



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías
Terrestres**

**“Reciclado de hule de neumático en mezclas asfálticas densas utilizando
para el diseño el protocolo AMAAC”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. JESÚS MURILLÓN DUARTE

ASESOR DE TESIS:

Dr. Mario Salazar Amaya

CO-ASESORES DE TESIS:

Dr. Horacio Delgado Alamilla

Dr. Jorge Alarcón Ibarra

MORELIA, MICHOACÁN, DICIEMBRE DE 2012



DEDICATORIA:

A mis padres (J. Jesús Murillón Valladares y Ma. Catalina Duarte Cano), que siempre han estado en los momentos que los necesito y me apoyaron en todo momento.

A mis hermanos (Mac Quetzin, Itzpapalotl y Tlazolteotl), con los cuales he compartido la mayor parte de mi vida y han sido parte fundamental en mi desarrollo como persona.

A los ingenieros Dr. Mario Salazar Amaya, Dr. Jorge Alarcón Ibarra, Dr. Horacio Delgado Alamilla, Dr. Paul Garnica Anguas por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, sin ellos no hubiera logrado recabar el conocimiento requerido para su realización.

A mis colaboradores y amigos Elica Leticia y Eduardo pasantes de Ing. Civil del Tecnológico de Oaxaca, por el apoyo brindado en el trabajo realizado durante la estancia en el Instituto Mexicano del Transporte.

A los ingenieros M.I.C. Efraín Márquez López y M.I.C. Julio Chávez Cárdenas por el apoyo brindado durante la estancia en la maestría.

Contenido

Resumen	5
Abstract.....	6
Resumen ejecutivo.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
A) PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
B) HIPÓTESIS	10
C) OBJETIVOS GENERALES.....	11
D) OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
E) ALCANCES	12
1. ANTECEDENTES	13
1.1 APLICACIONES DE LOS NEUMÁTICOS FUERA DE USO	13
1.2 EL POLVO DE NEUMÁTICO	14
1.3 LAS TÉCNICAS DE UTILIZACIÓN DE POLVO DE CAUCHO EN MATERIALES ASFÁLTICOS.....	15
1.4 APLICACIONES	17
1.5 TIPOS DE MEZCLAS Y SUS APLICACIONES	20
2. METODOLOGÍA “EL PROTOCOLO AMAAC”	22
2.1 ANTECEDENTES DEL PROTOCOLO AMAAC	22
2.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL NIVEL DE EVALUACIÓN REQUERIDO	24
2.3 PROTOCOLO AMAAC NIVEL I	26
2.3.1 DISEÑO VOLUMÉTRICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA	26
2.3.2 CALIDAD DE LOS AGREGADOS PÉTREOS	34
2.3.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS.....	39
2.3.4 SEGUIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE CONTENIDO ÓPTIMO Y DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS HASTA EL NIVEL II.....	44
2.4 SUSCEPTIBILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD	44

2.5 PROTOCOLO AMAAC NIVEL II	48
2.5.1 SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE.....	48
2.5.2 ESPECIFICACIONES CON RUEDA CARGADA DE HAMBURGO.....	48
2.5.3 ESPECIFICACIONES CON EL APA	49
2.5.4 ESPECIFICACIONES CON EL ENSAYE DE PISTA ESPAÑOLA.....	51
3.- EL DISEÑO MEDIANTE PROTOCOLO AMAAC	53
4. DEFORMACIÓN PERMANENTE.....	66
5.- RESULTADOS.....	71
5.1 Diseño volumétrico	71
5.2 Tensión indirecta.....	83
5.3 Deformación permanente.....	88
6. CONCLUSIONES	92
REFERENCIAS.....	93



Resumen

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas con la adición de diferentes porcentajes de hule de llanta (1% y 2%), utilizando la metodología de diseño del Protocolo de la Asociación Mexicana del Asfalto. Se ilustra el efecto del Hule de llanta en los parámetros volumétricos más importantes en el diseño, como son el volumen de vacíos (V_a); vacíos en el agregado mineral (VAM); y vacíos llenos de asfalto (VFA). Al igual se valora la variación en el desempeño de la mezcla asfáltica compactada por la modificación con el hule de llanta, mediante pruebas mecánicas que evalúan parámetros como susceptibilidad a la humedad y deformación permanente, comparando los resultados a su vez con la mezcla sin modificar.

Abstract

In this paper we evaluated the performance of asphalt mixtures modified with the addition of different percentages of tire rubber (1% and 2%), using the protocol design methodology of the Asociación Mexicana del Asfalto. It illustrates the effect of tire rubber in volumetric most important parameters in the design, such as the void volume (V_v); voids in the mineral aggregate (VAM), and gaps filled with asphalt (VFA). As assesses the variation in performance of the compacted asphalt modification with the tire rubber through mechanical testing parameters and evaluating the susceptibility to moisture and permanent deformation, comparing the results in turn with the unmodified blend.

Resumen ejecutivo

Uno de los más grandes problemas que se enfrenta en la actualidad en México, es la generación de altos volúmenes de contaminantes industriales y el almacenamiento de los mismos, aunado al creciente incremento tanto en número como en magnitud de las cargas de tránsito, ocasionando fallas prematuras en los pavimentos asfálticos.

Investigaciones recientes están buscando el mejoramiento de las mezclas asfálticas para pavimentación, mediante la inclusión de nuevos materiales para optimizar su desempeño.

En los últimos años, uno de los modificadores más utilizados ha sido el asfalto ahulado mediante el empleo de diferentes tipos de residuos de hule, como pueden ser llantas de desecho, SBR, hule natural, polibutadieno y hule reciclado.

En el primer capítulo se presentan los diferentes procesos de obtención e incorporación del hule, junto con una reseña de los trabajos ya realizados en la materia.

El capítulo 2 contiene el método de diseño de mezclas asfálticas: el método del protocolo de la Asociación Mexicana del Asfalto, que dado su importancia empieza a tener gran aplicación dentro del país.

Se proporcionan antecedentes de la metodología y las diferentes pruebas, tanto volumétricas como mecánicas, que se emplean para la selección de un diseño apropiado.

Por otra parte, en el capítulo 3 se presenta la descripción de los experimentos realizados, así como los resultados de las pruebas realizadas, al igual que los criterios adoptados.

Se describen los diferentes tipos de pruebas volumétricas y mecánicas utilizadas para evaluar el desempeño del hule de llanta como modificador del asfalto, mediante diversos criterios, como son la deformación permanente; la susceptibilidad a la humedad.

En el capítulo 4 se trabaja únicamente el criterio la deformación permanente con el fin de lograr tener una idea más extensa de su proceso y aplicación.

El capítulo 5 exhibe los resultados obtenidos, los cuales muestran los efectos producidos debido al empleo de los diferentes porcentajes de hule de llanta a través de la evaluación de propiedades volumétricas y mecánicas.

INTRODUCCIÓN

En México según la Asociación Nacional de Distribuidores de Llantas (Andellac), cada año se desechan 40 millones de neumáticos viejos. La obra pública podría ser un instrumento de reciclado adecuado, siempre que la utilización de materiales del reciclado de Neumático Fuera de Uso (NFU) sea técnica y económicamente viable.



Fig. 1 Tirado a cielo abierto

Entre las posibles aplicaciones en la obra pública, una de las de mayor interés es la fabricación de mezclas asfálticas para carreteras, ya que el caucho de los neumáticos comporta mejoras en su comportamiento, es más económico que otros modificadores alternativos y permite consumir una considerable cantidad de residuo.

En España por ejemplo, el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) del Ministerio de Fomento, siguiendo las directrices del citado Plan, especifica el empleo prioritario de polvo neumático en mezclas asfálticas siempre que sea técnica y económicamente posible, además de apoyarse en la normativa existente de SCT: N-CMT-4-05-002-01, N-CMT-4-05-002-06, referidas a pavimentos modificados.

A) PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Nuestra ecuación es simple y se presenta a continuación:

Problema: Neumáticos desechados (NFU).

Solución planteada: Incorporar los neumáticos triturados (hule molido) previamente, en los pavimentos flexibles (mezclas densas).



Fig. 2 Tirado a cielo abierto de gran magnitud

B) HIPÓTESIS

Se espera comprobar que la adición de hule molido en el pavimento asfáltico mejora sus características (resistencia al envejecimiento, aumentando la flexibilidad y resistencia a la tensión, y reduciendo la aparición de grietas por fatiga o temperatura, además en algunos casos se ha visto que se mejora la resistencia a deformación permanente, caso que trataremos de abordar en la investigación) con respecto a una mezcla convencional para comprobar que esta forma de reciclaje para los neumáticos fuera de uso que constantemente son abandonados en los tiraderos en verdad vale la pena para ser aplicada en nuestro país.



Fig. 3 Hule triturado

C) OBJETIVOS GENERALES

Se espera obtener que este tipo de reciclado de hule molido en pavimentos flexibles en verdad resulta una alternativa viable para el uso de neumáticos fuera de uso, debido a su bajo costo de aplicación y a la mejora de las características de la mezcla, en nuestro caso analizaremos la deformación permanente, tensión indirecta y los parámetros de diseño volumétrico.

Realizar el diseño Volumétrico para la mezcla modificada por el método del Protocolo AMAAC, con el fin de obtener sus relaciones de vacíos y contenidos de asfalto óptimos.

Evaluar la deformación permanente en las mezclas tanto modificadas con hule de neumático como no modificadas para hacer una comparativa de dichas mezclas.



Fig. 4 Pavimento asfáltico maltratado

D) OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Evaluar la influencia del hule de llanta en las propiedades volumétricas y de deformación permanente de una mezcla asfáltica.

Reducir el número de neumáticos fuera de uso en los tiraderos proponiendo un uso alternativo, tomando en cuenta todas las ventajas que este tipo de técnica representa para los pavimentos.

E) ALCANCES

Evaluar la mezcla modificada y comparar sus características (Contenido de asfalto, relación de vacíos, deformación permanente, susceptibilidad a la humedad) con la mezcla convencional.

Determinar los contenidos óptimos de asfalto.

1. ANTECEDENTES

1.1 APLICACIONES DE LOS NEUMÁTICOS FUERA DE USO

Las posibles aplicaciones de reutilización y de reciclado de los NFU son muy variadas. Además del recauchutado, que es sin duda la principal aplicación de reutilización de los neumáticos, se pueden citar empleos de neumáticos enteros en: arrecifes artificiales, defensas de muelles o embarcaciones, barreras sonoras, y como elementos de seguridad vial, entre otros.

En trozos o tiras se pueden utilizar en: rellenos ligeros, drenaje de gases en vertederos y rellenos, recogida de lixiviados en vertederos, y aislamientos térmicos.

Como material granulado y polvo tienen aplicación en: carreteras, campos de fútbol, campos de juego y gimnasia, pistas de atletismo, pistas ecuestres, relleno de césped artificial, camas para ganado, calzado, baldosas, rellenos de cables, decoración, mezclas de caucho, elastómeros termoplásticos, etc.

Además, el neumático tiene un poder calorífico alto (7.500 kcal/kg) que es superior al del carbón y menos contaminante que éste, ya que el neumático tiene un menor contenido de azufre, constituyendo un buen combustible, y puede ser valorizado energéticamente en centrales eléctricas, cementeras, industrias papeleras, cerámicas, de producción de vapor, etc.

Actualmente las aplicaciones de reciclado con mayor uso de neumáticos son los campos de fútbol y los polideportivos.

Técnicas con elevado potencial de consumo de NFU son la valorización energética y las mezclas asfálticas para carreteras. De ambas, la de mayor interés según el principio de jerarquía medioambiental es la de su utilización en la fabricación de mezclas bituminosas.

1.2 EL POLVO DE NEUMÁTICO

El polvo de caucho se obtiene triturando neumáticos fuera de uso (neumáticos que ya cumplieron su vida útil y quedan como desperdicio).

Los neumáticos son estructuras toroidales (superficie de revolución generada por una curva plana cerrada que gira alrededor de una recta exterior coplanaria, el eje de rotación situado en su mismo plano), muy complejas elaboradas con más de 200 componentes, si bien están compuestos básicamente por cauchos naturales y sintéticos, cargas reforzantes (negros de carbono y sílices), antioxidantes, materiales metálicos, textiles y otros ingredientes necesarios para el proceso de vulcanización del caucho.

En los neumáticos de automóvil privado el contenido de caucho natural es del orden del 65% del caucho total, mientras que en los de camión es del 72% aproximadamente.

El polvo de caucho reciclado se obtiene mediante triturado de los neumáticos enteros hasta el tamaño deseado y separando los metales y tejidos que puedan incorporar. La forma de trituración, la granulometría de las partículas y el contenido remanente de contaminantes metálico y textil afectan a las propiedades del polvo de neumático obtenido.

La utilización en mezclas asfálticas precisa que el hule reciclado esté en forma de partículas finas de tamaños inferiores a 2 mm, ó 0,5 mm, según las aplicaciones.

1.3 LAS TÉCNICAS DE UTILIZACIÓN DE POLVO DE CAUCHO EN MATERIALES ASFÁLTICOS

La incorporación de polvo neumático (hule molido) a una mezcla asfáltica modifica sus propiedades reológicas y mejora sus prestaciones como material para carreteras. Dicha incorporación se puede hacer de dos maneras:

Una de ellas es la mezcla previa del polvo de neumático con el asfalto para su posterior empleo como ligante en la mezcla asfáltica. Esta forma de incorporación del polvo neumático a las mezclas asfálticas por adición previa al asfalto se conoce como “vía húmeda”.

El segundo procedimiento consiste en introducir el polvo neumático directamente en la planta de fabricación de mezclas asfálticas, junto con el asfalto y los agregados. El polvo de neumático actúa en parte como árido, pero las partículas más finas interaccionan con el asfalto modificando sus propiedades, consiguiéndose así mejorar el comportamiento de la mezcla asfáltica. Con este procedimiento se obtiene una “mezcla de asfalto modificada con polvo neumático”. Esta forma de modificación en la que el polvo neumático se incorpora directamente como un componente más de la mezcla asfáltica, se conoce como “vía seca”.



Fig. 5 Hule triturado en fábrica

Para nuestra investigación vamos a utilizar la vía seca debido a que en nuestro país prácticamente no se ha trabajado por esta forma, en cambio por vía húmeda existe ya una

publicación del Instituto Mexicano del Transporte (Publicación técnica 254 “Comportamiento de la mezclas asfálticas modificadas con SBR”).



Fig. 6 Llantas en tiradero

En los procedimientos por vía seca el polvo de neumático se introduce directamente en el mezclador de la central de fabricación de mezclas bituminosas como si fuese un agregado más.

En el proceso por vía seca pueden diferenciarse dos técnicas, según el tamaño máximo del polvo de caucho.

La primera utiliza tamaños máximos elevados, de hasta 2 mm. Como la superficie específica del polvo es reducida y el periodo de interacción es limitado, no hay tiempo suficiente para que la maduración se desarrolle en toda la masa de las partículas más gruesas del polvo de neumático. Por tanto, el hule molido funciona como un sistema de dos componentes en el que las partículas más finas (principalmente las que pasan por el tamiz 0,5 mm) interaccionan con la mezcla a elevada temperatura y modifican su reología mediante un proceso similar al de vía húmeda. Por otro lado, las partículas gruesas se comportan como un árido elastomérico dentro del esqueleto mineral de la mezcla bituminosa, aunque superficialmente también reacciona con el betún y se crea una interface mezcla/hule molido que cohesiona ambos materiales. En España esta técnica se ha utilizado con dotaciones del 2% de polvo de caucho en peso de mezcla.

La segunda técnica utiliza polvo de neumático de menor tamaño (todo pasa por el tamiz 0,5 mm) y en menor proporción. El polvo de caucho más fino actúa como un modificador

de la mezcla asfáltica añadido al mezclador. Se trata de un sistema que se puede considerar como intermedio entre la vía seca y la vía húmeda y es menos crítico que esta última.



Fig. 7 Llantas en trituración

1.4 APLICACIONES

La incorporación del polvo de caucho procedente del triturado de neumáticos de desecho en asfaltos, se desarrolló comercialmente en EEUU en los años 60 con la patente de Charles McDonald para su aplicación en tratamientos superficiales y bacheos. El empleo de ligantes con hule molido en mezclas asfálticas comenzó a generalizarse en 1985, en Arizona y California.

En Europa empezaron las pruebas con asfaltos modificados de alta viscosidad con hule molido en mezclas drenantes en los años 70, especialmente en Bélgica y Francia, pero la falta de plantas de trituración y el desarrollo de los ligantes modificados con polímeros (SBS, EVA, etc.) limitaron su empleo.

En España el primer asfalto con polvo de neumático de NFU a escala industrial se desarrolló en el año 1996 y fue realizado en central. Este asfalto se utilizó en tramos de ensayo en Sevilla y Madrid.

Posteriormente, la publicación del Plan de Neumáticos Fuera de Uso 2001-2006 impulsó nuevamente el empleo de polvo neumático en la fabricación de mezclas bituminosas. En el año 2002 se empezaron a utilizar dos equipos de fabricación “in situ” de betún con polvo de caucho, uno de los cuales fabricaba betunes del tipo BMAVC (betún o asfalto modificado de alta viscosidad con caucho o hule molido). Con ellos se construyeron tramos en Cádiz, Madrid y Castellón. También se desarrolló un asfalto modificado con polvo neumático estable que se utilizó en el tramo de Madrid. Ese mismo año se publicó la Orden Circular 5bis/02, en la que se prescribía la prioridad de empleo de los materiales procedentes del reciclaje de neumáticos en las mezclas asfálticas, siempre que su uso fuese técnica y económicamente viable. A partir del año 2004 se han construido numerosos tramos con mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos modificados/mejorados con hule molido.

La idea original de la vía seca por otra parte, fue desarrollada por dos compañías suecas (Skega AB y AB Vaegfoerbaetringar) a finales de los años 60 y el producto se comercializó bajo el nombre de Rubit. En 1978 se patentó en EEUU con el nombre de PlusRide. En este sistema se utiliza un caucho troceado con tamaños relativamente gruesos, en la fracción 0/6, y una granulometría discontinua. Originalmente se diseñó como un sistema anti-hielo, ya que las partículas más gruesas se comportan como agregados elásticos y se deforman en la superficie de la carpeta por las sollicitaciones producidas por los vehículos, provocando la rotura del hielo cuando se comienza a formar.

En 1986 Takallou desarrolló un sistema alternativo al PlusRide (TAK genérico), empleando un tamaño más pequeño de las partículas (inferior a 1 mm) y una dotación aproximada del 2%. Este procedimiento no está protegido por patente.

Hay otro sistema genérico, que se utilizó por primera vez en Florida, y que utiliza menores cantidades de caucho y de menor tamaño (pasa por el tamiz 0,1 mm) que los empleados con el sistema TAK genérico.

En España, fue en Cataluña, a principios de la década de los 90, donde se inició la utilización de polvo de caucho por vía seca, a instancias de la Junta de Residuos de la Generalitat. Las primeras experiencias se basaron en la tecnología genérica de Takallou, adaptadas a la práctica española. Se construyeron varios tramos experimentales, con mezclas densas y semidensas modificadas con un 2% de polvo de caucho de tamaño inferior a 2 mm, que se emplearon como capas de rodadura.

En el año 1996 se realizaron varios tramos de ensayo por vía seca en Sevilla y en Madrid con comportamiento dispar, en los que también se extendieron mezclas fabricadas por vía húmeda. En el tramo de Sevilla se fabricó una mezcla discontinua tipo F10 y en el de Madrid una mezcla densa D20 y otra F10. El principal problema de estas aplicaciones fue la falta de tiempo suficiente para que se produjese la interacción de la mezcla con el polvo de neumático.

En 2004 se realizó un tramo experimental en Salamanca, con una mezcla de tipo semidensa modificada con un 1% de polvo de caucho de tamaño máximo 0,5 mm, con muy buenos resultados.

Quizá la experiencia de mayor interés, por el número de kilómetros ejecutados, es la de una empresa de Alicante, que desde el año 1997 ha puesto en obra unos 100 km de calzada, principalmente en vías urbanas en las provincias de Murcia, Alicante y Albacete, empleando mezclas bituminosas discontinuas del tipo M-10. Esta empresa utiliza polvo de neumático de tamaño inferior a 0,3 mm, con una dosificación aproximada del 0,5% sobre mezcla.

En México por otra parte se han tenido pequeños intentos de la aplicación de esta técnica, tal es el caso de la calzada Tlalpán en 1970 en la ciudad de México, CAPUFE lo utilizó en autopistas de altas especificaciones en 1996 y las Autopistas México-Puebla, México-Querétaro, México-Córdoba, México -Cuernavaca, Pátzcuaro-Uruapan.

Además se tiene contemplado dentro de la SCT el uso de hule molido en pavimentos flexibles en la norma: N-CMT-4-05-002-06, referidas a pavimentos modificados, aunque

sólo lo menciona en un párrafo muy breve, se demuestra que hay conocimiento sobre la materia, aunque falta maximizar la aplicación en nuestro país.

1.5 TIPOS DE MEZCLAS Y SUS APLICACIONES

Según la normativa vigente de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (N-CMT-4-05-003-08 Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras) las mezclas las podemos clasificar según su procedimiento de mezclado, como se muestra a continuación:

1. Mezclas asfálticas en caliente: Son las elaboradas con cemento asfáltico y materiales pétreos a temperaturas altas (de ahí su nombre de calientes), en planta mezcladoras estacionarias o móviles, que cuenten con el equipo necesario para calentar la mezcla, éstas a su vez se subdividen en tres tipos:

1.1 Mezcla asfáltica de granulometría densa: Son las más comúnmente usadas en las carreteras de nuestro país, se obtienen de la combinación de cementos asfálticos y materiales pétreos bien graduados de tamaño nominal $3/8$ de pulgada y $1 \frac{1}{2}$ pulgadas. Comúnmente son usados en pavimentos nuevos que requieren alta resistencia estructural, renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes.

1.2 Mezcla asfáltica de granulometría abierta: Son mezclas con alto porcentaje de vacíos con tamaños nominales desde $\frac{1}{2}$ pulgada hasta $\frac{1}{4}$ de pulgada, son usadas para formar la capa de rodadura sobre una capa de granulometría densa, ya que está última es la que cumple la función estructural. La ventaja de las mezclas abierta radica en permitir que el agua de lluvia sea desplazada por lo vehículos ocupando los vacíos en la carpeta, evitando así el acuaplaneo.

1.3 Mezcla asfáltica de granulometría discontinúa tipo SMA: Son mezclas formadas por granulometrías discontinúas, es decir materiales gruesos y finos, eliminando parte de las arenas; tienen un tamaño nominal ente $\frac{3}{4}$ de pulgada y $\frac{1}{4}$ de pulgada. Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, aunque también pueden utilizarse en capas inferiores en carreteras de alto tránsito. Cuando son usadas como

capas de rodadura su finalidad principal es mejorar las condiciones de circulación de los vehículos respecto a una carpeta asfáltica convencional. Al tener una elevada macrotextura se evita que el agua de lluvia forme una película continua sobre la superficie del pavimento, con lo que se incrementa la fricción de las llantas; se minimiza el acuaplaneo; se reduce la cantidad de agua que se proyecta sobre los vehículos adyacentes; se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal y se reduce el ruido hacia el entorno por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura.

2. Mezclas asfálticas en frío: Son las elaboradas en frío, en una planta mezcladora móvil, utilizando emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados y materiales pétreos. Las mezclas asfálticas en frío se subdividen a su vez en:

2.1 Mezcla asfáltica de granulometría densa: Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado y materiales pétreos, con tamaño nominal $1 \frac{1}{2}$ in y $\frac{3}{4}$ in. Normalmente se utiliza en los casos en que la intensidad del tránsito (SL) es igual a un (1) millón de ejes equivalentes o menor, en donde no se requiera de una alta resistencia estructural, para la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos y en carpetas para el refuerzo de pavimentos existentes, así como para la reparación de baches.

2.2 Mortero asfáltico: Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado, agua y arena con tamaño máximo de dos coma treinta y seis (2,36) milímetros (N°8). Normalmente se coloca sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, como capa de rodadura.

2. METODOLOGÍA “EL PROTOCOLO AMAAC”

2.1 ANTECEDENTES DEL PROTOCOLO AMAAC

El Protocolo AMAAC se desarrolló en el año 2008 por la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. al ver la necesidad de contar en nuestro país con un método que contemple las condiciones prevalecientes para el territorio nacional. No es necesario realizar mucha investigación para determinar que los pavimentos en México tienen muchos problemas, basta con realizar observaciones por vías de circulación cotidiana para darnos cuenta que la mayoría de las carreteras estatales, federales, autopistas, calles, etc., tienen una gran cantidad de deficiencias que se ven reflejados en los costos de operación.

El Ing. Oscar de Buen se reúne con el equipo de la AMAAC, y le sugiere generar una alternativa para mejorar la calidad en las mezclas asfálticas, AMAAC convoca a formar el Comité Técnico sobre Desempeño de Mezclas Asfálticas, Coordinado por el Dr. Paul Garnica, donde el objetivo de este comité sería hacer especificaciones para las mezclas asfálticas que incluyan ensayos de desempeño.

El Comité Técnico propone generar un protocolo con especificaciones para las mezclas asfálticas que incluyan ensayos de desempeño, control de calidad y algunas recomendaciones de ensayos adicionales para que pudieran llamarse en las especificaciones de proyectos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, como una opción para dicha instancia. Se reúne para trabajar proactivamente en la propuesta de diseño. Tomando en consideración los adelantos hasta ese momento, visitando diversas autoridades de España, Francia y Estados Unidos, para discutir sobre las metodologías utilizadas para el diseño, control de calidad, ensayos en los materiales y mezclas asfálticas. Los laboratorios de referencia mundial fueron:

- CEDEX (España)
- LCPC (Francia)
- SEM Materials (E.U.)
- Instituto del Asfalto (E.U.)

Como puntos relevantes se pudieron encontrar la normalización estandarizada de los métodos que se usan entre todos los constructores españoles y franceses, alineada a la regulación europea. Lo mismo aplica para Estados Unidos, se pudo observar que los laboratorios líderes tienen homologado el diseño SHRP-SUPERPAVE.

Además se observó una gran importancia en la preparación de las diferentes capas de pavimento y un énfasis en el control de la granulometría y tipo del agregado empleado.

De esto se concluyó que México requiere de laboratorios especializados, bien equipados, certificados, que validen la calidad de las mezclas que se usan en los pavimentos y en la obra terminada. Así como generar ESPECIFICACIONES para regular las características de los materiales y sus combinaciones. Requerimientos acordes a las condiciones reales.

Se observó que en general en Europa como en Estados Unidos, las pruebas de rueda cargada como la Rueda de Hamburgo o la Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) se consideran una medida exigente de desempeño para calificar los pavimentos antes de la aplicación del mismo. En Estados Unidos se están haciendo mediciones de rueda cargada y correlaciones con medidas del módulo dinámico.

El Comité Técnico de AMAAC consideró que debía de surgir una propuesta de esta prueba para que la SCT la incluya como prueba en la calificación de la mezcla asfáltica.

Terminados los documentos para la propuesta se realizó la revisión del documento en la que participaron diversas personalidades de carácter gubernamental (Dirección General de Servicios Técnicos, CAPUFE, Instituto Mexicano del Transporte, etc.), sector privado, académico (diversas Universidades) obteniendo así la aprobación de dicho protocolo y recomendaciones (como alternativa de diseño).

Se espera que con la implementación del Protocolo AMAAC se aproveche de manera más razonable el asfalto, pues el 95% de las carreteras del mundo están hechas de este material (Figura 14). Las mezclas asfálticas diseñadas con el Protocolo AMAAC tienen un comportamiento superior a los construidos tradicionalmente y las diseñadas con el método Marshall. En los próximos años, se tendrá en México una inversión en infraestructura carretera de gran importancia, por lo tanto es necesario que se realicen diseños adecuados que aseguren el objetivo

de un pavimento; seguro, confortable, duradero y económico que satisfaga las necesidades del usuario.

El Protocolo AMAAC es derivado del método SUPERPAVE desarrollado en Estados Unidos, pero adaptado para las características particulares de nuestro país. Y al igual incorpora criterios de España y Francia.

Para una correcta implementación del protocolo se crearon programas de capacitación y de certificación. En relación a la certificación uno de los puntos críticos fue definir los mecanismos para que los laboratorios siguieran los lineamientos que deben cumplir para contar con un control de calidad en equipos, conocimientos y habilidades del personal para poder evaluar los materiales involucrados en la construcción de la carpeta asfáltica.

Para que los laboratorios en México sean acreditados deberán cumplir con las especificaciones del Protocolo AMAAC cubriendo 3 etapas fundamentales: 1) Selección de los Agregados Pétreos, 2) Selección del Cemento Asfáltico y 3) Diseño de la Mezcla Asfáltica. La certificación está conformada por dos tipos; Certificación del Personal y Certificación de los Laboratorios.

2.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL NIVEL DE EVALUACIÓN REQUERIDO

El método de diseño propuesto por AMAAC, establece diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa en función del nivel de tránsito o el desempeño deseado para la infraestructura que se requiere.

En la tabla 1 se presenta la recomendación para la selección del nivel de diseño de la mezcla asfáltica en función del tránsito vehicular. Es importante revisar las columnas 2 y 3 de la tabla 1, para ajustar el criterio. El criterio que resulte más exigente de estas dos columnas será el nivel para el cual se evaluará la mezcla.

Tabla 1. Niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes de 8.2 t y el tipo de carretera.

Designación del nivel de tránsito	Número de ejes equivalentes	Tipo de carreteras usuales	Ensayos recomendados
Nivel I Tránsito bajo	Menor a 1,000,000	<ul style="list-style-type: none"> • Carreteras federales tipo D • Carreteras alimentadoras • Carreteras estatales y municipales • Calles urbanas 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad
Nivel II Tránsito medio	De 1,000,000 a 10,000,000	<ul style="list-style-type: none"> • Carreteras estatales • Carreteras federales tipo B y C • Vialidades urbanas 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad • Susceptibilidad a la deformación permanente
Nivel III Tránsito alto	De 10,000,000 a 30,000,000	<ul style="list-style-type: none"> • Carreteras federales tipo A • Autopistas de cuota 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad • Susceptibilidad a la deformación permanente • Modulo Dinámico
Nivel IV Tránsito muy alto	Más de 30,000,000	<ul style="list-style-type: none"> • Carreteras federales troncales • Autopistas de cuota importantes • Vialidades suburbana en ciudades muy grandes 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad • Susceptibilidad a la deformación permanente • Modulo Dinámico • Fatiga

La Figura 15, ilustra los diferentes niveles de evaluación para que la mezcla asfáltica cumpla con el nivel de desempeño deseado:



Figura 8. Criterios de selección de ensayos para la evaluación del diseño para mezclas asfálticas.

2.3 PROTOCOLO AMAAC NIVEL I

2.3.1 DISEÑO VOLUMÉTRICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

La filosofía del protocolo es que el diseño de la mezcla asfáltica se realice de la manera más adecuada. Teniendo en cuenta que la mezcla asfáltica está compuesta de agregados pétreos + asfalto, no se puede tener un buen desempeño de la mezcla si primero no se verifica que los materiales cumplen con la calidad requerida.

a) Selección del agregado mineral.- Este debe cumplir como ya se mencionó anteriormente con ciertas especificaciones, para esto es necesario realizar diversas pruebas a nuestro material seleccionado para verificar que se encuentra en condiciones de ser utilizado en nuestra mezcla asfáltica, así como, para poder determinar sus características particulares.

Granulometría de la mezcla. La granulometría a utilizar en una mezcla asfáltica se debe seleccionar de acuerdo a la función requerida para la capa asfáltica en la estructura de un pavimento. Con base en las necesidades del proyecto se podrán fabricar cinco tipos de mezcla asfáltica cuya designación es la que muestra la Tabla 2.

Tabla 2. Designación del tipo de mezcla en función del tamaño nominal.

Granulometría por tipo de mezcla		
Designación de la mezcla mm	Tamaño Nominal mm	Tamaño Máximo mm
37.5	37.5	50.0
25.0	25.0	37.5
19.0	19.0	25.0
12.5	12.5	19.0
9.5	9.5	12.5

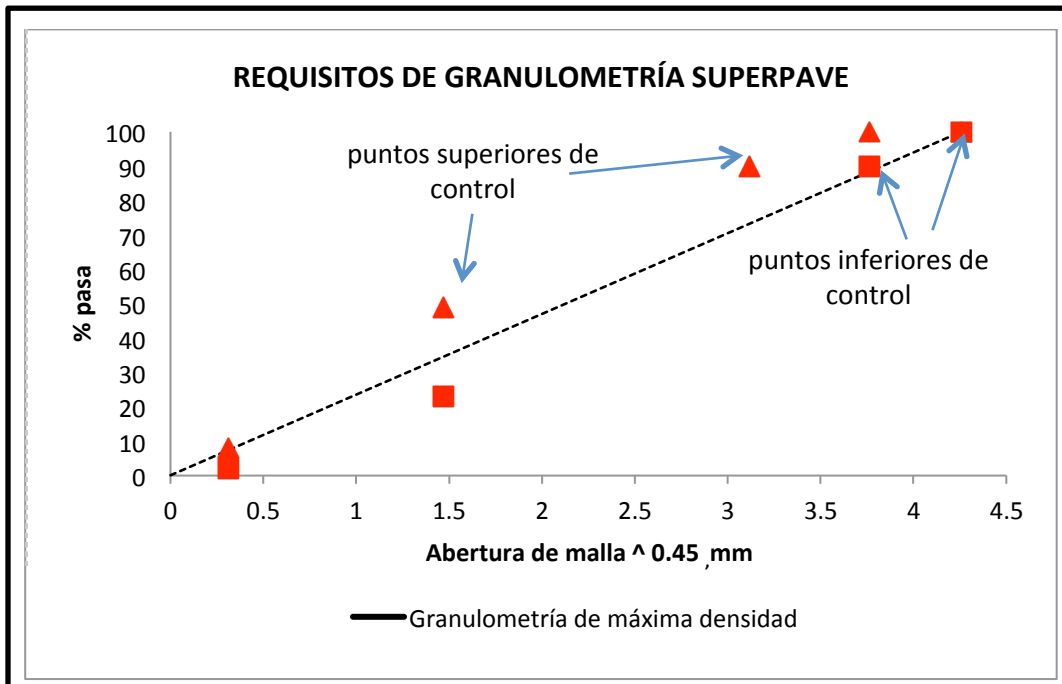
Los requisitos recomendados de granulometría para el caso de una carpeta asfáltica de granulometría densa son los que muestra la Tabla 3.

Tabla 3. Tabla del Material Pétreo de granulometría Densa.

Tamaño Nominal del Material Pétreo, mm. (pulgadas)						
Designación	Abertura mm	37.5	25	19	12.5	9.5
		1 ½ "	1"	¾ "	½ "	3/8 "
2"	50	100-100	-	-	-	-
1 ½ "	37.5	90-100	100-100	-	-	-
1"	25	90	90-100	100-100	-	-
¾ "	19	-	90	90-100	100-100	-
½ "	12.5	-	-	90	90-100	100-100
3/8	9.5	-	-	-	90	100-100
4	4.75	-	-	-	-	90
8	2.36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
16	1.18	-	-	-	-	-
30	0.60	-	-	-	-	-
50	0.30	-	-	-	-	-
100	0.15	-	-	-	-	-
200	0.075	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

A manera de ejemplo, la Gráfica 1, ilustra los límites establecidos para una mezcla con tamaño nominal de 19 mm. La escala de la abertura de la malla esta elevada a la potencia 0,45. En todos los demás casos se debe construir la gráfica correspondiente. La línea de máxima densidad de los agregados pétreos va desde el origen (0,0) hasta el tamaño máximo de la distribución granulométrica que se desee representar.

Gráfica 1. Granulometría para mezclas con tamaño nominal 19 mm. (3/4 ").



Recomendaciones generales para la selección del tipo de granulometría requerida por el proyecto.

Tabla 4. Definición de Mezclas de Graduación Densa, Gruesa y Fina.

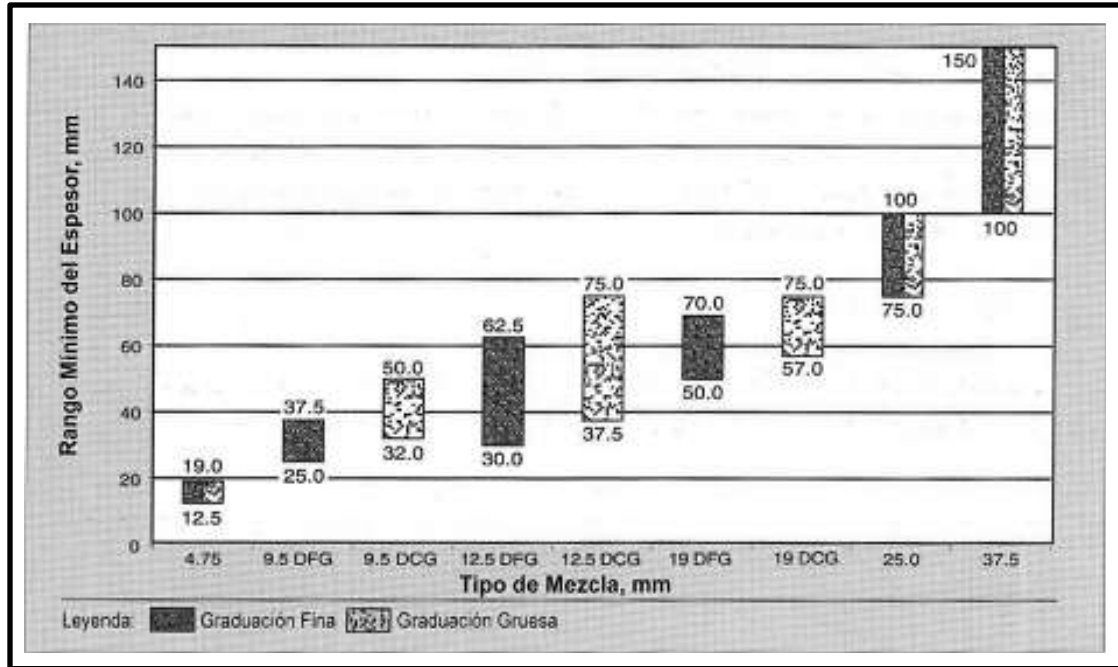
Tamaño de la mezcla	Granulometría Fina	Granulometría Gruesa
37.5 mm (1 ½ ")	>47 % Pasando la malla de 9.5	< 47 % Pasando la malla de 9.5
25.0 mm (1")	>40 % Pasando la malla de 4.75	<40 % Pasando la malla de 4.75
19.0 mm (3/4 ")	>47 % Pasando la malla de 4.75	<47 % Pasando la malla de 4.75
12.5 mm (1/2 ")	>39 % Pasando la malla de 2.36	<39 % Pasando la malla de 2.36
9.5 mm (3/8 ")	>47 % Pasando la malla de 2.36	<47 % Pasando la malla de 2.36
4.75 mm (Malla número 4)	N/A (granulometría no estándar)	

Tabla 5. Ventajas de las Mezclas de Granulometría Densa, Gruesa y Fina.

Granulometría Gruesa	Granulometría Fina
Menor permeabilidad	Permite espesores gruesos («25 mm TN)
Trabajabilidad (<25 mm TN)	Incrementa la macrotextura(«25 mm TN)
Espesores delgados («25 mm TN)	Mejor estructura interna (friccionante)
Mayor durabilidad en carreteras de tránsito bajo a medio	Elevada durabilidad en todos los tipos de proyecto
Textura lisa («25 mm TN)	

Durante el proceso de diseño se debe verificar que el espesor de la capa asfáltica donde se va a colocar la mezcla se encuentre dentro del rango establecido en la Gráfica 2. En caso de no cumplir con lo estipulado en dicha tabla, se debe cambiar el tamaño máximo de la mezcla.

Grafica 2. Recomendaciones para el rango mínimo del espesor para mezclas de graduación densa (DFG - Mezcla densa de granulometría fina, DCG - Mezcla densa de granulometría gruesa).



Una mezcla de granulometría densa se puede utilizar para cumplir cualquiera o todas las necesidades de los diseñadores de pavimento siguientes:

- Estructural (Mezclas finas y gruesas de 37,5, 25 y 19 mm). Este es el propósito principal de las mezclas de granulometría densa y es ante todo una función del espesor de la capa. Sin embargo, los materiales seleccionados pueden mejorar el valor estructural de las mezclas.
- Fricción (Mezclas gruesas de 19, 12,5 y 9,5 mm). Esto es una consideración importante para las carpetas de superficie. La fricción es una función de las propiedades del agregado y mezcla.
- Nivelación (Mezclas finas de 12,5 y 9,5 mm). Esta mezcla puede utilizarse en capas delgadas o gruesas para rellenar depresiones de las carreteras.

- Bacheo (Mezclas finas y gruesas de 12,5 y 9,5 mm). La mezcla debe reunir los mismos requerimientos que la utilizada para una nueva.

Las mezclas con función estructural de granulometría fina se recomiendan para caminos de tránsito bajo y/o moderado donde no se colocará ningún tipo de tratamiento superficial o capa de desgaste. Para caminos de tránsito de moderado a alto, donde será colocado algún tipo de tratamiento superficial, se recomienda el uso de mezclas con función estructural usando granulometrías gruesas. Sin embargo, se debe evaluar ambos tipos de mezclas densas para colocar la que tenga mejores propiedades volumétricas y de desempeño óptimo en las pruebas de simulación que se describen más adelante (sección de la susceptibilidad a la deformación permanente y en la sección de Fatiga).

Para la selección adecuada del tipo de mezcla y los espesores mínimos y máximos, se recomienda consultar la serie informativa 1285 “Guía para seleccionar el tipo de Mezcla Asfáltica en caliente (HMA) para pavimentos” disponible en las publicaciones traducidas por AMAAC de la NAPA (National Asphalt Pavement Association).

2.3.2 CALIDAD DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

Las características físicas básicas que deben cumplir las fracciones gruesa y fina del agregado pétreo seleccionado son las que se indican en las Tablas 6 y 7, respectivamente.

Tabla 6. Requisitos de calidad de la fracción gruesa del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.

Característica	Norma	Especificación
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131	30 máx. (Capas estructurales) 25 máx. (capas de rodadura)
Desgaste Microdeval, %	AASHTO TP 58-99	18 máx. (Capas estructurales) 15 máx. (capas de rodadura)
Intemperismo acelerado	AASHTO T 104	15 máx. Para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D 5821	90 mín.
Partículas alargadas, %	ASTM D 4791	Relación 3 a 1, 15% máx.
Partículas lajeadas, %	ASTM D 4791	Relación 3 a 1, 15% máx.
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	Recomendación AMAAC RA- 08/2008	90 mín.

Tabla 7. Requisitos de calidad de la fracción fina del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.

Característica	Norma	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D 2419	50 min. (capas estructurales) 55 min. (capas de rodadura)
Angularidad, %	AASHTO T 304	40 mín.
Azul de metileno, mg/g	Recomendación AMAAC RA-05/2008	15 máx. (Capas estructurales) 12 máx. (capas de rodadura)

Se recomienda considerar al menos tres granulometrías diferentes para dosificación y diseño de la mezcla. Las tres granulometrías pueden corresponder a las variaciones esperadas durante la producción en un cierto banco de material.

Además de los criterios antes señalados se deben realizar todas las pruebas a los agregados minerales que se citan a continuación, estas son por recomendación de la AMAAC.

- Reducción de muestras (ASTM C702-98(03)).
- Análisis granulométrico (ASTM C136-06).
- Densidad y absorción de agregados gruesos (ASTM C127-07).
- Densidad y absorción de agregados finos (ASTM C128-07a)
- Determinación del valor equivalente de arena (ASTM D2419-09).
- Determinación de partículas planas y alargadas (ASTM D4791-05).
- Azul de metileno (Filler) (RA 05/10).

- Determinación del % de partículas fracturadas en agregados gruesos (ASTM D5821-01).
- Intemperismo acelerado (ASTM C88-05).
- Desgaste de los ángeles (ASTM C131-06).
- Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Ebullición (ASTM D 3625-96).
- Resistencia al desprendimiento del asfalto de los materiales pétreos en mezclas asfálticas por acción del agua. (RA 07/2010).
- Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. (MMP 4.04.009/03).
- Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. (RA 08/08).
- Angularidad del agregado fino (AASHTO T304-08).
- Desgaste Microdeval (AASHTO T327-09).

b) Material Asfáltico.- El cemento asfáltico se debe seleccionar en función de la temperatura máxima y mínima que se espera en el lugar de aplicación. Si el cemento asfáltico seleccionado es convencional, se le determinará su carta de viscosidad usando un Viscosímetro Rotacional de acuerdo a la norma ASTM D-4402. De esta carta se obtendrán las temperaturas de mezclado y compactación (en el laboratorio) adecuadas que corresponderán a los valores de viscosidad que se presentan en la Tabla 7. Para cementos asfálticos modificados las temperaturas mencionadas deben ser proporcionadas por el proveedor.

Tabla 8. Rangos de viscosidades para seleccionar las temperaturas de mezclado y compactación entre el agregado pétreo y cemento asfáltico convencional.

Característica	Rango de Viscosidad, (Pa.s.)
Temperatura de mezclado	0.15 a 0.19
Temperatura de compactación	0.25 a 0.31



Figura. 9. Imagen del Viscosímetro Rotacional: José Eduardo García Servín.

c) Mezcla Asfáltica.- En esta sección se presentan los requerimientos que debe cumplir una mezcla asfáltica que se indica en la tabla 9. El contenido de asfalto optimo será el necesario para obtener un porcentaje de vacíos de aire (V_a) en la mezcla entre 3 y 5%, cumpliéndose además los requerimientos indicados en la tabla 10.

La fabricación de los especímenes debe realizarse en el compactador giratorio de acuerdo con la recomendación AMAAC- RA-06/2011.

Tabla 9. Valores de los parámetros volumétricos necesarios para el diseño óptimo de una mezcla asfáltica.

Requerimientos Para el Diseño Volumétrico de la Mezcla										
Nivel de tránsito	Densidad requerida (% de la gravedad específica teórica máxima (Gmm))			Vacíos de agregado mineral mínimo en % - VMA					Vacíos llenos de asfalto en %	Relación filler asfalto
	Nivel de compactación giratoria			Tamaño Nominal (mm)						
	N _{ini}	N _{dis}	N _{máx}	37.5	25	19	12.5	9.5		
I Bajo	≤ 91,5	96	≤ 98	11	1	13	14	15	70-80	0.6-1.2
II Medio	≤ 90,5								65-78	
III Alto	≤ 90,5								65-78	
IV Muy Alto	≤ 89								65-75	

Tabla 10. Esfuerzo requerido para la compactación giratoria según el tránsito esperado en el carril de diseño.

Ejes equivalentes	Parámetros de Compactación		
	N _{ini}	N _{dis}	N _{máx}
< 0.3	6	50	75
0.3 < 3	7	75	115
3 < 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

2.3.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS

Para la determinación de los parámetros volumétricos de la mezcla se deben emplear las formulas mostradas a continuación:

Gravedad Específica Bruta.- Se determina midiendo la masa seca y el volumen bruto de una muestra de agregados (ASTM e-127 o ASTM C-128). El volumen bruto incluye el volumen del sólido del agregado más el volumen de agua contenida en los poros superficiales. El volumen bruto se mide para la condición del agregado saturado y superficialmente seco.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad (1)$$

Donde:

G_{sb} = Gravedad específica neta (total).

P₁, P₂, P_n = Porcentajes individuales por masa de agregado.

G₁, G₂, G_n = Gravedad específica neta individual del agregado.

% de Absorción del Material (finos y gruesos).- Podemos definir la absorción, como la cantidad de agua absorbida por el agregado sumergido en el agua durante 24 horas.

$$Abs_{indiv} = \frac{(P_1 \times A_1) + (P_2 \times A_2)}{100} \quad (2)$$

Donde:

Abs_{individual} = Agua absorbida para cada material analizado.

P₁ = % retenido en la malla 4 (4.75 mm.).

A₁ = Agua absorbida en el material retenido en la malla 4 (4.75 mm.).

P₂ = % que pasa la malla 4 (4.75 mm.).

A₂ = Agua absorbida en el material que pasa la malla 4 (4.75 mm.).

% de Vacíos de Aire.- Es la concentración en volumen del aire en la muestra de mezcla asfáltica compactada. Los vacíos de aire se expresan siempre como un porcentaje del volumen total de la mezcla.

$$V_a = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Donde:

V_a = % de vacíos de aire en la mezcla.

G_{mb} = Gravedad específica total de la mezcla compactada.

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla.

Vacíos en el Agregado Mineral.- Es el espacio intergranular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla asfáltica compactada y se expresa como porcentaje del volumen total. Usualmente, no se considera como parte del VAM, el volumen de asfalto absorbido.

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen de asfalto efectivo y el volumen de aire necesarios en la mezcla. Valores mínimos de VAM son necesarios para asegurar un adecuado espesor de película de asfalto que contribuya a la durabilidad de la mezcla.

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad (4)$$

Donde:

VAM = Vacíos en el agregado mineral.

G_{mb} = Gravedad específica total de la mezcla.

P_s = Porcentaje de agregado en el espécimen.

G_{sb} = Gravedad específica total del agregado.

Vacíos Llenos con Asfalto.- Es el porcentaje de VAM que contienen asfalto. El concepto de VFA es utilizado para asegurar que el porcentaje de asfalto efectivo (P_{be}) no sea demasiado pequeño como para producir una mezcla poco durable, o demasiado alto como obtener una mezcla demasiado inestable. El rango aceptable de VFA depende del nivel de tránsito. Altos niveles de tránsito requieren menores porcentajes de VFA, debido a que en estas condiciones la resistencia y estabilidad de las mezclas es la mayor preocupación. Bajos niveles de tránsito requieren porcentajes de VFA mayores para garantizar la durabilidad de la mezcla asfáltica. Si los porcentajes de VFA son demasiados altos, la mezcla asfáltica se vuelve susceptible a presentar deformaciones plásticas.

$$VFA = 100 \times \frac{(VMA - V_a)}{VMA} \quad (5)$$

Donde:

VFA = % de volumen de VAM lleno de asfalto.

VAM = % de vacíos en el agregado mineral.

Va = % de vacíos de aire del volumen total de la mezcla.

Gravedad Específica Efectiva.- Se calcula usando la masa seca y volumen efectivo del agregado. El volumen efectivo incluye el volumen de los sólidos del agregado y el volumen de los poros de superficie llenos con agua pero no con asfalto. La gravedad específica del agregado no se mide directamente, a diferencia de las gravedades específicas bruta y aparente. Esta se calcula conociendo la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (G_{mm}) y el contenido de asfalto (P_b). Solo las gravedades específicas bruta y efectiva son utilizadas para el cálculo de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica. Los volúmenes calculados para cada uno tendrán diferentes significados, y por ende, diferentes valores numéricos.

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (6)$$

Donde:

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado.

P_b = % de asfalto.

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla.

G_b = Gravedad específica del asfalto.

Contenido de Asfalto Absorbido.- Es la concentración de masa del cemento asfáltico absorbido por el agregado. Normalmente se expresa como porcentaje de la masa del agregado.

$$P_{ba} = 100 \times \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \right) \times G_b \quad (7)$$

Dónde:

P_{ba} = % de asfalto absorbido.

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado.

G_{sb} = Gravedad específica total del agregado.

G_b = Gravedad específica del asfalto.

Contenido de Asfalto Efectivo.- Es la cantidad de masa de cemento asfáltico no absorbido por el agregado. Normalmente se expresa como porcentaje.

$$P_{be} = P_b - \left(\frac{P_{ba}}{100} \times P_s \right) \quad (8)$$

Dónde:

P_{be} = % de asfalto efectivo.

P_b = % de asfalto.

P_{ba} = % de asfalto absorbido.

P_s = % de agregado.

Relación Filler/ Asfalto.- Es la relación que existe entre el filler con respecto al porcentaje de asfalto efectivo (P_{be}).

$$\text{Relación Filler/ Asfalto} = \frac{\% \text{ Pasa la malla \# 200}}{P_{be}} \quad (9)$$

2.3.4 SEGUIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE CONTENIDO ÓPTIMO Y DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTÍCAS HASTA EL NIVEL II

Se realiza la revisión de la calidad de los materiales pétreos, después de seleccionada la distribución granulométrica ideal para el proyecto, preestablecido el grado de desempeño que se utiliza en la mezcla y revisada la relación de adherencia pétreo-asfalto, se procede a calcular el contenido óptimo para la granulometría propuesta.

2.4 SUSCEPTIBILIDAD DE LA MEZCLA ASFALTICA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD

El ensaye se debe realizar aplicando la Recomendación AMAAC RA-04/2010 "Resistencia de las mezclas asfálticas al daño inducido por humedad" y para todos los niveles de diseño el valor mínimo aceptable de TSR es = 80%.

El objetivo principal de la prueba es determinar la resistencia al daño inducido por humedad, también conocida como resistencia retenida, de una mezcla asfáltica compactada. La resistencia retenida es importante para establecer si una mezcla asfáltica es susceptible a la acción de la humedad, tal como se solicita en la norma de la SCT-N-CMT-4-05-003, calidad de las mezclas asfálticas para carreteras.

La preparación de la muestra consiste en especímenes cilíndricos de aproximadamente 100 mm de diámetro por 63.5 ± 2.5 mm de altura o de 150 mm de diámetro por 95 ± 5 mm de altura. Se deben preparar al menos seis especímenes para el ensaye, la mitad para ser ensayados en seco y el resto para ser ensayados después de un acondicionamiento que consiste en la saturación parcial del espécimen acompañado de un ciclo de congelación y deshielo.

De los especímenes se determina el peso saturado y superficialmente seco y se registra como B' . El volumen de agua absorbida (J') en centímetros cúbicos se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$J' = B' - A \quad (10)$$

Donde:

J' = Es el volumen de agua absorbida, centímetros cúbicos.

B' = Es el peso saturado y superficialmente seco después de la saturación parcial, g.

A = Es el peso del espécimen seco en aire, g.

Se determina el grado de saturación (S') comparando el volumen de agua absorbida (J') con el volumen de vacíos (V_a), con base en la siguiente ecuación:

$$S' = \frac{100 J'}{V_a} \quad (11)$$

Donde:

S' = Es el volumen de agua absorbida, centímetros cúbicos.

Si el grado de saturación esta entre el 70 y 80% se pasa al siguiente punto. Si el grado de saturación es menor al 70%, se requiere someter el espécimen nuevamente al proceso de saturación. Si el grado de saturación es mayor del 80%, el espécimen ha sido dañado y debe ser descartado.

El ensaye de los especímenes consiste en la determinación del esfuerzo máximo, que es capaz de soportar la mezcla compactada, bajo el ensaye de tensión indirecta a una temperatura de 25 ° C, para los especímenes acondicionados y no acondicionados.

Se registra la carga máxima aplicada (o tensión indirecta). El ensaye debe continuar hasta que se aprecia una grieta vertical. Se retira el espécimen de la prensa y se jalan las

dos mitades para provocar su separación. Visualmente se determina si el agregado grueso se rompió o solo se separó del asfalto.

Se calcula la resistencia a la tensión indirecta, con la expresión que se indica a continuación:

$$S_t = \frac{2000P}{\pi t D} \quad (12)$$

Donde:

S_t = Es la resistencia a la tensión indirecta, KPa.

P= Es la carga máxima, N.

T= Es el espesor o altura del espécimen, mm.

D= Es el diámetro del espécimen, mm.

Se reporta la resistencia de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad como el cociente de la resistencia a tensión indirecta promedio de los especímenes acondicionados entre la resistencia de los especímenes no acondicionados, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \times 100 \quad (13)$$

Donde:

TSR= Es la resistencia al daño inducido por humedad, expresada en %.

S_1 = Es la resistencia a tensión indirecta promedio de especímenes no acondicionados, KPa.

S_2 = Es la resistencia a tensión indirecta promedio de especímenes acondicionados, KPa.



Figura 10. Ensayo de Tensión Indirecta.

2.5 PROTOCOLO AMAAC NIVEL II

2.5.1 SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Para realizar la susceptibilidad de la mezcla a la deformación permanente se podrán emplear los ensayos siguientes:

2.5.2 ESPECIFICACIONES CON RUEDA CARGADA DE HAMBURGO.

El ensayo se debe realizar de acuerdo a la Recomendación AMACC RA-01/2011, Susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera de una mezcla asfáltica tendida y compactada, por medio del analizador de la rueda de carga de Hamburgo (HWT).

Las especificaciones se indican en la Tabla 11.

Tabla 11. Número mínimo de pasadas para la deformación máxima en la prueba de Hamburgo.

Nivel de tránsito	Mínimo de pasadas para la deformación máxima de 10 mm.
Bajo	10.000
Medio	15.000
alto/ muy alto	20.000



Figura 11. Rueda Cargada de Hamburgo.

2.5.3 ESPECIFICACIONES CON EL APA

El ensaye debe realizarse de acuerdo a la Recomendación AMAAC RA-02/2011. Susceptibilidad a la deformación por rodadura de una mezcla asfáltica, por medio del Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA).

En la Tabla 12 se indican las especificaciones correspondientes en relación con el nivel de tránsito vehicular.

Tabla 12. Especificaciones de rodera máxima con el Analizador de Pavimentos Asfálticos. APA para 8.000 ciclos.

Nivel de tránsito	Rodera máxima
Bajo	7.0 mm
Medio	5.5 mm
Alto	4.0 mm
Muy alto	3.0 mm

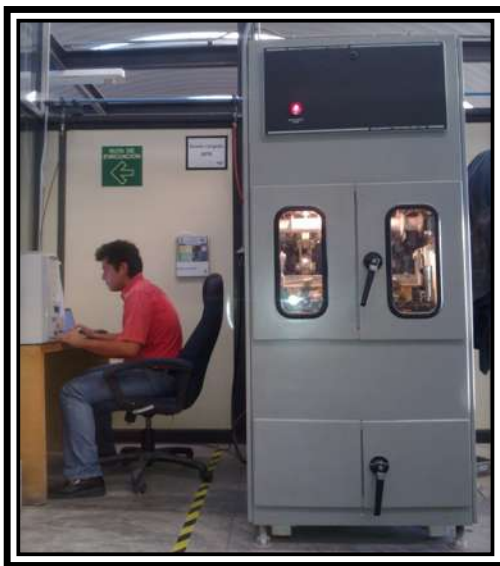


Figura. 12. Analizador de Pavimentos Asfálticos.

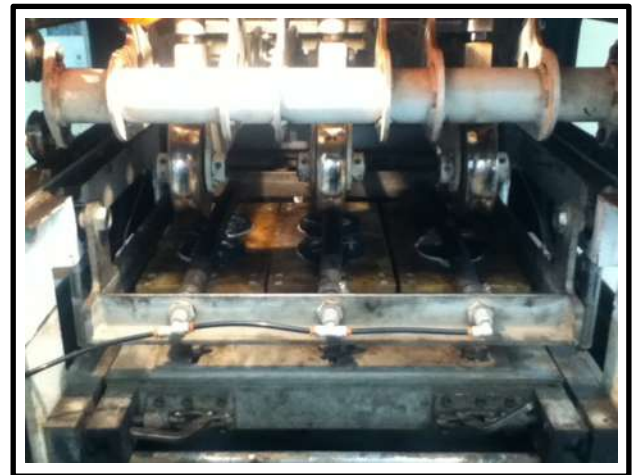


Figura. 13. Vista interior del APA.

2.5.4 ESPECIFICACIONES CON EL ENSAYE DE PISTA ESPAÑOLA

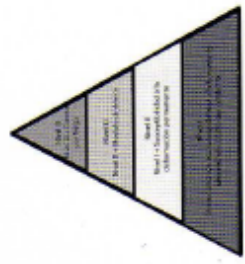
El ensaye se debe realizar de acuerdo a la recomendación AMAAC RA-03/2011, Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista española de ensayo. En la Tabla 13 se indican las especificaciones correspondientes.

Tabla 13. Velocidad máxima de deformación para el diseño de mezclas asfálticas mediante la máquina de pista en mm/min para el intervalo de 105 a 120 minutos.

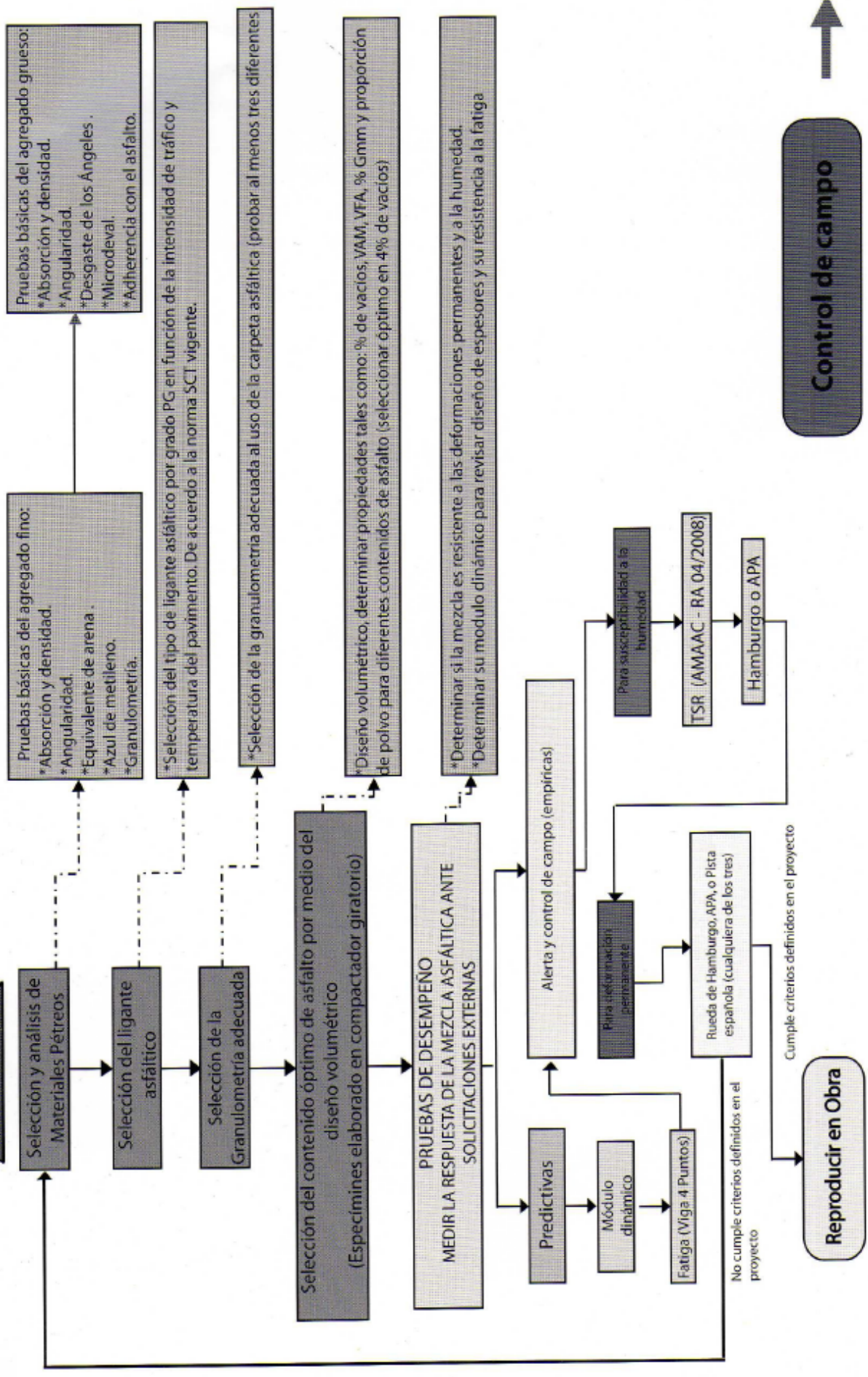
	Nivel de tránsito			
	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Velocidad máxima de deformación en mm/min	0.2	0.2	0.15	0.12

En la siguiente página tenemos el diagrama de flujo resumido de los pasos a seguir por el protocolo de AMAAC, para dejar una idea más clara del procedimiento a seguir.

Diagrama de flujo del método de diseño de mezclas AMAAC para carpetas asfálticas estructurales de granulometría densa



El proceso inicia con la selección del Nivel de Diseño de la Mezcla Asfáltica (Figura 3)



Control de campo

Reproducir en Obra

3.- EL DISEÑO MEDIANTE PROTOCOLO AMAAC

La presente investigación se realizó de manera completa mediante una estancia en el Instituto Mexicano del Transporte. Gracias a que ya se contaba con el material en dicho lugar se pudo iniciar de manera rápida con las pruebas necesarias. El primer paso que tuvimos que dar durante la actual estancia fue realizar las pruebas a los diferentes agregados y además del cribado del material para realizar las dosificaciones pertinentes.



Fig. 14 Mallas para cribado



Fig. 15 Proceso de Cribado



Fig. 16 Cribado de material grueso



Fig. 17 Cribadora automática

Posterior al cribado y las pruebas a los agregados se realizan las dosificaciones de los materiales tomando como base la siguiente granulometría utilizada con anterioridad en el instituto.

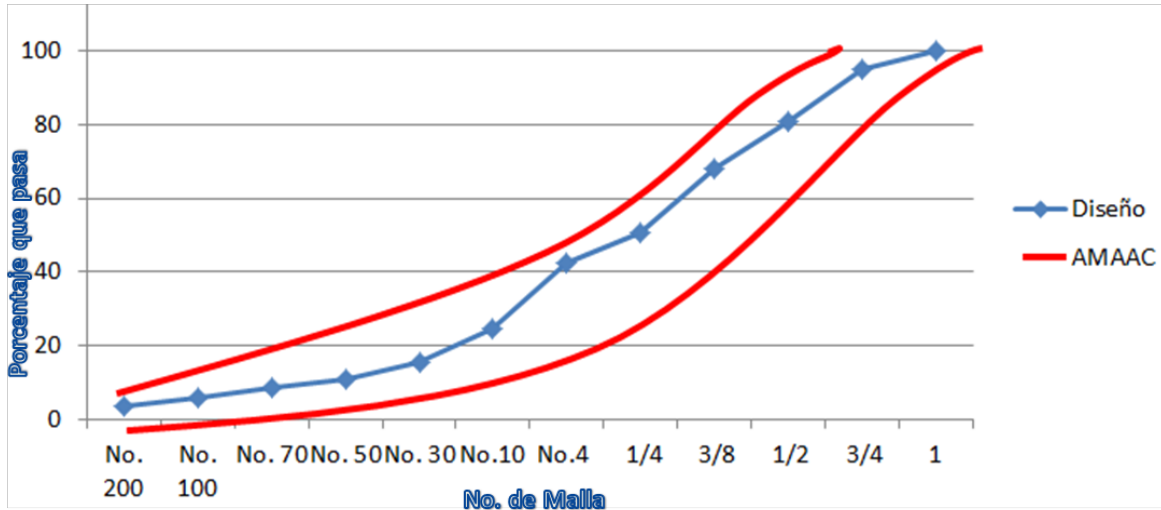


Fig. 18 Dosificación de material

Tablas 14 Granulometría usada

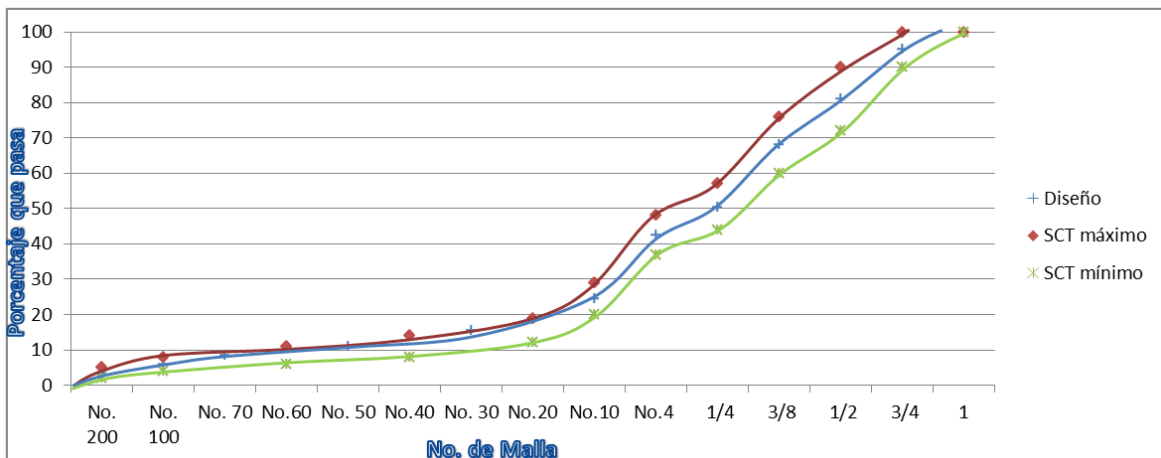
Abertura	Retenido - Malla (%)	Peso (g)	Acumulado (%)	Acumulado (%)
¾	5	60	60	5
½	14	168	228	19
3/8	13	156	384	32
¼	17.5	210	594	49.5
No.4	8	96	690	57.5
No.10	18	216	906	75.5
No. 30	9	108	1014	84.5
No. 50	4.5	54	1068	89
No. 70	2.5	30	1098	91.5
No. 100	2.5	30	1128	94
No. 200	2.5	30	1158	96.5
Pasa 200	3.5	42	1200	100

Podemos observar en la gráfica siguiente una comparativa con los porcentajes marcados dentro del protocolo.



Gráfica 3 Granulometría de proyecto contra límites AMAAC

También comparamos la granulometría de diseño con las propuestas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y en la figura siguiente podemos ver que sigue cumpliendo:



Gráfica 4 Granulometría de proyecto contra límites SCT

Ya corroborado que la granulometría nos cumple con las diferentes normativas nacionales, se modificará esta granulometría con contenidos de hule de molido de neumático al 1% y 2% con respecto al peso total de la muestra, sustituyendo material de la malla No.50 debido a que es el tamaño más cercano al del hule molido.

Ya con el material dosificado se procedió al cálculo de los contenidos de asfalto usando el 5%, 5.3%, 5.5% y 6% (este último sólo para el caso de las mezclas modificadas) como base, considerando también lo sugerido en el protocolo mediante las pruebas de Gmm y Gmb como se muestra a continuación:

Gmm, gravedad específica teórica máxima y la densidad de mezclas asfálticas para pavimentación (ASTM D 2041 - 03):

Este método cubre la determinación de la gravedad específica teórica máxima y densidad de mezclas asfálticas para pavimentación sin compactar a 25 °C. La gravedad específica máxima es utilizada en el cálculo de vacíos de aire en las mezclas asfálticas para pavimentación compactadas, en el cálculo de la cantidad de asfalto absorbido por el agregado, y para proveer los valores deseables para la compactación de las mezclas asfálticas.

Si la mezcla asfáltica se ha preparado en laboratorio usando agregados secados en horno, continuar con el siguiente párrafo, en caso de no ser así omitir. Cualquier otra muestra debe ser secada a una masa constante (pesajes consecutivos de la masa deben repetirse con diferencia menor de 0.1% durante 15 min) a una temperatura de 105 ± 5 °C (221 ± 9 °F).

Una vez que la muestra es secada y mientras continúa caliente, separar las partículas de la muestra de mezcla asfáltica a mano, tener cuidado de evitar el rompimiento del agregado, de modo que las partículas de la porción de agregado fino no sean mayores de 6 mm. Enfriar la muestra hasta temperatura ambiente. Será necesaria una separación adicional de la muestra para que las partículas de la porción de agregado fino no sean mayores de 6 mm. Colocar la muestra directamente dentro del recipiente tarado o en un matraz aforado. No use un contenedor dentro de otro. Pesarse el recipiente con la muestra y designar a la masa neta (masa del material únicamente) como A.

Añadir agua a una temperatura de aproximadamente 25 °C (77 °F) para cubrir completamente la muestra. Colocar la tapa (recipiente) o tapón (matraz) en el contenedor.

Colocar el recipiente con la muestra y el agua sobre el dispositivo de agitación mecánica y sujetar adecuadamente a la superficie del aparato. Comenzar la agitación, e inmediatamente comenzar a eliminar el aire atrapado en la muestra, aumentando gradualmente la presión de vacío hasta que el manómetro de presión residual indique $3,7 \pm 0,3$ kPa ($27,5 \pm 2,5$ mm) de Hg. El vacío debe lograrse en alrededor de 2 min. Una vez que el vacío se logra, continuar con el vacío y la agitación por 15 ± 2 min.



Fig. 19 Contenedor Gmm



Fig. 20 Colocación de material para Gmm

Liberar gradualmente la presión de vacío usando la válvula de alivio y proceder con cualquiera de las siguientes determinaciones:

Pesaje en agua: Suspender el matraz (sin tapa) y su contenido en un baño María por 10 ± 1 min, a continuación, determinar la masa. Medir y registrar la temperatura del agua en el baño. Designar la masa bajo el agua; del matraz y la muestra como C.

Pesaje en aire (recipiente): Sumergir lentamente el recipiente y la muestra en un baño de agua a $25 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ ($77 \pm 1,8 \text{ °F}$) por 10 ± 1 min. La tapa se colocará en el baño de agua al mismo tiempo. Deslizar la tapa en el recipiente sin sacarla del agua a fin de evitar atrapar

el aire, a continuación presionar firmemente la tapa hacia abajo sobre el contenedor. Retirar el recipiente con la tapa colocada del baño de agua. Secar con cuidado el recipiente y la tapa. Determinar la masa del contenedor, la muestra, y la tapa. Medir y registrar la temperatura del agua en la cámara. Repetir este procedimiento una segunda vez retirando la tapa y colocando tanto la tapa y el recipiente de nuevo en el agua. No es necesario esperar los 10 minutos antes de tomar la segunda lectura. Si el peso varía en más de 1,0 g, repetir el procedimiento hasta que cualquiera de los dos pesos estén dentro de 1,0 g. Designar el promedio de estas dos lecturas de masa como E; el recipiente, la tapa, el agua, y la muestra.

Pesaje en aire (matraz): Llenar lentamente el matraz con agua tener cuidado de no introducir aire en la muestra. Colocar el matraz en un baño agua durante 10 ± 1 min para estabilizar la temperatura sin sumergir la parte superior del matraz. Medir y registrar la temperatura del agua en el matraz. Retirar el termómetro y llenar completamente el frasco usando una placa plana, tener cuidado de no atrapar aire debajo de esta. La placa será la misma que la utilizada durante la calibración del matraz. Secar cualquier humedad del exterior del contenedor y la placa. Determinar la masa de la placa, matraz y su contenido completamente lleno de agua. Designar a esta masa como E.

Esta prueba debe de repetirse para cada uno de los contenidos de asfalto.



Fig. 21 Realización Gmm



Fig. 22 Contenedor en baño de agua

Gmb: Determinación de la gravedad específica y densidad de mezclas asfálticas no absorbentes, sin parafina (ASTM D 1188 - 07).

Esta prueba nos permite determinar la gravedad específica y densidad de especímenes de mezclas asfálticas compactadas. Los resultados obtenidos de este método de prueba pueden ser utilizados para determinar el peso específico de mezclas densas compactadas y en conjunto con el método de Prueba Gmm, para obtener el porcentaje de vacíos de aire. Estos valores a su vez pueden ser usados en la determinación del grado de compactación relativo.

1. Para núcleos y otros especímenes que pueden contener humedad o solvente. Solo los especímenes que se conoce están completamente secos (es decir, especímenes secos preparados en laboratorio) son ensayados de acuerdo con 2. Para los demás se asume que contienen humedad o solventes y son ensayados de acuerdo con 1. La secuencia de ensaye para 1 es: en agua, saturado y superficialmente seco, seco.

Masa sumergida del espécimen. Sumerja completamente el espécimen en el baño María a 25 °C (77 °F) de 3 a 5 min luego determine la masa sumergida. Designar esta masa como C. Si la temperatura del espécimen difiere de la temperatura del baño María en más de 2 °C (3.6 °F), el espécimen deberá sumergirse en el baño María de 10 a 15 min, en lugar de 3 a 5 min.

Medir la temperatura del agua y si difiere de 25 °C ± 1 °C (77 ± 1.8 °F) se deberá realizar una corrección a la gravedad específica a 25 °C de acuerdo con 10.1.1

Masa del espécimen saturada y superficialmente seca del espécimen en el aire. Secar superficialmente el espécimen de manera rápida con una toalla y después determinar la masa en el aire. Designar esta masa como B.

Después de determinar la masa en agua y en condición saturada y superficialmente seca, seque completamente el espécimen hasta una masa constante a 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F). Permita que el espécimen se enfríe y péselo en el aire. Designe esta masa como A. Se

podrán utilizar otros métodos para el secado mientras puedan lograr la masa constante (diferencia de pesaje no mayor de 0.1%).

Nota 2. El secado del espécimen a la temperatura requerida de 110 °C (230 °F) podría cambiar las características y forma del espécimen. Esto puede hacer al espécimen inapropiado para pruebas posteriores. Secar el espécimen a una temperatura inferior de 52 °C (125 °F), con el propósito de mantenerlo intacto, no cumplirá con los requerimientos de este método de ensaye.



Fig. 23 Acondición probabetas Gmb

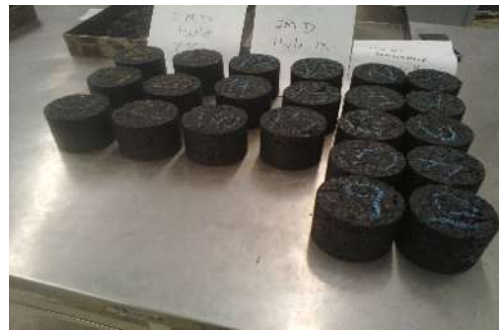


Fig. 24 Probetas para Gmb

El secado por microondas u otros métodos apropiados puede ser usado para secar el espécimen si el espécimen no es sobre calentado y existe documentación que muestre que los resultados son equivalentes al secado en el horno. Los intervalos de tiempo entre lecturas para determinar la masa constante deben ser suficiente para asegurar que toda la humedad y solventes han sido removidos. Este intervalo es dependiente del tamaño del espécimen y puede ser determinado por experimentación y confirmado con las comparaciones del secado en horno. Deberá existir documentación para validar los intervalos.

2. Especímenes completamente secos preparados en laboratorio.

Masa seca del espécimen al aire. Determinar la masa pesando el espécimen después de estar al aire en un cuarto de temperatura por al menos una hora. Designar este valor como A.

Masa sumergida del espécimen. Utilizar el mismo procedimiento descrito en 9.1.1.

Masa saturada y superficialmente seca al aire. Secar superficialmente el espécimen de manera rápida con una toalla y después determinar la masa en el aire. Designar esta masa como B.



Fig. 25 Compactación de Probetas



Fig. 26 Compactar Automático Servopack

Gmb con parafina: Determinación de la gravedad específica y densidad de mezclas bituminosas compactadas usando especímenes revestidos con parafina (ASTM D 1188 - 07):

Si el porcentaje de agua absorbida por el espécimen en la prueba de Gmb excede 2% continúe con el procedimiento de la prueba con parafina. Si el porcentaje de agua absorbido por el espécimen no excede el 2%, se usa el reporte de la gravedad específica del espécimen sin revestir.

1. Masa del espécimen sin revestir. Después que la muestra ha sido secada utilizando un ventilador hasta que la masa constante ha sido alcanzada, determine la masa de la muestra. Designe esta masa como A

2. Masa del espécimen revestido:

2.1 Sobre una superficie dura, cortar dos piezas de parafina de 100 x 100 mm (4 x 4 in).

2.2 Quitar el forro de una de las piezas de 100 x 100 mm (4 x 4 in).

2.3 Agarrar los lados opuestos de la película y a largar. Repetir el alargamiento con los otros dos lados hasta que la película ha sido estirada aproximadamente como un cuadrado de 150 x 150

mm (6 x 6 in). Tener cuidado de no hacer hoyos en la película.

2.4 Colocar la película estirada sobre un extremo del espécimen y presiona los lados de la película alrededor de la muestra.

2.5 Voltear el espécimen y colocarlo sobre la capa de espuma repetir 2.2 – 2.4 para el otro extremo del espécimen.

2.6 Después que ambos extremos han sido atrapados (y trabajan sobre la capa de espuma) colocar la otra pieza de espuma arriba del espécimen que es aproximadamente del mismo tamaño y forma del espécimen. Utilizar otro espécimen del mismo tamaño para presionar la parte superior de la espuma. Esto eliminará las bolsas de aire de ambas superficies.

2.7 Usar una navaja para quitar los excesos de película de los lados de la muestra. Tener cuidado de no dañar la muestra. Deberá haber un mínimo de 15 mm (aproximadamente 0.5 in) de película restante sobre el lado del espécimen de cada extremo.

2.8 Quitar el forro de la pieza restante de película. Agarrar la película en los extremos y alargar cerca de 400 mm (in).

2.9 Colocar un extremo de la película estirada sobre un lado del espécimen y enrollarlo hasta que la película se ajuste en la superficie.

2.10 Doblar y presionar los bordes alrededor y sobre los bordes del espécimen.

2.11 Determine la masa del aire del espécimen revestido y designe esta masa como D.

2.12 Determine la masa del espécimen revestido sumergido en el baño María a 25 °C. Designe esta masa como E. Medir la temperatura del agua y si es diferente de 25 °C ± 1 °C (77 °C ± 1.8 °F), una corrección de la gravedad específica a 25 °C deberá ser realizada de acuerdo con 9.3. Si la temperatura del espécimen difiere de la temperatura del baño María por más de 2 °C (3.6 °F), el espécimen deberá sumergirse en el baño María de 10 a 15 min.



Fig. 27 Probetas Parafinadas



Fig. 28 Pobeta con parafina en baño de agua

3. Gravedad específica aparente de la parafina.

3.1 Determinar la gravedad específica del cilindro de calibración de aluminio a 25 °C (77 °F) ± 1 °C (1.8 °F) primero determine la masa en el aire y luego la sumergida. La gravedad específica es:

$$G_{Al} = \frac{A_{Al}}{A_{Al} - B_{Al}}$$

Donde

AAI masa seca en el aire, g

BAI masa bajo el agua, g

3.2 Secar y envolver el cilindro de aluminio como se describe en 7.2 y determinar la masa del espécimen envuelto seco al aire y la masa sumergida.

3.3 Determinar la gravedad específica de la parafina a 25 °C (77 °F) ±1 °C (1.8 °F):

$$F = \frac{D_{Al} - A_{Al}}{D_{Al} - E_{Al} - \frac{A_{Al}}{G_{Al}}}$$

Donde

DAI masa seca del espécimen envuelto, g

EAI masa sumergida del espécimen envuelto.

En caso de que el espécimen haya sido obtenido durante la construcción o de un pavimento y contiene humedad, es necesario corregir las masas como se explica en las siguientes secciones:

La humedad puede ser determinada por uno de los dos métodos.

Determine la masa original de la muestra. Luego seque la muestra sin parafinar hasta masa constante en un horno a una temperatura de aproximadamente 110 °C (230 °F). Una masa constante es definida cuando el cambio en masa entre intervalos de secado consecutivos de 15 min. es menor a 0.05%. Designar esta masa secada en horno como E_{seca}. La masa de la humedad, E_{humedad} es:

$$E_{humedad} = E_{original} - E_{seca}$$

Donde

E_{original} masa original del espécimen, g

E_{seca} masa secada en horno, g

Reste E_{humedad} de cualquier de masa de las siguientes secciones.

Alternativamente, determine la masa de la humedad en la muestra usando el método de prueba D 1461. Este método debe ser usado si el material bituminoso en la mezcla contiene algún material volátil a una temperatura de 110 °C (230 °F). La masa de la humedad es restada de cualquier determinación de masa en las secciones siguientes.

4. DEFORMACIÓN PERMANENTE

Ya que tenemos el contenido de asfalto óptimo para los diferentes contenidos de hule de neumático procedemos a fabricar las probetas de la misma forma que lo hicimos para el análisis de Gmb las cuales probaremos en el Analizador de pavimentos Flexibles (APA), dichas probetas deben de tener 150 ± 2.0 mm de diámetro y 75 ± 2 mm de altura como se indica en la recomendación AMAAC 02/2011 referente a la susceptibilidad a la deformación permanente por rodera de una mezcla asfáltica. En esta prueba mediremos la deformación permanente que podemos esperar debido al tránsito vehicular y así tener una mejor idea de cómo se comportará el pavimento asfáltico tendido en obra.

Dentro de los resultados esperados en dicha prueba están el ver que con mayor cantidad de hule de neumático la deformación permanente disminuya considerablemente.

El APA es un probador de carga multifuncional que se utiliza para evaluar deformación permanente, agrietamiento por fatiga y susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas. El tiempo de prueba para una evaluación completa de deformación permanente es de 2h y 16min (8000 ciclos). La evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente de las mezclas asfálticas se puede determinar tanto en especímenes rectangulares como en cilíndricos, mediante cargas repetidas aplicadas con ruedas y midiendo la profundidad de la huella que deja la rueda. El APA cuenta con un sistema de adquisición de datos automatizado.

Las partes de la rueda de carga y la presión de inflado son representativas de las condiciones actuales en campo. Cada espécimen puede estar sujeto a un diferente nivel de carga. Pueden probarse seis cilindros a la vez, bajo temperaturas controlables tanto en condición seca como húmeda.



Fig. 29 Analizador de Pavimentos Flexibles

A continuación se describe el procedimiento de uso del Analizador de Pavimentos Flexibles (tomado de la publicación técnica 271 del Instituto Mexicano del Transporte):

1. Las probetas se acondicionan en el horno a la temperatura de prueba (64°C) por un espacio de 6 h previo al ensaye.
2. Se enciende el equipo, y desde el software de operación se introduce la temperatura de prueba en el panel de control principal (Figura siguiente).



Fig. 30 Tablero APA

3. Se lleva a cabo la calibración de las ruedas del APA mediante una celda de carga (Figura siguiente), a fin de asegurar que cada rueda aplique una fuerza de 100 lb durante el desarrollo de la prueba.

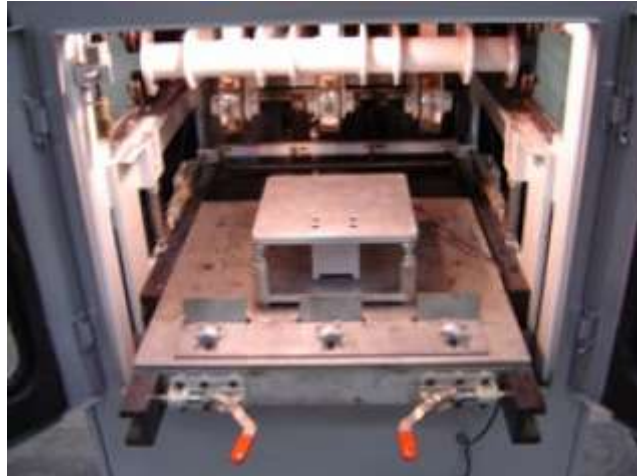


Fig. 31 Interior APA

4. En el panel de control del ensaye de deformación permanente (Figura siguiente), se especifica el tipo de probeta (viga o moldes cilíndricos); número de ciclos; presión de las mangueras; posición de los medidores de deformación (LVDT,s), entre otros parámetros. La prueba se ejecutó a 8 000 ciclos, con una presión de aire en las mangueras de 100 lb/pulg².

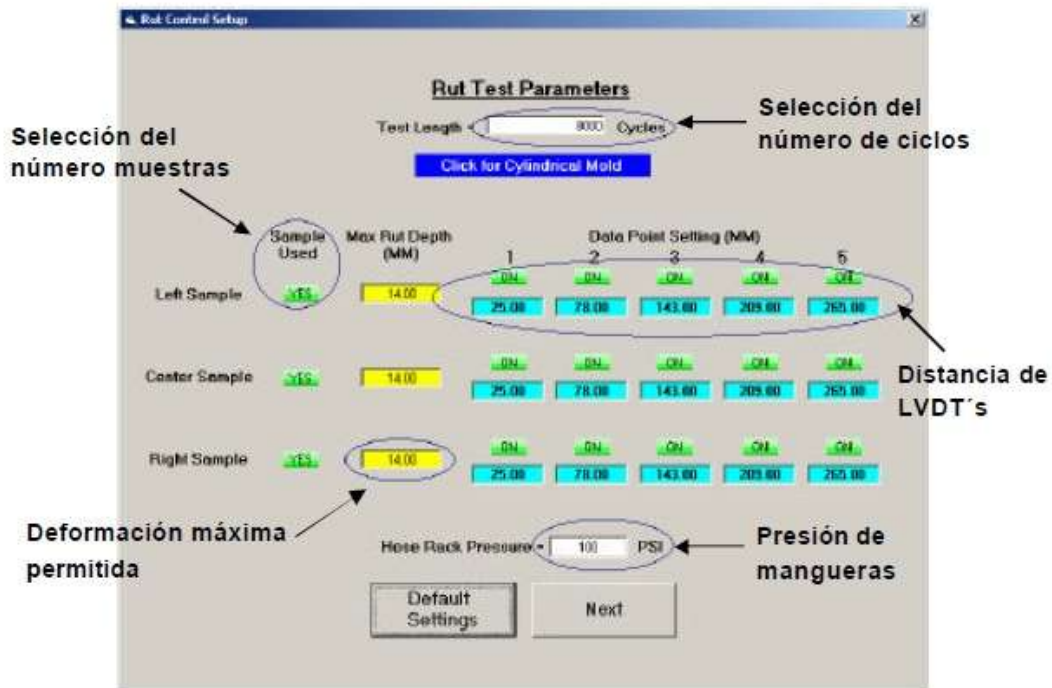


Fig. 32 Programa APA

5. Una vez que el equipo ha alcanzado los 64 °C se sacan las probetas del horno y se colocan las probetas dentro de los moldes de plástico, mismos que se introducen en el APA de tal forma que queden centrados por debajo de cada rueda (Figura siguiente izquierda).

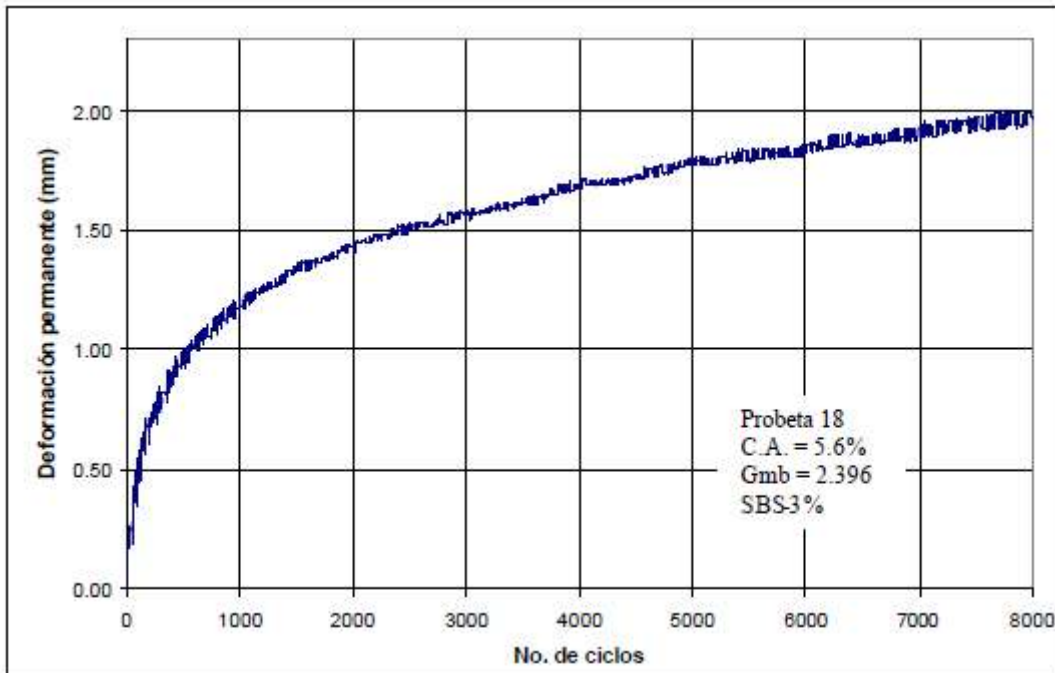


Fig. 33 Probetas en APA



Fig. 34 Probetas ya ensayadas

La prueba termina una vez completados los 8 000 ciclos, la Figura anterior derecha muestra la apariencia de las probetas después del ensayo de deformación permanente en el Analizador de Pavimentos Asfálticos. En la Figura siguiente se aprecia una curva típica de la evolución de la deformación permanente durante la prueba.



Gráfica 5 Ejemplo de gráfica de deformación permanente



5.- RESULTADOS

5.1 Diseño volumétrico

Diseño volumétrico Mezcla convencional

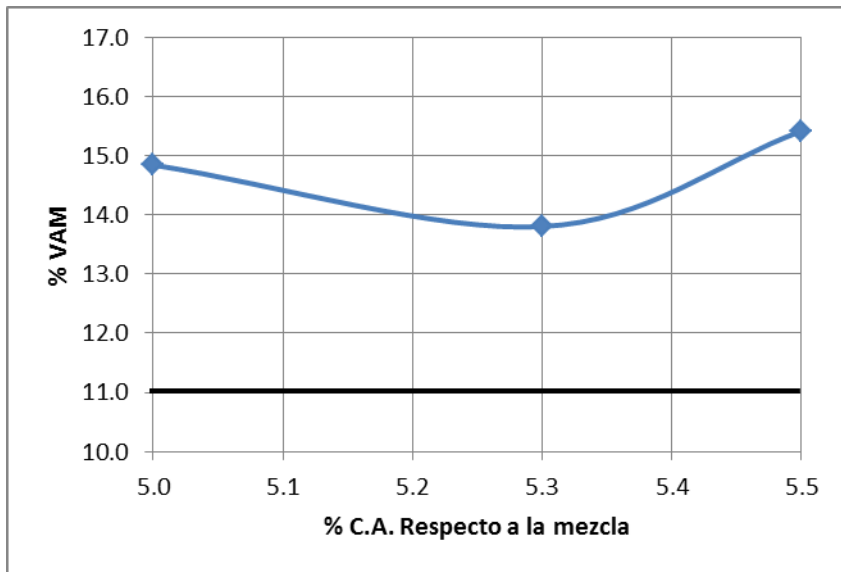
Densidad del agregado fino:	2.517	% Agregado Fino	42.5	G _{sb} =	2.642	G _b =	1.03
Densidad del agregado grueso:	2.742	% Agregado grueso	57.5				
% Que pasa la malla N0. 200:	3.5	Compactad or:	Giratorio	No. Giros:	100	Asfalto:	AC-20

No. pastilla	%C.A. agregado	Pb	Ps	W _{seco}	W _{sumergido}	W _{sss}	G _{mb}	G _{mm}	G _{se}	P _{ba}	P _{be}	%VAM	%VA	% VAF	% Filler/Asfalto
3		5.0	95.0	1243.0	726.1	1251.8	2.364	2.524	2.733	1.298	3.767	14.98	6.34	57.70	0.929
4		5.0	95.0	1239.4	727.0	1249.5	2.372	2.524	2.733	1.298	3.767	14.70	6.02	59.02	0.929
9		5.3	94.7	1251.0	737.7	1257.3	2.408	2.522	2.744	1.461	3.916	13.68	4.52	66.95	0.894
10		5.3	94.7	1241.2	730.8	1247.8	2.401	2.522	2.744	1.461	3.916	13.93	4.80	65.55	0.894
5		5.5	94.5	1247.3	728.4	1255.8	2.365	2.472	2.691	0.719	4.820	15.40	4.33	71.89	0.726
6		5.5	94.5	1247.5	728.1	1255.7	2.364	2.472	2.691	0.719	4.820	15.43	4.37	71.69	0.726
											5.0	14.84	6.18	58.36	0.93
											5.3	13.80	4.66	66.25	0.89
											5.5	15.41	4.35	71.79	0.73

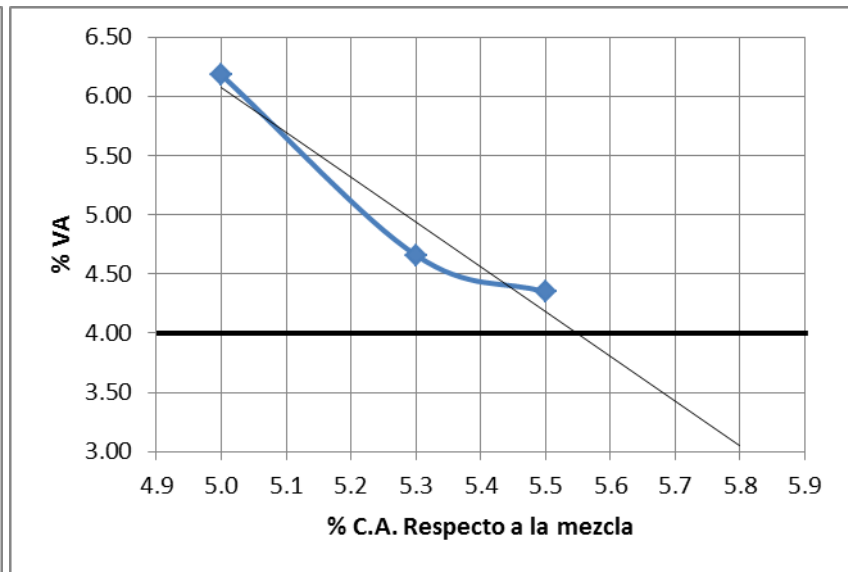
Tabla 15 Resultados de pruebas Volumetricas mezcla convencional

%CA	VAM	%CA	VA	%CA	VAF	%CA	Filler
5.0	14.8	5.0	6.18	5.0	58.4	5.0	0.93
5.3	13.8	5.3	4.66	5.3	66.2	5.3	0.89
5.5	15.4	5.5	4.35	5.5	71.8	5.5	0.73

Tabla 16 Resultados diseño volumetrico mezcla convencional

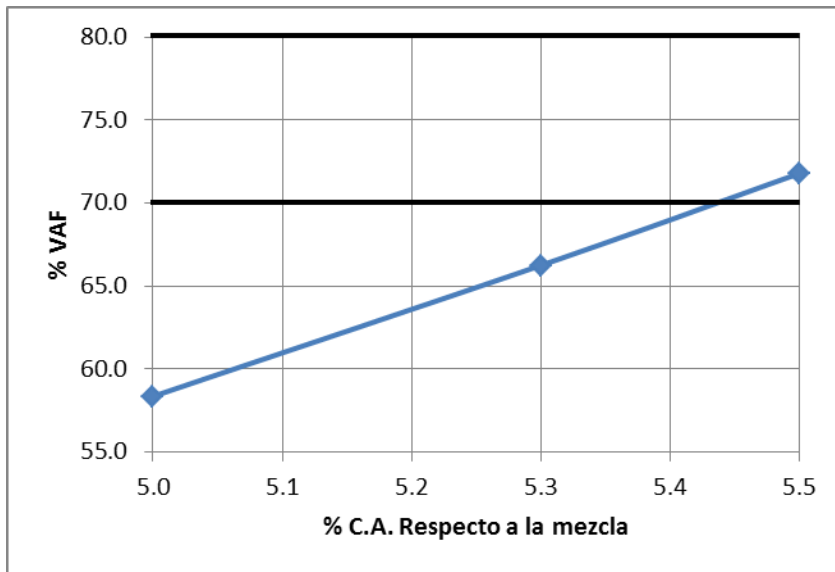


Gráfica 6 VAM respecto al porcentaje de asfalto

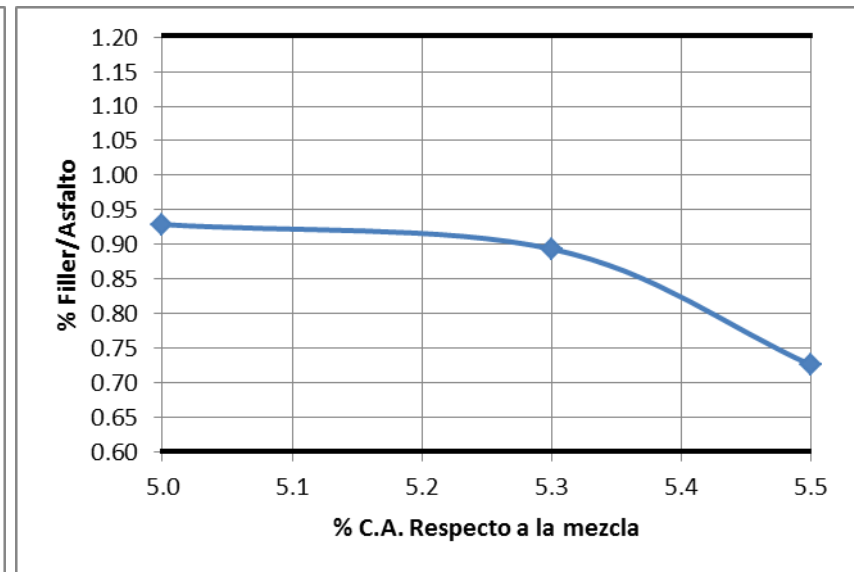


Gráfica 7 VA respecto al porcentaje de asfalto

El contenido óptimo de asfalto seleccionado fue de 5.4%, el cual resultó ser el mismo valor que se usa para los diseños convencionales en el instituto, comprobando que la prueba se hizo de la manera correcta.



Gráfica 8 VAF respecto al porcentaje de asfalto



Gráfica 9 porcentaje Filler/asfalto respecto al porcentaje de asfalto

Diseño volumétrico 1% de hule



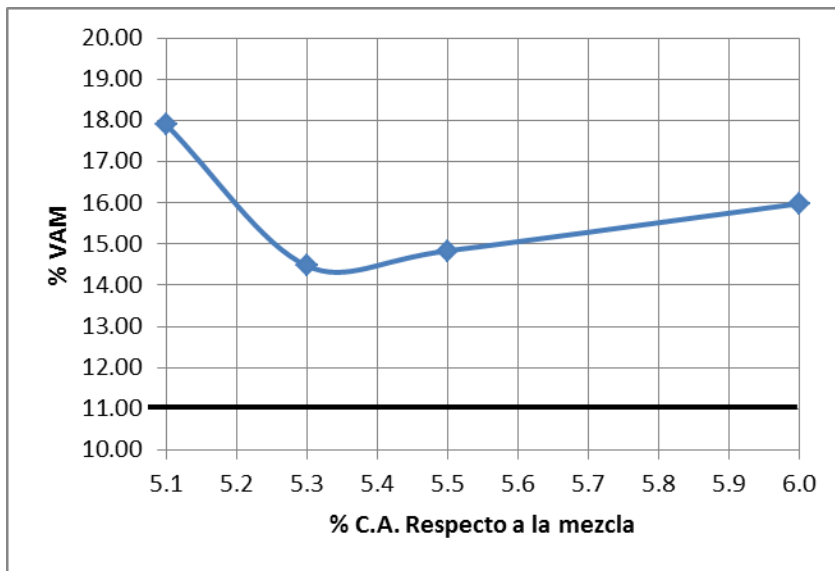
Densidad del agregado fino:	2.517	% Agregado Fino	41.5	$G_{sb} =$	2.572	$G_b =$	1.03
Densidad del agregado grueso:	2.742	% Agregado grueso	57.5				
% Que pasa la malla NO. 200:	3.5	Compactador:	Giratorio	No.		Asfalto:	AC-20
Densidad del hule:	0.700	% Hule:	1.0	Giros:	100		

No. pastilla	%C.A. agregado	Pb	Ps	W _{seco}	W _{sumergido}	W _{sss}	G _{mb}	G _{mm}	G _{se}	P _{ba}	P _{be}	%VAM	%VA	% VAF	% Filler/Asfalto
23		5.1	94.9	1247.2	721.6	1267.7	2.268	2.497	2.704	1.961	3.239	16.30	9.17	43.75	1.081
24		5.1	94.9	1245.0	718.5	1273.9	2.182	2.497	2.704	1.961	3.239	19.48	12.62	35.23	1.081
25		5.3	94.7	1247.3	721.4	1263.2	2.314	2.490	2.705	1.969	3.435	14.79	7.07	52.20	1.019
26		5.3	94.7	1244.5	720.8	1258.6	2.331	2.490	2.705	1.969	3.435	14.16	6.39	54.90	1.019
27		5.5	94.5	1249.7	721.5	1265.5	2.296	2.484	2.706	1.995	3.615	15.63	7.57	51.57	0.968
28		5.5	94.5	1247.9	723.3	1260.7	2.339	2.484	2.706	1.995	3.615	14.05	5.84	58.44	0.968
41		6.0	94.0	1254.4	712.0	1261	2.285	2.469	2.711	2.056	4.067	16.48	7.45	54.77	0.861
42		6.0	94.0	1257.1	718.6	1262.3	2.312	2.469	2.711	2.056	4.067	15.49	6.36	58.95	0.861
											5.1	17.89	10.89	39.49	1.08
											5.3	14.47	6.73	53.55	1.02
											5.5	14.84	6.70	55.01	0.97
											6.0	15.98	6.91	56.86	0.86

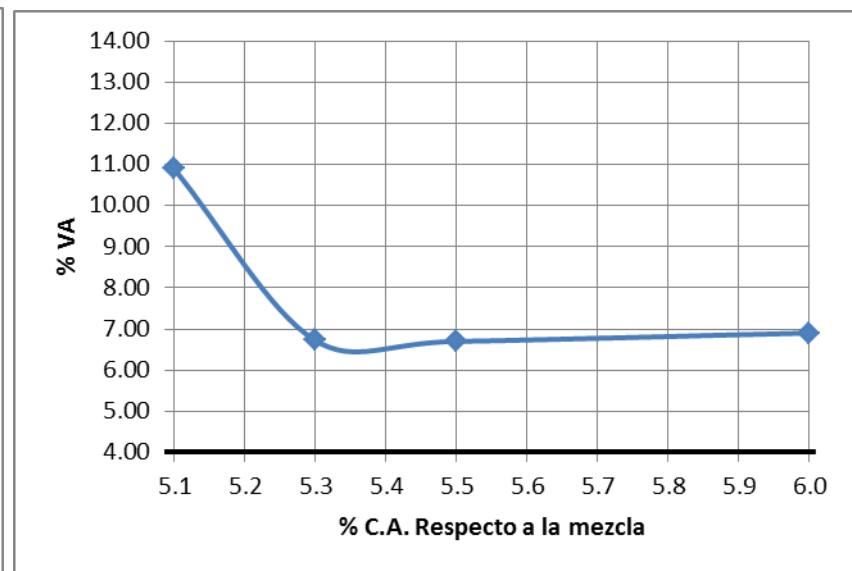
Tabla 17 Resultados de pruebas Volumetricas mezcla 1% de hule

%CA	VAM	%CA	VA	%CA	VAF	%CA	Filler
5.1	17.89	5.1	10.89	5.1	39.49	5.1	1.08
5.3	14.47	5.3	6.73	5.3	53.55	5.3	1.02
5.5	14.84	5.5	6.70	5.5	55.01	5.5	0.97
6.0	15.98	6.0	6.91	6.0	56.86	6.0	0.86

Tabla 18 Resultados diseño volumetrico mezcla 1% de hule

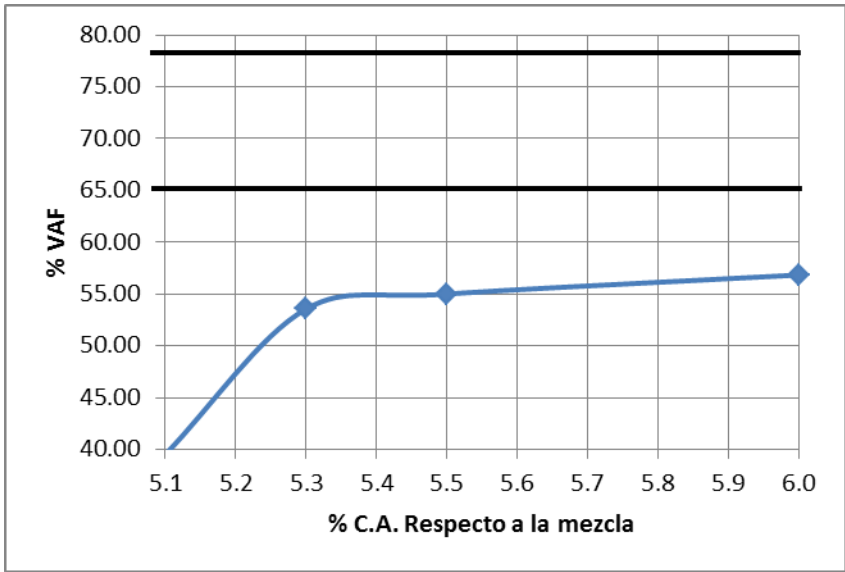


Gráfica 10 VAM respecto al porcentaje de asfalto

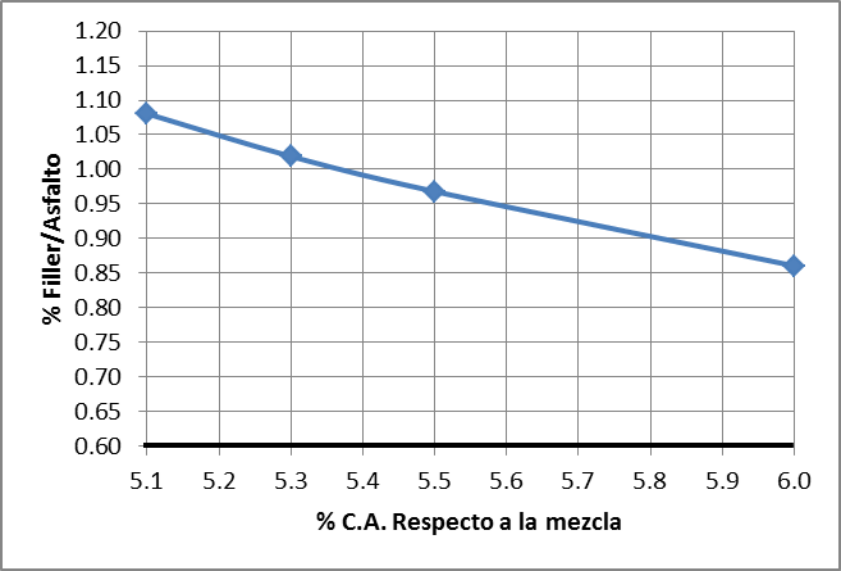


Gráfica 11 VA respecto al porcentaje de asfalto

Esta mezcla requirió el uso de parafina para calcular Gmb, debido a que su porcentaje de absorción es muy alto, esto debido al hule de neumático, sin embargo para 6% de asfalto no se requirió dicho procedimiento.



Gráfica 12 VAF respecto al porcentaje de asfalto



Gráfica 13 porcentaje filler/asfalto respecto al porcentaje de asfalto

Debido a los resultados de esta mezcla no se realizó cálculo de contenido de asfalto ya que dio valores demasiado alejados al 4% de vacíos de aire.



Diseño volumétrico 2% de hule

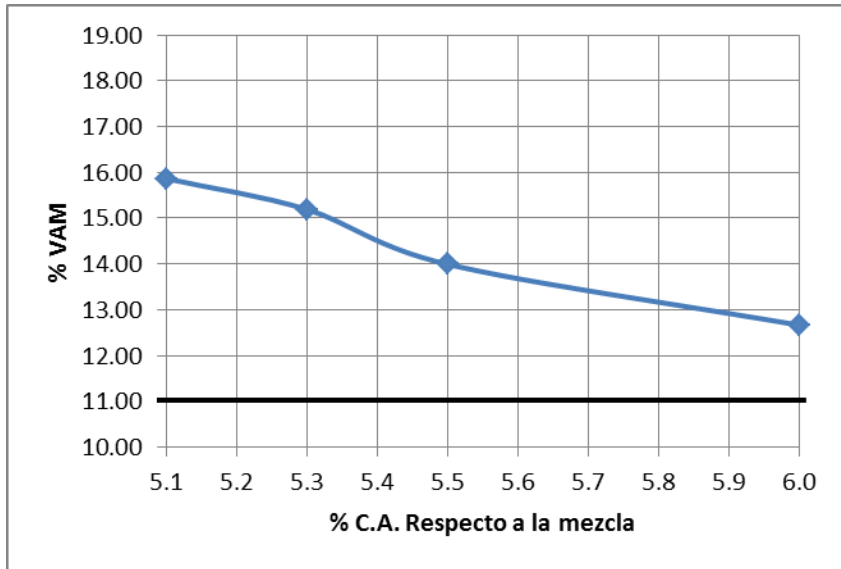
Densidad del agregado fino:	2.517	% Agregado Fino	40.5	$G_{sb} =$	2.505	$G_b =$	1.03
Densidad del agregado grueso:	2.742	% Agregado grueso	57.5				
% Que pasa la malla N0. 200:	3.5	Compactador:	Giratorio	No. Giros:	100	Asfalto:	AC-20
Hule:	0.700	% Hule:	2.0				

No. pastilla	%C.A. agregado	Pb	Ps	W _{seco}	W _{sumergido}	W _{sss}	G _{mb}	G _{mm}	G _{se}	P _{ba}	P _{be}	%VAM	%VA	% VAF	% Filler/Asfalto
29		5.1	94.9	1244.2	710.6	1258.1	2.273	2.431	2.623	1.843	3.351	13.89	6.50	53.22	1.044
30		5.1	94.9	1245.6	705.6	1266.7	2.169	2.431	2.623	1.843	3.351	17.83	10.78	39.57	1.044
31		5.3	94.7	1246.4	714.3	1258.7	2.253	2.429	2.629	1.934	3.468	14.83	7.25	51.15	1.009
32		5.3	94.7	1247.8	711.5	1265.4	2.234	2.429	2.629	1.934	3.468	15.55	8.03	48.37	1.009
33		5.5	94.5	1246.3	712.1	1255.1	2.295	2.427	2.635	2.026	3.585	13.43	5.44	59.49	0.976
34		5.5	94.5	1242.2	709.0	1255.5	2.265	2.427	2.635	2.026	3.585	14.56	6.67	54.15	0.976
43		6.0	94.0	1252.7	722.0	1254.1	2.356	2.405	2.629	1.937	4.179	11.60	2.04	82.43	0.838
44		6.0	94.0	1253.8	712.0	1257.4	2.299	2.405	2.629	1.937	4.179	13.74	4.41	67.91	0.838
											5.1	15.86	8.64	46.39	1.04
											5.3	15.19	7.64	49.76	1.01
											5.5	13.99	6.06	56.82	0.98
											6.0	12.67	3.22	75.17	0.84

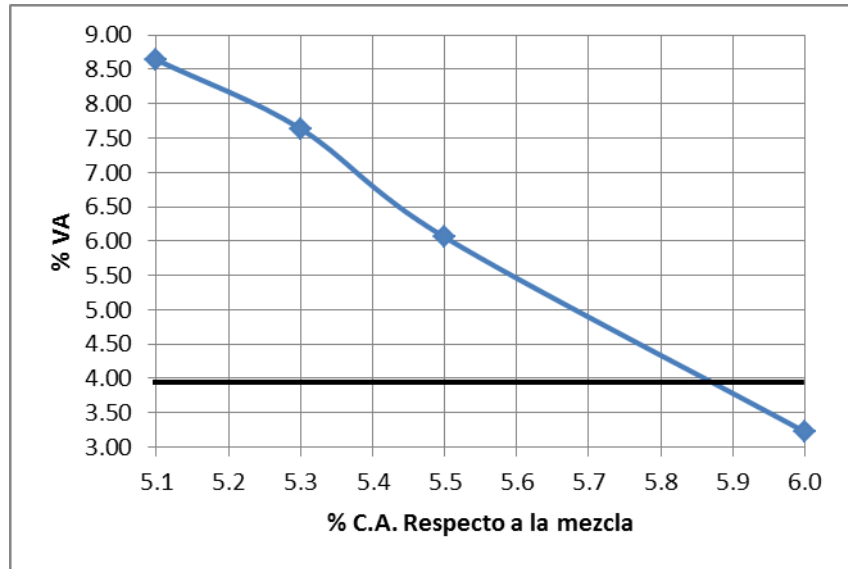
Tabla 19 Resultados de pruebas Volumetricas mezcla 2% de hule

%CA	VAM	%CA	VA	%CA	VAF	%CA	Filler
5.1	15.86	5.1	8.64	5.1	46.39	5.1	1.04
5.3	15.19	5.3	7.64	5.3	49.76	5.3	1.01
5.5	13.99	5.5	6.06	5.5	56.82	5.5	0.98
6.0	12.67	6.0	3.22	6.0	75.17	6.0	0.84

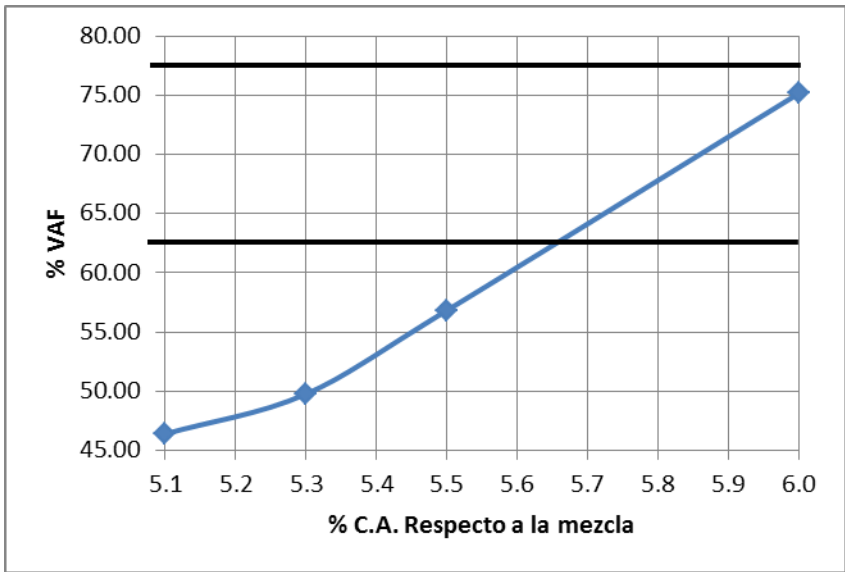
Tabla 18 Resultados diseño volumetrico mezcla 2% de hule



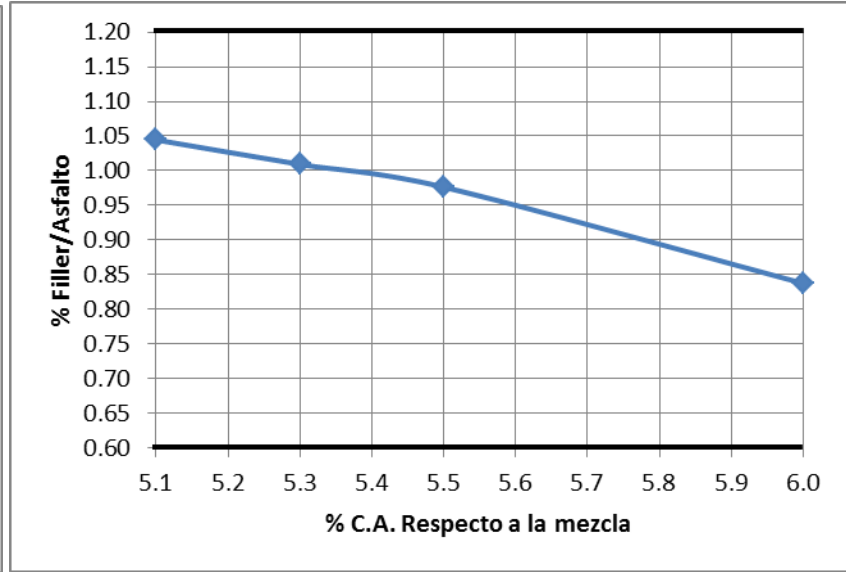
Gráfica 14 VAM respecto al porcentaje de asfalto



Gráfica 15 VA respecto al porcentaje de asfalto



Gráfica 16 VAF respecto al porcentaje de asfalto



Gráfica 17 Porcentaje filler/asfalto respecto al porcentaje de asfalto

Se optó por seleccionar el contenido de asfalto de 5.8% ya que estuvo muy cercano al 4% de vacíos de aire y además cumplió con todos los valores requeridos.

5.2 Tensión indirecta

Para este ensaye: de la mezcla convencional se seleccionaron las pastillas 3, 4, 5, 6, 9, 10, de la mezcla al 1% de hule se seleccionaron las pastillas 11, 12, 13, 14, 15 y 16; de la mezcla con hule al 2% se eligieron las pastillas 17, 18, 19, 20, 21 y 22.

Tabla 19 ACONDICIONAMIENTO DE LOS ESPECIMENES PARA ENSAYAR TSR,(Recomendación AMAAC RA 04/2008)

N° Especimen	Gmm	Diametro mm	Altura mm	Volumen cm	% Va	Gmb (ASTM D 2726-09)			Va abs	% saturacion
						Waire A	Wsss B	Wsumerg C		
						s1	s1	s1		
3	2.254	99.77	70.11	548.11	5.82	1253.6	1278.1	736.0	24.5	77.654
9	2.521	99.75	69.75	545.08	5.67	1259.4	1281.7	740.6	22.3	72.685
5	2.472	99.69	70.41	549.58	3.40	1257.5	1272.2	735.4	14.7	80.543
11	2.497	100.88	74.94	598.98	10.05	1273.5	1317.7	724.1	44.2	74.090
13	2.490	100.24	74.85	590.70	8.35	1263.1	1307.0	720.9	43.9	89.703
15	2.484	100.10	75.05	590.62	8.62	1266.6	1305.3	719.1	38.7	76.587
17	2.431	100.55	73.18	581.09	7.08	1263.0	1295.6	712.7	32.6	78.993
19	2.429	101.09	72.63	582.94	6.55	1267.8	1297.1	715.4	29.3	76.900
21	2.427	100.85	73.03	583.37	6.59	1267.3	1296.3	714.9	29.0	75.690

Los resultados se muestran a continuación:

MUESTRAN° 1

seco

N°	St (Kpa)
9	788.5707022
11	265.42
Promedio	526.99

TSR= 92.02%

Humedo

N°	St (Kpa)
22	498.562187
20	449.060501
12	507.17
Promedio	484.93

MUESTRA N°2

Seco

N°	St (Kpa)
5	957.3776637
3	987.2897917
Promedio	972.33

TSR= 52.44%

Humedo

N°	St (Kpa)
15	418.119594
18	430.211089
16	681.43178
Promedio	509.92



**MUESTRA
N°3**

Seco	
N°	St (Kpa)
19	497.7688669
17	317.437819
21	418.16122
14	688.0849646
4	850.7160826
Promedio	554.43

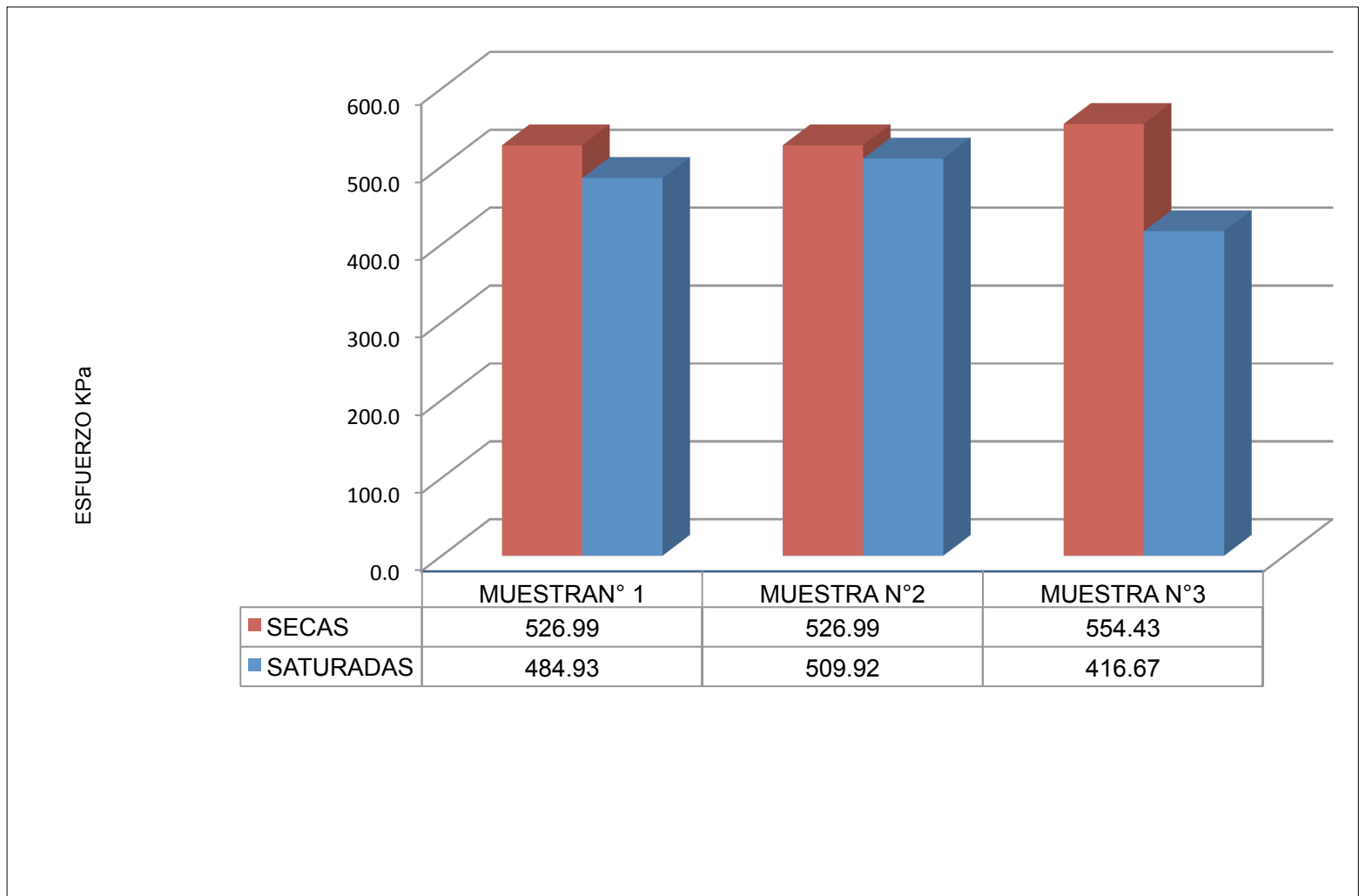
Humedo	
N°	St (Kpa)
6	799.873549
10	866.817282
Promedio	416.67

TSR= 75.15%

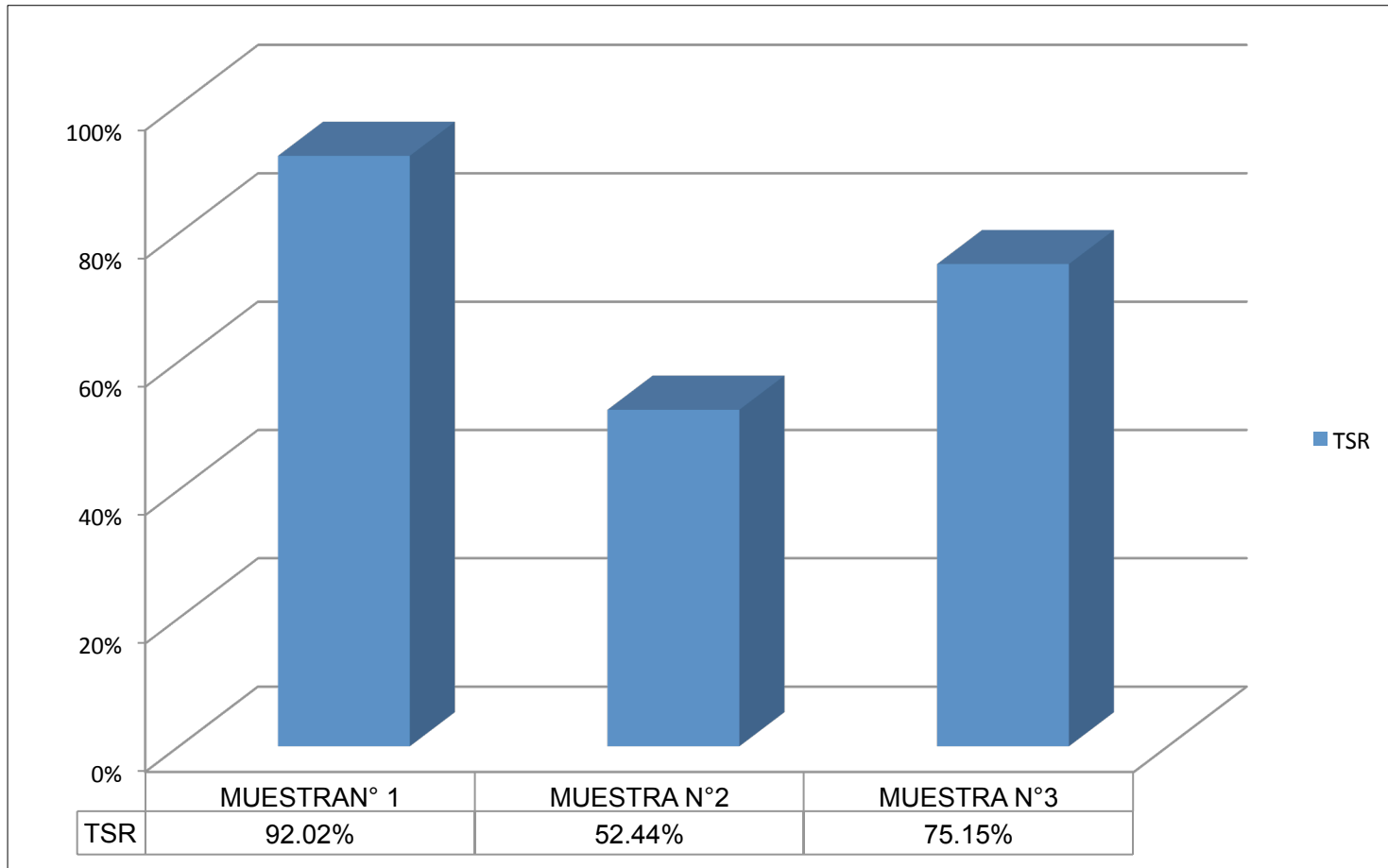
MUESTRAN°	SECAS	SATURADAS	TSR
1	526.99	484.93	92.02%
MUESTRA N°2	526.99	509.92	52.44%
MUESTRA N°3	554.43	416.67	75.15%

Las probetas modificadas con hule de llanta resultaron menos resistentes a la tensión, esto puede deberse a que las partículas de material tienen menor cantidad de asfalto ya que el hule de llanta absorbe parte de este.

Gráfica 18.- RELACIÓN DE RESISTENCIAS



Gráfica 19 Valores de TSR



5.3 Deformación permanente

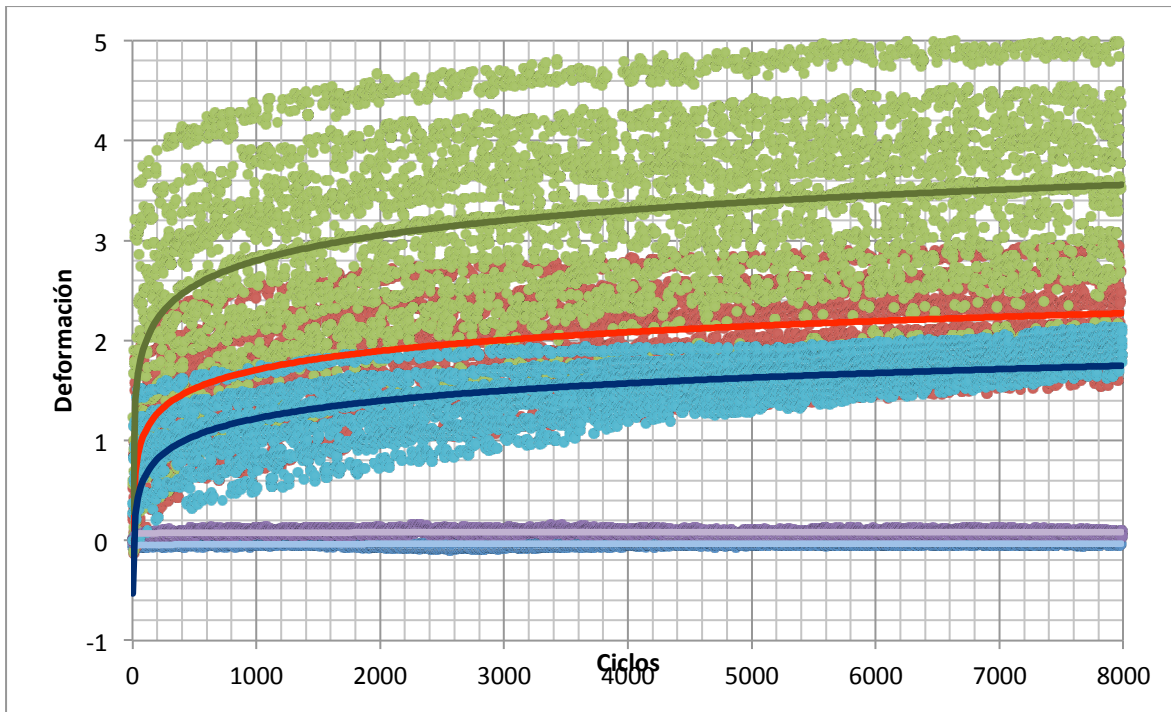
Para este ensaye se seleccionaron algunas de las pastillas ya fabricadas: de la mezcla convencional se seleccionaron las pastillas 1,2, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 7 y 8; de la mezcla al 1% de hule se seleccionaron las pastillas 23, 24, 25, 26, 41 y 41; de la mezcla con hule al 2% se eligieron las pastillas 29, 30, 31, 32, 33, 34, 43 y 44.



Fig. 35 Algunas de las probetas ensayadas

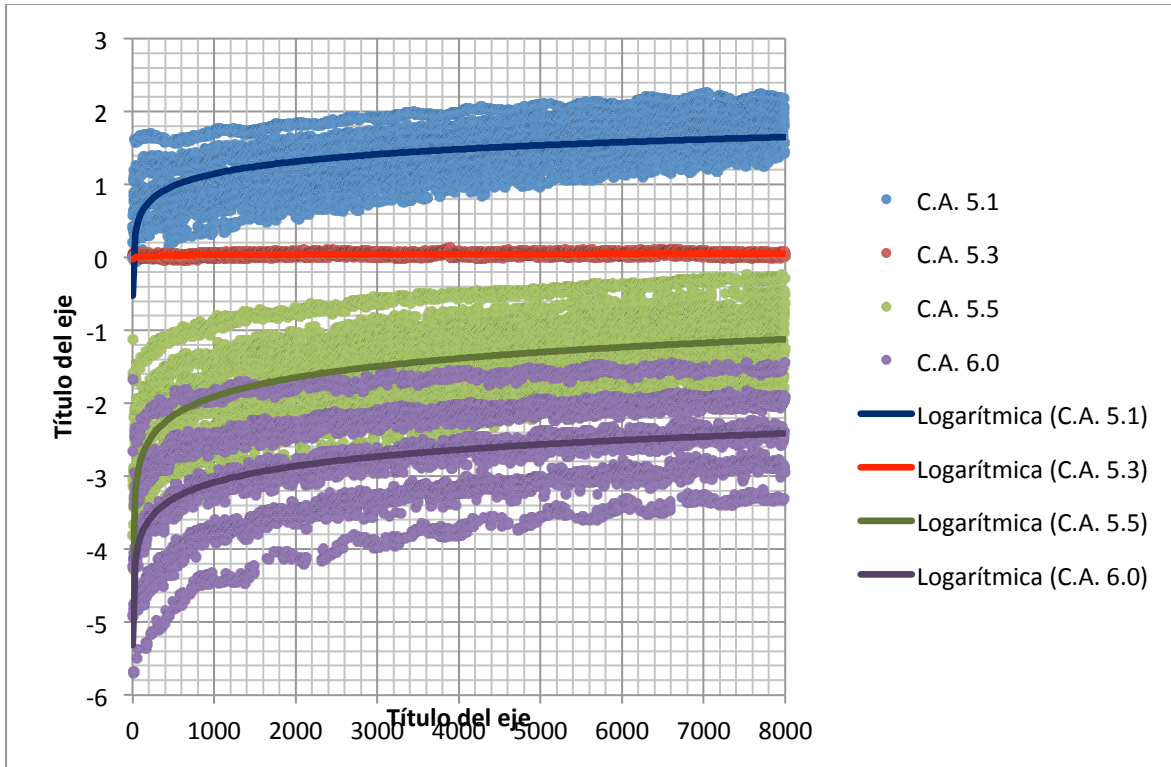
Los resultados se muestran a continuación:

Mezcla convencional



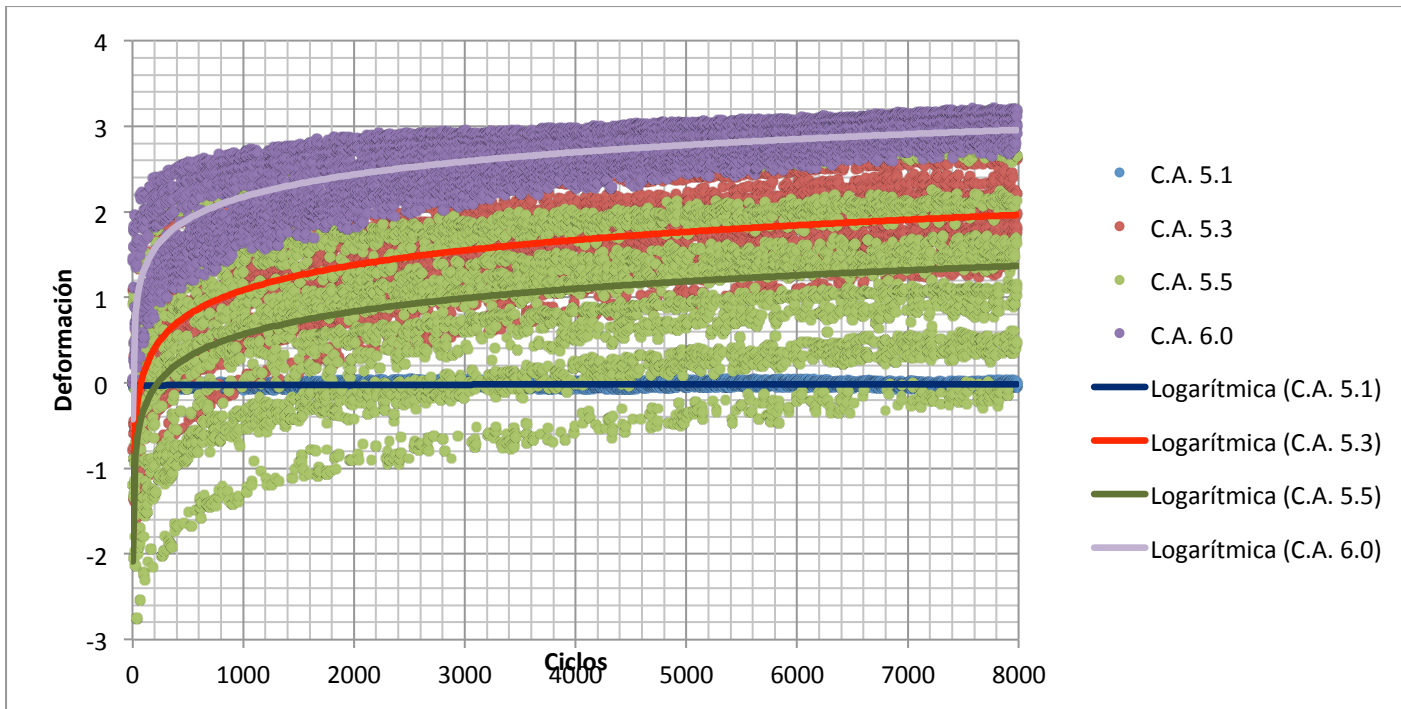
Gráfica 20 Deformación permanente mezcla convencional

Mezcla con 1 % de hule



Gráfica 21 Deformación permanente mezcla 1% de hule

Mezcla con 2 % de hule



Gráfica 22 Deformación permanente mezcla con 2% de hule

El comportamiento de la mezcla modificada con hule de llanta resulta ser más favorable en la deformación permanente, teniendo algunos milímetros menos de deformación con respecto a la mezcla convencional, aunque también resulta interesante ver que aunque la mezcla modificada con hule parece deformarse en un inicio, esta tiende a mantener su postura original gracias al hule incluido.

6. CONCLUSIONES

La presente investigación pretende abrir camino en un tema poco abundado dentro de México, tal como es la adición de hule molido en mezclas asfálticas, esto con el fin de buscar un avance en materia medio ambiental, debido a que se reciclaran los neumáticos fuera de uso, que inundan considerablemente el país, y que se están convirtiendo en un problema de magnitudes catastróficas, ya que no existen las suficientes formas de aprovecharlos, y con este trabajo se pretende extender su uso de sobre manera en la mayor parte del país, para así tratar de aminorar este gran problema.

Además cabe mencionar que no sólo se reciclará un material altamente contaminante, sino que además las mezclas asfálticas mejoran la flexibilidad y resistencia a la tensión, reduciendo así la aparición de grietas por fatiga o cambios de temperatura (ref. N-CMT-4-05-002-01).

Y un último punto a mencionar es que debido a que el hule molido resulta ser un material muy económico, son menores los costos de producción de mezclas asfálticas con respecto a otros modificadores.



REFERENCIAS

1. Normas SCT: N-CMT-4-05-002-01, N-CMT-4-05-002-06
2. Alfonso Rico Rodríguez, Rodolfo Téllez Gutiérrez, Paul Garnica Anguas; Publicación 104 imt pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias, Querétaro, Mex, 1998.
3. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. Manual de Empleo de Caucho de NFU en mezclas bituminosas, España, 2007. 64 p.
4. F. Perez-Jimenez, R. Miro Recasens(*), A. Martínez, C. Martínez Laínez y A. Páez Dueñas
5. Evaluación de la cohesión de betunes modificados con polvo de neumáticos, 2006. 54 p.
6. UNIVERSIDAD DE SALAMANCA, Diseño de desarrollo y seguimiento de un aglomerado asfáltico con polvo de caucho. España, 75 p.
7. GALLEGOS MEDINA. (2001). Mezclas bituminosas modificadas por adición de polvo de neumáticos. CEDEX ,Madrid. 2001. 82 p.
8. RAMIREZ GARCIA, José Luis, Tesis usos y aplicaciones del asfalto modificado con hule reciclado de llantas, México, 2004, 98 p.
9. CRESPO VILLALAZ, Carlos, Vías de comunicación, México 2001, 717 p.
10. PEREZ JIMENEZ, Félix, Estudio, Diseño y control de mezclas bituminosas, Madrid 2006, 220 p.
11. GARNICA ANGUAS, Paul, Delgado Alamilla, Horacio, Gómez López José Antonio; González Madrigal, Álvaro, Comportamiento de la mezclas asfálticas modificadas con SBR, SCT, IMT, México 2004, 38 p.

12. GARBICA ANGUAS, Paul; Delgado Alamilla, Horacio; Sandoval Sandoval, Carlos Daniel, Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas, SCT, IMT, México 2005, 48p.
13. Secretaría de Comunicaciones y Transportes; Anuario estadístico; México; 2009, 2010.
14. Asociación Mexicana del Asfalto; Protocolo AMAAC, México, 2010.