UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA VIAL

Análisis comparativo entre mezclas asfálticas convencionales y Mezclas Bituminosas Stone Mastic Asphalt (SMA), elaboradas con materiales de la provincia de Loja

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTOR: Bustamante Rivera, Esner Fidel, Ing.

DIRECTOR: Zúñiga Suárez, Alonso Rodrigo, Mgtr.

LOJA – ECUADOR

2017

Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es

Septiembre, 2017

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Magíster Ingeniero
Alonso Rodrigo Zúñiga Suárez
DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación, denominado: **Análisis comparativo entre mezclas asfálticas convencionales y Mezclas Bituminosas Stone Mastic Asphalt (SMA), elaboradas con materiales de la provincia de Loja**, realizado por Ing. Esner Fidel Bustamante Rivera ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, julio de 2017

f) ……..……

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Bustamante Rivera Esner Fidel** declaro ser autor del presente trabajo de titulación: Análisis comparativo entre mezclas asfálticas convencionales y Mezclas Bituminosas Stone Mastic Asphalt (SMA), elaboradas con materiales de la provincia de Loja, de la Titulación Maestría en Ingeniería Vial, siendo Mgtr. Ing. Alonso Rodrigo Zúñiga Suárez, director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, concepto, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f..……..……

Autor: Bustamante Rivera Esner Fidel, Ing.

Cédula: 1102615158

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres quienes gracias a su esfuerzo supieron inculcar en mí el espíritu emprendedor a través de la educación. A todos los catedráticos de la maestría que impartieron sus conocimientos, en especial a Mgtr. Ing. Alonso Rodrigo Zúñiga Suarez, Mgtr. Ing. Ángel Guillermo Tapia Chávez y Mgtr. Ing. Carmen Esparza Villalba por su apoyo incondicional en la revisión de este Trabajo de Titulación.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a la Santísima Virgen de El Cisne por darme la oportunidad de actualizar mis conocimientos en las aulas de mi querida UTPL; a mi esposa Mercy Yolanda Moncayo Flores, a mis hijos José Fernando, Esner Alexander y Kevin Joel quienes con su apoyo y comprensión ayudaron para que mi objetivo profesional se haga realidad.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido

CARÁTULA i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS iii
DEDICATORIA iv
AGRADECIMIENTO v
ÍNDICE DE CONTENIDOS vi
LISTA DE TABLAS viii
RESUMEN 1
ABSTRACT 2
INTRODUCCIÓN 3
Identificación del problema 3
Justificación 4
Hipótesis de la investigación 4
Objetivos 4
General: 4
Específicos: 5
Metodología 5
CAPÍTULO 1 7
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE 7
1.1 Mezclas bituminosas SMA. 8
1.1.1 Origen. 8
1.1.2 Características generales. 10
1.1.3 Propiedades. 15
1.1.4 Ventajas de utilización de mezclas SMA. 17
1.1.5 Desventajas de uso de mezclas SMA. 17
1.1.6 Campos de aplicación. 17
1.1.7 Componentes de las mezclas SMA. 18
1.1.8 Selección del aditivo estabilizante para el trabajo de titulación. 22
1.1.9 Pasos para el diseño de mezclas SMA. 23
1.2 Elaboración de la mezcla. 23
1.3 Control de calidad en la planta y en la ejecución. 23
1.4 Control de calidad de la mezcla producida. 24
1.5 Transporte, extendido y compactación. 24
1.6 Fatiga de una mezcla bituminosa. 25
CAPÍTULO 2 26
ENSAYOS DE RESISTENCIA PARA EVALUAR LAS PROPIEDADES DE DURABILIDAD Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS 26
2.1 ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ASTM d 4123 AASHTO T 283). 27
2.2 Ensayo de estabilidad y flujo Marshall (ASTM D6927-06). 31
2.3 Ensayo a compresión Edométrica. 33
2.4 Ensayo de resistencia al deslizamiento con péndulo británico. 34
2.5 Ensayo gravedad específica bulk de mezclas compactadas (ASTM D1188-96). 35
2.6 Ensayo RICE (Densidad teórica máxima (ASTM D204-3). 36
CAPÍTULO 3 38
TRABAJO EXPERIMENTAL DE ENSAYOS 38
3.1 Trabajo experimental. 39

3.2 Caracterización de los materiales usados en las mezclas asfálticas. 40
3.3 Diseño de la mezcla asfáltica en caliente convencional. 41
3.4 Temperatura de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica. 45
3.5 Diseño de mezcla asfáltica bituminosa SMA 11. 47
3.6 Diseño de mezcla asfáltica bituminosa SMA 16. 50
3.7 Elaboración de briquetas método Marshall para mezclas en caliente convencional y mezclas Stone Mastic Asphalt SMA 11 y SMA 16. 51
3.7.1 Elaboración de briquetas para mezcla en caliente. 52
3.7.2 Elaboración de briquetas SMA 11 y SMA 16. 56
CAPITULO 4 63
DATOS OBTENIDOS EN LABORATORIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 63
4.1 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ASTM D4123). 64
4.2 Ensayo de estabilidad y flujo Marshall (ASTM D6927-06). 65
4.3 Ensayo a Compresión Edométrica. 66
4.4 Ensayo Resistencia al Deslizamiento (NLT-175/88). 67
4.5 Ensayo Gravedad Específica Bulk de Mezclas Compactadas (ASTM D1188). 68
4.6 Ensayo Gravedad Específica Máxima RICE (ASTM D2041). 68
CONCLUSIONES 69
RECOMENDACIONES 70
BIBLIOGRAFÍA 71
ANEXOS 74
ANEXO 1: 75
ANEXO 2: 84
ANEXO 3: 86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Principales diferencias de mezclas SMA y mezclas bituminosas 12
Tabla 2: Requisitos para cementos asfálticos clasificados por viscosidad 19
Tabla 3: Criterio para evaluar los valores de fricción en la superficie del pavimento 35
Tabla 4: Caracterización de los materiales de la mina Catamayito 40
Tabla 5: Análisis comparativo de resultados con especificaciones MOP 41
Tabla 6: Tabla 405-5.1. MOP-001-F-2002 41
Tabla 7: Tabla 405-5.2. MOP-001-F-2002 42
Tabla 8: Ensayos realizados al cemento asfáltico AC-20 43
Tabla 9: Porcentaje (%) de agregados para obtener la Mezcla faja caliente de ¾” 44
Tabla 10: Porcentaje de diseño para Mezcla asfáltica en caliente 45
Tabla 11: Husos granulométricos. Cernido acumulado (% en masa) 47
Tabla 12: Porcentaje (%) de agregados para obtener la Mezcla faja SMA 11 49
Tabla 13: Porcentaje de diseño para Mezcla asfáltica SMA 11 50
Tabla 14: Husos granulométricos. Cernido acumulado (% en masa) 50
Tabla 15: Porcentaje de diseño para Mezcla asfáltica SMA 16 51
Tabla 16: Resultados de Mezcla asfáltica en caliente con porcentaje de asfalto óptimo de 5.75% 53
Tabla 17: Diseño de mezclas asfálticas para obtener el % óptimo de la mezcla convencional 54
Tabla 18: Porcentaje de materiales para diseño de Mezcla SMA 11 56
Tabla 19: Porcentaje de materiales para diseño de Mezcla SMA 16 57
Tabla 20: Requisitos de calidad de la fibra celulosa 57
Tabla 21: Resultados de Mezcla asfáltica SMA 11 con porcentaje de asfalto óptimo de 6.0 % 58
Tabla 22: Resultados de Mezcla asfáltica SMA 16 con porcentaje de asfalto óptimo de 6.0 % 58
Tabla 23: Diseño de mezclas asfálticas para obtener el % óptimo de la mezcla SMA 11 59
Tabla 24: Diseño de mezclas asfálticas para obtener el % óptimo de la mezcla SMA 16 61
Tabla 25: Datos ensayo a la resistencia a la rotura por tracción indirecta 64
Tabla 26: Resultados del Ensayo de Estabilidad y flujo Marshall 65
Tabla 27: Resultados de Módulo dinámico en mezclas convencionales y SMA 66
Tabla 28: Resultados del coeficiente de resistencia al deslizamiento 67
Tabla 29: Resultados del ensayo Gravedad específica Bulk 68
Tabla 30: Resultados del ensayo Gravedad específica máxima RICE 68

LISTA DE GRÁFICOS

Ilustración 1: Estructura de una mezcla Bituminosa SMA 11
Ilustración 2: Estructura de una mezcla bituminosa convencional 11
Ilustración 3: Composición detallada de una mezcla bituminosa SMA..... 11
Ilustración 4: (a) Configuración de la carga; y (b) rotura del ensayo de tracción indirecta. 27
Ilustración 5: Ensayo de Tracción Indirecta en falla. 28
Ilustración 6: Curva carga-deformación resultante del ensayo de tracción indirecta. 29
Ilustración 7: Mordaza para estabilidad y flujo Marshall 31
Ilustración 8: Equipo estabilidad y flujo Marshall 32
Ilustración 9: Viscosímetro rotatorio Brookfield (DV3T) 43
Ilustración 10: Temperaturas de mezclado y compactación 45
Ilustración 11: Nomograma de Heukelom para determinar las temperaturas óptimas de mezclado y compactación en el diseño de mezclas asfálticas en caliente 46
Ilustración 12: Carta de viscosidad (Garnica et al., 2003) 47
Ilustración 13: Obtención de Áridos..... 51
Ilustración 14: Briquetas de mezcla asfáltica con % óptimo 53
Ilustración 15: Briquetas SMA 11 y SMA 16 con porcentaje de asfalto de 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 y 7% 56
Ilustración 16: Colocación de la fibra celulósica de yute a la mezcla SMA 57
Ilustración 17: Briquetas SMA 11 y SMA 16 con asfalto óptimo 58
Ilustración 18: Equipo multiuso (CBR) utilizado para ensayo a Compresión Edométrica..... 66
Ilustración 19: Equipo Péndulo Británico 67

RESUMEN

Las carreteras de Ecuador se construyen con mezclas asfálticas convencionales diseñadas con el método Marshall, normalizadas en las especificaciones generales MOP-001-F-2002. Actualmente existen otros métodos de diseño, por eso vale preguntarse: ¿Porque la durabilidad no cumple con el período de diseño? ¿Cumplen los parámetros de calidad? ¿Porque se invierten muchos recursos en mantenimiento?

El propósito es adaptar otro método de diseño utilizando materiales de la mina Catamayito que cumplan con las normas MOP. Basado en la norma UNE EN 13108-5 desde 1960, las mezclas Stone Mastic Asphalt SMA se utilizan para proporcionar una mayor durabilidad; constituyen un excelente esqueleto mineral basándose en su alto contenido de ligante, una alta proporción de filler y adición de fibras celulósicas; resisten más a las deformaciones plásticas, proporcionan mayor seguridad porque presentan una textura que permite una mayor adherencia en el contacto neumático-pavimento.

Las briquetas elaboradas se someten a ensayos de laboratorio para evaluar sus propiedades de durabilidad y resistencia; con los resultados obtenidos se concluye que las mezclas SMA son una solución eficaz para resolver los problemas que presentan los asfaltos convencionales.

PALABRAS CLAVES: Agregados, SMA, Stone Mastic Asphalt, fibras de celulosa de yute.

ABSTRACT

The roads of Ecuador are constructed with conventional asphalt mixtures designed with the Marshall method, standardized in the general specifications MOP-001-F-2002. Currently there are other methods of design, that´s why it's worth asking: Why durability does not meet the design period? Do they meet the quality parameters? Why are many resources invested in maintenance?

The purpose is to adapt another design method using materials from the Catamayito mine that comply with MOP standards. Based on standard UNE EN 13108-5 since 1960, Stone Mastic Asphalt SMA blends are used to provide greater durability; constitute an excellent mineral skeleton based on its high binder content, a high proportion of filler and addition of cellulosic fibers; more resistant to plastic deformations, provide greater safety because they have a texture that allows a greater adhesion in the pneumatic-pavement contact.

The elaborated briquettes are subjected to laboratory tests to evaluate their properties of durability and resistance; with the results obtained it is concluded that the SMA mixtures are an effective solution to solve the problems presented by conventional asphalts.

KEY WORDS: Aggregates, SMA, Stone Mastic Asphalt, jute cellulose fibers.

INTRODUCCIÓN

La carpeta asfáltica en caliente colocada en la red vial estatal del Ecuador es diseñada con el método Marshall. Estas mezclas no cumplen con la durabilidad para el tiempo que fueron diseñadas, es por esta razón que se invierte muchos recursos en mantenimiento. En esta investigación se demostrará que con el uso de las mezclas SMA se va a mejorar la calidad y desempeño de los asfaltos para así disminuir el excesivo costo del mantenimiento de las vías. Para evitar este gasto es necesario mejorar su calidad y una de las posibles opciones es utilizar la mezcla asfáltica bituminosa en caliente Stone Mastic Asphalt (SMA); éstas son diseñadas bajo la normativa UNE EN 13108-5 y apenas son utilizadas en España, pero se usan por todo el mundo (Costa, Loma, Hidalgo, Pérez, & Botella Nieto, 2014).

Este trabajo investigativo está dirigido a profesionales de la Ingeniería Civil que trabajan en instituciones públicas o en el campo privado y a profesionales que trabajan en empresas contratistas dedicadas a la construcción de carreteras.

En el capítulo uno de la investigación se desarrolla el marco teórico y el estado del arte de las mezclas SMA en base a normativas internacionales. En el capítulo dos se explican los ensayos a aplicar a las briquetas con la finalidad de evaluar las propiedades de durabilidad y características físicas de las mezclas asfálticas. En el capítulo tres se realiza el trabajo experimental basado en ensayos aplicados a las mezclas asfálticas. En el capítulo cuatro se tabulan los datos obtenidos en el laboratorio y se realiza un análisis de los resultados. El capítulo cinco contiene las conclusiones y recomendaciones. También existe un capítulo de anexos en donde se encuentra la caracterización de los materiales de la mina Catamayito y los resultados de las mezclas de estudio.

Identificación del problema

Por falta de durabilidad-resistencia de la carpeta asfáltica y para mantener un buen nivel de servicio de las vías, el Estado Ecuatoriano invierte cada año muchos recursos en el mantenimiento de las carreteras.

Se estima que el 40% del deterioro de un pavimento sucede al 75% de la vida útil y desde aquí es muy progresivo (BURGOS, 2014).

Justificación

Las mezclas SMA permiten aumentar la vida útil de las capas de rodadura, contribuyendo a la reducción de costos en el ciclo de vida de la estructura de la vía (Lanchas & Núñez, 2013).

La investigación se basará en comparar mediante ensayos de laboratorio quien presenta mejores condiciones de durabilidad-desempeño entre las mezclas convencionales y las SMA.

Se espera determinar que las mezclas bituminosas SMA van a ser más convenientes que las mezclas convencionales, implicando un beneficio en la durabilidad y calidad.

El propósito de aplicar el diseño de mezclas asfálticas SMA es la de presentar una nueva alternativa tecnológica para la construcción de carpetas asfálticas, lo que permitirá innovar nuevas prácticas constructivas en nuestro país. En el diseño de estas mezclas se utilizará fibras celulósicas de yute que fácilmente encontramos en nuestro país.

La durabilidad de las mezclas SMA es la característica principal, consideración que ha traspasado las fronteras de Europa, razón por lo que se ha normalizado en otros países como Australia, Asia y América, adaptándose a los requisitos y condiciones de cada país, sin variar la idea original en cuanto a la estructura y composición de las mezclas (Lanchas, 2012).

En base a lo explicado se justifica la necesidad de elaborar mezclas SMA con materiales de la mina Catamayito con la finalidad de analizar la durabilidad de las mezclas; con los resultados obtenidos se determinará la conveniencia de su utilización en las carreteras del Ecuador.

Hipótesis de la investigación

Con el diseño de las mezclas asfálticas bituminosas SMA, utilizando materiales de la mina Catamayito, se obtendrá mayor resistencia y durabilidad que las mezclas convencionales.

Objetivos

General:

Comparar las características de resistencia y durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente con las Mezclas Bituminosas SMA, utilizando los materiales de la mina Catamayito.

Específicos:

- Estudiar el diseño de mezclas bituminosas SMA y aplicarlo en laboratorio utilizando materiales de la mina Catamayito más la incorporación de fibras celulósicas de yute.
- Análisis de resistencia y durabilidad de la mezcla asfáltica bituminosa SMA para comparar con las características de las mezclas convencionales.

Metodología

En este trabajo de titulación se utiliza la investigación científica desde un enfoque cuantitativo, realizando ensayos normalizados para el diseño de mezclas asfálticas convencionales que son aplicados en el Ecuador.

Se empezará realizando una revisión bibliográfica del estado actual de desarrollo del diseño de las mezclas bituminosas SMA utilizando las normas internacionales lo que permitirá establecer el punto de partida para el proyecto de investigación que se está planteando; posteriormente se diseñará las mezclas SMA con los materiales de la mina Catamayito.

Según el tamaño máximo nominal del árido se ha definido tres tipos de mezclas SMA convencionales: SMA 8, SMA 11 y SMA 16 (Costa et al., 2014). En el presente trabajo se aplicará las curvas granulométricas correspondientes a mezclas SMA 16 y SMA 11. La primera se puede aplicar como capa intermedia o base y también como capa de rodadura; y, la segunda como capa de rodadura (Sánchez, 2013).

Se propone realizar el presente trabajo investigativo utilizando las siguientes fases:

1. Estudiar el diseño de las mezclas SMA, para luego aplicar el método en el laboratorio con materiales de la mina Catamayito más la incorporación de fibras celulósicas de yute.
   - Estudio de diseño y fundamentos de las mezclas SMA basado en normas internacionales. Las mezclas SMA se las realizará en base a la Norma Europea UNE EN 13108-5. La caracterización de materiales se realizará utilizando las normas AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), ASTM (American Society for Testing Materials). Para la preparación de la celulosa se aplicará un secado, liberación de contenido orgánico, disminución de humedad y trituración hasta lograr tamaños similares a su equivalente industrializado, basados en la Norma ISO-2470 (International Organization for Standardization).

- Recolección de materiales de tamaño pasante de ¾ pulg, ½ pulg, arena triturada, arena lavada y filler de la mina Catamayito; y, adquisición de la fibra celulósica de yute.
- Realización de la mezcla asfáltica en caliente utilizando el método Marshall, con porcentajes de asfalto de 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 y 6.5%. Se realizará 3 briquetas elaboradas para cada contenido del porcentaje de asfalto, de ellas se definirá el contenido óptimo de asfalto, cumpliendo los requerimientos de estabilidad, flujo, contenido de vacíos y demás requisitos de la norma (ASTM, 1993).
- Elaboración en el laboratorio de las mezclas asfálticas bituminosas SMA 11 y SMA 16 con los materiales de la mina Catamayito y la utilización del 0.3% de fibra celulósica (Prowell & Hurley, 2010), para este trabajo se utilizará fibras de yute. Cada tipo de mezcla se realizará con porcentajes de asfalto de 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 y 7%. Se realizarán 3 briquetas para cada contenido de asfalto, así se definirá el contenido óptimo.
- Con el contenido óptimo de asfalto, se procederá a elaborar briquetas para realizar los ensayos y cuatro briquetas de 20x20 cm para cada tipo mezcla con el propósito de realizar el ensayo de resistencia al deslizamiento con el péndulo del Transport and Road Research Laboratory (TRRL) (Norma-NLT-175/88, n.d.).

2. Análisis de resistencia y durabilidad de la mezcla asfáltica bituminosa SMA para comparar con las características de la mezcla asfáltica convencional.
   - Realización de ensayos en el laboratorio para evaluar las propiedades que determinen la durabilidad y las características físicas de las mezclas asfálticas en caliente y de las mezclas SMA11 y SMA 16:
     - Ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ASTM D4123)
     - Ensayo de estabilidad y flujo Marshall (ASTM D6927-06)
     - Ensayo a Compresión Edométrica
     - Ensayo de Resistencia al Deslizamiento (NTL-175/88)
     - Ensayo Gravedad específica Bulk de mezclas compactadas (ASTM D1188)
     - Ensayo Gravedad específica máxima RICE (ASTM D2041)
3. Analizar de resultados entre las mezclas en caliente convencionales y las mezclas bituminosas SMA.
   - Tabulación de los resultados de laboratorio. Tomando en cuenta la durabilidad y desempeño se comparará los datos de las mezclas bituminosas SMA11 o SMA16 con los resultados de la mezcla asfáltica en caliente.
   - Con los resultados obtenidos se recomendará la utilización del tipo de mezcla más conveniente para la utilización en las vías de la Red Vial Estatal.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

1.1 Mezclas bituminosas SMA.

1.1.1 Origen.

Los agregados ligados con asfalto se utilizan convencionalmente en todo el mundo tanto en la construcción como en el mantenimiento de pavimentos flexibles. Los agregados gradados, uniformes o densos ligados con asfalto, si se diseñan y se ejecutan correctamente funcionan normalmente bien en carreteras muy traficadas, es por eso que son muy comunes en la construcción de pavimentos. Sin embargo, no siempre es posible disponer de agregados gradados, uniformes o densos disponibles en el sitio de construcción. En tales circunstancias, se puede realizar una mezcla bituminosa denominada Stone Mastic Asphalt (SMA) que consiste básicamente en agregados gradados de intervalo. (Suchismita, 2009)

Los primeros ensayos para obtener una mezcla SMA para pavimentos asfálticos se realizaron en Alemania, en 1968. El propósito de los investigadores era obtener un pavimento con la mayor resistencia al desgaste y que tengan un alto desempeño en las carreteras de Europa. La mezcla SMA fue desarrollada por la empresa de pavimentos Strabag, en conjunto con J. Rettenmaier & Söhne (líder mundial en tecnología de fibras). Tras la prohibición de utilizar neumáticos de clavos en las carreteras, se demostró que con el uso de las mezclas SMA se obtenían pavimentos de altísima durabilidad y de excelente resistencia al desgaste, lo que determinó que en 1984 se normalice a las mezclas SMA en Alemania. Posteriormente se utilizó en otros países de Europa, Estados Unidos, Asia Pacífico y en el Reino Unido. Con el uso de las mezclas bituminosas SMA se dio solución a los problemas de deformación permanente producto de los veranos muy calurosos. (Kong & Zelanda, 2016). Las mezclas SMA se utilizan en los Estados Unidos desde el año de 1991. (E Ray Brown, Mallick, Haddock, & Bukowski, 1997).

En el año de 1993, Brown y Manglorkar determinaron que las cargas de tráfico en las mezclas SMA son transportadas en las partículas de agregado grueso y no en el agregado fino de mortero-asfalto. La mezcla es más duradera con un mayor contenido de ligante. (Suchismita, 2009)

Actualmente, se ha detectado que sobre los pavimentos asfálticos convencionales se provoca la presencia de un mayor número de deformaciones permanentes, esto se debe al incremento de las cargas por eje, al incremento de la presión de los neumáticos y por la disminución del área de contacto. Debido a esto, en 1990 la American Association of State Higway and

Trasportation Officials AASHTO y la European Asphalt Study Tour de los Estados Unidos recomendaron que para vías de tráfico pesado se emplee las mezclas Stone Mastic Asphalt. Últimamente, por su mayor durabilidad hay mucho interés de usar las mezclas SMA en aeropuertos.(Lanchas, 2012)

Para un total de 100 pavimentos localizados en 19 estados de los Estados Unidos, después de 15 años se realizaron evaluaciones a mezclas SMA que fueron construidas entre los años 1991 y 1996, como resultado se observó que los SMA son: más resistentes a la rodadura, presentan una menor propagación de fisuras, el comportamiento a la fatiga arrojó una mejora en torno a 3-5 veces y los valores de deslizamiento tuvieron un mejor comportamiento frente a las mezclas convencionales. (Haddock & Lynn, 1997). También en el año de 1997 estos pavimentos fueron evaluados por Brown, analizando en la superficie la existencia de defectos por roderas, grietas, desmoronamientos y exudaciones; él concluyó que en el 90% de los proyectos evaluados, las mezclas SMA son más resistentes a la rodadura entre un 30 y un 40% que las mezclas convencionales. En lo concerniente al defecto por roderas determinó que presentaban una altura menor de 4 mm. (Lanchas, 2012)

En el año 2000 se empezó a utilizar las mezclas SMA en Argentina, en la repavimentación de la Autopista Ricchieri, para su elaboración se usó ligante asfáltico modificado con un polímero SBS, fibra de celulosa y relleno mineral de origen calcáreo. (Laura et al., 2005)

Entre enero de 2010 y junio de 2013, varias empresas españolas en colaboración con centros de investigación y universidades de España desarrollaron un proyecto de investigación sobre las mezclas SMA cuyo principal objetivo general es el desarrollo de nuevas mezclas SMA con las que se consigan mejoras, tanto en sus propiedades como en su comportamiento medioambiental con la finalidad de aumentar la durabilidad, disminuir el impacto sonoro producido por el ruido de rodadura, reducir la emisión de gases de efecto invernadero y reducir el consumo de energía fabricando mezclas SMA a temperaturas inferiores que las convencionales. Como conclusión de ésta investigación se determinó un porcentaje óptimo de ligante alrededor del 6%, se determinó que las mezclas SMA tienen mayor durabilidad que las mezclas convencionales y que los valores globales de nivel sonoro de rodadura medido en proximidad, L_{CPtr} dB(A), para las mezclas SMA11 y SMA16 son aceptables para la reducción del ruido producto del tráfico vehicular. (Costa et al., 2014).

Al tomar como base la experiencia de otros países que han aplicado las mezclas SMA, se concluye que:

- La mezcla SMA sometida a un tráfico pesado tiene un excelente desempeño a largo plazo, principalmente debido a su alta resistencia a la deformación permanente.
- Se debe tener mucho cuidado con la cantidad y calidad de los agregados.
- Se reduce el envejecimiento y agrietamiento con un alto contenido de ligante asfáltico dándole una larga vida útil a la carpeta asfáltica.
- Se recomienda como aditivo estabilizador el uso de fibras de celulosa para obtener una excelente homogeneidad de la mezcla y así evitar la segregación y drenaje del ligante asfáltico.
- La mezcla SMA debe ser colocada y compactada a temperaturas mayores a las mezclas convencionales ya que con temperaturas menores el entrelazado de partículas se rigidiza en exceso. (Zúñiga & Aguila, 2012).

1.1.2 Características generales.

Las mezclas bituminosas SMA son de tipo discontinuo, están conformadas por un alto contenido de áridos gruesos que componen un esqueleto pétreo de estructura controlada. El asfalto de alta viscosidad llenan los huecos existentes en dicha matriz estructural. Es necesario destacar que el contenido mínimo de árido grueso presente en este tipo de mezclas es del 70% ya que esto garantiza un perfecto contacto entre partículas en el extendido y compactación. Para dotarle a la mezcla un elevado grado de rigidez y para aumentar la viscosidad del ligante es necesario añadir una fracción de árido fino o arena triturada. Habitualmente a estas mezclas se les añade un pequeño porcentaje de fibras de celulosa para conferir una mayor estabilidad y así evitar la segregación en el momento que se transporte, coloque y se compacte. (Gallart, 2011)

La característica principal de una mezcla asfáltica discontinua es que tienen una granulometría en la que predominan las partículas gruesas, carecen de partículas de tamaño intermedio y tienen partículas finas que llenan los espacios dejados por las gruesas. Este tipo de composición produce un contacto partícula a partícula de los materiales gruesos, lo que es conveniente para la reducción de deformaciones permanentes. (Segovia, 2014).

En las ilustraciones 1 y 2 se representa a las mezclas SMA y a las mezclas convencionales.

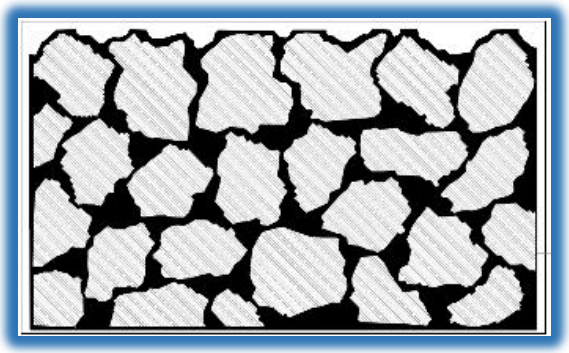


Ilustración 1: Estructura de una mezcla Bituminosa SMA
Fuente: Evaluación en laboratorio de la durabilidad de mezclas bituminosas tipo SMA
Elaborado por: Autor

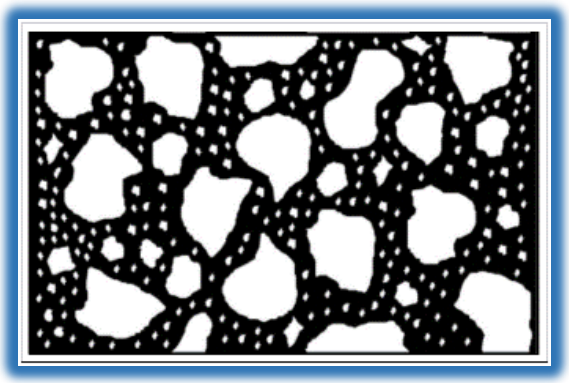


Ilustración 2: Estructura de una mezcla bituminosa convencional
Fuente: Evaluación en laboratorio de la durabilidad de mezclas bituminosas tipo SMA
Elaborado por: Autor

La estructura y composición de una mezcla asfáltica bituminosa Stone Mastic Asphalt SMA se la observa en la ilustración 3:

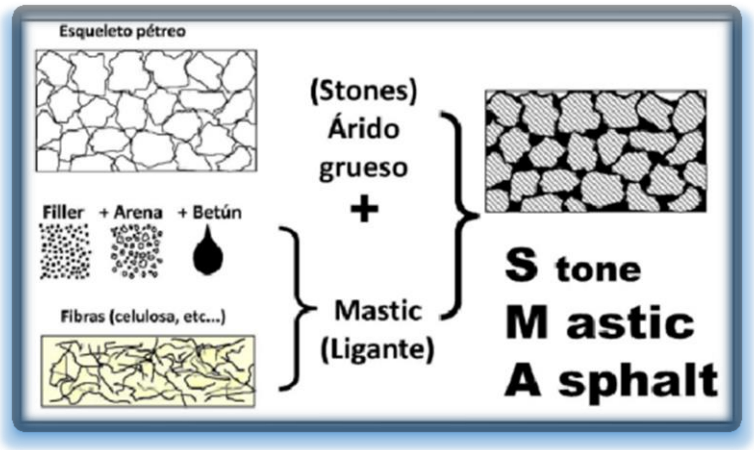


Ilustración 3: Composición detallada de una mezcla bituminosa SMA
Fuente: Evaluación en laboratorio de la durabilidad de mezclas bituminosas tipo SMA
Elaborado por: Autor

A diferencia de las mezclas asfálticas en caliente (HMA), las mezclas bituminosas SMA se caracterizan por el contacto de piedra sobre piedra. Su fuerza se deriva principalmente del esqueleto piedra sobre piedra desarrollado en la mezcla. (E. R. Brown & Mallick, 1995).

En la Tabla 1 constan las diferencias entre un SMA y una mezcla bituminosa normal (BC)

Tabla 1: Principales diferencias de mezclas SMA y mezclas bituminosas

Propiedades	SMA	BC (Mezcla bituminosa)
Definición	SMA es una mezcla discontinua que consiste de agregado grueso de alta calidad firmemente unidos entre si por una fuerte matriz de asfalto que consiste en agregado fino, filler, betún y aditivos estabilizantes	Mezcla bituminosa se compone de agregados gruesos y finos bien gradados, filler y betun
Figura de la muestra		
Contenido de la masa de agregado grueso, (%)	75 - 80	50 - 60
Masa de agregado fino (%)	20 - 25	40 - 50
Masa de contenido de filler (%)	9 - 13	6 - 10
Tipo de Aglutinante	60/70, PMB- 40	60/70, 80/100 y aglutinante modificado
Contenido de aglutinante mínimo por peso de la mezcla	>6.5	5 - 6
Aditivos estabilizantes por peso de mezcla	0.3 - 0.5	-------
Vacíos de aire (%)	3 - 4	3 - 6
Grosor de la capa, mm	25 - 75	30 - 65

Fuente Stone Mastic Asphalt (SMA) – A Long Life Pavement Surface. (Bose, et al., 2006)
Elaborado por: Autor

El rango de los valores en porcentajes de los componentes de una mezcla Stone Mastic Asphalt, son:

- Árido Grueso 70-80% en peso
- Filler 8-12% en peso
- Ligante bituminoso 6-7%
- Fibras 0.3%
- La restante parte porcentual es el árido de granulometría intermedia. (Suchismita, 2009)

El betún en esta mezcla discontinua es estabilizado durante el proceso de mezcla, el almacenaje intermedio, el transporte, la colocación y la compactación a través de la adición de fibras. Las mezclas Stone Mastic Asphalt es reconocido por su:

* Alta estabilidad a la deformación.
* Durabilidad
* Impermeabilidad
* Trabajabilidad
* Flexibilidad
* Resistencia a la fatiga y al envejecimiento.
* Drenaje lateral del agua.
* Resistencia al deslizamiento.
* Reducción del ruido. (E-ASPHALT, 2014).

La estabilidad de una mezcla es la capacidad para soportar las cargas y resistir las tensiones a las que está sometida bajo cargas de tránsito con unos valores de deformaciones tolerables. La estabilidad responde a una combinación del rozamiento interno y de la cohesión de los materiales que conforman la mezcla. La estabilidad se mide respecto del porcentaje de asfalto; es así, que la mezcla se hace más estable cuando tiene mayor porcentaje de asfalto hasta determinado límite luego la estabilidad de la mezcla disminuye.

La **Durabilidad** se relaciona a la capacidad del agregado a la desintegración, cómo reacciona el asfalto con el medio y a evitar que el asfalto se desprenda del agregado. Los agregados no sólo deben cumplir con las especificaciones granulométricas, sino con la calidad. Las presiones que soportan las aristas de los agregados son altas, es por esto que deben ser duros y resistentes. Los agregados deben se hidrofóbicos, esto es importante para que no exista desprendimiento de la película del asfalto en los agregados (riesgo de peladuras). La durabilidad de la mezcla depende de la película del asfalto, si es gruesa se tendrá menor porcentaje de vacíos de aire, esto retarda la oxidación que sufre el asfalto al encontrarse en contacto con el oxígeno. Si la película de asfalto es delgada, éste se oxidará rápidamente.

La **impermeabilidad** se cumple cuando la mezcla tiene la capacidad de evitar el paso de aire y del agua.

La **trabajabilidad** de la mezcla es la facilidad con que la mezcla se coloca y compacta.

Una mezcla es **flexible** cuando resiste a las deformaciones sin agrietarse. Con los años de servicio que tenga una vía, el terreno de fundación se asentará, lo cual se refleja en la superficie, es por esto que la carpeta deberá acomodarse sin agrietarse.

Una carpeta se flexiona constantemente porque soporta continuamente la acción de cargas cíclicas, por tal razón, se manifiesta que una carpeta cumple con la **resistencia a la fatiga**, cuando resiste a esta flexión, esta característica está íntimamente relacionada al asfalto; por lo tanto, los asfaltos oxidados no son resistentes a la fatiga. Los agrietamientos por fatiga se reflejan en la superficie, se les denomina piel de cocodrilo; es decir, surgen en la fibra inferior de la carpeta asfáltica cuando trabaja a tracción.

La **resistencia al deslizamiento** de una mezcla se cumple cuando en la superficie de rodadura se reduce la posibilidad de que la llanta se deslice sobre ella, sobre todo en épocas de lluvia. Una carpeta que tiene partículas redondeadas es menos resistentes al deslizamiento que una carpeta formada por partículas duras y de textura rugosa.

El **drenaje lateral del agua** se cumple cuando se cuenta con un tipo de mezcla que en conjunto con las obras de drenaje evacuen de forma rápida el agua lluvia de las estructuras viales.

La **reducción del ruido** al tener contacto los neumáticos con el asfalto producto de la circulación de los vehículos representa un efecto positivo en el campo ambiental.

Las mezclas SMA han demostrado ser más rentables que las mezclas densas y gradadas para carreteras que tienen un alto volumen de tráfico. En 1996 Brown observó que algunos factores influyen en el desempeño de las mezclas asfálticas, tales como: cambios en el ligante, tipos de agregados, condiciones ambientales, métodos de producción y construcción, etc.; siendo necesario evaluar estos factores para determinar el desempeño a largo plazo de las mezclas SMA y para obtener información para realizar los cambios necesarios para adaptarlas a diferentes condiciones ambientales. (Suchismita, 2009)

Las fibras celulósicas actúan como enlaces que evitan la segregación del asfalto, al unirse entre agregados para formar un esqueleto autoportante.(Tashman & Pearson, 2012). El contenido de fibras celulósicas en peso total de la mezcla mínimo es 0.3% (Zúñiga & Aguila, 2012).

Convencionalmente en la elaboración de mezclas SMA se usan las fibras sintéticas, pero por tener un costo mayor se puede utilizar las fibras celulósicas de yute. Para determinar su conveniencia se realizaron ensayos en el laboratorio como la prueba de susceptibilidad a la humedad, la deformación acumulada, el módulo de fluencia y el módulo de rigidez. Los resultados de los ensayos indicaron que la fibra de yute natural puede reemplazar a las fibras sintéticas en las mezclas SMA. A una temperatura de 40°C y 50°C se observó una deformación acumulada ligeramente mayor y posteriormente un módulo de fluencia ligeramente menor en comparación con las fibras sintéticas. Se obtuvieron los mismos resultados en la prueba de rueda de Hamburgo ya que indicaron que la deformación permanente es la misma en ambas fibras. A temperaturas de 25°C y 35°C el módulo de rigidez de las mezclas SMA con fibra natural es ligeramente menor que con las fibras sintéticas. Para ambas mezclas la relación de resistencia a la tracción es superior a los límites prescritos. Además se determinó que el costo de construcción por tonelada de la mezcla SMA con fibra natural es comparativamente menor a las SMA con fibras sintéticas. (Paawan Kumar , P.K. Sikdar, 2011).

El yute es una fibra natural que se extrae de la corteza de la planta que lleva el mismo nombre. Este material natural es de sencilla producción y se le considera la segunda de las fibras vegetales más populares, sólo después del algodón. El yute es una fibra versátil, lo que le proporciona la característica fundamental de la posibilidad de usarse por separado o mezclada con diversas fibras o materiales. Éste es usado ampliamente en la industria del empaque y embalaje alternativo para transportar y proteger productos agrícolas (EL-Diario, 2015).

1.1.3 Propiedades.

Como ya se ha explicado las mezclas SMA es producto de la combinación de áridos, ligante y filler + fibras, que en adecuadas proporciones forman un esqueleto pétreo autoportante rodeado de un mastic altamente cohesivo. Es una mezcla estable, resistente a esfuerzos repetidos y al envejecimiento. Se ha comprobado que construyendo carreteras con mezclas

SMA en sustitución de las mezclas convencionales se obtiene hasta un 50% más de rendimiento y presentan un mejor servicio de calidad. (Kong & Zelanda, 2016).

Las mezclas SMA confieren a los pavimentos las siguientes propiedades y características:

- **Buena estabilidad a altas temperaturas:** Al tener un esqueleto autoportante de árido grueso de buena calidad, proporcionan un incremento de la fricción interna y de resistencia al corte, lo que les confiere una estabilidad extremadamente alta.
- **Buena flexibilidad a bajas temperaturas**: Al utilizar una mezcla rica en mortero con propiedades superiores a las mezclas convencionales de granulometría continua, se incrementa la resistencia contra la fisuración térmica.
- **Alta resistencia al desgaste:** La durabilidad es más elevada que las mezclas convencionales, por el bajo contenido de huecos la convierte a la mezcla en prácticamente impermeable, mejorando su resistencia al envejecimiento y disminuyendo los efectos de la humedad.
- **Elevada capacidad adhesiva entre los agregados y el bitumen:** Por el alto contenido de filler se agrega fibras de celulosa como estabilizador. Estas fibras permiten al betún mantener una elevada viscosidad, espesa la capa bituminosa y mejora la adherencia entre el betún y los áridos.
- **Una mezcla compacta que no tiende a separarse:** Esto se debe a la correcta y eficiente estabilización del mortero que evita su segregación de las partículas gruesas.
- **Buena resistencia al deslizamiento:** El empleo de áridos gruesos confieren un elevado nivel de resistencia al deslizamiento.
- **Durabilidad:** Las mezcla SMA prácticamente son impermeables, esto se debe al bajo contenido de aire en los huecos.
- **Alta adherencia entre áridos y betún:** Esta propiedad se obtiene debido a la presencia de altos contenidos de filler y de la presencia de las fibras celulósicas.
- **Reducción del agua planning:** Las mezclas SMA contribuyen a eliminar los reflejos nocturnos y favorece la percepción de las marcas viales, esto se lo obtiene porque la textura de la mezcla es más profunda.
- **Salpicado reducido:** Hay menos salpicado de agua, debido a que tienen mayor profundidad de la textura del pavimento.
- **Menos ruido de tráfico:** Se ha comprobado que en los pavimentos densos un aumento de la textura supone un aumento del nivel sonoro, mientras que las mezclas SMA, a igual textura, son más silenciosos debido a las propiedades de textura conseguidos.

1.1.4 Ventajas de utilización de mezclas SMA.

Las mezclas SMA tienen las siguientes ventajas:

- Tiene una superficie con textura, durable y resistente al ahuellamiento.
- El ruido generado es menor que las mezclas convencionales.
- La durabilidad de las mezclas SMA es igual o mayor que las mezclas convencionales.
- Las mezclas SMA al tener mayor durabilidad se reduce el mantenimiento, razón por lo que se reducen los costos.
- Incremento de la vida útil de la carpeta asfáltica SMA entre un rango del 20-30% en comparación con una carpeta convencional.
- La producción y compactación de una mezcla asfáltica se la puede realizar con los mismos equipos utilizados en una mezcla convencional.

1.1.5 Desventajas de uso de mezclas SMA.

Las posibles desventajas debido a la utilización de las mezclas asfálticas SMA son:

- Aumento del tiempo de mezcla y de la temperatura
- Que exista una posible segregación y escurrimiento del ligante durante el transporte y extendido de la mezcla
- Se necesita temperaturas altas para el almacenamiento y extendido de la mezcla
- La elaboración de la mezcla puede tener un mayor costo en comparación a las convencionales, producto del alto contenido de betún y de filler.

1.1.6 Campos de aplicación.

En la actualidad a las mezclas SMA se las emplean en carreteras que tienen una elevada intensidad de tráfico y en zonas industriales, así tenemos que son utilizadas en:

- Zona de tráfico pesado elevado - Autopistas
- Intersecciones y sitios semaforizados - Puertos
- Puentes - Viaductos
- Carriles y paradas de Bus - Zonas de carga y descarga
- Aeropuertos - Aparcamientos.

1.1.7 Componentes de las mezclas SMA.

Los componentes para este tipo de mezcla discontinua son: agregados de alta calidad (grava y arena), Asfalto, filler y fibra celulósica.

Agregados de la mezcla.

Los áridos que se utilizaran en la mezcla deben tener características granulométricas y de resistencia a la abrasión determinadas por las normas internacionales. Estos deben ser triturados, con superficie rugosa y no se considera adecuado ningún agregado con más del 10% de su superficie redondeada. Estos agregados presentan una mayor trabazón y mayor resistencia al cortante, caso contrario al de áridos redondeados que se deslizan una sobre otras. Con respecto a las mezclas convencionales utilizadas, la granulometría de los áridos de la mezcla SMA tiene una importante diferencia. En función del tipo de mezcla, el tamaño máximo varía desde los 4 mm hasta 22,4 mm, descrito en la norma UNE EN 13108-5. A nivel de granulometría para la mezclas SMA se desechan los tamaños superiores e inferiores del agregado. (Lanchas, 2012). Con la selección del tamaño de materiales nos implica desechar una gran cantidad de materiales, elevando alrededor del 20% los costos de producción en comparación con las mezclas convencionales, pero queda justificado este aumento de costo inicial ya que el nivel de intervención en el mantenimiento es menor y además se tiene un asfalto de una vida útil más larga. (Loma & Rubio, 2013)

Los áridos gruesos deben ser resistentes, duraderos y de forma cúbica (máximo 20% de agregado alargado o achatado). Las partículas tienen que ser el 100% con una o más caras fracturadas. La forma de los agregados debe ser de tipo angular para que puedan tener una buena adherencia con los demás materiales a combinarse. El árido fino se añade para aumentar la rigidez de la mezcla y la viscosidad del ligante, debe presentar por lo menos el 50% de partículas fracturadas y no se puede utilizar arena natural. (Paredes, 2009)

El ligante asfáltico.

El ligante asfáltico o Asfalto es, según la American Society for Testing and Materials (ASTM), un material consistente de color marrón oscuro o negro compuesto por una mezcla de productos bituminosos que pueden ser naturales o que se obtienen por refinación del petróleo. A temperatura ambiente el asfalto es sólido a semisólido y se vuelve líquido cuando la

temperatura se eleva, esa condición permite que durante la mezcla los agregados sean cubiertos completamente. Los asfaltos de acuerdo al grado de viscosidad se clasifican en: AC-5, AC-10, AC-20, AC-30, AC-40. En el presente trabajo de titulación se va a utilizar el asfalto AC-20. En la siguiente tabla se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfaltos:

Tabla 2: Requisitos para cementos asfálticos clasificados por viscosidad

PRUEBA	Grado de Viscosidad				
	AC- 5	AC- 10	AC- 20	AC- 30	AC- 40
Viscosidad, 60°C, poises	500±100	1000±200	2000±400	3000±600	4000±800
Viscosidad, 135°Cs- mínimo	175	250	300	350	400
Penetración, 25°C, 100g. 5s-mín.	140	80	60	50	40
Punto de llama, Cleveland, °C -mín.	177(350)	219(425)	232(450)	232(450)	232(450)
Solubilidad en Tricloroethileno, % mín.	99	99	99	99	99
Pruebas sobre el residuo del ensayo TFO: Pérdida por calentamiento, % máximo (opcional)	1	0.5	0.5	0.5	0.5
Viscosidad, 60°C, poises- máximo	200	4000	8000	12000	16000
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm-mínimo	100	75	50	40	25
Prueba de mancha (cuándo y cómo se especifique)	Negativa para todos los grados				
Solvente normal de nafta	Negativa para todos los grados				
Solvente de nafta-xileno, % xileno	Negativa para todos los grados				
Solvente de heptano-xileno, % xileno					

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Serie de manuales N° 22 (MS-22), Instituto del Asfalto
Elaborado por: Autor

Para estudiar las propiedades de las mezclas asfálticas SMA, los investigadores han utilizado diversos tipos de asfalto. Para evaluar este tipo de mezclas se utilizan asfaltos de grado de penetración tal como 60/70, asfaltos modificados y de calidad de funcionamiento Superpave. En 1994, Brown y Mallick usaron asfalto de grado de viscosidad AC-20. En las mezclas SMA, el asfalto proporciona durabilidad a la mezcla y actúa como agente aglutinante entre los agregados gruesos, finos y la fibra celulósica. Las características del asfalto que afecta al comportamiento de la mezcla asfáltica son: susceptibilidad a la temperatura, viscoelasticidad y envejecimiento. El comportamiento del asfalto depende tanto de la temperatura como del tiempo de carga. Es más rígido a menor temperatura y bajo un período de carga más corto. El asfalto debe ser tratado como un material viscoelástico ya que a la temperatura normal del pavimento presenta propiedades tanto viscosas como elásticas. Aunque a bajas temperaturas

se comporta como un material elástico y a altas temperaturas su comportamiento es como un fluido viscoso. El asfalto junto a las fibras celulósicas actúa como estabilizador. El asfalto contribuye a la resistencia a la deformación y el drenaje es menor. (Suchismita, 2009).

Se debe tomar en cuenta que al tratarse de una mezcla en la cual la temperatura será más elevada, (para mantener maleable a la mezcla), es muy importante que el ligante tenga alta tolerancia a las altas temperaturas.

En las mezclas SMA se suele poner un contenido mínimo de betún del 6%. A mayor contenido del betún mejora la durabilidad de la mezcla, así como su flexibilidad. Al tener grandes cantidades de betún es necesario el uso de fibras para reducir el riesgo de segregación y escurrimiento durante la fase de mezcla, almacenamiento, transporte, tendido y compactación.

Filler

Se puede definir que el filler es un material inerte finamente dividido que pasa por la malla N°. 200 y su función es la de fortalecer a la mezcla asfáltica. Si se coloca un alto contenido de filler a las mezclas SMA produciría un excesivo endurecimiento de la misma, ocasionando la presencia de grietas de tamaño considerable. Para tener una rigidez adecuada del mastic en las mezclas SMA, la relación filler/asfalto debe ser 1.5.

La utilización del filler tiene como objetivo la de mejorar la unión entre las partículas de los áridos. En las mezclas SMA se puede utilizar como filler: polvo de roca, polvo de escorias, cal hidratada, cemento hidráulico, cenizas volantes y granos de tamaño inferior a los 75 micrones.

En las mezclas asfálticas se incluye el filler con el fin de generar mayor estabilidad y resistencia después de la compactación. (Salgado & Momm, 2009)

Fibras celulósicas

El principal objetivo de su utilización en las mezclas SMA es el de aumentar la estabilidad y disminuir el escurrimiento. Se usan fibras o polímeros como estabilizador para asegurar la masilla a intervalos de la estructura y así detener el drenaje durante el almacenamiento, transporte y extendido de la mezcla SMA. En el drenaje se toma en cuenta los finos y asfalto

ya que se separan de la muestra como un todo y fluye hacia abajo a través de la mezcla. La verificación del drenaje es muy importante en la mezclas SMA. (Narwal, 2016)

Las fibras de celulosa son fisiológicamente y toxicológicamente seguras. Se requiere una cantidad muy pequeña de fibra celulósica, aproximadamente 0.3% para estabilizar la mezcla.

En Europa y América del Norte comúnmente se utiliza la fibras de celulosa o minerales, en el caso europeo es el 0.3% en peso total de la mezcla y el 0.3 – 0.4% en el norteamericano. Desde un punto de vista funcional, la ventaja que presentan las fibras de celulosa en comparación con las fibras de minerales es que no son ofensivas a la salud y son producidas a partir de fuentes renovables. (Colares, Barbosa, & Dal, 2007)

El uso de fibras de celulosa no modifican químicamente al asfalto pero si intervienen en las propiedades físicas, haciendo que se pueda incrementar el contenido del mismo. La utilización de las fibras celulósicas hace que la mezcla se espese, evitando que el ligante drene de la mezcla antes de ser compactada. El contenido de fibra celulósica dependerá de las características de cada tipo de fibra, generalmente debe ser 0.3% en peso calculado sobre mezcla total (E-ASPHALT, 2014). Las fibras de celulosa es el aditivo más empleado en el mercado Alemán, es así que su implementación esta entre el 90-95%. (Gallart, 2011). Debido a que tiene secciones huecas, la fibra celulósica actúa como una esponja, permitiendo la absorción de líquidos tales como aceite. Es por ello que considerando aspectos técnicos y costos, la fibra celulosa es considerada la mejor fibra puesto que ha dado los mejores resultados en la práctica que otras fibras.

La inclusión de fibras celulósicas como estabilizante durante el proceso de mezcla tiene las siguientes ventajas:

- Se puede aumentar el contenido del aglutinante
- Aumento en un 30-40% del espesor de la película en el agregado
- Mayor estabilidad de la mezcla
- El entrelazado entre las fibras y los agregados es mejor
- Reducción de la posibilidad de drenaje durante el transporte y en el extendido de la mezcla. (Gite & Soyal, 2013)

1.1.8 Selección del aditivo estabilizante para el trabajo de titulación.

Las mezclas bituminosas SMA son mezclas discontinuas que tienen más contenido de aire y una concentración más alta de aglutinante, esto ocasiona la segregación en la fase de compactación, por esta razón se añaden aditivos estabilizantes para evitar el escurrimiento del asfalto. Con el propósito de resolver el problema de drenaje, muchos investigadores han probado con varias fibras tales como fibras de celulosa, fibras minerales, etc., varios polímeros, plásticos en forma de gránulos o polvo, materiales de desecho como fibra de alfombra, neumáticos, poliéster, fibras naturales. La elaboración de las mezclas SMA con fibras y polímeros con costosas y no están disponibles en el mercado. (Suchismita, 2009)

La fibra de yute contiene celulosa y su uso en las mezclas asfálticas bituminosas SMA van a evitar el drenaje del mortero aglutinante. Por esta razón es que en el presente trabajo de titulación se va a utilizar las fibras de yute, que es un material natural de bajo costo y se encuentra fácilmente en nuestro país.

La fibra natural de yute se la extrae de la corteza de la planta que lleva el mismo nombre. Sólo después del algodón es la segunda de las fibras vegetales más populares, es un material natural y su producción es muy sencilla. (EL-Diario, 2015).

Sirve para evitar que el asfalto se escurra y para mantenerlo en el sitio más adecuado para el trabajo que tiene que desarrollar dentro de la mezcla asfáltica SMA. Se establece como intervalo, valores máximos entre 0,3-1%. Este porcentaje ya ha sido investigado y es el óptimo para la fabricación de la mezcla bituminosa SMA, está en relación al peso unitario suelto de la mezcla. En ensayos de investigación realizados, todas las mezclas estabilizadas con fibras naturales muestran el valor máximo de la resistencia a la compresión con un contenido del 0.30%. (Bindu & Beena, 2015). En 1994 los investigadores Brown y Mallick determinaron que con un porcentaje del 0.3% de fibra de celulosa europea se producía el menor drenaje. (Myers, 2007)

Según AASHTO MP8-01, el contenido de fibra celulosa debe ser aproximadamente 0.3% del peso total de la mezcla y que sea suficiente para evitar escurrimiento del ligante. Como ejemplo, si una mezcla SMA tiene un peso unitario suelto de 1680 Kg/m3, y el diseño es de 0.30% de fibra de celulosa de yute; tendríamos que la cantidad que se necesita es de: 1680 x 0.003% = 5.04 Kg de fibra por m3 de mezcla producida.

De acuerdo a los ensayos realizados se puede afirmar que la diferencia entre las mezclas SMA y las mezclas convencionales, radica que las primeras tienen un contenido superior de betún (de 0.5% a 1.3% superior), tienen un mortero más rico en finos y un mayor contenido de árido grueso.

A la combinación de asfalto, filler, arena y fibra, se la llama Mastic o Matriz, el cual es parte fundamental de las mezclas asfálticas SMA, esta combinación le da consistencia a la mezcla.

1.1.9 Pasos para el diseño de mezclas SMA.

Se debe considerar los siguientes pasos:

1. **Análisis de los materiales**: De los agregados, del asfalto y de la fibra de celulosa
2. **Diseño de la granulometría**: Evaluación de por lo menos 3 granulometrías y obtener un contenido de asfalto fijo.
3. **Obtención del contenido óptimo de asfalto**: Evaluación de por lo menos 3 contenidos.
4. **Verificación de la fórmula de trabajo**: Se debe revisar el escurrimiento y la susceptibilidad a la humedad.

1.2 Elaboración de la mezcla.

Aunque la temperatura de mezclado y de tendido del SMA es más elevada que la regularmente utilizada, no existe mayor problema en utilizar cualquier planta actualmente funcional. El tamaño de los agregados está dentro de los rangos de tamaño de las granulometrías de uso común, por lo que únicamente es necesaria la adaptación de un sistema que adicione continua y balanceadamente las fibras en el momento del mezclado, manteniéndose un orden y secuencia que permita la homogeneidad de la mezcla.(Loma & Rubio, 2013)

1.3 Control de calidad en la planta y en la ejecución.

A las mezclas SMA se le debe realizar los siguientes controles de calidad:

- **Control en planta (producción de la mezcla)**: En planta se debe realizar el control de calidad de los materiales y la mezcla debe producirse de acuerdo a la fórmula de trabajo establecida.

- **Control en la ejecución**: Cuando se realiza el tendido de la mezcla en la obra debe: chequear la temperatura de compactación, evitar la segregación y comprobar que la densidad alcance el valor especificado.

1.4 Control de calidad de la mezcla producida.

A la mezcla SMA se le debe realizar un control de calidad cada 200 toneladas de producción, para lo cual hay que verificar:

- **Mezcla suelta**: Se debe comprobar el escurrimiento
- **Lavado de la mezcla**: Se debe chequear el contenido de asfalto, Granulometría y la presencia de la cantidad de fibra.

1.5 Transporte, extendido y compactación.

El transporte de las mezclas SMA no debe sufrir daños, es por esto que se lo debe realizar en vehículos o contenedores limpios térmicamente aislados para protegerla de la acción del aire. (Grillo, 2012). Las mezclas SMA deben ser trabajadas a regímenes de temperatura más elevadas, por lo que la entrega en planta y el transporte hacia el sitio de trabajo deben considerar este potencial tiempo de viaje y de enfriamiento. El transporte como tal se realiza de la misma manera que una mezcla normal, aunque la mezcla tiene mayor ligante, al estar las fibras actuando, el ligante no se segregará.

El extendido de la mezcla se realizará de la misma forma que otras mezclas, mediante una terminadora de asfalto que esté regulada para el espesor de diseño en la vía.

Una de las diferencias marcadas en relación a las mezclas asfálticas tradicionales es la compactación. Ésta se realiza empleando rodillos metálicos sin vibración de 10 a 15 Toneladas. Antes de dar tránsito, se debe dejar pasar un tiempo prudente para que la mezcla se enfríe. (Zúñiga & Aguila, 2012). No se debe usar rodillo neumático debido a que por el alto contenido de ligante que tiene la mezcla, éste puede quedarse adherido a los neumáticos así como también para evitar eliminar la macrotextura de la mezcla SMA. La compactación debe alcanzar una densidad del 97% de la densidad de referencia obtenida. (Lanchas, 2012).

1.6 Fatiga de una mezcla bituminosa.

La fatiga de una mezcla asfáltica es la alteración producida en la respuesta deformacional del pavimento bajo la aplicación repetitiva periódica de una solicitación inferior a la de rotura. La fatiga hace que se pierda las propiedades mecánicas de la sección y de la estructura del firme, traduciéndose en una fisuración que posteriormente puede generalizarse con el tiempo.

Las causas más frecuentes del deterioro de las mezclas asfálticas es la fisuración de los pavimentos bituminosos que se puede manifestar con la aparición de fisuras longitudinales como transversales.

Esta fisuración es la causa principal del deterioro del pavimento ocasionando la disminución del período de vida útil de los mismos, teniendo su origen en la fatiga de las mezclas asfálticas. La fisuración hace que aumenten las deflexiones y que disminuya la capacidad portante reflejándose en el valor del módulo de rigidez. Producto de la fatiga aparecen grietas superficiales en el pavimento, a medida que dichas fisuras se generalizan se forma la denominada “piel de cocodrilo”, esto ocasiona que el agua entre en el pavimento provocando el deterioro generalizado del firme. Entre los factores que mejoran el comportamiento a la fatiga son: el uso de asfaltos más blandos, el aumento del betún y la disminución del porcentaje de vacíos. En el laboratorio se determina el valor de la resistencia a la fatiga, sometiendo las briquetas de las mezclas bituminosas a cargas repetidas con diferentes deformaciones prefijadas hasta que se produce la rotura del material. De esta forma se consiguen las leyes de fatiga, que al representarlas en escala doblemente logarítmicas son rectas. (Gallart, 2011)

.

CAPÍTULO 2

ENSAYOS DE RESISTENCIA PARA EVALUAR LAS PROPIEDADES DE DURABILIDAD Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1 ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ASTM d 4123 AASHTO T 283).

Este ensayo es ampliamente utilizado para medir la resistencia a la tracción de las mezclas bituminosas, es un método simple que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible a bajas tensiones en la parte inferior de la capa asfáltica (zona de tracción), con este ensayo se obtiene la carga máxima que soporta una mezcla antes de romperse. También se puede determinar las propiedades elásticas resilientes como: módulo de elasticidad estático o dinámico, fisuración por fatiga, fisuración térmica, deformación permanente de las mezclas; con lo que podemos evaluar el efecto de humedad y los fallos producidos en ellos. Con este ensayo se calcula la Resistencia a Compresión Diametral de las mezclas bituminosas. Así mismo se lo puede utilizar para realizar el control de calidad de las mezclas asfálticas durante su fabricación y colocación en obra.

Descripción del ensayo.

Con este ensayo se somete a compresión diametral una probeta cilíndrica, idéntica a la definida en el ensayo Marshall, se aplica una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura, ver Ilustración 4:

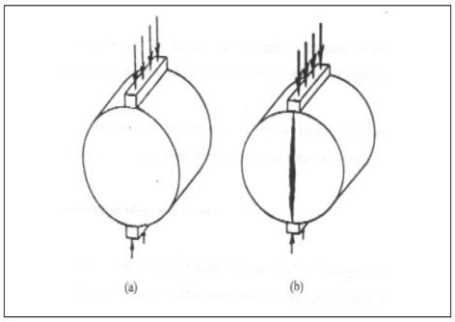


Ilustración 4: (a) Configuración de la carga; y (b) rotura del ensayo de tracción indirecta.
Fuente: El Ensayo de tracción indirecta. (Villar, 1965)
Elaborado por: Autor

De acuerdo a esta configuración de carga se provoca un esfuerzo de tensión perpendicular a la dirección de la carga aplicada (a lo largo del eje diametral vertical), y esta tracción es la que agota la probeta, desencadenando la rotura del espécimen en el plano diametral, ver la Ilustración 5.

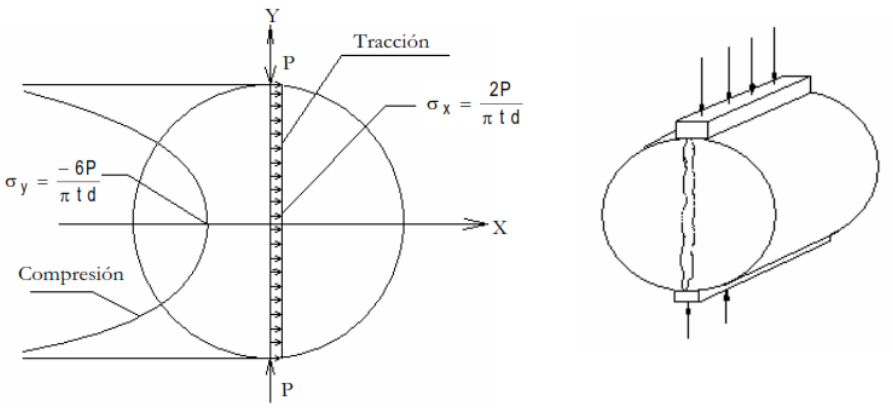


Ilustración 5: Ensayo de Tracción Indirecta en falla.
Fuente: Tesis comportamiento mecánico de las mezclas tipo SMA (Paredes, 2009)
Elaborado por: Autor

Se carga la probeta cilíndrica (igual a la de Marshall) a compresión según el plano diametral vertical de la misma. Se requiere un dispositivo de sujeción de la probeta a través del cual se materialice dicho plano de carga. Como parte de este dispositivo, y en contacto directo con dos generatrices diametralmente opuestas a la probeta, existen dos elementos encargados de evitar la rotura local de la probeta durante el ensayo, para lo que se utiliza unas placas de apoyo curvo, con radio de curvatura igual al radio nominal de la probeta, de 12.7 o 25.4 mm de ancho, para que la distribución de tensiones no se altere significativamente y para que los cálculos del módulo de elasticidad y la relación de Poisson se faciliten manteniendo constante el ancho de carga, en lugar de un ancho de carga variable durante el ensayo, que ocurriría con una placa de carga plana.

Según la norma de este ensayo, la velocidad de desplazamiento del sistema durante la aplicación de la carga será uniforme es igual a la utilizada en el ensayo Marshall de 50.8 mm/min.

La temperatura ideal para este ensayo es 25±1°C, pero permite el uso de otras temperaturas para analizar la susceptibilidad térmica de la mezcla, no se debe utilizar temperaturas superiores al reblandamiento del ligante por tener la característica de altamente viscoso.

Este ensayo permite determinar el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta y el parámetro a medir es la carga de rotura de la probeta. En la ilustración 6 se grafica la curva carga- deformación resultante de un ensayo realizado.

Ilustración 6: Curva carga-deformación resultante del ensayo de tracción indirecta.
Fuente: Tesis comportamiento mecánico de las mezclas tipo SMA. (Paredes, 2009)
Elaborado por: Autor

Distribución teórica de tensiones.

El ensayo de tracción indirecta tiene validez para materiales de comportamiento elástico y lineal.

Cuando una probeta cilíndrica es sometida a compresión diametral desarrolla un estado de tensiones bidimensional en su interior. La carga aplicada a lo largo de dos generatrices diametralmente opuestas, describe planos principales de tensiones, uno horizontal y otro vertical. Particularmente en el plano vertical se produce una tensión variable de compresión y una tensión teóricamente uniforme de tracción. Este análisis de rotura en la probeta demuestra que la fisura inicial ocurre cuando la tensión horizontal de tracción desarrollada en el plano vertical de carga alcanza el valor de la resistencia a tracción del material.

Una carga de 0.5” (12.7 mm) de ancho se aplica en especímenes de 4” de diámetro (101.6 mm) para proporcionar una carga uniforme en todo el ancho, que produzca la distribución de esfuerzos uniformes. Las ecuaciones propuestas para esfuerzos y deformaciones en falla asumen que las mezclas asfálticas en caliente son homogéneas, isotrópicas y elásticas. Según Huang, ninguna de estas suposiciones es cierta pero es un procedimiento de ensayo común en HMA. Las ecuaciones de esfuerzos y deformación para tracción indirecta son:

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi t d} \quad y \quad \sigma_y = \frac{6P}{\pi t d} \qquad y \qquad \varepsilon_f = 0.52 x_t \qquad \text{Ec. 1}$$

Donde:

σx = Esfuerzo de tensión horizontal en el centro del especimen, N/mm².
σy = Esfuerzo de compresión vertical en el centro del especimen, N/mm².

εf = Deformación por tracción en falla, mm/mm.
P = Carga aplicada, N.
t = Altura del especimen, mm.
d = Diámetro del especimen, mm.
x t = Deformación horizontal a lo largo del especimen, mm.

Para el caso de especimenes de ensayo de 6” de diámetro la carga aplicada es de 0.75” (19.0 mm) a todo lo ancho.

El ensayo de tracción indirecta proporciona dos propiedades de la mezcla. La primera es la resistencia a la tracción que es un parámetro que evalúa la susceptibilidad al humedecimiento de las mezclas. Para la susceptibilidad al humedecimiento, se mide la resistencia a la tracción antes y después de saturar el especimen, se calcula la resistencia a la tracción retenida como un porcentaje de la resistencia a la tracción original. En segundo lugar, la deformación por tracción en falla se emplea para evaluar el potencial de agrietamiento de la mezcla. Las mezclas que toleran altas deformaciones antes de alcanzar a la falla, resisten mejor los agrietamientos comparadas con las mezclas que no toleran altas deformaciones.

El ensayo de tracción indirecta normalmente se realiza a una velocidad de aplicación de carga de 2 pulg/min (50.8 mm/min) y a 77ºF (25ºC). Los ensayos de tracción también pueden realizarse a otras temperaturas (especialmente las más bajas) para predecir el comportamiento de la mezcla sometida a agrietamientos por baja temperatura.

Tensión de Rotura.

Las anteriores ecuaciones son válidas para un sólido elástico lineal idealizado. La mayoría de los materiales no son elásticos, razón por lo que los valores de tensión horizontal se aproximan a los reales. La resistencia a tracción indirecta en el momento de fallo se expresa así:

$$S_t = \frac{2\,P_{máx}}{\Pi \,.\, t \,.\, d} \qquad \text{Ec. 2}$$

Donde:

S_t = Resistencia a la rotura por tracción indirecta, N/mm².
$P_{máx}$ = Carga máxima o carga de rotura, N.
t = Altura del especimen, mm.
d = Diámetro del especimen, mm.

2.2 Ensayo de estabilidad y flujo Marshall (ASTM D6927-06).

Ensayo de estabilidad Marshall.

Con el ensayo de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica se obtiene el valor de carga máxima en Kg que soporta la mezcla para resistir desplazamientos y deformaciones. Este valor expresa la resistencia estructural de la mezcla compactada y depende del contenido de asfalto, la composición granulométrica y del tipo de agregado. Con este ensayo se evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual y su interacción cuando están mezclados. La estabilidad de la mezcla depende de la fricción y cohesión interna. La fricción interna tiene relación con las características geométricas y textura del agregado. La cohesión proviene de la capacidad del ligante para mantener unidas las partículas. (SÁNCHEZ, 2014)

La deformación depende del tiempo para saber cuánto se flexiona el pavimento.

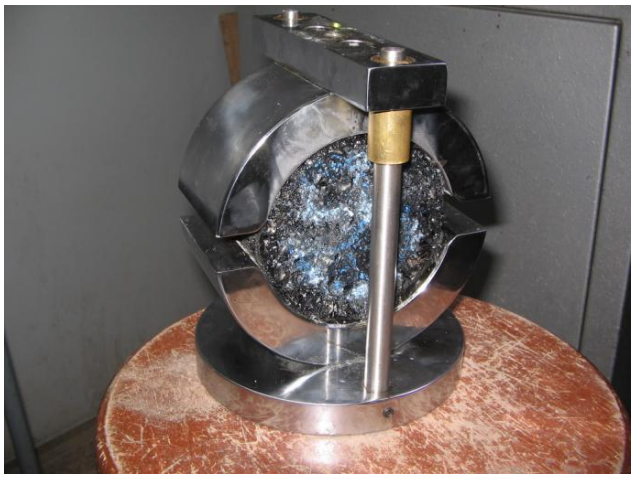


Ilustración 7: Mordaza para estabilidad y flujo Marshall
Fuente: Evaluación en laboratorio de la durabilidad de mezclas bituminosas tipo SMA
Elaborado: Autor

Este ensayo se lo realiza sometiendo el especimen a una carga que se aumenta lentamente. Cuando la probeta se deforma se obtiene la carga máxima, siendo este el valor de Estabilidad Marshall. Muchos suelen pensar que a mayor estabilidad mejor es la mezcla asfáltica, pero la realidad es otra ya que a mayor estabilidad mayor rigidez, esto implica que tendrá menos durabilidad de vida; y por lo tanto, el pavimento terminaría quebrándose y deteriorándose a corto plazo.

Flujo Marshall.

Se entiende como flujo a la deformación vertical total del espécimen sometido a la carga máxima, en este punto la carga empieza a decrecer. Este valor nos indica la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica al deformarse bajo la acción de las cargas de los vehículos.

Cuando el flujo es mayor a 0.16 pulgadas puede indicar que la mezcla es inestable bajo cargas de los vehículos. (SÁNCHEZ, 2014)

Existen casos en que las mezclas contienen mayor cantidad de fluidez, siendo estas muy inestables produciendo daños. Todos estos factores de estabilidad y fluidez de la mezcla dependen mucho de la cantidad de asfalto que estas contengan.

Ilustración 8: Equipo estabilidad y flujo Marshall
Fuente: Laboratorio
Elaborado: Autor

Para la realización de este ensayo, se necesita una mordaza y medidor de deformación.

El medidor de deformación consistirá en un deformímetro de lectura fija y dividida en centésimas de milímetro firmemente sujeto al segmento superior, y cuyo vástago se apoyará cuando se realiza el ensayo en una palanca ajustable acoplada al segmento inferior.

2.3 Ensayo a compresión Edométrica.

El ensayo se lo realiza aplicando una carga sinusoidal sin período de descanso a una muestra asfáltica que está confinada lateralmente por un molde metálico. Para realizar el ensayo la muestra debe estar colocado dentro del molde Marshall y el equipo a utilizar es el de CBR. El ensayo se lo realiza a temperatura de 0°C y a 60°C, la razón es que las mezclas SMA se caracterizan por que a bajas temperaturas tienen mayor durabilidad y a altas temperaturas presentan buena flexibilidad. (Paredes, 2009)

Cálculo

La deformación es calculada directamente con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon\ (\%) = \frac{\Delta h}{h}\ x\ 100 \qquad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

ε	Deformación del especimen
Δh	asentamiento debido a la carga
h	altura original del especimen

El módulo dinámico se lo calcula con la ecuación:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} \qquad \text{Ec. 4}$$

E^* = Módulo dinámico de la mezcla asfáltica,
σ = Esfuerzo aplicado al especimen
ε = Deformación de la briqueta

El módulo dinámico nos indica el grado máximo de resistencia de las mezclas asfálticas.

El módulo dinámico es la propiedad más importante ya que nos proporciona información sobre el comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica. Es la relación entre la deformación del material bajo una carga aplicada y el esfuerzo y en la magnitud del módulo complejo de una mezcla. (SÁNCHEZ, 2014)

Procedimiento del ensayo.

El ensayo consiste en aplicar una carga sinusoidal sin período de descaso a un especimen confinado entre 5 y 10 kg/cm2. La carga cíclica, se aplica con el pistón de carga a un disco metálico del diámetro del especimen. Los especimenes cilíndricos tienen un promedio de 2.24

pulgadas de altura y 4 pulgadas de diámetro. Los ensayos se realizaron a 0°C y 60°C. La frecuencia del equipo multiusos utilizado es de 2.7 Hz.

2.4 Ensayo de resistencia al deslizamiento con péndulo británico.

El ensayo de resistencia al deslizamiento se lo realiza utilizando la norma NTL-175/88, en la que se describe el procedimiento a seguirse para realizar las medidas de resistencia al deslizamiento mediante la utilización del Péndulo del Transport and Road Research Laboratory (British Portable Skid Resistance Tester). Este equipo proporciona un método rutinario para verificar la resistencia al deslizamiento y derrapes de superficies secas y húmedas, tanto en la carretera como en el laboratorio.

Con el ensayo se mide la pérdida de energía de un péndulo que en su extremo tiene una zapata de goma, cuando la arista de la zapata roza, con una presión determinada, sobre la superficie a ensayar y en una longitud fija. Esta pérdida de energía se mide por el ángulo suplementario de la oscilación del péndulo. (Norma-NLT-175/88, n.d.)

El péndulo de fricción TRRL se usa para medidas puntuales, se lo utiliza sobre una superficie húmeda dejando desplazarse un péndulo que tiene debajo de la zapata. El péndulo se libera desde una posición horizontal de modo que golpee la superficie de la probeta con una velocidad constante y recorre una distancia normalizada en la superficie a medir hasta el reposo. Esta pérdida de energía por la fricción que tiene el pavimento se registra en una escala graduada que tiene incorporado.

Equipo a Utilizar

Péndulo británico o también conocido como Péndulo del TRRL
Regleta graduada
Termómetro, recipientes de agua, cepillo.

Cálculo

El coeficiente de fricción es calculado con la siguiente ecuación:

$$CRD = \frac{\text{Lectura efectiva}}{100} \qquad \text{Ec. 5}$$

CRD = Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento.

Los resultados de ensayos de las medidas efectuadas en cada zona de ensayo serán expresados por al menos tres (3) valores. El valor del CRD se lo obtendrá de la media aritmética de los 3 o más valores efectuados sobre el punto de ensayo.

Rangos de fricción.

En base a mediciones de distintos tipos de superficies los valores de fricción con el péndulo británico en condición crítica (pavimento mojado) se muestra en la siguiente tabla (López & Garnica, 2002):

Tabla 3: Criterio para evaluar los valores de fricción en la superficie del pavimento

Fricción, Valor de CRD, adimensional	Calificación
< 0.5	Malo (derrapamiento del vehículo)
0.51 - 0.60	De regular a bueno
0.61 - 0.80	Bueno
0.81 – 0.90	De bueno a regular
>0.91	Malo (desgaste de neumáticos)

Fuente: Consideraciones para la aplicación del índice de fricción internacional en carreteras de México
Elaborado: Autor

2.5 Ensayo gravedad específica bulk de mezclas compactadas (ASTM D1188-96).

Este ensayo se lo realiza utilizando la norma ASTM D1188-96 descrito en la tesis Técnico Laboratorista en Mezclas Asfálticas. (Morales, 2009). En este ensayo determinamos la gravedad específica bulk de especímenes compactados de mezcla bituminosas recubiertas de parafina. Las muestras deben contener espacios vacíos o interconectados que absorban más del 2% de agua por volumen. La gravedad específica bulk debe calcularse usando el peso unitario de la muestra. Con este ensayo determinamos el peso específico aparente y además determinamos los volúmenes existentes en la mezcla.

Equipo a utilizar:

Balanza

Recipiente de agua

Materiales:

Parafina

Cálculos:

$$G_{mb} = \frac{W_D}{W_{SSD} - W_{sub}} \qquad \text{Ec. 6}$$

Dónde:

G_{mb} = Gravedad específica bulk, en (gr)
W_D = Peso seco, en (gr)
W_{SSD} = Peso con superficie satura superficialmente seca, en (gr)
W_{sub} = Peso sumergido en agua, en (gr).

2.6 Ensayo RICE (Densidad teórica máxima (ASTM D204-3).

Este ensayo se lo realiza utilizando la norma ASTM D204-3 descrito en la tesis Técnico Laboratorista en Mezclas Asfálticas. (Morales, 2009). Con este ensayo determinamos el peso específico teórico máximo de las mezclas asfálticas no compactadas a 25°C. En este ensayo no se considera los vacíos de la muestra por estar la mezcla en condición suelta, simplemente es la densidad de sólo las partículas del agregado recubiertas por el asfalto. Se ha determinado que son propiedades importantes los valores que son influenciados por la composición de la mezcla. Valores que son usados y sirven para la determinación de los valores de volúmenes vacíos.

Para realizar este ensayo se coloca en un recipiente una muestra de mezcla asfáltica, se le agrega agua a una temperatura de 25°C hasta sumergirla completamente. Posterior a ello con la finalidad de eliminar los vacíos de aire se reduce la presión residual dentro del recipiente y se agita por 15±2 minutos. El volumen de la muestra es obtenida completando el nivel de agua en el recipiente.

Equipo a utilizar:

Picnómetro de vacío
Frasco volumétrico de vidrio de paredes gruesas
Balanza con una precisión de 0.1 gr.
Bomba de vacío o aspirador de agua.
Manómetro de presión residual o calibración absoluta.
Manómetro o indicador de vacío
Termómetro Baño de agua
Válvula de vacío Horno
Dispositivo de agitación mecánica.

Cálculos:

Cálculo del peso específico de la muestra:

Peso en el agua

$$Peso\ específico = \frac{A}{A-C}$$ Ec. 7

Dónde:

A = Peso de la muestra seca en el aire, en gr.
C = Peso de la muestra en agua, en gr.

Gravedad especifica teórica máxima.

Determinación con el frasco y/o picnómetro de vacío.

$$G\ mm = \frac{A}{A + (D-E)}$$ Ec. 8

Dónde:

G mm = Gravedad específica máxima de la muestra.
A = Peso de la muestra seca en el aire, en gr.
D = Peso del frasco con placa y lleno con agua a 25°C, en gr
E = Peso del frasco con placa lleno con agua y muestra a 25°C, en gr.

CAPÍTULO 3

TRABAJO EXPERIMENTAL DE ENSAYOS

3.1 Trabajo experimental.

En el capítulo 1 se describe los aspectos más relevantes para el diseño de las mezclas bituminosas SMA; en este capítulo se muestra los datos obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio para la caracterización de los materiales de la mina Catamayito y los resultados del diseño de las mezclas asfálticas.

En este trabajo de titulación se realiza:

- Caracterización de los materiales usados en las mezclas asfálticas:
  - Granulometría, realizado según norma ASTM C 136
  - Gravedad específica Bulk
    Agregado grueso, norma ASTM C 127-88
    Agregado fino, norma ASTM C 128-97
  - Gravedad específica aparente
  - Abrasión, según norma ASTM C 131
  - Partículas alargadas, norma ASTM D 4791-99
  - Durabilidad, norma ASTM C 88-99
  - Equivalente de arena, según norma ASTM D 2419-95

- Diseño de mezcla asfáltica convencional con materiales de la mina Catamayito, con la finalidad de obtener el porcentaje de asfalto óptimo.
- Diseño de mezclas asfálticas SMA 11 y SMA 16 con materiales de la mina Catamayito, con la finalidad de obtener el porcentaje de asfalto óptimo.
- Elaboración de Briquetas Marshall con el porcentaje óptimo para:
  - La mezcla en caliente convencional
  - Las mezclas asfálticas bituminosas SMA 11 y SMA 16
- A las briquetas de mezcla en caliente convencional, SMA 11 y SMA 16 con el porcentaje óptimo se las somete a los siguientes ensayos:
  - Ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ASTM D4123)
  - Ensayo de estabilidad y flujo Marshall (ASTM D6927-06)
  - Ensayo a Compresión Edométrica
  - Ensayo Resistencia al Deslizamiento (NLT-175/88 - ASTM E303)
  - Ensayo Gravedad Específica Bulk de mezclas compactadas (ASTM D1188)
  - Ensayo Gravedad Específica máxima RICE (ASTM D2041)

Luego de realizar los ensayos se determina el comportamiento mecánico que tienen las mezclas SMA para compararlas con las mezclas en caliente.

3.2 Caracterización de los materiales usados en las mezclas asfálticas.

Luego de realizar los ensayos a los materiales en el laboratorio, ver en anexo 1, se obtiene:

Tabla 4: Caracterización de los materiales de la mina Catamayito

Ensayos		Grava triturada 3/4"		Grava triturada 1/2"		Arena gruesa triturada		Arena gruesa lavada		Filler	
1. Granulometría											
Malla	Abertura (mm)	% Rete-nido	% Pasa	% Retenido	% Pasa	% Retenido	% Pasa	% Rete-nido	% Pasa	% Rete-nido	% Pasa
1”	25.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
¾”	19.00	1.18	98.82	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
½”	12.50	73.28	26.72	0.81	99.19	0.05	99.95	0.00	100.00	0.00	100.00
3/8”	9.50	95.19	4.81	35.28	64.72	0.62	99.38	0.07	99.93	0.00	100.00
#4	4.75	97.75	2.25	98.26	1.74	36.59	63.41	20.06	79.94	0.00	100.00
#8	2.36	98.21	1.79	98.83	1.17	58.50	41.50	38.60	61.40	0.09	99.91
#16	1.18	98.25	1.75	98.93	1.07	67.97	32.03	54.83	45.17	0.40	99.6
#30	0.60	98.28	1.72	98.97	1.03	75.17	24.83	72.44	27.56	1.59	98.41
#50	0.30	98.33	1.67	99.01	0.99	83.36	16.64	86.21	13.79	5.99	94.01
#100	0.149	98.44	1.56	99.14	0.86	89.74	10.26	94.22	5.78	20.37	79.63
#200	0.075	98.75	1.25	99.39	0.61	94.09	5.91	97.63	2.37	62.79	37.21
Fondo											
2. Gravedades Específicas											
- Peso específico Bulk seco (gr/cm3)		2.567		2.560		2.454		2.51		2.12	
- Peso específico Bulk SSC (gr/cm3)		2.603		2.599		2.546		2.584		2.332	
- Peso específico aparente (gr/cm3)		2.664		2.67		2.704		2.71		2.68	
- % de Absorción		1.43		1.57		3.76		2.86		9.88	
3. Abrasión (%)		27.95		27.95							
4. Partículas Alargadas		6.25		8.07							
5. Equivalente de arena						90.7					
6. Durabilidad		0.1		0.5		1.9		1.9			
7. Deletéreos (%)		0.53		0.53		0.84		0.84			
8. Caras fracturadas											
8.1 1 Cara fracturada 1 CARA (%)		98.66									
8.2 2 Caras fracturadas 2 caras (%)		95.73									

Fuente: Datos obtenidos en el laboratorio
Elaborado por: Autor

Estos resultados se compara con los valores especificados en el numeral 811.2.02a Requisitos, constantes en la norma especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP-001-F-2002 (MOP, 2002), ver la tabla siguiente:

Tabla 5: Análisis comparativo de resultados con especificaciones MOP

Característica del ensayo	Unidad	Norma MOP	Especificación MOP		Resultados
			Mín.	Máx.	
Gravedad específica del llenante mineral	-	811.2.02a	--	--	2.33
Equivalente de arena	%		50	--	90.7
Desgaste los Ángeles	%		--	40	27.95
Pérdidas en ensayo de solidez Sulfato de sodio (5 ci.)	%		--	12	1.9
Gravedad específica y absorción del agregado fino	-		--	--	2.55/3.76
Gravedad específica y absorción del agregado grueso	-		--	--	2.60/1.43
Partículas fracturadas mecánicamente (Mín. 1 Cara)	%		85	--	98.66
Partículas fracturadas mecánicamente (Mín. 2 Cara)	%		80	--	95.73
Partículas planas y alargadas (Relación 5:1)	%		--	10	6.99
Materiales deletéreos agregado grueso	%		--	1	0.53
Materiales deletéreos agregado fino	%		--	1	0.84

Fuente: Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP-001-F-2002.
Elaborado por: Autor

3.3 Diseño de la mezcla asfáltica en caliente convencional.

La mezcla asfáltica convencional se la realiza con los materiales de la mina Catamayito.

Capa de rodadura: Agregados para Mezcla en Planta.

De acuerdo a lo especificado en el numeral 811-2. Agregados para mezcla en Planta, constantes en las especificaciones MOP-001-F-2002, los agregados que se utilizan para la fabricación de hormigón asfáltico empleando una planta de asfaltos o equipos semejante para su mezcla con el asfalto (MOP, 2002), son:

Tabla 6: Tabla 405-5.1. MOP-001-F-2002

TAMIZ	Porcentajes en peso que pasa a través los tamices de malla cuadrada
	¾”
1” (25.4 mm.)	100
¾” (19 mm.)	90 - 100
½” (12.5 mm.)	--
3/8” (9.5 mm.)	56 - 80
No. 4 (4.75 mm.)	35 - 65
No. 8 (2.36 mm.)	23 - 49
No. 50 (0.30 mm.)	5 - 19
No. 200 (0.075 mm.)	2 - 8

Fuente: Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP-001-F-2002.
Elaborado por: Autor

Tabla 7: Tabla 405-5.2. MOP-001-F-2002

Ensayos de acuerdo al método Marshall	TRÁFICO					
	PESADO		MEDIO		LIVIANO	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
N° de golpes	75		50		35	
Estabilidad (libras)	1,800	--	1,200	--	750	--
Flujo (pulgada/100)	8	16	8	18	8	20
% vacíos con aire						
Carpeta	3	5	3	5	3	5
Base	3	8	3	8	3	8
Nota: % de Vacíos en el agregado mineral (VMA) de acuerdo con el gráfico actualizado del Instituto del Asfalto.						

Fuente: Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP-001-F-2002.
Elaborado por: Autor

Agregados

Los agregados de ¾"; 1/2", arena triturada, arena lavada y filler empleados en el presente diseño provienen de la mina Catamayito, los datos de granulometría están en la tabla 4.

Asfalto

El asfalto a utilizar en el diseño tiene las características adecuadas, se determina mediante ensayo un peso específico promedio de 1.0218 gr/cm^3.

El asfalto que se utiliza en este trabajo de titulación se lo clasifica de acuerdo a su viscosidad como AC–20; proviene de la Refinería Estatal de Esmeraldas, ubicada en la ciudad y provincia del mismo nombre, república del Ecuador. Se caracteriza en base a su viscosidad para conocer sus propiedades en estado original y sobre el residuo del TFOT.

Ensayos realizados al cemento asfáltico

En la Tabla 8 se encuentran los tipos de ensayos realizados al asfalto AC-20, para determinar la viscosidad se utilizó el viscosímetro rotatorio Brookfield (DV3T), ver ilustración 9; además, se presenta la comparación entre los valores especificados en la norma NTE-INEN 2515 Enmienda 1 (NTE-INEN 2515, 2014) con los resultados obtenidos de los ensayos.

Ilustración 9: Viscosímetro rotatorio Brookfield (DV3T)
Fuente: Pincay, J., 2017 Método RAMCODES.
Elaborado por: Autor

Tabla 8: Ensayos realizados al cemento asfáltico AC-20

Características de ensayo Sobre muestra Original	**Unidad**	**Especificación**	**Resultados**
Viscosidad Absoluta (60 ºC)	Pa.s	160 - 240	210
Viscosidad Cinemática (135 ºC)	Pa.s	300 mín.	353
Punto de Inflamación (ºC)	° C	232 mín.	295
Densidad Relativa (25 ºC)	gr/cm3	1.00	1.0218
Índice de Penetración	-	- 1,5 a 1	-1.0
Penetración (25ºC)	mm/10	60 -70	70
Punto de Ablandamiento ºC	° C	47 - 58	48
Sobre residuo del (TFOT. 5 horas a 163 °C)			
Viscosidad Absoluta (60 ºC)	Pa.s	800 máx.	888
Cambio de Masa (%)	%	1.0 máx.	-0.32
Ductilidad (25 ºC)	Cm	50 mín.	42

Fuente: Pincay, J., 2017 Método RAMCODES.
Elaborado por: Autor

Observaciones: Los valor de viscosidad absoluta y ductilidad sobre el residuo están fuera de especificación.

Granulometrías

Luego de tener la granulometría de los materiales, se obtiene una mezcla de agregados en el que intervienen: 22% de material de ¾”, 25% de material de ½”, 12% de arena triturada, 34% de arena lavada y 7% de Filler, con la finalidad de tener una mezcla de granulometría que cumpla las especificaciones MOP-001-F-2002 para carpeta asfáltica de tamaño nominal ¾”. Ésta dosificación si es necesario será reajustada en planta al momento de la producción; en el siguiente gráfico se detalla las franjas de diseño.

Tabla 9: Porcentaje (%) de agregados para obtener la Mezcla faja caliente de ¾”

MEZCLA FAJA 3/4" INSTITUTO DEL ASFALTO

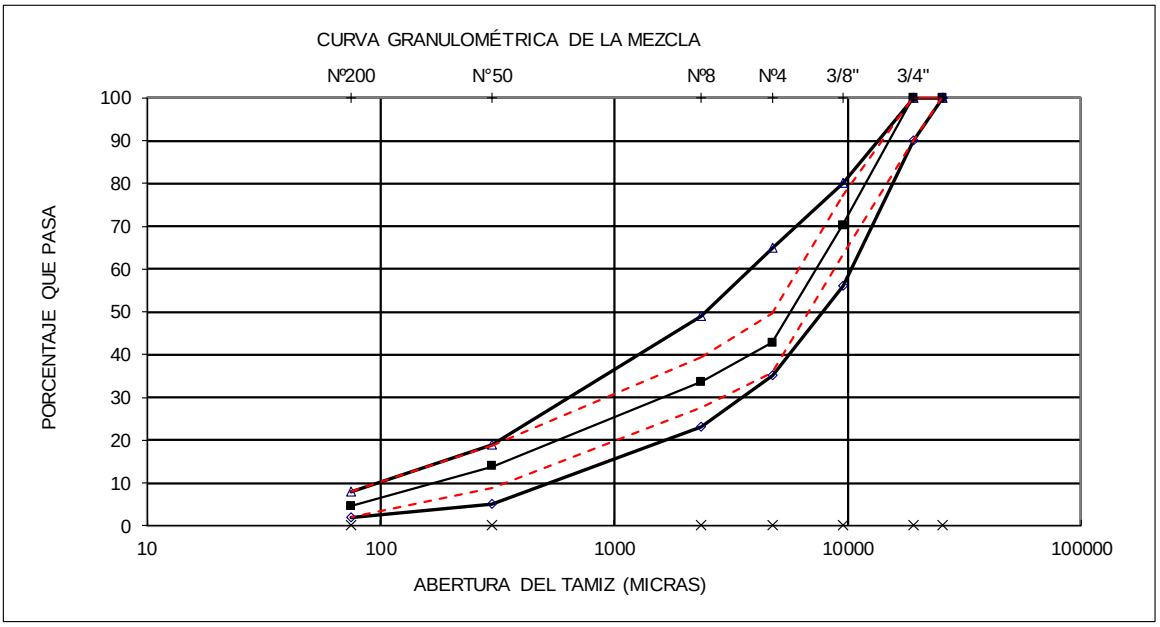
PROYEC : **TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL**

OBRA MEZCLA ASFÁLTICA
LOCALZ.: MINA CATAMAYITO
FECHA : DICIEMBRE-2016

MUESTRA # 1: 3/4"
MUESTRA # 2: 1/2"
MUESTRA # 3: ARENA TRITURADA
MUESTRA # 4: ARENA LAVADA
MUESTRA # 5: FILLER

TAMIZ	MUESTRAS % PASA					NORMA MOP		MEZCLA	MEZCLA
N°	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5	MÍNIMO	MÁXIMO	% PASA	% R.A.
1"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00
3/4"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	90.00	100.00	100.00	0.00
3/8"	4.81	64.72	99.38	99.93	100.00	56.00	80.00	70.14	29.86
N°4	2.25	1.74	63.41	79.94	100.00	35.00	65.00	42.72	57.28
N°8	1.79	1.17	41.50	61.40	99.91	23.00	49.00	33.54	66.46
N°50	1.67	0.99	16.64	13.79	94.01	5.00	19.00	13.88	86.12
N°200	1.25	0.61	5.91	2.37	37.21	2.00	8.00	4.55	95.45

MUESTRA N° 1 % = 22
MUESTRA N° 2 % = 25
MUESTRA N° 3 % = 12
MUESTRA N° 4 % = 34
MUESTRA N° 5 % = 7



Fuente: Datos obtenidos en laboratorio.
Elaborado por: Autor

Las granulometrías individuales de los agregados que intervienen en el diseño de la mezcla asfáltica constan en anexo 1.

Formula de trabajo

Con la fórmula de trabajo descrita en la tabla 16, en el laboratorio se realizó la mezcla en caliente convencional utilizando el método Marshall, así se tiene:

Tabla 10: Porcentaje de diseño para Mezcla asfáltica en caliente

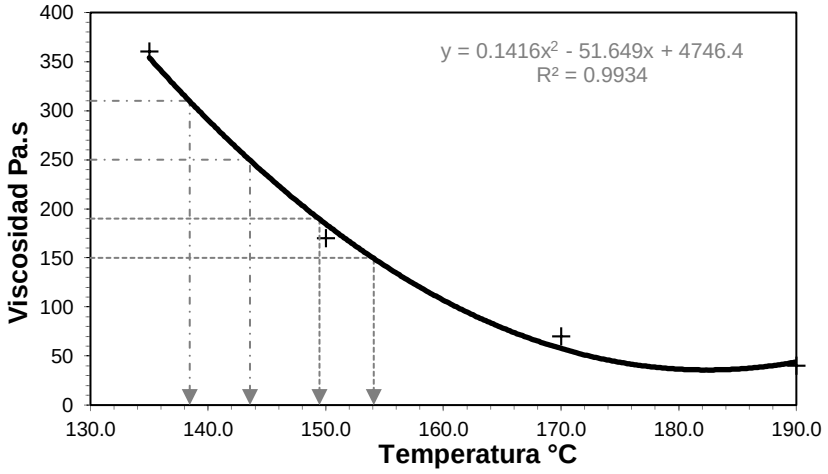
MATERIAL	PORCENTAJE DE DISEÑO
Material grueso 3/4"	**22%**
Material grueso 1/2"	**25%**
Material arena triturada	**12%**
Material arena lavada	**34%**
Material Filler	7%
Porcentaje de asfalto	5.75%

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio.
Elaborado por: Autor

3.4 Temperatura de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica.

De los resultados que se obtienen con el ensayo de viscosidad descritos en la tabla 8 y del trazado de la curva reológica se determina las temperaturas de mezclado y de compactación en laboratorio, tomando en cuenta los criterios de 170 ± 20 Pa.s y 280 ± 30 Pa.s respectivamente.

Ilustración 10: Temperaturas de mezclado y compactación



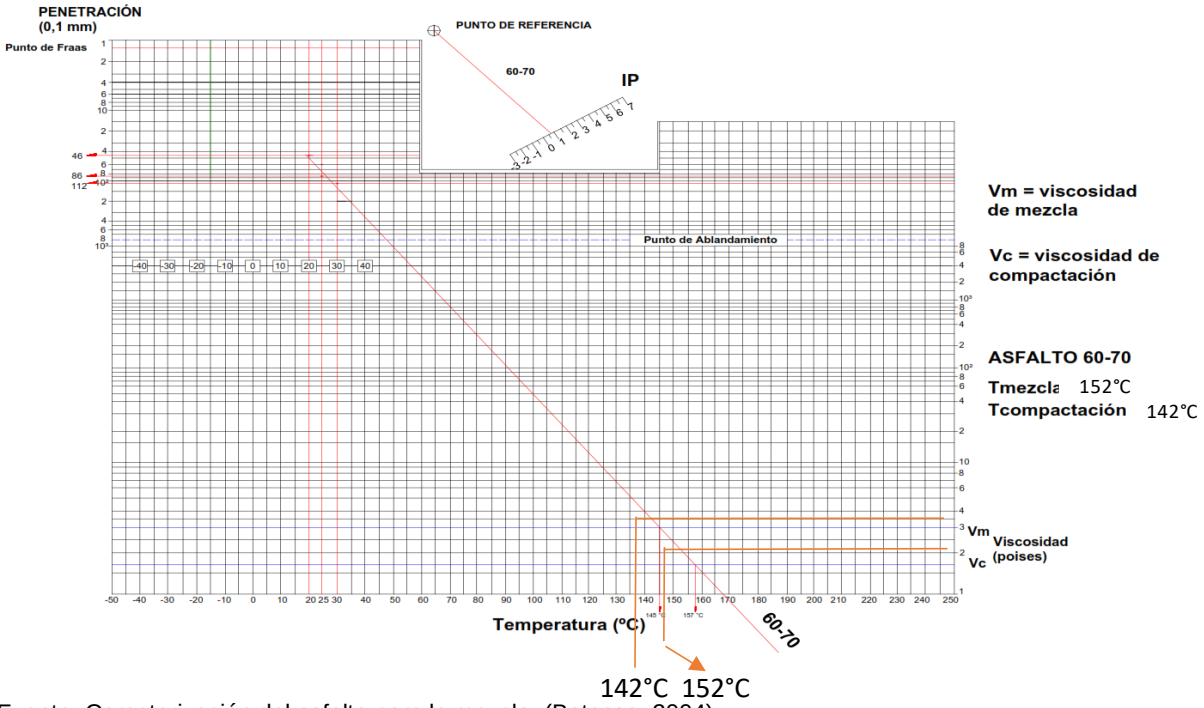
Fuente: Pincay, J., 2017 Método RAMCODES.
Elaborado por: Autor

De la ilustración 10 se determina que la temperatura de mezclado está entre el rango de 149 – 154°C y que el rango de la temperatura de compactación es 138°C- 144°C.

En el caso de que no se realice en laboratorio el ensayo para obtener el trazado de la curva reológica, existen varios métodos que se puede utilizar, entre ellos se tiene: el Nomograma de Heukelom y la curva de viscosidad.

Con los resultados de la tabla 8 se procede a determinar las temperaturas de mezclado como la de compactación utilizando el Nomograma de Heukelom, así se tiene que del ensayo para el asfalto utilizado en este trabajo se determina que la viscosidad para 135°C fue de 0.353 Pa.s y para 60° fue de 210 Pa.s; de acuerdo a la ilustración 11 se determina que la temperatura para la compactación es de 142°C y la temperatura para la mezcla es de 152°C:

Ilustración 11: Nomograma de Heukelom para determinar las temperaturas óptimas de mezclado y compactación en el diseño de mezclas asfálticas en caliente



Fuente: Caracterización del asfalto para la mezcla. (Botasso, 2004)
Elaborado por: Autor

También se puede utilizar la carta de viscosidad-temperatura, que fue elaborada en base a pruebas en el viscosímetro rotacional a diferentes temperaturas. En esta carta se puede observar que los rangos de valores de mezclado y de compactación son de 143- 147°C y 135-140°C. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003).

De acuerdo a la ilustración 12 se determina que la temperatura para la compactación es de 135°C y la temperatura para la mezcla es de 144°C.

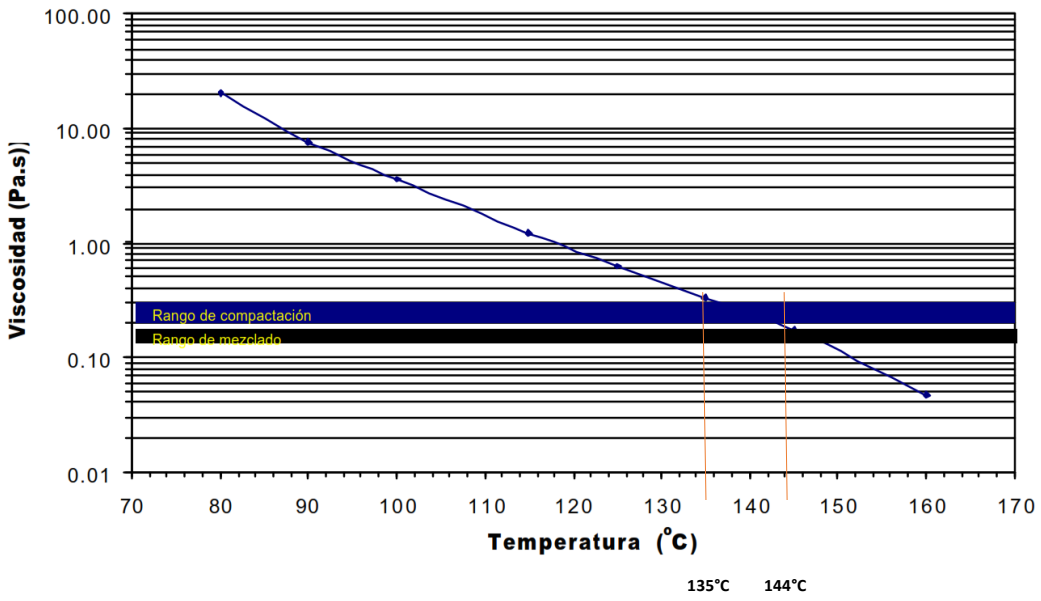


Ilustración 12: Carta de viscosidad (Garnica et al., 2003)
Fuente: Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio.
Elaborado por: Autor

Luego del análisis realizado para obtener las temperaturas óptimas de mezclado y de compactación con los dos métodos, se puede determinar un rango para mezclado de 135-142°C y para la mezcla de 144- 152°C. Como se observa, con estos dos métodos se tiene valores similares al realizado en el laboratorio.

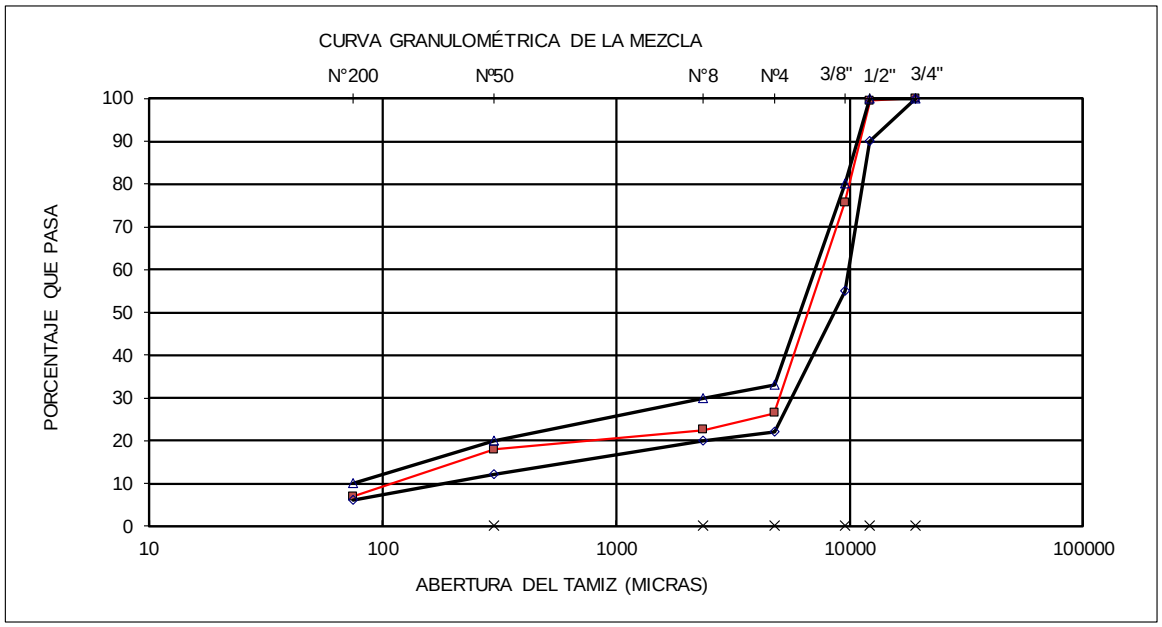
3.5 Diseño de mezcla asfáltica bituminosa SMA 11.

Agregados para mezcla en planta.

El diseño de la mezcla bituminosa SMA 11 estará dentro de los husos granulométricos de la norma europea UNE EN 13108-5, los cuales constan en la tabla 11.

Tabla 11: Husos granulométricos. Cernido acumulado (% en masa)

TIPO DE MEZCLA	ABERTURA DE LOS TAMICES (MM)							
	22	16	11.2	8	4	2	0.5	0.063
SMA 11		100	90 - 100	55 - 80	22 - 33	20 - 30	12 - 20	6 - 10



Fuente: Mezclas SMA (Stone mastic Asphalt), Sostenibles y medioambientalmente amigables
Elaborado: Autor

Agregados

Los áridos a utilizar son de la mina Catamayito, los resultados de la caracterización de los materiales están descritos en la tabla 4.

Granulometrías

Luego de realizar los análisis granulométricos respectivos, se obtiene una mezcla de agregados en el que intervienen: 69% de material de ½", 16% de arena triturada y 15% de Filler, obteniéndose una mezcla con granulometría que cumple la norma europea UNE EN 13108-5 para carpeta asfáltica, tamaño nominal SMA 11. Ésta dosificación si es necesario será reajustada en planta al momento de la producción; en el siguiente gráfico se detalla las fajas de diseño.

Tabla 12: Porcentaje (%) de agregados para obtener la Mezcla faja SMA 11

MEZCLA FAJA 1/2" SMA - 11

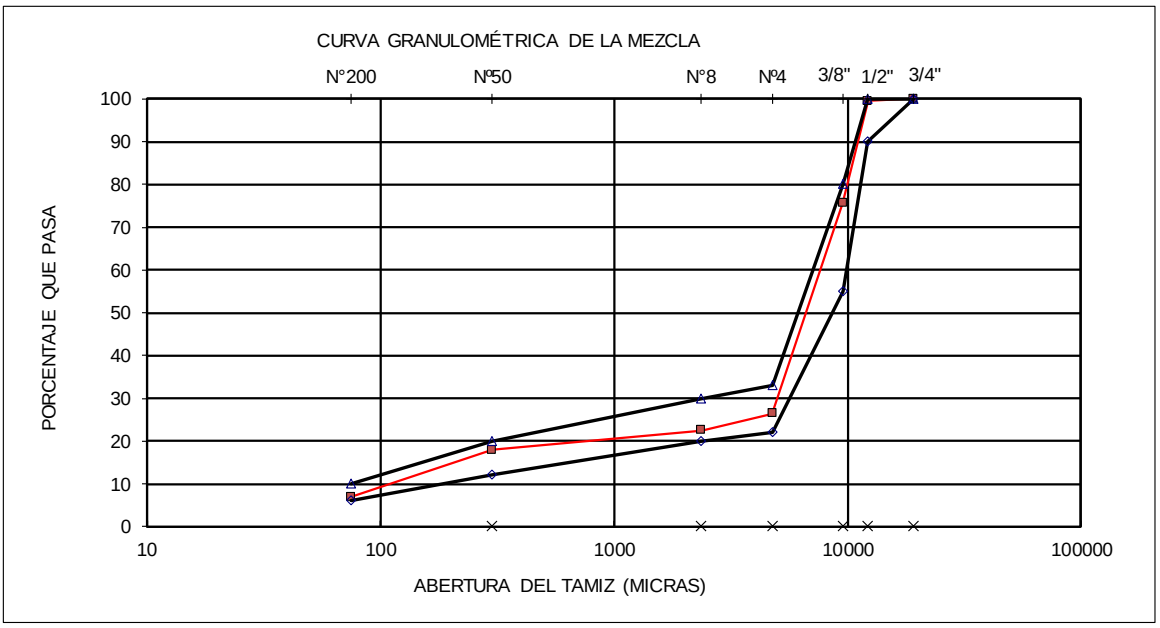
PROYEC : **TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL**

LOCALZ.: MINA CATAMAYITO
FECHA : ENERO-2017

MUESTRA # 1: 3/4"
MUESTRA # 2: 1/2"
MUESTRA # 3: ARENA TRITURADA
MUESTRA # 4: FILLER
MUESTRA # 5:

TAMIZ	MUESTRAS % PASA					NORMA MOP		MEZCLA	MEZCLA
N°	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5	MÍNIMO	MÁXIMO	% PASA	% R.A.
3/4"	98.92	100.00	100.00	100.00		100.00	100.00	100.00	0.00
1/2"	26.72	99.19	99.95	100.00		90.00	100.00	99.43	0.57
3/8"	4.81	64.72	99.38	100.00		55.00	80.00	75.56	24.44
N°4	2.25	1.74	63.43	100.00		22.00	33.00	26.35	73.65
N°8	1.79	1.17	41.50	99.91		20.00	30.00	22.43	77.57
N°50	1.67	0.99	19.64	94.01		12.00	20.00	17.93	82.07
N°200	1.25	0.61	5.91	37.21		6.00	10.00	6.95	93.05

MUESTRA Nº 1 % =	0
MUESTRA Nº 2 % =	69
MUESTRA N° 3 % =	16
MUESTRA N° 4 % =	15
MUESTRA N° 5 % =	0



Fuente: Datos obtenidos en laboratorio.
Elaborado por: Autor

Fórmula de trabajo

Con la fórmula de trabajo descrita en la tabla 23, en el laboratorio se realizó la mezcla SMA 11 utilizando el método Marshall.

Tabla 13: Porcentaje de diseño para Mezcla asfáltica SMA 11

MATERIAL	PORCENTAJE DE DISEÑO
Material grueso 1/2"	69%
Material arena triturada	16%
Material Filler	15%
Porcentaje de asfalto	6.00%

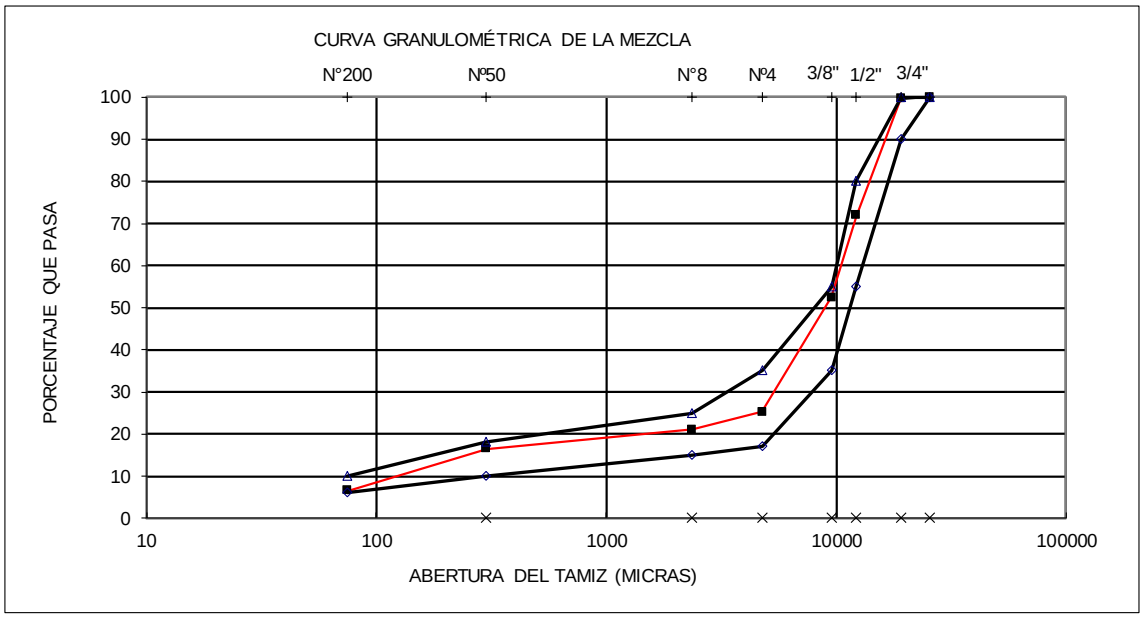
Fuente: Datos obtenidos en laboratorio.
Elaborado por: Autor

3.6 Diseño de mezcla asfáltica bituminosa SMA 16.

El diseño de la mezcla bituminosa SMA 16 estará dentro de los husos granulométricos de la norma europea UNE EN 13108-5, los cuales constan en la tabla 14.

Tabla 14: Husos granulométricos. Cernido acumulado (% en masa)

TIPO DE MEZCLA	ABERTURA DE LOS TAMICES (MM)							
	22	16	11.2	8	4	2	0.5	0.063
SMA 16	100	90 - 100	55 - 80	35 - 55	17 - 35	15 - 25	10 - 18	6 - 10



Fuente: Mezclas SMA (Stone mastic Asphalt), Sostenibles y medioambientalmente amigables
Elaborado: Autor

Agregados

Los áridos a utilizar son los de la mina Catamayito, los resultados de la caracterización de los materiales están descritos en la tabla 4.

Granulometrías

Luego de realizar los análisis granulométricos respectivos, se obtiene una mezcla de agregados en el que intervienen: 38% de material de 3/4”, 32% de material de ½”, 17% de arena triturada y 13% de Filler, obteniéndose una mezcla con granulometría que cumple la norma europea UNE EN 13108-5 para carpeta asfáltica, tamaño nominal SMA 11. Ésta dosificación si es necesario será reajustada en planta al momento de la producción; en el siguiente gráfico se detalla las franjas de diseño.

Fórmula de trabajo

Con la fórmula de trabajo descrita en la tabla 24, en el laboratorio se realiza la mezcla SMA 16 utilizando el método Marshall.

Tabla 15: Porcentaje de diseño para Mezcla asfáltica SMA 16

MATERIAL	PORCENTAJE DE DISEÑO
Material grueso 3/4"	**38%**
Material grueso 1/2"	**32%**
Material arena triturada	**17%**
Material Filler	13%
Porcentaje de asfalto	6.00%

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio.
Elaborado por: Autor

3.7 Elaboración de briquetas método Marshall para mezclas en caliente convencional y mezclas Stone Mastic Asphalt SMA 11 y SMA 16.

Las muestras de los áridos se las obtuvo de la mina Catamayito:

Ilustración 13: Obtención de Áridos
Fuente: Mina Catamayito
Elaborado: Autor

3.7.1 Elaboración de briquetas para mezcla en caliente.

Con el propósito de obtener el % de asfalto óptimo de las mezclas asfálticas bituminosas convencionales, utilizando los materiales de la mina Catamayito, se realiza el siguiente procedimiento para la elaboración de las briquetas:

1. Se elabora las briquetas con el porcentaje de materiales obtenido en la tabla 9 con la finalidad de cumplir con las especificaciones MOP-001-F-2002 para carpeta asfáltica, tamaño nominal ¾”

2. A la combinación de los agregados, se agrega el 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 y 6.5% de asfalto con la finalidad de obtener el porcentaje de asfalto óptimo, realizándose 3 briquetas para cada porcentaje. Alcanzada la temperatura de 145°C del asfalto y de los materiales pétreos, se procede a mezclar.

3. El material mezclado se lo va colocando en el molde Marshall y se compacta con 75 golpes por cada cara, se deja enfriar y se desmolda a través de una prensa hidráulica.

4. A las briquetas se las somete al ensayo del método Marshall, con los resultados obtenidos se realiza los gráficos: % de asfalto vs vacíos, % de asfalto vs estabilidad, % de asfalto vs flujo, % de asfalto vs densidad Bulk, % de asfalto vs VAM y % de asfalto vs Relación bitumen Vacíos.

5. De las gráficas se obtiene el porcentaje de asfalto óptimo de 5.75% y los resultados se resumen en el siguiente tabla:

Tabla 16: Resultados de Mezcla asfáltica en caliente con porcentaje de asfalto óptimo de 5.75%

PROPIEDADES	VALOR OBTENIDO	EXIGENCIAS
% ASFALTO	5.75%	N.E.
ESTABILIDAD	2090 Lbs	> 1800 Lbs
FLUJO	11.50 1"/100	8 - 14 pulg/100
PESO UNITARIO	2336 gr/cm3	N.E.
VACÍOS EN MEZCLA	4.40%	3 - 5%
VACÍOS AGREGADO MINERAL	14.25%	> 14%
RELACIÓN FILLER/BETÚN	0.80	0.80 - 1.20
RELACIÓN BITUMEN VACÍOS	75%	65 - 75%

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio
Elaborado: Autor

6. Con el porcentaje de asfalto óptimo de 5.75% se realizan briquetas cilíndricas y 4 briquetas de 20 x 20 cm, las mismas que servirán para desarrollar los ensayos de comparación que se mencionan posteriormente.

Ilustración 14: Briquetas de mezcla asfáltica con % óptimo
Fuente: Briquetas obtenidas en el laboratorio
Elaborado: Autor

Tabla 17: Diseño de mezclas asfálticas para obtener el % óptimo de la mezcla convencional

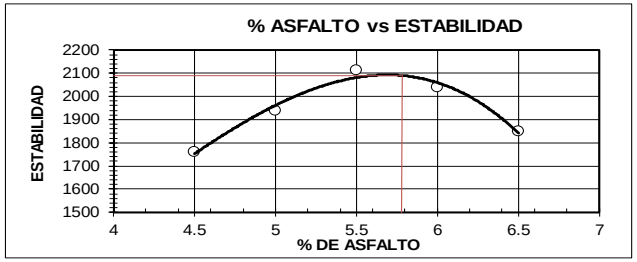
FAJA DE TRABAJO: 3/4" INSTITUTO DEL ASFALTO
GRADO DE CEMENTO ASFALTICO: AC-20
GOLPES: 75
FECHA: 12-2016

CONTROL DE LA MEZCLA ASFALTICA EN LABORATORIO

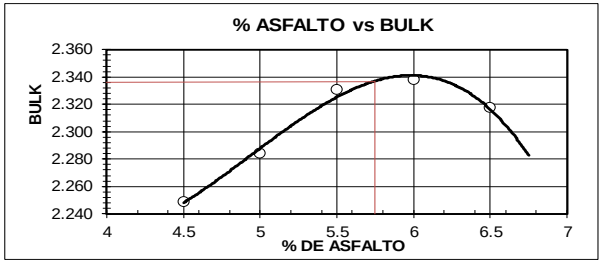
MATERIALES					MEZCLA ASFALTICA										% EN VOLUMEN						ESTABILIDAD (lbs)				
AGREGADOS	% AGREGADOS	% DOSIFICACION	PESO ESPECIFICO AGREGADOS (gr)	PESO ESPECIFICO 25/25°C ASFALTO	MUESTRA	P. Aire Seco (gr)	P. Aire S.S.S. (gr)	P. agua (gr)	VOLUMEN (cm³)	PESO ESPECIFICO BULK (gr/cm³)	PESO ESPECIFICO MAXIMO TEÓRICO (gr/cm³)	PESO ESPECIFICO MAXIMO MEDIDO (gr/cm³)		% ASFALTO ABSORVIDO	AGREGADOS	VACIOS CON AIRE	C. A. AFECTIVO	% VACIOS EN AGREGADOS MINERALES	% ASFALTO EFECTIVO EN LA MEZCLA	% RELACION BITUMEN VACIOS	FACTOR DE CORRECCION	LECTURA (kN)	LECTURA (lbs)	CORREGIDA	FLUJO 0.01"
3/ 4"	22. 00	21. 01	2. 603		1	1082. 35	1082. 95	600. 13	482. 82	2. 242		W m	1000. 42								1. 14	6. 76	1516	1728	9. 68
1/ 2"	25. 00	23. 88	2. 599		2	1018. 20	1019. 90	568. 06	451. 84	2. 253		W f +a	6885. 00								1. 25	6. 28	1408	1760	9. 12
Arena Trt	12. 00	11. 46	2. 546		3	1114. 56	1115. 23	620. 27	494. 96	2. 252		W f +a+r	7475. 00								1. 09	7. 31	1639	1787	8. 84
Arena lav	34. 00	32. 47	2. 584																						
Filler	7. 00	6. 69	2. 332																						
C. A.		4. 50		1. 016	4							RICE													
TOTAL	100	100	2. 568		**PROMEDIO**					2. 249	2. 403	2. 438		0. 624	83. 64	7. 74	8. 62	16. 36	3. 90	56. 29				1759	9
3/ 4"	22. 00	20. 9	2. 603		1	999. 93	1000. 87	563. 33	437. 54	2. 285		W m	1000. 21								1. 32	6. 49	1455	1921	9
1/ 2"	25. 00	23. 8	2. 599		2	1042. 34	1043. 37	585. 33	458. 04	2. 276		W f +a	6885. 00								1. 19	7. 33	1644	1956	9. 72
Arena Trt	12. 00	11. 4	2. 546		3	1025. 26	1026. 32	579. 00	447. 32	2. 292		W f +a+r	7476. 00								1. 25	6. 92	1552	1940	10. 11
Arena lav	34. 00	32. 3	2. 584																						
Filler	7. 00	6. 7	2. 332																						
C. A.		5. 00		1. 016	4							RICE													
TOTAL	100	100	2. 568		**PROMEDIO**					2. 284	2. 386	2. 444		1. 058	84. 51	6. 54	8. 95	15. 49	3. 99	63. 21				1939	10
3/ 4"	22. 00	20. 79	2. 603		1	1046. 30	1047. 34	598. 42	448. 92	2. 331		W m	1000. 00								1. 25	7. 44	1669	2086	11
1/ 2"	25. 00	23. 63	2. 599		2	1088. 06	1089. 12	622. 24	466. 88	2. 330		W f +a	6885. 00								1. 19	8. 03	1801	2143	11. 02
Arena Trt	12. 00	11. 34	2. 546		3							W f +a+r	7476. 00												
Arena lav	34. 00	32. 13	2. 584																						
Filler	7. 00	6. 62	2. 332																						
C. A.		5. 50		1. 016	4							RICE													
TOTAL	100	100	2. 568		**PROMEDIO**					2. 331	2. 369	2. 445		1. 392	85. 77	4. 68	9. 55	14. 23	4. 18	72. 95				2114	11
3/ 4"	22. 00	20. 68	2. 603		1	1031. 84	1032. 69	592. 48	440. 21	2. 344		W m	1000. 00								1. 32	6. 92	1552	2048	12
1/ 2"	25. 00	23. 50	2. 599		2	1027. 40	1027. 34	588. 44	438. 90	2. 341		W f +a	6885. 00								1. 32	6. 93	1554	2051	12
Arena Trt	12. 00	11. 28	2. 546		3	1080. 15	1080. 98	617. 00	463. 98	2. 328		W f +a+r	7473. 00								1. 19	7. 54	1691	2012	12
Arena lav	34. 00	31. 96	2. 584																						
Filler	7. 00	6. 58	2. 332																						
C. A.		6. 00		1. 016								RICE													
TOTAL	100	100	2. 568		**PROMEDIO**					2. 338	2. 352	2. 427		1. 396	85. 57	3. 69	10. 74	14. 43	4. 69	78. 91				2037	12
3/ 4"	22. 00	20. 57	2. 603		1	1203. 46	1204. 29	685. 02	519. 27	2. 318		W m	1000. 00								1. 00	7. 81	1751	1751	13. 85
1/ 2"	25. 00	23. 38	2. 599		2	1159. 45	1160. 18	659. 41	500. 77	2. 315		W f +a	6885. 00								1. 04	7. 69	1725	1794	13
Arena Trt	12. 00	11. 22	2. 546		3	1083. 89	1084. 66	617. 21	467. 45	2. 319		W f +a+r	7471. 00								1. 19	7. 49	1680	1999	13
Arena lav	34. 00	31. 79	2. 584		4																				
Filler	7. 00	6. 55	2. 332																						
C. A.		6. 50		1. 016								RICE													
TOTAL	100	100	2. 568		**PROMEDIO**					2. 317	2. 336	2. 415		1. 508	84. 38	4. 07	11. 56	15. 62	5. 09	78. 47				1848	13

PROYECTO: TRABAJO DE TITULACION MAESTRIA INGENIERIA VIAL
FAJA DE TRABAJO: 3/4" INSTITUTO DEL ASFALTO
GRADO DE CEMENTO ASFALTICO: AC-20
GOLPES: 75
FECHA: 12-2016

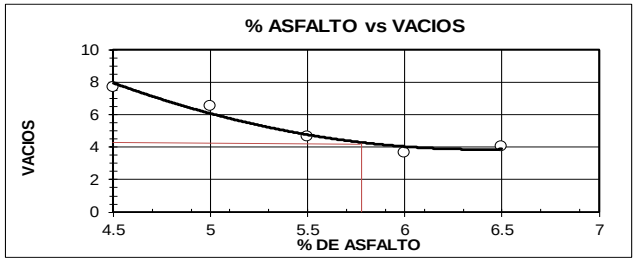
TENDENCIA	
ASF.	ESTAB.
4.5	1758.5
5	1939.1
5.5	2114.3
6	2037.4
6.5	1848



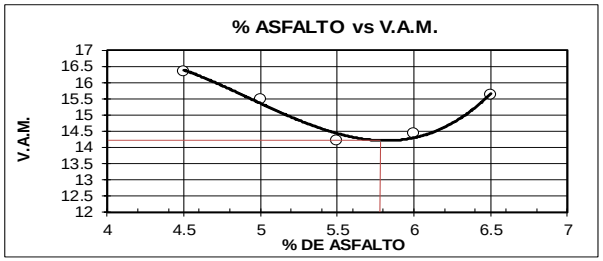
TENDENCIA	
ASF.	BULK
4.5	2.249
5	2.284
5.5	2.331
6	2.338
6.5	2.317



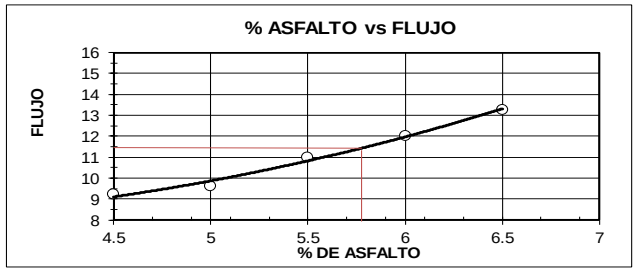
TENDENCIA	
ASF.	VACIOS
4.5	7.7353
5	6.5424
5.5	4.6785
6	3.6904
6.5	4.07



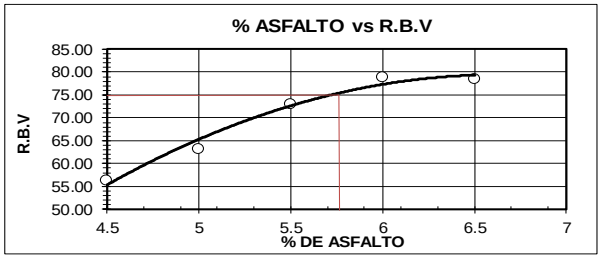
TENDENCIA	
ASF.	V.A.M
4.5	16.36
5	15.49
5.5	14.23
6	14.43
6.5	15.62



TENDENCIA	
ASF.	FLUJO
4.5	9.2133
5	9.61
5.5	11.01
6	12.00
6.5	13.28



TENDENCIA	
ASF.	V.A.M
4.5	56.29
5	63.21
5.5	72.95
6	78.91
6.5	78.47



RESUMEN :

PORCENTAJE OPTIMO	5.75 %
ESTABILIDAD	2,090 lb
FLUENCIA	11.50 1/100
DENSIDAD	2336.0 gr/cm3

REQUERIMIENTOS

5.5 %	6 %
>	1,800 lb
8.0 1/100	14 1/100

RESUMEN :

VACIOS CON AIRE	4.40 %
VACIOS DE AGRAGADO MINERAL	14.25 %
RELACION BITUMEN VACIOS	75.00 %
PESO ESPECIFICO MAXIMO TEORICO	2.35 gr/cm3

REQUERIMIENTOS

3 %	5 %
>	14 %
65 %	75 %

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio
Elaborado: Autor

3.7.2 Elaboración de briquetas SMA 11 y SMA 16.

Con el propósito de obtener el % de asfalto óptimo de las mezclas asfálticas bituminosas SMA 11 y SMA 16 utilizando los materiales de la mina Catamayito, se realiza el siguiente procedimiento para la elaboración de las briquetas:

1. Se toma en cuenta las especificaciones para el diseño de las mezclas bituminosas SMA 11 y SMA 16 explicado en el numeral 3.5 y 3.6 con la finalidad de cumplir con la norma europea UNE EN 13108-5
2. Para obtener el asfalto óptimo de las mezclas SMA 11 y SMA 16, en base al método Marshall, se elabora 3 briquetas de cada una con el porcentaje de asfalto del 5.0%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7.0%.

Ilustración 15: Briquetas SMA 11 y SMA 16 con porcentaje de asfalto de 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 y 7%
Fuente: Briquetas obtenidas en el laboratorio
Elaborado por: Autor

3. La combinación de los agregados, en base a la distribución granulométrica de diseño de la mezcla SMA 11 utilizando el método Marshall, es:

Tabla 18: Porcentaje de materiales para diseño de Mezcla SMA 11

MATERIAL	PORCENTAJE DE DISEÑO
Material grueso 1/2"	**69 %**
Material arena triturada	**16 %**
Material Filler	15 %
Porcentaje de asfalto	*5.0, 5.5, 6.0, 6.5 y 7.0 %*

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio
Elaborado: Autor

4. La combinación de los agregados, en base a la distribución granulométrica de diseño de la mezcla SMA 16 utilizando el método Marshall, es:

Tabla 19: Porcentaje de materiales para diseño de Mezcla SMA 16

MATERIAL	PORCENTAJE DE DISEÑO
Material grueso 3/4"	**38 %**
Material grueso 1/2"	**32 %**
Material arena triturada	**17 %**
Material Filler	13 %
Porcentaje de asfalto	5.0, 5.5, 6.0, 6.5 y 7.0 %

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio
Elaborado: Autor

5. El contenido de la fibra celulósica de yute es 0.3% del peso unitario suelto de la mezcla.

Ilustración 16: Colocación de la fibra celulósica de yute a la mezcla SMA
Fuente: Laboratorio
Elaborado: Autor

Estas fibras deben cumplir con las propiedades de la siguiente tabla:

Tabla 20: Requisitos de calidad de la fibra celulosa

Prueba	Requisito
Análisis de tamaño:	
Longitud de la fibra	6 mm (0.25 in) máximo valor medio
Espesor	0.005 mm (0.0002 in) máximo valor medio
Contenido perdido:	
Pasa el tamiz de 0.250 mm (N°60)	90±5 por ciento
Pasa el tamiz de 0.063 mm (N°230)	70±10 por ciento

Fuente: Diseño y construcción de pavimentos tipo Stone Mastic Asphalt en México (Barrera, 2008)
Elaborado por: Autor

6. Todo el material y el asfalto se lleva al horno hasta que alcance la temperatura de 145°C. Alcanzada la temperatura del asfalto y de los materiales pétreos, se procede a mezclar.
7. El material mezclado se lo coloca en el molde Marshall y se compacta por cada cara 50 golpes, se deja enfriar y se desmolda a través de una prensa hidráulica.
8. A las briquetas se las somete al ensayo del método Marshall, con los resultados obtenidos se realiza los gráficos: % de asfalto vs vacíos, % de asfalto vs estabilidad, % de asfalto vs flujo, % de asfalto vs densidad Bulk, % de asfalto vs VAM y % de asfalto vs Relación bitumen Vacíos.

9. De las gráficas se obtiene el porcentaje de asfalto óptimo de 6.0%, en el siguiente cuadro se resumen los resultados obtenidos y que cumplen con la norma:

Tabla 21: Resultados de Mezcla asfáltica SMA 11 con porcentaje de asfalto óptimo de 6.0 %

PROPIEDADES	VALOR OBTENIDO	EXIGENCIAS
% ASFALTO	6.00%	N.E.
ESTABILIDAD	1900 Lbs	> 1800 Lbs
FLUJO	12.25 1"/100	8 - 14 pulg/100
PESO UNITARIO	2322 gr/cm3	N.E.
VACÍOS EN MEZCLA	4.50%	3 - 5%
VACÍOS AGREGADO MINERAL	14.30%	> 14%
RELACIÓN FILLER/BETÚN	1.16	0.80 - 1.20
RELACIÓN BITUMEN VACÍOS	75%	65 - 75%

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio
Elaborado: Autor

Tabla 22: Resultados de Mezcla asfáltica SMA 16 con porcentaje de asfalto óptimo de 6.0 %

PROPIEDADES	VALOR OBTENIDO	EXIGENCIAS
% ASFALTO	6.00%	N.E.
ESTABILIDAD	1980 Lbs	> 1800 Lbs
FLUJO	13.0 1"/100	8 - 14 pulg/100
PESO UNITARIO	2326 gr/cm3	N.E.
VACÍOS EN MEZCLA	4.50%	3 - 5%
VACÍOS AGREGADO MINERAL	14.50%	> 14%
RELACIÓN FILLER/BETÚN	1.09	0.80 - 1.20
RELACIÓN BITUMEN VACÍOS	75%	65 - 75%

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio
Elaborado: Autor

10. Con los porcentajes de materiales y de asfalto óptimo de 6% para el SMA 11 y SMA 16 se realizan briquetas cilíndricas y 4 briquetas cuadradas de 20 x 20 cm para cada mezcla, las que servirán para someterlas a los ensayos de comparación que se mencionan posteriormente.

Ilustración 17: Briquetas SMA 11 y SMA 16 con asfalto óptimo
Fuente: Briquetas obtenidas en el laboratorio
Elaborado por: Autor

Tabla 23: Diseño de mezclas asfálticas para obtener el % óptimo de la mezcla SMA 11

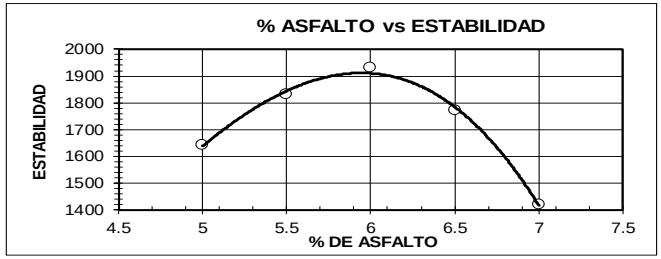
PROYECTO: TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL
FAJA DE TRABAJO: 1/2" SMA 11
GRADO DE CEMENTO ASFALTICO: AC-20
GOLPES: 50
FECHA: 8-02-2015

CONTROL DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN LABORATORIO

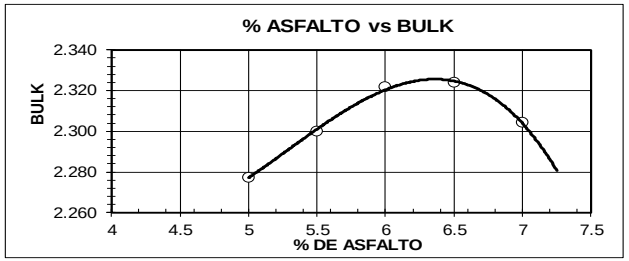
MATERIALES					MEZCLA ASFÁLTICA										% EN VOLUMEN						ESTABILIDAD (lbs)				
AGREGADOS	% AGREGADOS	% DOSIFICACIÓN	PESO ESPECIFICO AGREGADOS (gr)	PESO ESPECÍFICO 25/25°C ASFALTO	MUESTRA	P. Aire Seco (gr)	P. Aire S.S.S. (gr)	P. agua (gr)	VOLUMEN (cm³)	PESO ESPECÍFICO BULK (gr/cm³)	PESO ESPECÍFICO MÁXIMO TEÓRICO (gr/cm³)	PESO ESPECÍFICO MÁXIMO MEDIDO (gr/cm³)		% ASFALTO ABSORBIDO	AGREGADOS	VACÍOS CON AIRE	C. A. AFECTIVO	% VACÍOS EN AGREGADOS MINERALES	% ASFALTO EFECTIVO EN LA MEZCLA	% RELACIÓN BITUMEN VACÍOS	FACTOR DE CORRECCIÓN	LECTURA (kN)	LECTURA (lbs)	CORREGIDA	FLUJO 0.01"
					1	985. 30	992. 84	558. 29	434. 55	2. 267		W m	525. 47								1. 32	5. 55	1245	1643	11
1/ 2"	69. 00	65. 55	2. 599		2	899. 64	906. 61	512. 68	393. 93	2. 284		W f +a	1248. 26								1. 56	4. 62	1036	1616	11
Ar ena Tr t	16. 00	15. 20	2. 546		3	882. 15	886. 26	499. 45	386. 81	2. 281		W f +a+r	1557. 48								1. 67	4. 45	998	1667	11
Fi l l er	15. 00	14. 25	2. 332																						
C. A.		5. 00		1. 016	4							RICE													
TOTAL	100	100	2. 547		PROMEDIO					2. 277	2. 368	2. 430		1. 126	84. 95	6. 28	8. 77	15. 05	3. 93	64. 08				1642	11
					1	1121. 49	1126. 88	636. 86	490. 02	2. 289		W m	519. 46								1. 09	7. 38	1655	1804	12
1/ 2"	69. 00	65. 2	2. 599		2	1046. 90	1048. 31	593. 60	454. 71	2. 302		W f +a	1248. 26								1. 32	6. 26	1404	1853	12
Ar ena Tr t	16. 00	15. 1	2. 546		3	1038. 78	1039. 95	590. 12	449. 83	2. 309		W f +a+r	1554. 91								1. 32	6. 20	1390	1835	12
Fi l l er	15. 00	14. 2	2. 332																						
C. A.		5. 50		1. 016	4							RICE													
TOTAL	100	100	2. 547		PROMEDIO					2. 300	2. 352	2. 441		1. 642	85. 35	5. 77	8. 88	14. 65	3. 95	68. 33				1831	12
					1	966. 89	968. 47	550. 56	417. 91	2. 314		W m	503. 29								1. 47	5. 89	1321	1942	12
1/ 2"	69. 00	64. 86	2. 599		2	1032. 05	1034. 50	591. 15	443. 35	2. 328		W f +a	1247. 03								1. 32	6. 46	1449	1912	12
Ar ena Tr t	16. 00	15. 04	2. 546		3	953. 03	955. 26	545. 11	410. 15	2. 324		W f +a+r	1543. 50								1. 47	5. 88	1319	1938	12
Fi l l er	15. 00	14. 10	2. 332																						
C. A.		6. 00		1. 016	4							RICE													
TOTAL	100	100	2. 547		PROMEDIO					2. 322	2. 336	2. 433		1. 831	85. 69	4. 59	9. 71	14. 31	4. 28	74. 91				1931	12
					1	1109. 02	1110. 11	629. 60	480. 51	2. 308		W m	502. 65								1. 14	6. 91	1550	1767	13
1/ 2"	69. 00	64. 52	2. 599		2	1082. 59	1082. 94	618. 20	464. 74	2. 329		W f +a	1247. 03								1. 19	6. 62	1485	1767	13
Ar ena Tr t	16. 00	14. 96	2. 546		3	1118. 45	1119. 09	639. 87	479. 22	2. 334		W f +a+r	1538. 68								1. 14	6. 96	1561	1779	13
Fi l l er	15. 00	14. 03	2. 332																						
C. A.		6. 50		1. 016								RICE													
TOTAL	100	100	2. 547		PROMEDIO					2. 324	2. 320	2. 382		1. 212	85. 31	2. 45	12. 23	14. 69	5. 37	85. 84				1771	13
					1	1092. 92	1093. 58	620. 55	473. 03	2. 310		W m	502. 69								1. 14	5. 50	1233	1406	14
1/ 2"	69. 00	64. 17	2. 599		2	1126. 02	1126. 99	639. 99	487. 00	2. 312		W f +a	1247. 03								1. 09	5. 89	1321	1440	14
Ar ena Tr t	16. 00	14. 88	2. 546		3	1129. 92	1131. 49	638. 01	493. 48	2. 290		W f +a+r	1536. 57								1. 09	5. 78	1296	1413	14
Fi l l er	15. 00	13. 95	2. 332																						
C. A.		7. 00		1. 016								RICE													
TOTAL	100	100	2. 547		PROMEDIO					2. 304	2. 304	2. 358		1. 080	84. 14	2. 30	13. 56	15. 86	6. 00	87. 34				1420	14

PROYECTO: TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL
FAJA DE TRABAJO: 1/2" SMA 11
GRADO DE CEMENTO ASFALTICO: AC-20
GOLPES: 50
FECHA: 8-02-2015

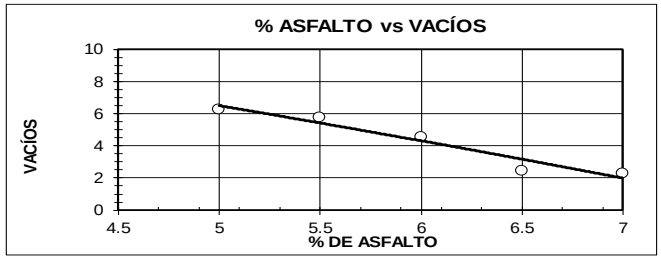
TENDENCIA	
ASF.	ESTAB.
5	1641. 9
5. 5	1830. 8
6	1930. 8
6. 5	1770. 9
7. 00	1420



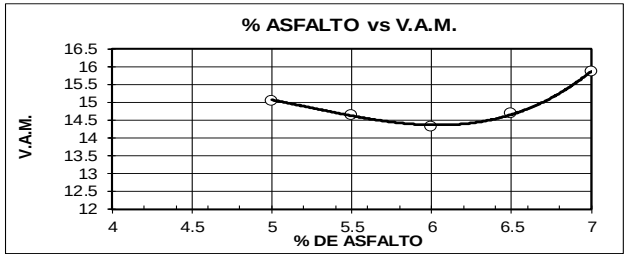
TENDENCIA	
ASF.	BULK
5	2. 277
5. 5	2. 300
6	2. 322
6. 5	2. 324
7	2. 304



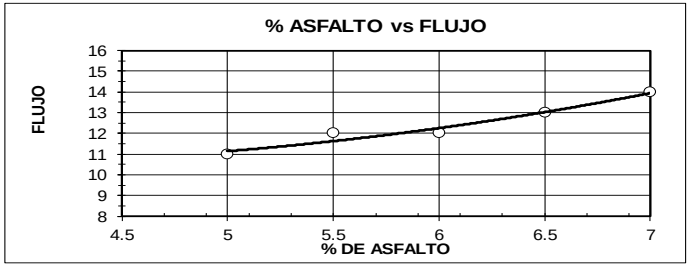
TENDENCIA	
ASF.	VACÍOS
5	6. 2831
5. 5	5. 7708
6	4. 5931
6. 5	2. 4533
7	2. 30



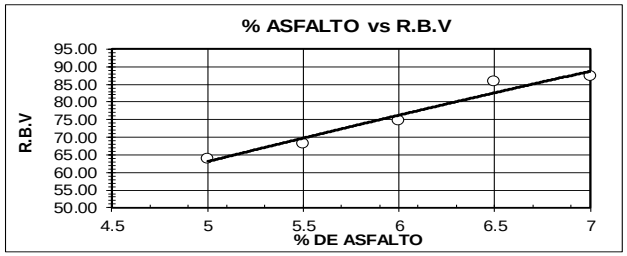
TENDENCIA	
ASF.	V. A. M
5	15. 05
5. 5	14. 65
6	14. 31
6. 5	14. 69
7	15. 86



TENDENCIA	
ASF.	FLUJO
5	11
5. 5	12
6	12
6. 5	13. 00
7	14. 00



TENDENCIA	
ASF.	V. A. M
5	64. 08
5. 5	68. 33
6	74. 91
6. 5	85. 84
7	87. 34



RESUMEN :

PORCENTAJE OPTIMO	6.00 %
ESTABILIDAD	1,900 lb
FLUENCIA	12.25 1/100
DENSIDAD	2.322 gr/cm3

REQUERIMIENTOS

5.75 %	6.25 %
>	1,800 lb
8.0 1/100	14 1/100

RESUMEN :

VACÍOS CON AIRE	4.50 %
VACÍOS DE AGREGADO MINERAL	14.30 %
RELACIÓN BITUMEN VACÍOS	75.00 %
PESO ESPECIFICO MÁXIMO TEÓRICO	2.336 gr/cm3

REQUERIMIENTOS

3 %	5 %
>	14 %
65 %	75 %

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio
Elaborado: Autor

Tabla 24: Diseño de mezclas asfálticas para obtener el % óptimo de la mezcla SMA 16

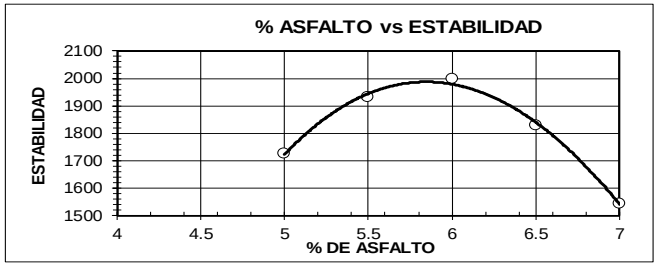
PROYECTO: TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRIA DE INGENIERIA VIAL
FAJA DE TRABAJO: 3/4" SMA 16
GRADO DE CEMENTO ASFALTICO: AC-20
GOLPES: 50
FECHA: 8-02-2015

CONTROL DE LA MEZCLA ASFALTICA EN LABORATORIO

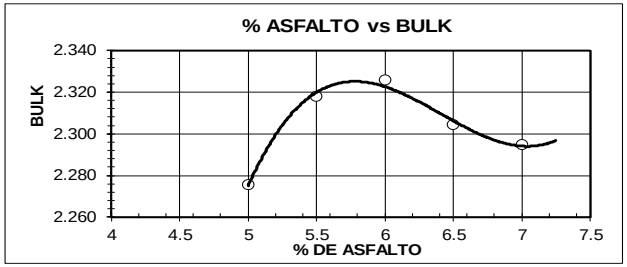
MATERIALES					MEZCLA ASFALTICA										% EN VOLUMEN						ESTABILIDAD (lbs)				
AGREGADOS	% AGREGADOS	% DOSIFICACIÓN	PESO ESPECIFICO AGREGADOS (gr)	PESO ESPECÍFICO 25/25°C ASFALTO	MUESTRA	P. Aire Seco (gr)	P. Aire S.S.S. (gr)	P. agua (gr)	VOLUMEN (cm³)	PESO ESPECÍFICO BULK (gr/cm³)	PESO ESPECÍFICO MÁXIMO TEÓRICO (gr/cm³)	PESO ESPECÍFICO MÁXIMO MEDIDO (gr/cm³)		% ASFALTO ABSORBIDO	AGREGADOS	VACIOS CON AIRE	C. A. AFECTIVO	% VACIOS EN AGREGADOS MINERALES	% ASFALTO EFECTIVO EN LA MEZCLA	% RELACIÓN BITUMEN VACIOS	FACTOR DE CORRECCIÓN	LECTURA (kN)	LECTURA (lbs)	CORREGIDA	FLUJO 0.01"
3/ 4"	38. 00	36. 10	2. 603		1	1021. 84	1023. 75	576. 22	447. 53	2. 283		W m	580. 77								1. 32	5. 89	1321	1744	11
1/ 2"	32. 00	30. 40	2. 599		2	1018. 14	1019. 97	570. 12	449. 85	2. 263		W f +a	1248. 26								1. 32	5. 66	1269	1675	11
Ar ena Tr t	17. 00	16. 15	2. 546		3	1002. 63	1008. 25	568. 37	439. 88	2. 279		W f +a+m	1592. 52								1. 32	5. 95	1334	1761	11
Fi l l er	13. 00	12. 35	2. 332																						
C. A.		5. 00		1. 016	4							RICE													
TOTAL	100	100	2. 553		**PROMEDIO**					2. 275	2. 374	2. 456		1. 476	84. 65	7. 34	8. 01	15. 35	3. 60	60. 40				1727	11
3/ 4"	38. 00	35. 9	2. 603		1	1045. 20	1046. 06	595. 31	450. 75	2. 319		W m	514. 94								1. 32	6. 63	1487	1963	12
1/ 2"	32. 00	30. 2	2. 599		2	1104. 88	1106. 40	630. 09	476. 31	2. 320		W f +a	1248. 26								1. 14	7. 56	1695	1933	12
Ar ena Tr t	17. 00	16. 1	2. 546		3	1147. 99	1148. 84	653. 01	495. 83	2. 315		W f +a+m	1552. 62								1. 09	7. 78	1745	1902	12
Fi l l er	13. 00	12. 3	2. 332																						
C. A.		5. 50		1. 016	4							RICE													
TOTAL	100	100	2. 553		**PROMEDIO**					2. 318	2. 357	2. 445		1. 617	85. 78	5. 21	9. 01	14. 22	3. 97	70. 66				1932	12
3/ 4"	38. 00	35. 72	2. 603		1	1069. 15	1069. 80	610. 35	459. 45	2. 327		W m	509. 99								1. 19	7. 39	1657	1972	13
1/ 2"	32. 00	30. 08	2. 599		2	1125. 83	1127. 86	643. 50	484. 36	2. 324		W f +a	1248. 26								1. 09	7. 98	1790	1951	13
Ar ena Tr t	17. 00	15. 98	2. 546		3	1050. 59	1052. 11	600. 27	451. 84	2. 325		W f +a+m	1548. 62								1. 32	6. 99	1568	2069	13
Fi l l er	13. 00	12. 22	2. 332																						
C. A.		6. 00		1. 016	4							RICE													
TOTAL	100	100	2. 553		**PROMEDIO**					2. 326	2. 341	2. 433		1. 717	85. 61	4. 41	9. 98	14. 39	4. 39	75. 69				1997	13
3/ 4"	38. 00	35. 53	2. 603		1	1076. 09	1077. 34	612. 12	465. 22	2. 313		W m	508. 47								1. 19	6. 81	1527	1817	14
1/ 2"	32. 00	29. 92	2. 599		2	998. 51	999. 45	566. 32	433. 13	2. 305		W f +a	1248. 26								1. 32	6. 21	1393	1838	14
Ar ena Tr t	17. 00	15. 90	2. 546		3	1073. 66	1075. 76	607. 81	467. 95	2. 294		W f +a+m	1544. 84								1. 19	6. 85	1536	1828	14
Fi l l er	13. 00	12. 16	2. 332																						
C. A.		6. 50		1. 016								RICE													
TOTAL	100	100	2. 553		**PROMEDIO**					2. 304	2. 325	2. 400		1. 436	84. 38	3. 98	11. 65	15. 62	5. 16	78. 76				1828	14
3/ 4"	38. 00	35. 34	2. 603		1	1009. 38	1009. 55	570. 23	439. 32	2. 298		W m	524. 64								1. 32	5. 35	1200	1584	15
1/ 2"	32. 00	29. 76	2. 599		2	888. 88	889. 88	500. 87	389. 01	2. 285		W f +a	1248. 26								1. 67	4. 06	910	1521	15
Ar ena Tr t	17. 00	15. 81	2. 546		3	1041. 53	1042. 54	589. 91	452. 63	2. 301		W f +a+m	1553. 47								1. 32	5. 17	1159	1530	15
Fi l l er	13. 00	12. 09	2. 332																						
C. A.		7. 00		1. 016								RICE													
TOTAL	100	100	2. 553		**PROMEDIO**					2. 295	2. 309	2. 391		1. 598	83. 57	4. 03	12. 40	16. 43	5. 51	79. 68				1545	15

FAJA DE TRABAJO: 3/4" INSTITUTO DEL ASFALTO
GRADO DE CEMENTO ASFALTICO: AC-20
GOLPES: 50
FECHA: 8-02-2015

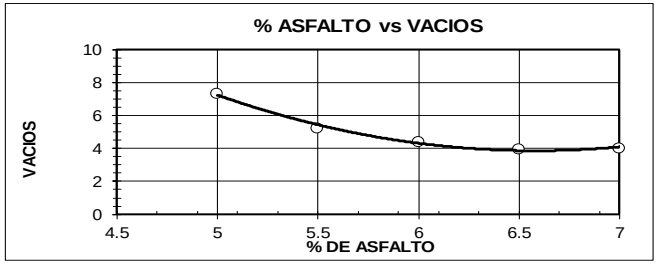
TENDENCI A	
ASF.	ESTAB.
5	1726. 8
5. 5	1932. 4
6	1997. 4
6. 5	1827. 9
7. 00	1545



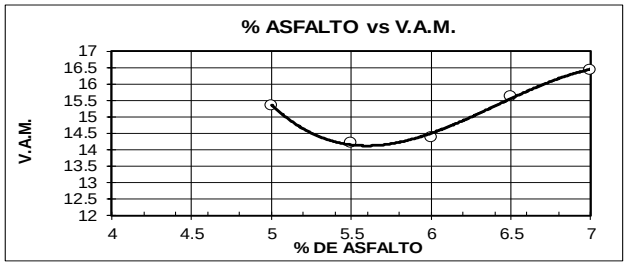
TENDENCI A	
ASF.	BULK
5	2. 275
5. 5	2. 318
6	2. 326
6. 5	2. 304
7	2. 295



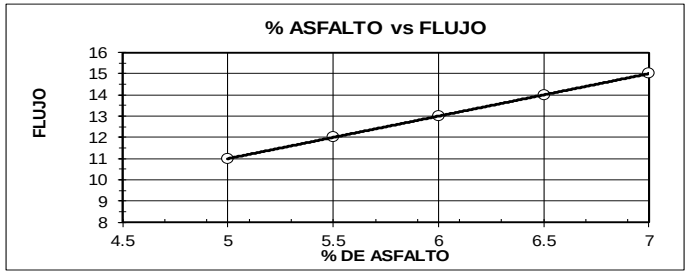
TENDENCI A	
ASF.	VACI OS
5	7. 3417
5. 5	5. 2108
6	4. 4106
6. 5	3. 9764
7	4. 03



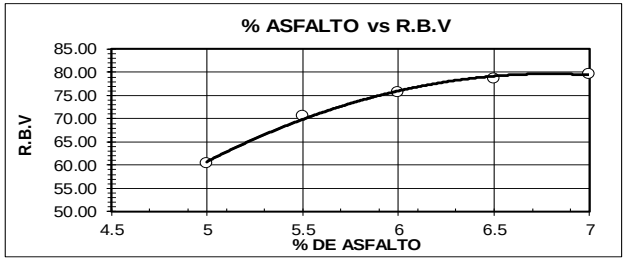
TENDENCI A	
ASF.	V. A. M
5	15. 35
5. 5	14. 22
6	14. 39
6. 5	15. 62
7	16. 43



TENDENCI A	
ASF.	FLUJO
5	11
5. 5	12
6	13
6. 5	14. 00
7	15. 00



TENDENCI A	
ASF.	V. A. M
5	60. 40
5. 5	70. 66
6	75. 69
6. 5	78. 76
7	79. 68



RESUMEN :

		REQUERIMIENTOS	
PORCENTAJE OPTIMO	6.00 %	5.75 %	6.25 %
ESTABILIDAD	1,980 lb	>	1,800 lb
FLUENCIA	13.00 1/100	8.0 1/100	14 1/100
DENSIDAD	2.326 gr/cm3		

RESUMEN :

		REQUERIMIENTOS	
VACIOS CON AIRE	4.50 %	3 %	5 %
VACIOS DE AGRAGADO MINERAL	14.50 %	>	14 %
RELACION BITUMEN VACIOS	75.00 %	65 %	75 %
PESO ESPECIFICO MAXIMO TEORICO	2.341 gr/cm3		

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio
Elaborado: Autor

CAPITULO 4

DATOS OBTENIDOS EN LABORATORIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ASTM D4123).

Tabla 25: Datos ensayo a la resistencia a la rotura por tracción indirecta

PROYECTO: TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL
OBRA: MEZCLA ASFÁLTICA
FAJA DE TRABAJO: INDICADAS
GRADO DE CEMENTO ASFALTICO: AC-20
MUESTRA: LABORATORIO
FECHA: 4/3/2017

$$St = \frac{2 * Pmáx}{\pi * t * d}$$

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA					
MEZCLA	ENSAYO	DIÁMETRO (mm)	ALTURA (mm)	CARGA (N)	RESISTENCIA A LA ROTURA POR TRACCIÓN INDIRECTA (N/mm²)
MCA	1	101.80	65.00	4,880	0.470
	2	101.60	64.00	4,640	0.454
	3	101.60	63.00	4,890	0.486
				Promedio	0.470
SMA 11	1	102.00	59.00	4,810	0.509
	2	102.00	60.40	5,650	0.584
	3	101.60	58.80	5,150	0.549
				Promedio	0.547
SMA16	1	101.80	57.10	4,830	0.529
	2	102.00	59.00	5,100	0.540
	3	102.00	60.50	5,480	0.565
				Promedio	0.545

Fuente: Datos de laboratorio
Elaborado por: Autor

De acuerdo a los resultados obtenidos las mezclas SMA presentan una mayor resistencia a la rotura por tracción indirecta.

4.2 Ensayo de estabilidad y flujo Marshall (ASTM D6927-06).

En el anexo 2 se detallan los resultados de los ensayos realizados a las mezclas convencionales, SAM 11 y SMA 16, el resumen consta en la tabla 26:

Tabla 26: Resultados del Ensayo de Estabilidad y flujo Marshall

ESTABILIDAD Y FLUJO					
EQUIPO	MARSHALL	ESTABILIDAD (lb)		FLUJO 0.01"	
Briqueta	TIPO DE MUESTRA	RESULTADO	PROMEDIO	RESULTADO	PROMEDIO
1	CONVENCIONAL	2044	2036	12	12
2	CONVENCIONAL	2025		12	
3	CONVENCIONAL	2039		12	
1	SMA 11	1912	1904	13	13
2	SMA 11	1937		13	
3	SMA 11	1861		13	
1	SMA 16	1903	1927	13	13
2	SMA 16	1924		13	
3	SMA 16	1953		13	

Fuente: Datos de laboratorio
Elaborado por: Autor

De los resultados obtenidos se verifica que en las mezclas SMA con fibras celulósicas de yute el flujo es mayor comparadas a las mezclas convencionales, lo que permite concluir que las mezclas SMA son más trabajables en el momento de su colocación en las vías.

De acuerdo al resultado presentado en la tabla 26, la mezcla convencional presenta un flujo menor y una mayor estabilidad en comparación con las mezclas SMA, por lo que permite concluir que las mezclas convencionales son más frágiles y rígidas en comparación que las mezclas SMA.

4.3 Ensayo a Compresión Edométrica.

En el anexo 3 se detallan los resultados de los ensayos a Compresión Edométrica realizados a las mezclas convencionales, SAM 11 y SMA 16, el resumen consta en la siguiente tabla:

Tabla 27: Resultados de Módulo dinámico en mezclas convencionales y SMA

PROYETO: TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL
OBRA: MEZCLA ASAFÁLTICA
LOCALIZACIÓN: MINA CATAMAYITO

RESUMEN Frecuencia = 2.7 Hz $\varepsilon(\%) = \frac{\Delta h}{h} \times 100$

0°c	E* = P / e (kg/cm2)	PROMEDIO E* (kg/cm2)	**60°c**	**E* = P / e (kg/cm2)**	PROMEDIO E* (kg/cm2)
MCA	818.71 833.33	826.02	**MCA**	395.83 420.42	408.13
SMA 11	410.13 363.70	386.91	**SMA 11**	584.29 496.63	540.46
SMA 16	413.58 391.55	402.56	**SMA 16**	593.75 694.76	644.26

Fuente: Datos de laboratorio
Elaborado por: Autor

Ilustración 18: Equipo multiuso (CBR) utilizado para ensayo a Compresión Edométrica
Fuente: Laboratorio
Elaborado por: Autor

Las mezclas SMA demuestran mayor capacidad que las mezclas convencionales ya que tienen un módulo dinámico mayor; es decir, tienen un mayor grado de resistencia a la compresión respecto a las mezclas convencionales.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el módulo dinámico disminuye cuando aumenta la temperatura en las mezclas asfálticas.

4.4 Ensayo Resistencia al Deslizamiento (NLT-175/88).

Tabla 28: Resultados del coeficiente de resistencia al deslizamiento

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO					
EQUIPO	PÉNDULO BRITÁNICO		ENSAYO EN PLACAS DE LABORATORIO		
Briqueta	TIPO DE MUESTRA	TEMP. AGUA	MEDIDAS	PROMEDIO	RESULTADO
1	CONVENCIONAL	21°C	60	0.60	0.60
			59		
			59		
			60		
2	CONVENCIONAL	21°C	60	0.61	
			61		
			61		
			61		
3	CONVENCIONAL	21°C	61	0.60	
			59		
			60		
			61		
1	SMA 11	21°C	65	0.66	0.63
			65		
			66		
			66		
2	SMA 11	21°C	61	0.61	
			62		
			60		
			61		
3	SMA 11	21°C	62	0.62	
			61		
			63		
			62		
1	SMA 16	21°C	70	0.69	0.68
			68		
			68		
			69		
2	SMA 16	21°C	66	0.68	
			68		
			69		
			68		
3	SMA 16	21°C	69	0.68	
			66		
			70		
			68		

Fuente: Datos de pruebas de laboratorio
Elaborado por: Autor

Ilustración 19: Equipo Péndulo Británico
Fuente: Equipo en Laboratorio
Elaborado por: Autor

Con los datos obtenidos en el laboratorio y de acuerdo al valor del coeficiente de resistencia al deslizamiento CRD que se describió en la tabla 3, se tiene que la superficie de la mezcla convencional adquiere una calificación de “regular a bueno” porque se obtuvo con el péndulo británico un valor de fricción en la superficie de 0.60; y, que las superficies de las mezclas SMA 11 y SMA 16 adquieren una calificación de “Bueno” porque se obtuvo con el péndulo Británico un valor de fricción en la superficie de 0.63 y 0.68 respectivamente. Esto significa que las mezclas SMA tienen más alto nivel de resistencia al deslizamiento; es decir, tienen una superficie más rugosa que permite una mayor adherencia en el contacto entre neumático y pavimento asfáltico.

4.5 Ensayo Gravedad Específica Bulk de Mezclas Compactadas (ASTM D1188).

En el anexo 2 se detallan los resultados de los ensayos de Gravedad específica Bulk de mezclas compactadas realizados a las mezclas convencionales, SAM 11 y SMA 16, el resumen consta en la siguiente tabla:

Tabla 29: Resultados del ensayo Gravedad específica Bulk

GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK			
EQUIPO	MARSHALL	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK (gr/cm3)	
Briqueta	TIPO DE MUESTRA	RESULTADO (gr/cm3)	PROMEDIO (gr/cm3)
1	CONVENCIONAL	2382	2380
2	CONVENCIONAL	2383	
3	CONVENCIONAL	2376	
1	SMA 11	2315	2319
2	SMA 11	2325	
3	SMA 11	2317	
1	SMA 16	2337	2327
2	SMA 16	2308	
3	SMA 16	2336	

Fuente: Datos de pruebas de laboratorio
Elaborado por: Autor

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que las mezclas convencionales son más densas que las mezclas SMA.

4.6 Ensayo Gravedad Específica Máxima RICE (ASTM D2041).

En el anexo 2 se detallan los resultados de los ensayos de Gravedad específica máxima RICE realizados a las mezclas convencionales, SAM 11 y SMA 16, el resumen consta en la siguiente tabla:

Tabla 30: Resultados del ensayo Gravedad específica máxima RICE

GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA RICE		
EQUIPO	MARSHALL	GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA RICE (gr/cm3)
Briqueta	TIPO DE MUESTRA	RESULTADO
1	CONVENCIONAL	2412
1	SMA 11	2433
1	SMA 16	2428

Fuente: Datos de pruebas de laboratorio
Elaborado por: Autor

De acuerdo a los resultados obtenidos en laboratorio se determina que al estar conformadas las mezclas SMA por una mayor cantidad de partículas gruesas presentan una mayor gravedad específica máxima RICE en comparación con la mezcla convencional.

CONCLUSIONES

En el desarrollo de la presente investigación y de conformidad a la norma UNE EN 13108-5, para la elaboración de mezclas tipo Stone Mastic Asphalt (SMA) se utilizó arena triturada con la finalidad de obtener una mejor interrelación friccional de las partículas, lo cual no se logra con las arenas cribadas.

Con los resultados del ensayo por tracción indirecta obtenidos en el laboratorio se demuestra que las mezclas SMA presentan 16.38% de resistencia a la rotura mayor en comparación con las mezclas convencionales, esto permite concluir que las mezclas SMA se van a deteriorar menos debido al paso de las cargas a las que van a ser sometidas.

Como resultado de los ensayos practicados en laboratorio con el Péndulo Británico se concluye que una mezcla SMA arroja resultados de fricción en la superficie de 0.63 en mezclas SMA 11 y de 0.68 en mezclas SMA 16, indicando que está dentro de una calificación “Bueno” de conformidad a lo señalado en la “Tabla de criterios para evaluar los valores de fricción en la superficie del pavimento”, lo que significa que este tipo de mezclas tienen más alto nivel de resistencia al deslizamiento respecto a las mezclas convencionales; es decir, tienen una superficie más rugosa que permite una mayor adherencia en el contacto entre neumático y pavimento asfáltico.

De conformidad a los resultados de los ensayos de Compresión Edométrica se puede observar que una mezcla SMA 11 tienen un porcentaje de 32.42%; y, que la mezcla SMA 16 tiene un porcentaje de 57.86%, lo que demuestra que este tipo de mezclas presentan mayor capacidad que las mezclas convencionales ya que tienen un módulo dinámico mayor; es decir, tienen un mayor grado de resistencia a la compresión respecto a las mezclas convencionales.

En la construcción de obras viales es necesario realizar un análisis de costos para determinar su conveniencia de aplicación. Luego de haber realizado un análisis de costos entre mezclas SMA y convencionales se determina que las mezclas SMA son un 10.16% más costosas que las mezclas convencionales, este costo a largo plazo es más conveniente ya que las mezclas SMA al ser más durables necesitan menos recursos de inversión para su mantenimiento, produciendo rentabilidad económica en el tiempo.

RECOMENDACIONES

Al tener mejor durabilidad las mezclas asfálticas SMA en comparación que las mezclas convencionales, se recomienda su uso; por lo que para poder aplicarlas en las vías de la red vial del Ecuador es necesario que las instituciones normalicen el diseño de mezclas asfálticas SMA.

Luego de haber obtenido resultados favorables con las mezclas SMA utilizando materiales de la provincia de Loja, se recomienda introducir estas mezclas en nuestro país con la finalidad de cambiar los métodos de diseño convencionales a métodos de diseño basados en el desempeño, con la finalidad de tener vías que no exijan gastos demasiado costosos en el mantenimiento.

Luego de que se obtuvo resultados que cumplen con el objetivo propuesto, se recomienda que para obtener una mezcla asfáltica SMA se utilice materiales de buena calidad ya que con esto se mejoraría la rigidez, durabilidad, flexibilidad, etc., de las mezclas.

Con los porcentajes de materiales obtenidos en el laboratorio para la realización de mezclas SMA se recomienda realizar un tramo de prueba, con la finalidad de evaluar su comportamiento efectivo.

Se recomienda realizar más ensayos de diseño de mezclas asfálticas SMA con otros materiales de la provincia de Loja con la finalidad de obtener resultados que garanticen su uso en las carreteras de la Red Vial Estatal del Ecuador.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM. (1993). 81673063-ASTM-D-1559-Resistance-to-Plastic-Flow-of-Bituminous-Mixtures-Using-Marshall-Apparatus.pdf.

Barrera, C. (2008). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS TIPO STONE MASTIC ASPHALT EN MÉXICO. Retrieved from http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2146/barreracervantes.pdf?sequence=1

Bindu, C. S., & Beena, K. S. (2015). Influence of natural fibers on the compressive strength of Stone Matrix Asphalt mixtures, (6), 445–449. Retrieved from http://ijseas.com/volume1/v1i6/ijseas20150647.pdf

Botasso, G. (2004). Caracterización del asfalto para la mezcla. Retrieved from http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_627_180_496_5010.pdf

Brown, E. R., & Mallick, R. B. (1995). Evaluation of Stone-on-Stone Contact in Stone-Matrix Asphalt. Retrieved from http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1492/1492-023.pdf

Brown, E. R., Mallick, R. B., Haddock, J. E., & Bukowski, J. (1997). PERFORMANCE OF STONE MATRIX ASPHALT (SMA) MIXTURES IN THE UNITED, (97). Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/E_Brown3/publication/267420115_Performance_of_stone_matrix_asphalt_SMA_mixtures_in_the_United_States/links/5554a88208ae6fd2d8217598.pdf

BURGOS, B. (2014). ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UN PAVIMENTO RÍGIDO Y UN PAVIMENTO FLEXIBLE PARA LA RUTA S/R : SANTA ELVIRA–EL ARENAL , EN LA COMUNA DE VALDIVIA ". Retrieved from http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfcib957a/doc/bmfcib957a.pdf

Colares, A., Barbosa, J., & Dal, M. (2007). APLICABILIDADE DE FIBRAS DE COCO EM MISTURAS ASFÁLTICAS TIPO SMA, *1*, 1–10.

Costa, A., Loma, J., Hidalgo, M. E., Pérez, F., & Botella Nieto, R. (2014). Mezclas SMA (Stone Mastic Asphalt), sostenibles y medioambientalmente amigables, 1–14. Retrieved from http://www.asefma.es/wp-content/uploads/2014/06/08.-Mezclas-SMA-v1.pdf

E-ASPHALT. (2014). Stone Mastic Asphalt (SMA). Retrieved from http://www.e-asphalt.com/sma/index.htm

EL-Diario. (2015). Costales de Yute. Retrieved from http://www.eldiario.ec/noticias-manabi-ecuador/368307-costales-de-yute/

Gallart, F. (2011). Evaluación en laboratorio de la durabilidad de mezclas bituminosas tipo SMA, 1–59.

Garnica, P., Gómez, J., & Delgado, H. (2003). Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio, (228). Retrieved from http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt254.pdf

Gite, B., & Soyal, M. (2013). Stone Mastic Asphalt, 1–8.

Grillo, S. (2012). Metodología para el diseño y caracterización de mezclas bituminosas tipo SMA. Retrieved from https://core.ac.uk/download/pdf/41807352.pdf

Haddock, J. E., & Lynn, T. A. (1997). DEVELOPMENT OF A MIXTURE DESIGN PROCEDURE FOR STONE MATRIX ASPHALT (SMA), (97). Retrieved from http://ntl.bts.gov/lib/3000/3900/3903/rep97-3.pdf

Kong, H., & Zelanda, N. (2016). Mezclas SMA : Retrieved from http://www.surfax.com.mx/new_site/admin/descargas/Mezclas-SMA.pdf

Lanchas, S. (2012). Las mezclas SMA normalizadas en Europa , con experiencias en diferentes aplicaciones en el mundo, 33–42. Retrieved from http://www.asefma.es/modules/mastop_publish/files/files_50dc3a537f4f8.pdf

Lanchas, S., & Núñez, R. (2013). FIBRAS DE CELULOSA ADITIVADAS PARA MEZCLAS TIPO SMA CON PROPIEDADES MEJORADAS, 1–12. Retrieved from http://www.proyectosma.eu/modules/mastop_publish/files/files_5232d2905a737.pdf

Laura, I., Castro, R., Rica, U. D. C., Universitaria, C., Facio, R., Pedro, S., … Rica, C. (2005). Mezclas de matriz de agregado grueso, 1–16. Retrieved from http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/autores/fabian/2005-fabian-03.pdf

Loma, Y. J., & Rubio, B. (2013). MEZCLAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT) CON ALTO CONTENIDO, 1–13. Retrieved from http://www.proyectosma.eu/modules/mastop_publish/files/files_5232d26fd35fd.pdf

López, D., & Garnica, P. (2002). Consideraciones para la aplicación del índice de fricción internacional en carreteras de México, (170). Retrieved from http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt170.pdf

MOP. (2002). ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y PUENTES MOP - 001-F 2002. Retrieved from http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf

Morales, X. (2009). TÉCNICO LABORATORISTA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Myers, N. (2007). Stone Matrix Asphalt The Washington Experience. Retrieved from courses.washington.edu/cee500/SMA_final_version.doc

Narwal, A. (2016). Analysis of results on bituminous mixes using natural fibers, *4*(6), 217–221. Retrieved from https://www.ijaresm.com/uploaded_files/document_file/Anuj_Narwal_4wuMc.pdf

Norma-NLT-175/88. (n.d.). Coeficiente_Resistencia_al_deslizamiento_D175_88.pdf. Norma. Retrieved from http://www.carreteros.org/normativa/otros/nlt/pdfs/negras/1988/175_88.pdf

NTE-INEN 2515. (2014). *Ecuatoriana Nte Inen 2515*. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*.

Paawan Kumar , P.K. Sikdar, S. B. & S. C. (2011). Use of Jute Fiber in Stone Matrix Asphalt. Retrieved from http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14680629.2004.9689971

Paredes, E. (2009). COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS MEZCLAS TIPO SMA (STONE MASTIC ASPHALT), 1–265. Retrieved from https://www.google.com.ec/webhp?ie=utf-8&oe=utf-8&gws_rd=cr&ei=9SVSVu6zAoTNeuanqIAB#q=COMPORTAMIENTO+MECANICO+DE+LAS+MEZCLAS+TIPO+SMA+(STONE+MASTIC++ASPHALT)

Prowell, B. D., & Hurley, G. C. (2010). EVALUATION OF STONE MATRIX ASPHALT (SMA) FOR AIRFIELD PAVEMENTS, (April 2010). Retrieved from http://www.airtech.tc.faa.gov/ATT2010/Pavements/Session6a/Prowell-Evaluation of SMA for Airfield Pavements.pdf

Salgado, B., & Momm, L. (2009). Mezclas Asfálticas Evaluación de características físicas y químicas de los rellenos minerales de piedra caliza y polvo de piedra en la formulación de los morteros asfálticos, 34–45. Retrieved from http://www.kerwa.ucr.ac.cr:8080/bitstream/handle/10669/13583/1732-2669-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sánchez, F. (2013). TRAMO DE ENSAYO A ESCALA REAL CON MEZCLAS, 1–14. Retrieved from http://www.proyectosma.eu/modules/mastop_publish/files/files_5232d0a92ab31.pdf

SÁNCHEZ, M. (2014). *INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN EN EL MÓDULO DINÁMICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN LA CARRETERA PERICOS-SAN IGNACIO- CAJAMARCA*. Retrieved from http://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/502/T 625.8 S211 2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Segovia, A. (2014). Predicción de las deformaciones plásticas permanentes de mezclas asfálticas en caliente , correlacionando determinaciones de rigidez del ligante y ensayos dinámicos de carga. Retrieved from https://www.google.com.ec/search?sclient=psy-ab&site=webhp&source=hp&btnG=Buscar&q=Predicción+de+las+deformaciones+plásticas+permanentes+de+mezclas+asfálticas+en+caliente%2C+correlacionando+determinaciones+de+rigidez+del+ligante+y+ensayos+dinámicos+de+carga

Suchismita, A. (2009). A STUDY OF EFFECTS OF BINDER QUALITY AND NATURAL FIBER ON STONE MATRIX ASPHALT A STUDY OF EFFECTS OF BINDER QUALITY AND NATURAL. Retrieved from http://ethesis.nitrkl.ac.in/2806/1/Thesis-607CE002.pdf

Tashman, L., & Pearson, B. (2012). Characterisation of stone matrix asphalt mixtures, (October). https://doi.org/10.1080/10298436.2011.595793

Villar, E. G. (1965). El ensayo de tracción indirecta, 5–14.

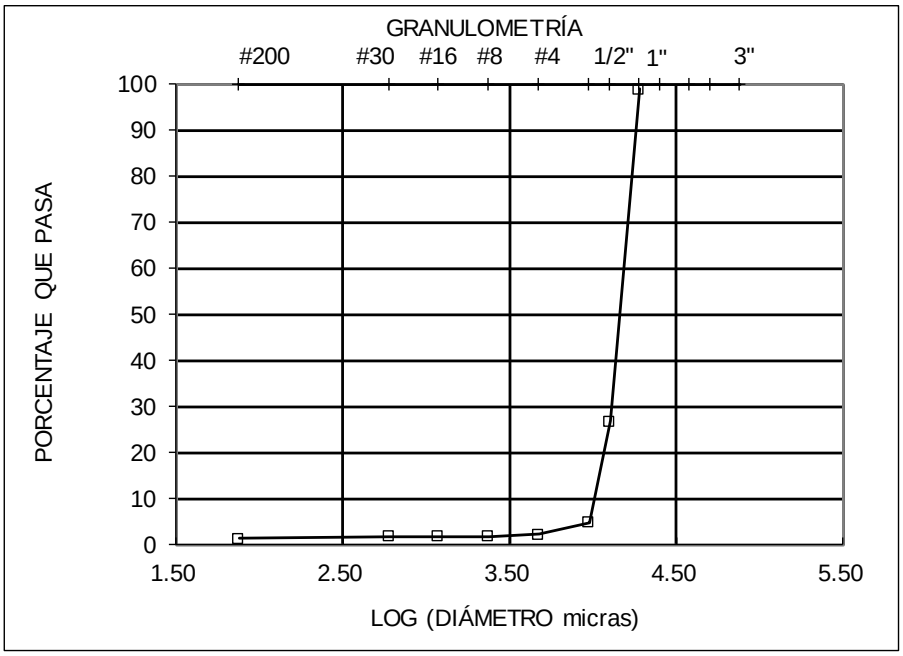
Zúñiga, R., & Aguila, M. (2012). ESTUDIO Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA MEZCLA STONE MASTIC ASPHALT (SMA) MEDIANTE UN TRAMO DE PRUEBA, 1–15. Retrieved from http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/Documents/investigacion/inv10_StoneMasticAsphalt.pdf

ANEXOS

ANEXO 1:

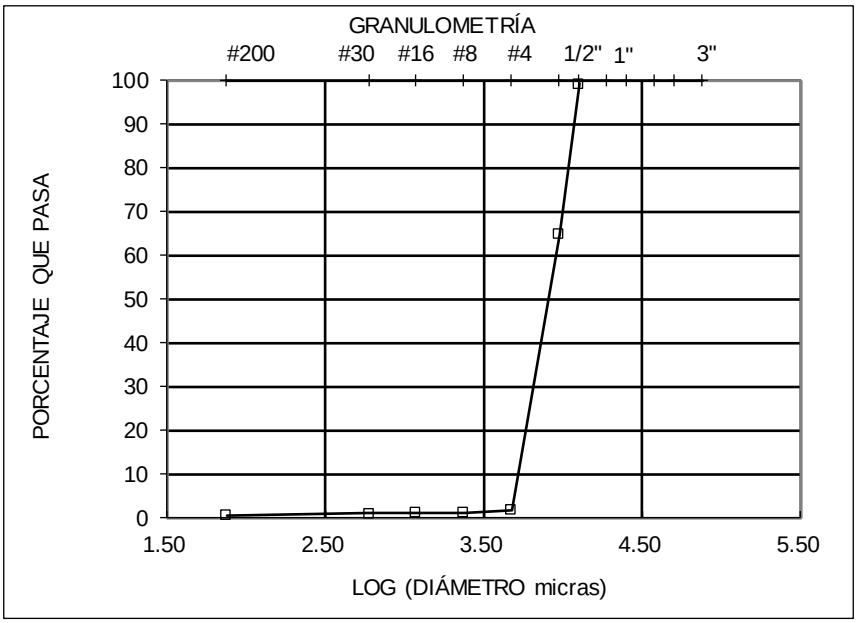
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

PROY. :	TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL					
OBRA :	MEZCLA ASFÁLTICA					
UBIC. :	MINA CATAMAYITO		MUESTRA:	´**3/4**¨		
FECHA :	DICIEMBRE-2016		OPERADOR	E.B.R.	PROFUND.: STOCK	
MATERIAL:	**3/4"**		LÍMITE LÍQUIDO:		0.00	
PESO IN.:	3,485.00		LÍMITE PLÁSTICO		0.00	
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET.AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	41.04	41.04	1.18	98.82	98.82	1.18
1/2	2,512.77	2,553.81	73.28	26.72	26.72	73.28
3/8	763.72	3,317.53	95.19	4.81	4.81	95.19
# 4	89.14	3,406.67	97.75	2.25	2.25	97.75
PASA # 4	78.33	78.33	2.25			
SUMAN	3,485	3,485	100.00			
PESO HUM=	78.3	w% =	0.00	P.SECO=	78	
# 8	15.81	15.81	20.18	79.82	1.79	98.21
# 16	1.53	17.34	22.14	77.86	1.75	98.25
# 30	1.03	18.37	23.45	76.55	1.72	98.28
# 50	1.60	19.97	25.49	74.51	1.67	98.33
# 100	3.95	23.92	30.54	69.46	1.56	98.44
# 200	10.91	34.83	44.47	55.53	1.25	98.75
PASA #200	43.50	43.50	55.53			
SUMAN	78.33	78.33	100.00			



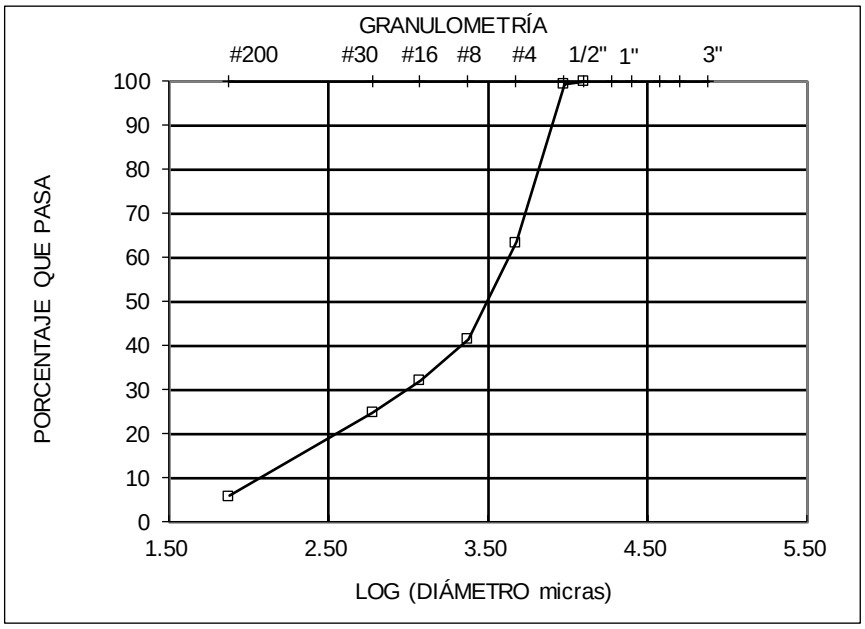
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

PROY. :	TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL					
OBRA :	MEZCLA ASFÁLTICA					
UBIC. :	MINA CATAMAYITO		MUESTRA:	´**1/2**¨		
FECHA :	DICIEMBRE-2016		OPERADOR	E.B.R.	PROFUND.: STOCK	
MATERIAL:	**1/2"**		LÍMITE LIQUIDO:		0.00	
PESO IN.:	6,095.00		LÍMITE PLÁSTICO		0.00	
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET.AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1/2	49.30	49.30	0.81	99.19	99.19	0.81
3/8	2,100.92	2,150.22	35.28	64.72	64.72	35.28
# 4	3,838.59	5,988.81	98.26	1.74	1.74	98.26
PASA # 4	106.19	106.19	1.74			
SUMAN	6,095	6,095	100.00			
PESO HUM=	106.2	w% =	0.00	P.SECO=	106	
# 8	34.63	34.63	32.61	67.39	1.17	98.83
# 16	6.11	40.74	38.37	61.63	1.07	98.93
# 30	2.39	43.13	40.62	59.38	1.03	98.97
# 50	2.57	45.70	43.04	56.96	0.99	99.01
# 100	8.08	53.78	50.65	49.35	0.86	99.14
# 200	15.49	69.27	65.23	34.77	0.61	99.39
PASA #200	36.92	36.92	34.77			
SUMAN	106.19	106.19	100.00			



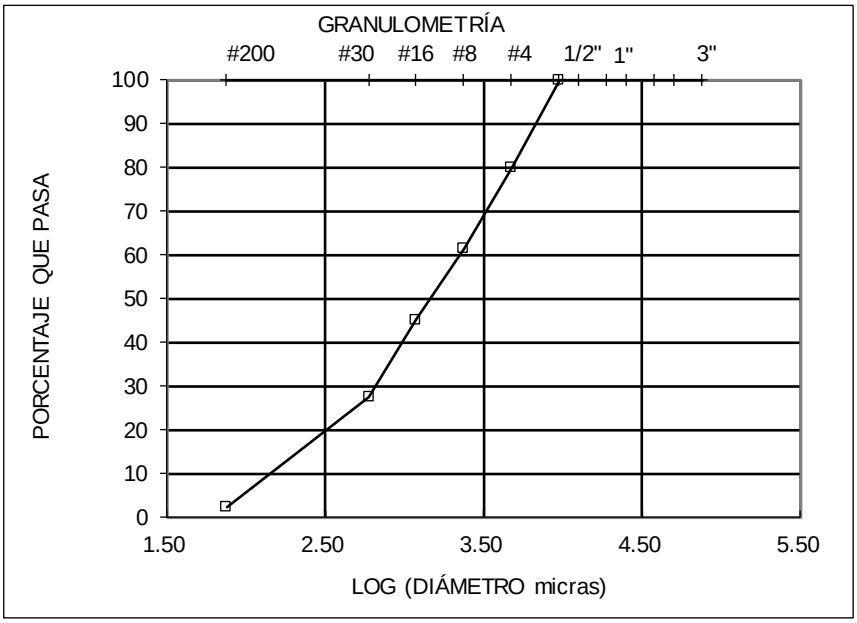
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

PROY. :	TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL					
OBRA :	MEZCLA ASFÁLTICA					
UBIC. :	MINA CATAMAYITO		MUESTRA:	**ARENA TRITURADA**		
FECHA :	DICIEMBRE-2016		OPERADOR	E.B.R.	PROFUND.:	STOCK
MATERIAL:	**ARENA**		LÍMITE LÍQUIDO:		0.00	
PESO IN.:	4,930.00		LÍMITE PLÁSTICO		0.00	
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET.AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1/2	2.40	2.40	0.05	99.95	99.95	0.05
3/8	28.07	30.47	0.62	99.38	99.38	0.62
# 4	1,773.38	1,803.85	36.59	63.41	63.41	36.59
PASA # 4	3,126.15	3,126.15	63.41			
SUMAN	4,930	4,930	100.00			
PESO HUM=	3126.2	w% =	0.00	P.SECO=	3126	
# 8	1080.22	1080.22	34.55	65.45	41.50	58.50
# 16	466.61	1546.83	49.48	50.52	32.03	67.97
# 30	355.34	1902.17	60.85	39.15	24.83	75.17
# 50	403.82	2305.99	73.76	26.24	16.64	83.36
# 100	314.19	2620.18	83.81	16.19	10.26	89.74
# 200	214.72	2834.90	90.68	9.32	5.91	94.09
PASA #200	291.25	291.25	9.32			
SUMAN	3126.15	3126.15	100.00			



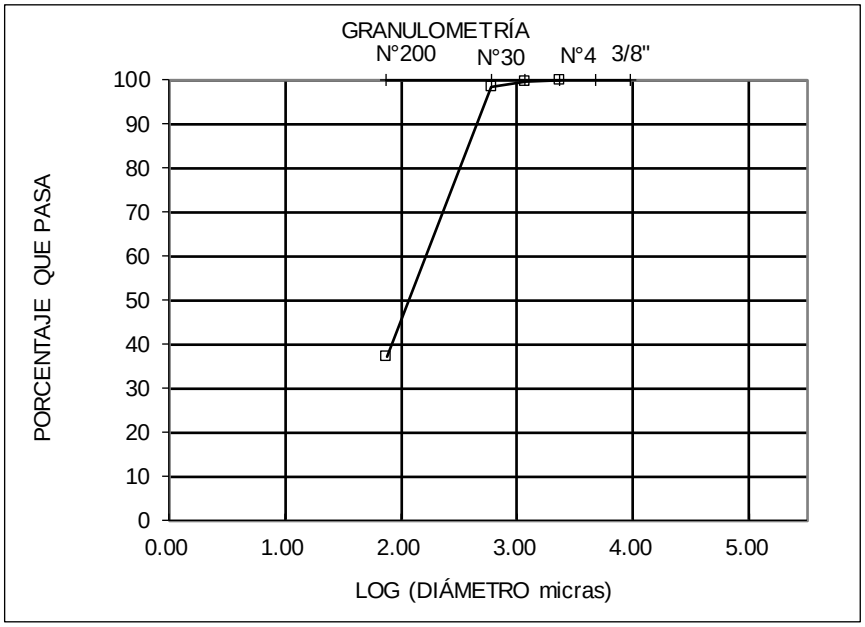
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

PROY. :	TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL					
OBRA :	MEZCLA ASFÁLTICA					
UBIC. :	MINA CATAMAYITO		MUESTRA:	**ARENA LAVADA**		
FECHA :	DICIEMBRE-2016		OPERADOR	E.B.R.	PROFUND.:	STOCK
MATERIAL:	ARENA		LÍMITE LÍQUIDO:		0.00	
PESO IN.:	4,075.00		LÍMITE PLÁSTICO		0.00	
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET.AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/8	2.94	2.94	0.07	99.93	99.93	0.07
# 4	814.40	817.34	20.06	79.94	79.94	20.06
PASA # 4	3,257.66	3,257.66	79.94			
SUMAN	4,075	4,075	100.00			
PESO HUM=	3257.7	w% =	0.00	P.SECO=	3258	
# 8	755.45	755.45	23.19	76.81	61.40	38.60
# 16	661.33	1416.78	43.49	56.51	45.17	54.83
# 30	717.94	2134.72	65.53	34.47	27.56	72.44
# 50	561.13	2695.85	82.75	17.25	13.79	86.21
# 100	326.40	3022.25	92.77	7.23	5.78	94.22
# 200	138.85	3161.10	97.04	2.96	2.37	97.63
PASA #200	96.56	96.56	2.96			
SUMAN	3257.66	3257.66	100.00			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

PROY. :	TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL					
OBRA :	MEZCLA ASFÁLTICA					
UBIC. :	MINA CATAMAYITO		MUESTRA:	**FILLER**		
FECHA :	DICIEMBRE-2016		OPERADOR	E.B.R.	PROFUND.:	STOCK
MATERIAL:	FILLER		LÍMITE LÍQUIDO:		0.00	
PESO IN.:	270.31		LÍMITE PLÁSTICO		0.00	
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MASA RET. ACUMULADA	% RET.	% PASA	% PASA CORREG.	% RET.AC
3	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
1/2	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
3/8	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
# 4	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00
PASA # 4	270.31	270.31	100.00			
SUMAN	270	270	100.00			
PESO HUM=	270.3	w% =	0.00	P.SECO=	270	
# 8	0.24	0.24	0.09	99.91	99.91	0.09
# 16	0.84	1.08	0.40	99.60	99.60	0.40
# 30	3.21	4.29	1.59	98.41	98.41	1.59
# 50	11.91	16.20	5.99	94.01	94.01	5.99
# 100	38.85	55.05	20.37	79.63	79.63	20.37
# 200	114.69	169.74	62.79	37.21	37.21	62.79
PASA #200	100.57	100.57	37.21			
SUMAN	270.31	270.31	100.00			



PESO ESPECÍFICO DE AGREGADOS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA		
LOCALZ.:	MINA CATAMAYITO	MUESTRA :	**ARENA TRIT. Y 3/4"**
FECHA:	DICIEMBRE-2016		

MUESTRA: **Agregado triturado Arena triturada y 3/4"**

PESO ESPECÍFICO AGREGADO ARENA TRITURADA

NORMA DE ENSAYO: ASTM C-128

DATOS:		
PESO PICNÓMETRO MAS AGUA:	1298.66	gr
PESO PICNÓMETRO:	476.65	gr
VOLUMEN PICNÓMETRO:	822.01	cc
PESO TOTAL:	1602.31	gr
PESO SUELO SECO:	481.88	gr
DENSIDAD MASIVA:	2.454	gr/cm3
DENSIDAD SSS:	2.546	gr/cm3
DENSIDAD APARENTE:	2.704	gr/cm3
ABSORCIÓN:	3.76%	

PESO ESPECÍFICO AGREGADO 3/4"

NORMA DE ENSAYO: ASTM C-127

DATOS:		
PESO EN EL AIRE:	3905.00	gr
PESO SUMERGIDO:	2405.00	gr
PESO SECO:	3850.00	gr
DENSIDAD MASIVA:	2.567	gr/cm3
DENSIDAD SSS:	2.603	gr/cm3
DENSIDAD APARENTE:	2.664	gr/cm3
ABSORCIÓN:	1.43%	

PESO ESPECÍFICO DE AGREGADOS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA		
LOCALZ.:	MINA CATAMAYITO	MUESTRA:	**Arena Lav. Y 1/2"**
FECHA:	DICIEMBRE-2016		

MUESTRA: **Arena Lavada y 1/2" Grueso Triturado**

PESO ESPECÍFICO AGREGADO ARENA LAVADA

NORMA DE ENSAYO: ASTM C-128

DATOS:		
PESO PICNÓMETRO MAS AGUA:	1247.05	gr
PESO PICNÓMETRO:	444.58	gr
VOLUMEN PICNÓMETRO:	802.47	cc
PESO TOTAL:	1553.54	gr
PESO SUELO SECO:	486.12	gr
DENSIDAD MASIVA:	2.51	gr/cm^3
DENSIDAD SSS:	2.584	gr/cm^3
DENSIDAD APARENTE:	2.71	gr/cm^3
ABSORCIÓN:	2.86%	

PESO ESPECÍFICO AGREGADO GRUESO 1/2"

NORMA DE ENSAYO: ASTM C-127

DATOS:		
PESO EN EL AIRE:	3560.00	gr
PESO SUMERGIDO:	2190.00	gr
PESO SECO:	3505.00	gr
DENSIDAD MASIVA:	2.56	gr/cm^3
DENSIDAD SSS:	2.599	gr/cm^3
DENSIDAD APARENTE:	2.67	gr/cm^3
ABSORCIÓN:	1.57%	

PESO ESPECÍFICO DE AGREGADOS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA		
LOCALZ.:	MINA CATAMAYITO	MUESTRA:	**FILLER**
FECHA:	DICIEMBRE-2016		

MUESTRA: FILLER

PESO ESPECÍFICO AGREGADO FINO **FILLER**

NORMA DE ENSAYO: ASTM C-128

DATOS:		
PESO PICNÓMETRO MAS AGUA:	1248.21	gr
PESO PICNÓMETRO:	445.60	gr
VOLUMEN PICNÓMETRO:	802.61	cc
PESO TOTAL:	1533.77	gr
PESO SUELO SECO:	455.05	gr
DENSIDAD MASIVA:	2.12	gr/cm³
DENSIDAD SSS:	2.332	gr/cm³
DENSIDAD APARENTE:	2.68	gr/cm³
ABSORCIÓN:	9.88%	

PROYECTO:	TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA	MUESTRA:	**MINA CATAMAYITO**
UBICACIÓN:	**CATAMAYO**	PROF:	STOCK
FECHA:	DICIEMBRE/2016	OPERADOR:	E.B.R.

ENSAYO DE ABRASIÓN MÉTODO A

TAMIZ PASA	TAMIZ RET.	MASA IN.	MASA FINAL	%
1 1/2"	**1"**	1,250.34		
1"	**3/4"**	1,251.35		
3/4"	**1/2"**	1,250.71		
1/2"	**3/8"**	1,251.06		
SUMA		**5,003.46**	**3,605.00**	**27.95%**
ESPECIF.:		**40.00%**	CUMPLE	**SI**

Número de esferas:	11	Masa carga abrasiva	4,420.00 gr.
Porcentaje de Abrasión:			**27.95 %**

Valor de abrasión en % $V = (A - B)/Ax100$	Desgaste a la Abrasión Máximo Porcentaje 40%

ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE PARTÍCULAS ALARGADAS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA		
LOCALZ.:	CATAMAYO	MUESTRA :	**MEZCLA FAJA 3/4"**
FECHA:	DICIEMBRE-2016	PROFUND.:	STOCK
		OPERADOR:	E.B.R.
		NORMA ASTM D 4791	

PORCENTAJE DE PARTÍCULAS ALARGADAS

TAMIZ RET.	MASA GR.	MASA DE PARTÍCULAS ALARGADAS	% PARTÍCULAS ALARGADAS
2"	0.00	0.00	-
1 1/2"	0.00	0.00	-
1"	0.00	0.00	-
3/4"	5000.00	312.62	6.25%
1/2"	2000.00	161.43	8.07%
3/8"	1000.30	84.90	8.49%
SUMA=	8000.30	558.95	6.99%
ESPECIF.:	**10.00%**	CUMPLE	**SI**

PORCENTAJE DE FINOS EN ARENAS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA		
LOCALZ.:	CATAMAYO	MUESTRA:	**MEZCLA FAJA 3/4"**
FECHA:	DICIEMBRE-2016		

MUESTRA: TRITURADO

NORMA : ASTM D-2419

EXP. No.	LECTURA ARENA	LECTURA ARCILLA	E. A PARCIAL
	cc.	cc.	%
1	265	295	89.8
2	260	285	91.2
3	255	280	91.1
4			
VALOR MEDIO:			**90.7**
ESPECIF.:	**50.00%**	CUMPLE	**SI**

PORCENTAJE DE FINOS: **9.3** %

SERIE GRUESA

FRACCIÓN	TAMIZ		GRADACIÓN DE LA MUESTRA ORIGINAL	MASA ANTES DEL ENSAYO			MASA DESPUÉS DEL ENSAYO		PÉRDIDA	PÉRDIDA COMPENSADA	ACCIÓN				
											DESINTE-GRACIÓN	HENDI-MIENTO	DESMENU-ZAMIENTO	AGRIETA-MIENTO	DESCA-MACIÓN
	Pasante	Retenido	(%)	Parcial (g)	Total (g)	Número	Tamices	Peso Ret. (g)	(%)	(%)					
1	90mm (3")	63mm (2 1/2")	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	63mm (2 1/2")	50mm (2")	-		-	-	31,5mm (1 1/4")	-	-	-	-	-	-	-	-
	50mm (2")	37,5mm (1 1/2")													
3	37,5mm (1 1/2")	25mm (1")	6.8		-	-	16mm (5/8")	-	1.4	0.1	-	-	-	-	-
	25mm (1")	19mm (3/4")													
4	19mm (3/4")	12,5 mm(1/2")	39.2	670.3	1002.28	-	8mm (5/16")	988.69	1.4	0.5	-	-	-	-	-
	12,5 mm(1/2")	9.5mm (3/8")		332.0											
5	9.5mm (3/8")	4,75mm (Nº4)	54.0	300.1	300.07	-	4mm (Nº5)	294.43	1.9	1.0	-	-	-	-	-
TOTAL			100.0							**1.6**					

SERIE FINA

FRACCIÓN	TAMIZ		GRADACIÓN DE LA MUESTRA ORIGINAL (%)	MASA ANTES DEL ENSAYO (g)	MASA DESP. DEL ENSAYO (g)	PÉRDIDA (%)	PÉRDIDA COMPENSADA (%)	OBSERVACIONES
	Pasante	Retenido						
1	9,5mm (3/8")	4,75mm (Nº4)						
2	4,75mm (Nº4)	2,36mm (Nº8)	49.4	100.09	98.71	1.4	0.7	
3	2,36mm (Nº8)	1,18mm (Nº16)	26.1	100.05	99.19	0.9	0.2	
4	1,18mm (Nº16)	,600mm (Nº30)	14.7	100.07	96.13	3.9	0.6	
5	,600mm (Nº30)	300mm (Nº50)	9.8	100.01	95.93	4.1	0.4	
TOTAL			100.0				**1.9**	

ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE DELETÉREOS

PROYEC:	**TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL**		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA		
LOCALZ.:	CATAMAYO	MUESTRA :	**MEZCLA FAJA 3/4"**
FECHA:	DICIEMBRE-2016	PROFUND.:	STOCK
		OPERADOR:	E.B.R.
		NORMA ASTM C 142	

DELETÉREOS AGREGADO GRUESO

TAMIZ RET.	MASA IN.	MASA MUESTRA LAVADA	% DELETÉREOS
1 1/2"	0.00	0.00	-
3/4"	0.00	0.00	-
3/8"	2000.68	8.83	0.44%
Nº 4	1000.48	7.00	0.70%
SUMA=	3001.16	15.83	0.53%
ESPECIF.:	**1.00%**	CUMPLE	**SI**

DELETÉREOS AGREGADO FINO

TAMIZ RET.	MASA IN.	MASA MUESTRA LAVADA	% DELETÉREOS
#16	25.00	0.21	0.84%
ESPECIF.:	**1.00%**	CUMPLE	**SI**

ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE CARAS FRACTURADAS

PROYEC:	TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL		
OBRA:	MEZCLA ASFÁLTICA		
LOCALZ.:	CATAMAYO	MUESTRA :	**MEZCLA FAJA 3/4"**
FECHA:	DICIEMBRE-2016	PROFUND.:	STOCK
		OPERADOR:	E.B.R.
		NORMA ASTM D5821	

CARAS FRACTURADAS

TAMAYO MÁXIMO NOMINAL	3/4"
PESO DE LA MUESTRA	1501.93
TAMIZ RETENIDO	1/2"
PESO MÍNIMO 1 CARA FRACTURADA	1469.03
PESO MÍNIMO 2 CARAS FRACTURADAS	1425.02
PESO PARTÍCULAS CUESTIONABLES	25.63
% MÍNIMO 1 CARA FRACTURADA	98.66%
ESPECIF.	**85%**
CUMPLE	**SI**
% MÍNIMO 2 CARA FRACTURADA	95.73%
ESPECIF.	**80 %**
CUMPLE	**SI**

ANEXO 2:

Mezcla asfáltica en caliente

PROYECTO: **TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL**
FAJA DE TRABAJO: 3/4" INSTITUTO DEL ASFALTO
GRADO DE CEMENTO ASFALTICO: AC-20
GOLPES: 75
FECHA: 12/12/2016

MATERIALES					MEZCLA ASFÁLTICA									ESTABILIDAD				
AGREGADOS	% AGREGADOS	% DOSIFICACIÓN	PESO ESPECÍFICO AGREGADOS (gr)	PESO ESPECÍFICO 25/25°C ASFALTO	MUESTRA	P. Aire Seco (gr)	P. Aire S.S.S. (gr)	P. agua (gr)	VOLUMEN (cm³)	PESO ESPECÍFICO BULK (gr/cm³)	PESO ESPECÍFICO MÁXIMO TEÓRICO (gr/cm³)	PESO ESPECÍFICO MÁXIMO MEDIDO (gr/cm³)		FACTOR DE CORRECCIÓN	LECTURA (kN)	LECTURA (lbs)	CORREGIDA	FLUJO 0.01"
3/4"	22.00	20.74	2.603		1	1111.12	1112.24	645.73	466.51	2.382		W. m.	500.04	1.19	7.66	1718	2044	12
1/2"	25.00	23.56	2.599		2	1234.09	1235.31	717.35	517.96	2.383		W. f+a	1248.56	1.00	9.03	2025	2025	12
Arena Trt	12.00	11.31	2.546		3	1023.35	1023.05	592.35	430.70	2.376		W. f+a+m	1541.32	1.39	6.54	1467	2039	12
Arena Lav	34.00	32.05	2.548		4													
Filler	7.00	6.60	2.332															
Asfalto		5.75		1.016								RICE						
Total	100.00	100.00	2.556	1.016	PROMEDIO					2.380	2.360	2.412					2036	12

RESUMEN :		REQUERIMIENTOS	
PORCENTAJE ÓPTIMO	5.75 %	5.75 %	6.25 %
ESTABILIDAD	2,036 lb	>	1,800 lb
FLUENCIA	12 1/100	8.0 1/100	14 1/100
DENSIDAD	2.38 gr/cm3		

RESUMEN :		REQUERIMIENTOS	
VACÍOS CON AIRE	4.40 %	3 %	5 %
VACÍOS DE AGREGADO MINERAL	18.20 %	>	14 %
RELACIÓN BITUMEN VACÍOS	75.00 %	65 %	75 %
PESO ESPECÍFICO MÁXIMO TEÓRICO	2.36 gr/cm3		

Mezcla bituminosa asfáltica SMA 11

PROYECTO: **TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL**
FAJA DE TRABAJO: **1/2" SMA 11**
GRADO DE CEMENTO ASFALTICO: AC-20
GOLPES: 50
FECHA: 12/12/2016

MATERIALES					MEZCLA ASFÁLTICA									ESTABILIDAD				
AGREGADOS	% AGREGADOS	% DOSIFICACIÓN	PESO ESPECÍFICO AGREGADOS (gr)	PESO ESPECÍFICO 25/25°C ASFALTO	MUESTRA	P. Aire Seco (gr)	P. Aire S.S.S. (gr)	P. agua (gr)	VOLUMEN (cm³)	PESO ESPECÍFICO BULK (gr/cm³)	PESO ESPECÍFICO MÁXIMO TEÓRICO (gr/cm³)	PESO ESPECÍFICO MÁXIMO MEDIDO (gr/cm³)		FACTOR DE CORRECCIÓN	LECTURA (kN)	LECTURA (lbs)	CORREGIDA	FLUJO 0.01"
3/4"	0.00	0.00	2.603		1	1109.95	1111.90	632.39	479.51	2.315		W. m.	500.02	1.14	7.48	1677	1912	13
1/2"	69.00	64.86	2.599		2	1083.70	1085.99	619.79	466.20	2.325		W. f+a	1248.56	1.19	7.26	1628	1937	13
Arena Trt	16.00	15.04	2.546		3	1091.56	1094.63	623.53	471.10	2.317		W. f+a+m	1543.03	1.14	7.28	1633	1861	13
Filler	15.00	14.10	2.332															
Asfalto		6.00		1.016								RICE						
Total	100.00	100.00	2.547	1.016	PROMEDIO					2.319	2.336	2.433					1904	13

RESUMEN :		REQUERIMIENTOS	
PORCENTAJE ÓPTIMO	**6.00 %**	**5.75 %**	**6.25 %**
ESTABILIDAD	**1,904 lb**	**>**	**1,800 lb**
FLUENCIA	**13 1/100**	**8.0 1/100**	**14 1/100**
DENSIDAD	**2.319 gr/cm3**		

RESUMEN :		REQUERIMIENTOS	
VACÍOS CON AIRE	**4.50 %**	**3 %**	**5 %**
VACÍOS DE AGREGADO MINERAL	**14.30 %**	**>**	**14 %**
RELACIÓN BITUMEN VACÍOS	**75.00 %**	**65 %**	**75 %**
PESO ESPECIFICO MÁXIMO TEÓRICO	**2.327 gr/cm3**		

Mezcla bituminosa asfáltica SMA 16

PROYECTO:	**TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL**
FAJA DE TRABAJO:	**3/4" SMA 16**
GRADO DE CEMENTO ASFALTICO:	AC-20
GOLPES:	50
FECHA:	12/12/2016

MATERIALES					MEZCLA ASFÁLTICA									ESTABILIDAD				
AGREGADOS	**% AGREGADOS**	**% DOSIFICACIÓN**	**PESO ESPECÍFICO AGREGADOS (gr)**	**PESO ESPECÍFICO 25/25°C ASFALTO**	**MUESTRA**	**P. Aire Seco (gr)**	**P. Aire S.S.S. (gr)**	**P. agua (gr)**	**VOLUMEN (cm³)**	**PESO ESPECÍFICO BULK (gr/cm³)**	**PESO ESPECÍFICO MÁXIMO TEÓRICO (gr/cm³)**	**PESO ESPECÍFICO MÁXIMO MEDIDO (gr/cm³)**		**FACTOR DE CORRECCIÓN**	**LECTURA (kN)**	**LECTURA (lbs)**	**CORREGIDA**	**FLUJO 0.01"**
3/4"	38.00	35.72	2.603		1	1171.52	1172.52	671.32	501.20	2.337		W. m.	500.02	1.04	8.16	1830	1903	13
1/2"	32.00	30.08	2.599		2	1074.77	1076.68	610.92	465.76	2.308		W. f+a	1248.56	1.19	7.21	1617	1924	13
Arena Trt	17.00	15.98	2.546		3	1097.24	1099.34	629.60	469.74	2.336		W. f+a+m	1542.61	1.19	7.32	1642	1953	13
Filler	13.00	12.22	2.332															
Asfalto		6.00		1.016								**RICE**						
Total	100.00	100.00	2.553	1.016	**PROMEDIO**					2.327	2.341	2.428					1927	13

RESUMEN :		**REQUERIMIENTOS**	
PORCENTAJE ÓPTIMO	**6.00 %**	**5.75 %**	**6.25 %**
ESTABILIDAD	**1,927 lb**	**>**	**1,800 lb**
FLUENCIA	**13 1/100**	**8.0 1/100**	**14 1/100**
DENSIDAD	**2.327 gr/cm3**		

RESUMEN :		**REQUERIMIENTOS**	
VACÍOS CON AIRE	**4.50 %**	**3 %**	**5 %**
VACÍOS DE AGREGADO MINERAL	**14.39 %**	**>**	**14 %**
RELACIÓN BITUMEN VACÍOS	**75.00 %**	**65 %**	**75 %**
PESO ESPECIFICO MÁXIMO TEÓRICO	**2.327 gr/cm3**		

ANEXO 3:

PROYETO: TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL
OBRA: MEZCLA ASAFÁLTICA
LOCALIZACIÓN: MINA CATAMAYITO
FECHA: 1/3/2017

TIPO DE MUESTRA **MCA** Frecuencia = 2.7 Hz

$$\varepsilon\ (\%) = \frac{\Delta h}{h}\ x\ 100$$

Presión (kg/cm2)	**T°C ensayo**	Altura del molde (mm)	Altura libre menor (mm)	Altura libre mayor (mm)	altura de la muestra (mm)	**Deflexión Marshall (mm)**	**Deformación ε (%)**	**E* = P / ε (kg/cm2)**
0	**0°C**	87	11	19	57.00	0.000	0.0000	
10	**0°C**	87	11	19	57.00	1.332	0.0234	427.93
5	**0°C**	87	11	20	56.00	0.396	0.0071	707.07
5	**0°C**	87	11	20	56.00	0.432	0.0077	648.15
5	**0°C**	87	11	20	56.00	0.414	0.0074	676.33
5	**0°C**	87	11	20	56.00	0.432	0.0077	648.15
5	**0°C**	87	11	20	56.00	0.414	0.0074	676.33
5	**0°C**	87	11	20	56.00	0.378	0.0068	740.74
5	**0°C**	87	11	20	56.00	0.396	0.0071	707.07
5	**0°C**	87	11	20	56.00	0.378	0.0068	740.74
5	**0°C**	87	11	20	56.00	0.378	0.0068	740.74
5	**0°C**	87	11	20	56.00	0.342	0.0061	818.71
5	**0°C**	87	11	20	56.00	0.342	0.0061	818.71
5	**0°C**	87	11	20	56.00	0.342	0.0061	818.71

TIPO DE MUESTRA **MCA** Frecuencia = 2.7 Hz

$$\varepsilon\ (\%) = \frac{\Delta h}{h}\ x\ 100$$

Presión (kg/cm2)	**T°C ensayo**	Altura del molde (mm)	Altura libre menor (mm)	Altura libre mayor (mm)	altura de la muestra (mm)	**Deflexión Marshall (mm)**	**Deformación ε (%)**	**E* = P / ε (kg/cm2)**
0	**0°C**	88	11	13	64	0.000	0.0000	
10	**0°C**	88	11	13	64	0.936	1.4625	683.76
5	**0°C**	88	11	14	63	0.486	0.7714	648.15
5	**0°C**	88	11	14	63	0.450	0.7143	700.00
5	**0°C**	88	11	14	63	0.414	0.6571	760.87
5	**0°C**	88	11	14	63	0.438	0.6952	719.18
5	**0°C**	88	11	14	63	0.414	0.6571	760.87
5	**0°C**	88	11	14	63	0.382	0.6063	824.61
5	**0°C**	88	11	14	63	0.378	0.6000	833.33
5	**0°C**	88	11	14	63	0.382	0.6063	824.61
5	**0°C**	88	11	14	63	0.378	0.6000	833.33
5	**0°C**	88	11	14	63	0.378	0.6000	833.33
5	**0°C**	88	11	14	63	0.378	0.6000	833.33
5	**0°C**	88	11	14	63	0.378	0.6000	833.33

PROYETO: TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL
OBRA: MEZCLA ASAFÁLTICA
LOCALIZACIÓN: MINA CATAMAYITO
FECHA: 1/3/2017

TIPO DE MUESTRA **SMA 11** Frecuencia = 2.7 Hz

$$\varepsilon\ (\%) = \frac{\Delta h}{h}\ x\ 100$$

Presión (kg/cm2)	T°C ensayo	Altura del molde (mm)	Altura libre menor (mm)	Altura libre mayor (mm)	altura de la muestra (mm)	Deflexión Marshall (mm)	Deformación ε (%)	E* = P / ε (kg/cm2)
0	**0°C**	86.6	13	20.7	52.90	0.000	0.0000	
10	**0°C**	86.6	13	20.7	52.90	1.080	2.0416	489.81
5	**0°C**	86.6	13	24.6	49.00	0.756	1.5429	324.07
5	**0°C**	86.6	13	25.3	48.30	0.738	1.5280	327.24
5	**0°C**	86.6	13	24.5	49.10	0.666	1.3564	368.62
5	**0°C**	86.6	13	24.5	49.10	0.738	1.5031	332.66
5	**0°C**	86.6	13	24.5	49.10	0.720	1.4664	340.97
5	**0°C**	86.6	13	24.5	49.10	0.720	1.4664	340.97
5	**0°C**	86.6	13	24.4	49.20	0.738	1.5000	333.33
5	**0°C**	86.6	13	24.4	49.20	0.666	1.3537	369.37
5	**0°C**	86.6	13	24.4	49.20	0.648	1.3171	379.63
5	**0°C**	86.6	13	24.4	49.20	0.630	1.2805	390.48
5	**0°C**	86.6	13	24.4	49.20	0.612	1.2439	401.96
5	**0°C**	86.6	13	24.4	49.20	0.738	1.5000	333.33
5	**0°C**	86.6	13	23.4	50.20	0.612	1.2191	410.13
5	**0°C**	86.6	13	23.4	50.20	0.612	1.2191	410.13
5	**0°C**	86.6	13	23.4	50.20	0.612	1.2191	410.13

TIPO DE MUESTRA **SMA 11** Frecuencia = 2.70 Hz

$$\varepsilon\ (\%) = \frac{\Delta h}{h}\ x\ 100$$

Presión (kg/cm2)	T°C ensayo	Altura del molde (mm)	Altura libre menor (mm)	Altura libre mayor (mm)	altura de la muestra (mm)	Deflexión Marshall (mm)	Deformación ε (%)	E* = P / ε (kg/cm2)
0	**0°C**	87.2	13	16.9	57.3	0.000	0.0000	
10	**0°C**	87.2	13	16.9	57.3	0.936	1.6335	612.18
5	**0°C**	87.2	13	17.4	56.8	0.558	0.9824	508.96
5	**0°C**	87.2	13	17.4	56.8	0.522	0.9190	544.06
5	**0°C**	87.2	13	17.4	56.8	0.324	0.5704	876.54
5	**0°C**	87.2	13	17.4	56.8	0.486	0.8556	584.36
5	**0°C**	87.2	13	17.4	56.8	0.522	0.9190	544.06
5	**0°C**	87.2	13	17.4	56.8	0.598	1.0528	474.92
5	**0°C**	87.2	13	17.4	56.8	0.594	1.0458	478.11
5	**0°C**	87.2	13	17.4	56.8	0.684	1.2042	415.20
5	**0°C**	87.2	13	17.9	56.3	0.666	1.1829	422.67
5	**0°C**	87.2	13	17.9	56.3	0.792	1.4067	355.43
5	**0°C**	87.2	13	17.9	56.3	0.774	1.3748	363.70
5	**0°C**	87.2	13	17.9	56.3	0.774	1.3748	363.70
5	**0°C**	87.2	13	17.9	56.3	0.774	1.3748	363.70

PROYETO: TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL
OBRA: MEZCLA ASAFÁLTICA
LOCALIZACIÓN: MINA CATAMAYITO
FECHA: 1/3/2017

TIPO DE MUESTRA **SMA 16** Frecuencia = 2.7 Hz

$$\varepsilon\ (\%) = \frac{\Delta h}{h}\ x\ 100$$

Presión (kg/cm2)	T°C ensayo	Altura del molde (mm)	Altura libre menor (mm)	Altura libre mayor (mm)	altura de la muestra (mm)	Deflexión Marshall (mm)	Deformación ε (%)	E* = P / ε (kg/cm2)
0	0°C	88	13	20.4	54.6	0.000	0.0000	
10	0°C	88	13	20.4	54.6	1.080	1.9780	505.56
5	0°C	88	13	20.9	54.1	0.576	1.0647	469.62
5	0°C	88	13	20.9	54.1	0.630	1.1645	429.37
5	0°C	88	13	20.9	54.1	0.738	1.3641	366.53
5	0°C	88	13	21.4	53.6	0.756	1.4104	354.50
5	0°C	88	13	21.4	53.6	0.504	0.9403	531.75
5	0°C	88	13	21.4	53.6	0.432	0.8060	620.37
5	0°C	88	13	21.4	53.6	0.702	1.3097	381.77
5	0°C	88	13	21.4	53.6	0.684	1.2761	391.81
5	0°C	88	13	21.4	53.6	0.936	1.7463	286.32
5	0°C	88	13	21.4	53.6	0.648	1.2090	413.58
5	0°C	88	13	21.4	53.6	0.648	1.2090	413.58
5	0°C	88	13	21.4	53.6	0.648	1.2090	413.58

TIPO DE MUESTRA **SMA 16** Frecuencia = 2.7 Hz

$$\varepsilon\ (\%) = \frac{\Delta h}{h}\ x\ 100$$

Presión (kg/cm2)	T°C ensayo	Altura del molde (mm)	Altura libre menor (mm)	Altura libre mayor (mm)	altura de la muestra (mm)	Deflexión Marshall (mm)	Deformación ε (%)	E* = P / ε (kg/cm2)
0	0°C	87	13	18.4	55.6	0.000	0.0000	
10	0°C	87	13	18.4	55.6	1.134	2.0396	490.30
5	0°C	87	13	18.4	55.6	0.738	1.3273	376.69
5	0°C	87	13	18.4	55.6	0.648	1.1655	429.01
5	0°C	87	13	18.4	55.6	0.828	1.4892	335.75
5	0°C	87	13	18.4	55.6	0.720	1.2950	386.11
5	0°C	87	13	18.4	55.6	0.666	1.1978	417.42
5	0°C	87	13	18.4	55.6	0.540	0.9712	514.81
5	0°C	87	13	18.4	55.6	0.504	0.9065	551.59
5	0°C	87	13	18.4	55.6	0.486	0.8741	572.02
5	0°C	87	13	18.4	55.6	0.702	1.2626	396.01
5	0°C	87	13	18.4	55.6	0.710	1.2770	391.55
5	0°C	87	13	18.4	55.6	0.710	1.2770	391.55
5	0°C	87	13	18.4	55.6	0.710	1.2770	391.55

PROYETO: TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL
OBRA: MEZCLA ASAFÁLTICA
LOCALIZACIÓN: MINA CATAMAYITO
FECHA: 2/3/2017

TIPO DE MUESTRA **MCA** Frecuencia = 2.7 Hz

$$\varepsilon(\%) = \frac{\Delta h}{h} \times 100$$

Presión (kg/cm2)	T°C ensayo	Altura del molde (mm)	Altura libre menor (mm)	Altura libre mayor (mm)	altura de la muestra (mm)	Deflexión Marshall (mm)	Deformación ε (%)	E* = P / ε (kg/cm2)
0	**60°C**	87	11	18	58.00	0.000	0.0000	
10	**60°C**	87	11	18	58.00	1.962	3.3828	295.62
5	**60°C**	87	11	19	57.00	0.972	1.7053	293.21
5	**60°C**	87	11	19	57.00	0.900	1.5789	316.67
5	**60°C**	87	11	19	57.00	0.936	1.6421	304.49
5	**60°C**	87	11	19	57.00	0.918	1.6105	310.46
5	**60°C**	87	11	19	57.00	0.846	1.4842	336.88
5	**60°C**	87	11	19	57.00	0.810	1.4211	351.85
5	**60°C**	87	11	19	57.00	0.810	1.4211	351.85
5	**60°C**	87	11	19	57.00	0.774	1.3579	368.22
5	**60°C**	87	11	19	57.00	0.810	1.4211	351.85
5	**60°C**	87	11	19	57.00	0.720	1.2632	395.83
5	**60°C**	87	11	19	57.00	0.720	1.2632	395.83
5	**60°C**	87	11	19	57.00	0.720	1.2632	395.83

TIPO DE MUESTRA **MCA** Frecuencia = 2.7 Hz

$$\varepsilon(\%) = \frac{\Delta h}{h} \times 100$$

Presión (kg/cm2)	T°C ensayo	Altura del molde (mm)	Altura libre menor (mm)	Altura libre mayor (mm)	altura de la muestra (mm)	Deflexión Marshall (mm)	Deformación ε (%)	E* = P / ε (kg/cm2)
0	**60°C**	92	11	24	57	0.000	0.0000	
10	**60°C**	92	11	24	57	1.584	2.7789	359.85
5	**60°C**	92	11	25	56	0.828	1.4786	338.16
5	**60°C**	92	11	25	56	0.738	1.3179	379.40
5	**60°C**	92	11	25	56	0.702	1.2536	398.86
5	**60°C**	92	11	25	56	0.738	1.3179	379.40
5	**60°C**	92	11	25	56	0.702	1.2536	398.86
5	**60°C**	92	11	25	56	0.702	1.2536	398.86
5	**60°C**	92	11	25	56	0.702	1.2536	398.86
5	**60°C**	92	11	25	56	0.684	1.2214	409.36
5	**60°C**	92	11	25	56	0.684	1.2214	409.36
5	**60°C**	92	11	25	56	0.666	1.1893	420.42
5	**60°C**	92	11	25	56	0.666	1.1893	420.42
5	**60°C**	92	11	25	56	0.666	1.1893	420.42

PROYETO: TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL
OBRA: MEZCLA ASAFÁLTICA
LOCALIZACIÓN: MINA CATAMAYITO
FECHA: 2/3/2017

TIPO DE MUESTRA **SMA11** Frecuencia = 2.7 Hz

$$\varepsilon(\%) = \frac{\Delta h}{h} \times 100$$

Presión (kg/cm2)	T°C ensayo	Altura del molde (mm)	Altura libre menor (mm)	Altura libre mayor (mm)	altura de la muestra (mm)	Deflexión Marshall (mm)	Deformación ε (%)	E* = P / ε (kg/cm2)
0	**60°C**	87	11	14	62.00	0.000	0.0000	
10	**60°C**	87	11	14	62.00	0.918	1.4806	675.38
5	**60°C**	87	11	15	61.00	0.558	0.9148	546.59
5	**60°C**	87	11	15	61.00	0.540	0.8852	564.81
5	**60°C**	87	11	15	61.00	0.558	0.9148	546.59
5	**60°C**	87	11	15	61.00	0.540	0.8852	564.81
5	**60°C**	87	11	15	61.00	0.558	0.9148	546.59
5	**60°C**	87	11	15	61.00	0.522	0.8557	584.29
5	**60°C**	87	11	15	61.00	0.522	0.8557	584.29
5	**60°C**	87	11	15	61.00	0.522	0.8557	584.29
5	**60°C**	87	11	15	61.00	0.544	0.8918	560.66
5	**60°C**	87	11	15	61.00	0.522	0.8557	584.29
5	**60°C**	87	11	15	61.00	0.522	0.8557	584.29
5	**60°C**	87	11	15	61.00	0.522	0.8557	584.29

TIPO DE MUESTRA **SMA11** Frecuencia = 2.7 Hz

$$\varepsilon(\%) = \frac{\Delta h}{h} \times 100$$

Presión (kg/cm2)	T°C ensayo	Altura del molde (mm)	Altura libre menor (mm)	Altura libre mayor (mm)	altura de la muestra (mm)	Deflexión Marshall (mm)	Deformación ε (%)	E* = P / ε (kg/cm2)
0	**60°C**	87	11	16	60	0.000	0.0000	
10	**60°C**	87	11	16	60	1.692	2.8200	354.61
5	**60°C**	87	11	17	59	0.666	1.1288	442.94
5	**60°C**	87	11	17	59	0.630	1.0678	468.25
5	**60°C**	87	11	17	59	0.594	1.0068	496.63
5	**60°C**	87	11	17	59	0.594	1.0068	496.63
5	**60°C**	87	11	17	59	0.594	1.0068	496.63
5	**60°C**	87	11	17	59	0.612	1.0373	482.03
5	**60°C**	87	11	17	59	0.576	0.9763	512.15
5	**60°C**	87	11	17	59	0.594	1.0068	496.63
5	**60°C**	87	11	17	59	0.594	1.0068	496.63
5	**60°C**	87	11	17	59	0.594	1.0068	496.63
5	**60°C**	87	11	17	59	0.594	1.0068	496.63
5	**60°C**	87	11	17	59	0.594	1.0068	496.63

PROYETO: TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA VIAL
OBRA: MEZCLA ASAFÁLTICA
LOCALIZACIÓN: MINA CATAMAYITO
FECHA: 2/3/2017

TIPO DE MUESTRA **SMA 16** Frecuencia = 2.7 Hz

$$\varepsilon(\%) = \frac{\Delta h}{h} \times 100$$

Presión (kg/cm2)	**T°C ensayo**	Altura del molde (mm)	Altura libre menor (mm)	Altura libre mayor (mm)	altura de la muestra (mm)	**Deflexión Marshall (mm)**	**Deformación ε (%)**	**E* = P / ε (kg/cm2)**
0	60°C	87	11	19	57	0.000	0.0000	
10	60°C	87	11	19	57	1.116	1.9579	510.75
5	60°C	87	11	19	57	0.558	0.9789	510.75
5	60°C	87	11	19	57	0.612	1.0737	465.69
5	60°C	87	11	19	57	0.594	1.0421	479.80
5	60°C	87	11	19	57	0.630	1.1053	452.38
5	60°C	87	11	19	57	0.630	1.1053	452.38
5	60°C	87	11	19	57	0.576	1.0105	494.79
5	60°C	87	11	19	57	0.570	1.0000	500.00
5	60°C	87	11	19	57	0.576	1.0105	494.79
5	60°C	87	11	19	57	0.491	0.8614	580.45
5	60°C	87	11	19	57	0.480	0.8421	593.75
5	60°C	87	11	19	57	0.480	0.8421	593.75
5	60°C	87	11	19	57	0.480	0.8421	593.75

TIPO DE MUESTRA **SMA 16** Frecuencia = 2.7 Hz

$$\varepsilon(\%) = \frac{\Delta h}{h} \times 100$$

Presión (kg/cm2)	**T°C ensayo**	Altura del molde (mm)	Altura libre menor (mm)	Altura libre mayor (mm)	altura de la muestra (mm)	**Deflexión Marshall (mm)**	**Deformación ε (%)**	**E* = P / ε (kg/cm2)**
0	60°C	87	11	14	62	0.000	0.0000	
10	60°C	87	11	14	62	1.476	2.3806	420.05
5	60°C	87	11	15	61	0.504	0.8262	605.16
5	60°C	87	11	15	61	0.558	0.9148	546.59
5	60°C	87	11	15	61	0.578	0.9475	527.68
5	60°C	87	11	15	61	0.540	0.8852	564.81
5	60°C	87	11	15	61	0.486	0.7967	627.57
5	60°C	87	11	15	61	0.486	0.7967	627.57
5	60°C	87	11	19	57	0.439	0.7702	649.20
5	60°C	87	11	19	57	0.439	0.7702	649.20
5	60°C	87	11	15	61	0.439	0.7197	694.76
5	60°C	87	11	15	61	0.439	0.7197	694.76
5	60°C	87	11	15	61	0.439	0.7197	694.76
5	60°C	87	11	15	61	0.439	0.7197	694.76