



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE
EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES

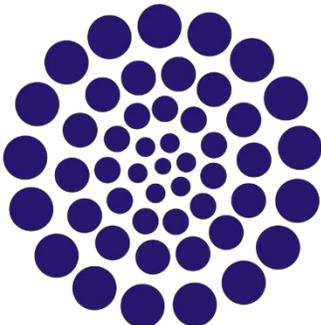
**“EFECTO DE LA UTILIZACIÓN DE HULE MOLIDO DE LLANTA EN MEZCLAS
ASFÁLTICAS DE ACUERDO AL PROTOCOLO AMAAC”**

Tesis que para obtener el título de
**MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE
EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

Presenta:
ING. MIGUEL MADRIGAL MAGAÑA

Asesor:
**DOCTOR EN INGENIERÍA CIVIL
MARIO SALAZAR AMAYA**

Co-Asesor:
**DOCTOR EN INGENIERÍA CIVIL
ROSEMBERG REYES RAMÍREZ**



Morelia, Michoacán, Febrero de 2015



AGRADECIMIENTOS

A Dios

A mi familia que me apoya siempre y en todas partes, mi padre J. Luz Madrigal García y mi madre Lucia Magaña Guerrero ^(†) que nunca me dejan caer y me incitan para superarme, a mis hermanos Jacobo, Guadalupe y Jesús que nunca dejan de darme lecciones y consejos que fortalecen mi interior. A mi esposa Marisol y a ese nuevo ser que a su corta vida me motiva a seguir adelante.

Todos ellos son la razón de este episodio en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Me es grato agradecer a mi asesor de tesis el Dr. Mario Salazar Amaya por darme la oportunidad de llevar a cabo este trabajo de investigación así como por brindarme parte de su valioso tiempo.

A mi co-asesor de tesis el Dr. Rosemberg Reyes Ramírez por la amable hospitalidad prestada y las facilidades para el uso del laboratorio de mezclas asfálticas así como sus recomendaciones fundamentales para desarrollar el presente trabajo.

A Mtro. Alejandro Castellanos Cordero, por sus asesorías, su tiempo e incontables recomendaciones que fueron clave para la correcta elaboración de esta investigación.

A Dr. Benito Corona Vásquez por permitirme hacer uso de las instalaciones de la Universidad de las Américas Puebla.

A Baruch Lacave y Armando Benítez que me apoyaron durante mi estancia, así como a todos los estudiantes de la UDLAP relacionados con el laboratorio de mezclas asfálticas.

A Dr. Jorge Alarcón Ibarra por sus consejos y recomendaciones para el correcto avance de la investigación.

A SemMaterials y su amable personal por las facilidades brindadas para realizar parte del proceso de la investigación.

A mis compañeros de la Maestría por compartir en todo momento su tiempo dentro y fuera de las aulas así como su amistad.

A los Miembro del Núcleo Académico y profesores de la Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres, por sus experiencias compartidas y sus enseñanzas vitales para desarrollar mi tesis, así como al personal que labora en la UMSNH.

Sin la participación de todas estas personas no hubiese sido posible lograr lo que en determinado momento parecía difícil.

CONTENIDO

RESUMEN	1
PALABRAS CLAVES: AGREGADOS PÉTREOS, HULE DE LLANTA, MEZCLA ASFÁLTICA, PROTOCOLO AMAAC.....	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 OBJETIVO	6
1.1.1 OBJETIVOS PARTICULARES.....	6
1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	7
1.3 DELIMITACIÓN	7
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	8
2 ANTECEDENTES	11
2.1 NEUMÁTICOS FUERA DE USO NFU.....	11
2.1.1 COMPONENTES DE LOS NEUMÁTICOS	12
2.1.2 PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE HULE MOLIDO.....	13
2.1.2.1 MOLIDO A TEMPERATURA AMBIENTE.....	13
2.1.2.2 MOLIDO POR CRIOGÉNESIS.....	13
2.1.3 APLICACIONES DE LOS NFU	14
2.2 RECICLADORES EN MÉXICO	15
2.3 USO DE HULE MOLIDO EN CARRETERAS DE MÉXICO.....	15
2.4 INCORPORACIÓN DE POLVO DE NFU EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	16
2.5 USO DE HULE MOLIDO EN OTROS PAÍSES	16
3 ESTADO DEL ARTE DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN MÉXICO	17
3.1 TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	18
3.1.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.....	18
3.1.1.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA	18
3.1.1.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA ABIERTA	18
3.1.1.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DISCONTINUA, TIPO SMA.....	19

3.1.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO.....	20
3.1.2.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA	20
3.1.2.2 MORTERO ASFÁLTICO	20
3.1.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL SISTEMA DE RIEGOS.....	20
3.2 METODOS DE DISEÑO	21
3.2.1 MÉTODO DE DISEÑO HVEEM.....	21
3.2.2 MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL	24
3.2.3 MÉTODO DE DISEÑO SUPERPAVE.....	26
3.2.3.1 AGREGADO MINERAL.....	27
3.2.3.2 CEMENTO ASFÁLTICO.....	27
3.2.3.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	28
3.2.4 PROTOCOLO AMAAC PA-MA 01/2013	30
4 PROTOCOLO AMAAC PA-MA 01/2013	33
4.1 CRITERIO DE SELECCIÓN DEL NIVEL DE EVALUACIÓN REQUERIDO.....	34
4.2 NIVEL I.....	36
4.2.1 SELECCIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS	36
4.2.1.1 GRANULOMETRÍA DE LA MEZCLA.....	36
4.2.1.2 CALIDAD DE LOS AGREGADOS PETREÓS	40
4.2.2 SELECCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO.....	42
4.2.3 DISEÑO VOLUMÉTRICO	43
4.2.4 SUSCEPTIBILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD.....	45
4.3 NIVEL II.....	47
4.3.1 SUSCEPTIBILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA A LA DEFORMACION PERMANENTE	47
4.3.1.1 RUEDA CARGADA DE HAMBURGO	47
4.3.1.2 ESPECIFICACIONES CON EL APA.....	49
4.3.1.3 ESPECIFICACIONES CON EL ENSAYE DE PISTA ESPAÑOLA	49
4.4 NIVEL III.....	51
4.4.1 MÓDULO DINÁMICO	51

4.5 NIVEL IV	52
4.5.1 FATIGA	52
5 DISEÑO DE LA MEZCLA.....	55
5.1 ANÁLISIS Y CARACTERÍSTICAS DEL HULE DE LLANTA CON SBR	56
5.2 BANCO DE MATERIAL PÉTREO	59
5.3 SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DEL AGREGADO PÉTREO.....	60
5.4 SELECCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO	62
5.5 DISEÑO DE LA MEZCLA DE PRUEBA.....	63
5.5.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO	71
5.5.2 VERIFICACIÓN DE LA MÁXIMA DENSIFICACIÓN	73
5.6 SUCEPTIBILIDAD AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD, TSR	75
5.7 RUEDA CARGADA DE HAMBURGO	96
5.8 MÓDULO DINÁMICO	106
5.9 FATIGA.....	112
CONCLUSIONES	119
REFERENCIAS	122

Índice de Figuras

Figura I. Estadísticas de vehículos de motor registrados en circulación (Fuente [1]).....	8
Figura II.- Estadísticas por tipo de vehículo (Fuente [1]).	9
Figura III.- Componentes de las llantas. (Fuente [5])	12
Figura IV.- Superficie de rodamiento con deformación permanente.	17
Figura V.- Cohesiómetro de Hveem (Fuente [13])	22
Figura VI.- Croquis del equipo para la prueba de Expansión (Fuente [13]).....	23
Figura VII.- Prensa para prueba Marshall (Fuente [15])......	24
Figura VIII.- Compactador Marshall (Fuente [16]).	25
Figura IX.- Molde para Especímenes de 6”, y accesorio de extracción.....	26
Figura X.- Molde para Especímenes de 4”, y accesorio de extracción.....	26
Figura XI.- Cuarteador Mecánico.	27
Figura XII.- Compactador Giratorio.	29
Figura XIII.- Representación simbólica de AMAAC.....	31
Figura XIV.- Criterios de selección de ensayos para la evaluación del diseño para mezclas asfálticas.	35
Figura XV.- Granulometría para mezclas con tamaño nominal 19 mm (3/4”).	37
Figura XVI.- Recomendaciones para el rango mínimo del espesor para mezclas de granulometría densa.	39
Figura XVII.- Espécimen montado sobre mordaza Lottman, y espécimen después del ensayo.....	46
Figura XVIII.- Especímenes montados sobre la rueda cargada de Hamburgo.	48
Figura XIX.- Especímenes para ensayo de modulo dinámico.....	51
Figura XX.- Equipo para ensayo de viga sujeta a flexión con cámara ambiental sistema de control y adquisición de datos.	52
Figura XXI.- Asignación de la tensión en la muestra del ensayo de flexión a 4 puntos.	54
Figura XXII.- Hule de llanta con SBR.	57
Figura XXIII.- Comparativa entre hule quemado y hule nuevo de llanta con SBR.	58
Figura XXIV.- Hule de llanta con SBR quemado.....	58
Figura XXV.- Vista aérea del Banco La Letra.....	59

Figura XXVI.- Planta de trituración, Banco La Letra.....	60
Figura XXVII.- Proceso de muestreo en banco de material.	61
Figura XXVIII.- Reducción de muestras en laboratorio.	61
Figura XXIX.-Representación gráfica de las tres propuestas granulométricas.	64
Figura XXX.- Especímenes para Gmb.	66
Figura XXXI.- Espécimen para Gmm.	66
Figura XXXII.- Picnómetro, material y agua, para determinación de Gmm.	68
Figura XXXIII.- Especímenes con diferentes contenidos de asfalto.....	70
Figura XXXIV.- Especímenes para TSR.	75
Figura XXXV.- Especímenes no acondicionados para TSR, 0% de hule, método A. ...	77
Figura XXXVI.- Especímenes acondicionados para TSR, 0% de hule, método A.	78
Figura XXXVII.- Especímenes no acondicionados para TSR, 1% de hule, método A. .	80
Figura XXXVIII.- Especímenes acondicionados para TSR, 1% de hule, método A.	81
Figura XXXIX.- Especímenes no acondicionados para TSR, 2% de hule, método A. ..	83
Figura XL.- Especímenes acondicionados para TSR, 2% de hule, método A.....	84
Figura XLI.- Especímenes no acondicionados para TSR, 1% de hule, método B.....	86
Figura XLII.- Especímenes acondicionados para TSR, 1% de hule, método B.....	87
Figura XLIII.- Especímenes no acondicionados para TSR, 2% de hule, método B.....	89
Figura XLIV.- Especímenes acondicionados para TSR, 2% de hule, método B.	90
Figura XLV.- Resultados obtenidos TSR.....	95
Figura XLVI.- Deformación en Hamburgo con 0% de hule, método A.	96
Figura XLVII.- Especímenes de Hamburgo deformados, con 0% de hule, método A. ..	97
Figura XLVIII.- Deformación en Hamburgo con 0% de hule, método A.	98
Figura XLIX.- Especímenes de Hamburgo deformados, con 1% de hule, método A. ...	99
Figura L.- Deformación en Hamburgo con 2% de hule, método A.	100
Figura LI.- Especímenes de Hamburgo deformados, con 2% de hule, método A.....	101
Figura LII.- Deformación en Hamburgo con 1% de hule, método B.	102
Figura LIII.- Especímenes de Hamburgo deformados, con 1% de hule, método B.....	103
Figura LIV.- Deformación en Hamburgo con 2% de hule, método B.....	104
Figura LV.- Especímenes de Hamburgo deformados, con 2% de hule, método B.	105
Figura LVI.- Espécimen para módulo montado para ensaye.	106

Figura LVII.- Equipo para extracción de núcleos para Modulo Dinámico.....	109
Figura LVIII.- Comparativa de resultados de modulo dinámico con las tres mezclas.	109
Figura LIX.- Equipo para secado de Especímenes de Modulo Dinámico.....	110
Figura LX.- Núcleo para Modulo Dinámico después de ser cortado.	111
Figura LXI.- Muestra de campo para extracción de núcleos.	111
Figura LXII.- Equipo de corte para vigas.	112
Figura LXIII.- Espécimen compactado en Compactador lineal.....	113
Figura LXIV.- Dimensiones de las vigas.....	113
Figura LXV.- Viga ensayada a 600ms, se remarca la grieta que se generó.	114
Figura LXVI.- Vigas con 0% de hule, a 600ms.....	115
Figura LXVII.- Vigas con 0% de hule, a 800ms.....	115
Figura LXVIII.- Vigas con 1% de hule, a 600ms.....	116
Figura LXIX.- Vigas con 1% de hule, a 800ms.....	116
Figura LXX.- Vigas con 2% de hule, a 600ms.....	117
Figura LXXI.- Vigas con 2% de hule, a 800ms.....	117
Figura LXXII.- Vigas con 0%, 1% y 2% de hule, a 600ms.....	118
Figura LXXIII.- Vigas con 0%, 1% y 2% de hule, a 800ms.....	118

Índice de Tablas

Tabla I.- Evolución de longitud de la red carretera según su superficie (Fuente [2]).....	10
Tabla II.- Niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes de 8.2t y el tipo de carretera.	35
Tabla III.- Designación del tipo de mezcla en función del tamaño nominal.	36
Tabla IV.- Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (puntos de control).....	37
Tabla V.- Definición de mezclas de granulometría densa (gruesa y fina).	38
Tabla VI.- Características de las mezclas de granulometría densa, gruesa y fina.	38
Tabla VII.- Requisitos de calidad de la fracción gruesa del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.	40
Tabla VIII.- Requisitos de calidad de la fracción fina del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.	41
Tabla IX.- Rangos de viscosidades para seleccionar las temperaturas de mezclado y compactación entre el agregado pétreo y cemento asfáltico convencional.....	42
Tabla X.- Valores de los parámetros volumétricos necesarios para el diseño óptimo de una mezcla asfáltica de granulometría densa.	43
Tabla XI.- Esfuerzo requerido para la compactación giratoria según el tránsito esperado en el carril de diseño.	43
Tabla XII.- Secuencia de cálculo de propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.	45
Tabla XIII.- Numero de pasadas mínimas para la deformación máxima en la prueba de Hamburgo.	48
Tabla XIV.- Especificaciones de rodera máxima con el Analizador de Pavimentos asfálticos, APA para 8000 ciclos.	49
Tabla XV.- 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.	50
Tabla XVI.- Propiedades granulométricas del hule de llanta.....	56
Tabla XVII.- Propiedades físicas inherentes de los materiales pétreos.	60
Tabla XVIII.- Granulometría de los tres materiales empleados.	63

Tabla XIX.- Propuestas granulométricas.....	64
Tabla XX.- Cálculos para la obtención de Gmb.	66
Tabla XXI.- Cálculos para la obtención de Gmm.	67
Tabla XXII.- Cálculos para estimar la obtención del contenido de asfalto inicial.....	67
Tabla XXIII.- Cálculos para estimar la obtención de 4% de vacíos.	67
Tabla XXIV.- Obtención de las propiedades con diferentes contenidos de asfalto.	69
Tabla XXV.- Propiedades obtenidas con diferentes contenidos de asfalto.	69
Tabla XXVI.- Obtención del % de asfalto para un 4% de vacíos.....	71
Tabla XXVII.- % de VAM para un % de asfalto que cumple con el 4% de Va.....	71
Tabla XXVIII.- % de VAF para un % de asfalto que cumple con el 4% de Va.....	72
Tabla XXIX.- Rel. filler-asfalto con un % de asfalto que cumple con el 4% de Va.	72
Tabla XXX.- Características de Especímenes para Nmax.	73
Tabla XXXI.- Obtención de parámetros para la máxima densificación.....	73
Tabla XXXII.- Registro de alturas en compactador giratorio para Nmax.....	74
Tabla XXXIII.- Cálculos para TSR, 0% de hule, método A.....	76
Tabla XXXIV.- Cálculos para TSR, 1% de hule, método A.	79
Tabla XXXV.- Cálculos para TSR, 2% de hule, método A.	82
Tabla XXXVI.- Cálculos para TSR, 1% de hule, método B.	85
Tabla XXXVII.- Cálculos para TSR, 2% de hule, método B.	88
Tabla XXXVIII.- Cálculos para TSR, 1% de hule, método B.	91
Tabla XXXIX.- Cálculos para TSR, 2% de hule, método B.	92
Tabla XL.- Cálculos para TSR, 1% de hule, método B.	93
Tabla XLI.- Cálculos para TSR, 2% de hule, método B.....	94
Tabla XLII.- Resumen de resultados TSR.....	95
Tabla XLIII.- Volumetría de especímenes de Hamburgo, 0% de hule, método A.	96
Tabla XLIV.- Deformación en especímenes en Hamburgo, 0% de hule, método A.	96
Tabla XLV.- Deformaciones en mm @400 pasadas con 0% de hule, método A.	97
Tabla XLVI.- Volumetría de especímenes de Hamburgo, 1% de hule, método A.	98
Tabla XLVII.- Deformación en especímenes en Hamburgo, 1% de hule, método A.	98
Tabla XLVIII.- Deformaciones en mm @400 pasadas con 0% de hule, método A.	99
Tabla XLIX.- Volumetría de especímenes de Hamburgo, 2% de hule, método A.	100

Tabla L.- Deformación en especímenes en Hamburgo, 2% de hule, método A.....	100
Tabla LI.- Deformaciones en mm @400 pasadas con 2% de hule, método A.....	101
Tabla LII.- Volumetría de especímenes de Hamburgo, 1% de hule, método B.....	102
Tabla LIII.- Deformación en especímenes en Hamburgo, 1% de hule, método B.....	102
Tabla LIV.- Deformaciones en mm @400 pasadas con 1% de hule, método B.....	103
Tabla LV.- Volumetría de especímenes de Hamburgo, 2% de hule, método B.....	104
Tabla LVI.- Deformación en especímenes en Hamburgo, 2% de hule, método B.....	104
Tabla LVII.- Deformaciones en mm @400 pasadas con 2% de hule, método B.....	105
Tabla LVIII.- Resultados en espécimen #1 con 0% de hule.....	107
Tabla LIX.- Resultados en espécimen #2 con 0% de hule.....	107
Tabla LX.- Resultados en espécimen #1 con 1% de hule.....	107
Tabla LXI.- Resultados en espécimen #2 con 1% de hule.....	107
Tabla LXII.- Resultados en espécimen #1 con 2% de hule.....	108
Tabla LXIII.- Resultados en espécimen #2 con 2% de hule.....	108
Tabla LXIV.- Volumetría de especímenes para módulo dinámico antes de cortar.....	108
Tabla LXV.- Volumetría de especímenes para módulo dinámico.....	108
Tabla LXVI.- Resultados obtenidos para módulo de dinámico.....	109
Tabla LXVII.- Volumetrías de especímenes para viga. (Sin Cortar).....	113
Tabla LXVIII.- Volumetrías de especímenes para viga. (Cortadas).....	114
Tabla LXIX. Trasladando la información obtenida a campo.....	120

RESUMEN

No es difícil determinar las condiciones en las que se encuentran actualmente la mayoría de los pavimentos flexibles en México ya que distan de brindar condiciones de servicio, seguridad, comodidad y funcionalidad, aunado a ello la contaminación que generan las llantas en desuso, son factores que requieren atención por parte de instituciones públicas y privadas. En consecuencia estos indicadores son esenciales por lo que a través de esta tesis se busca aportar una opción más para el uso y aprovechamiento de polvo de llanta, evaluando mediante un análisis los efectos que ocasiona incorporar hule molido de llanta en mezclas asfálticas bajo las recomendaciones de diseño establecidas en el Protocolo para mezclas densas de la Asociación Mexicana del Asfalto AMAAC.

El desarrollo de la presente investigación se basa en realizar el diseño de una mezcla asfáltica densa sin incorporar inicialmente hule de llanta, partiendo desde la selección y evaluación de los agregados pétreos, ahora bien una vez obtenido el diseño de la mezcla patrón se incorpora hule de llanta en porcentajes de 1% y 2% como parte de los agregados y de esta forma se procede a evaluar mediante ensayos de desempeño las tres mezclas con 0% 1% y 2% de hule de llanta, para obtener puntos de comparación entre sí.

Por consiguiente las pruebas para evaluar el desempeño de la mezcla están acotadas de acuerdo al nivel de tránsito requerido partiendo de un tránsito bajo, medio, alto y muy alto, asimismo, en el orden mencionado las pruebas son Susceptibilidad al daño inducido por humedad, Susceptibilidad a la deformación permanente, módulo dinámico y evaluación de la fatiga cumpliendo así con la evaluación de los cuatro niveles de diseño del protocolo AMAAC.

Palabras claves: Agregados pétreos, hule de llanta, mezcla asfáltica, protocolo AMAAC.

ABSTRACT

Is not difficult to determine the conditions that currently have the pavements in Mexico, since they are far from providing service conditions, safety, comfort and functionality, added to that the pollution caused by waste tires are factors that require attention from public and private institutions. Consequently these indicators are essential so that through this thesis it seeks to provide another option for the use and exploitation of dust rim, by an analysis evaluating the effects caused by incorporating ground tire rubber in asphalt mixtures under the recommendations of design set out in the Protocol for dense mixtures of the Mexican Association of Asphalt AMAAC.

The development of this research is based in designing a mix dense asphalt without initially incorporate tire rubber, starting from the selection and evaluation of stone aggregates, however once obtained the pattern mix asphalt design, is incorporated tire rubber in percentages 1% and 2% in relation to the stone aggregate and we proceed to evaluate the performance tests using three blends with 0% 1% and 2% of tire rubber, to then compare the results.

Consequently the tests to evaluate the performance of the mixture are bounded according to the traffic required level from low, medium, high and very high traffic, also, in the order mentioned tests are susceptibility to damage induced by moisture, susceptibility to deformation permanent, evaluation of module dynamic and fatigue, thus complying with the evaluation of the four levels of design AMAAC protocol.

Keywords: stone aggregates, tire rubber, asphalt, AMAAC protocol.

1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento y desarrollo de un país está íntimamente vinculado con la infraestructura carretera del mismo, lo que permite tener un parámetro de la calidad de vida en una sociedad, máxime si se consideran los efectos que las obras civiles provocan sobre el medio ambiente.

En el presente trabajo cuando se hable de llantas o neumáticos como componentes de mezclas asfálticas será para hacer referencia únicamente al hule en polvo. Sin embargo cabe señalar que a diferencia de la llanta el neumático está formado además de hule por aire comprimido. Por simplicidad en lo subsecuente se abreviara como NFU a las llantas o neumáticos fuera de uso.

En gran parte del territorio mexicano se encuentran NFU, los cuales son un desecho sólido no biodegradable y en la mayor parte de los municipios de México se ha observado que su disposición final no es la más adecuada y por tanto este contaminante afecta de diversas formas al bienestar del hombre.

Por otro lado se tiene una enorme necesidad de diseñar pavimentos que cumplan con la función de recibir y transmitir las cargas distribuidas a las capas subsecuentes así como soportar las inclemencias del tiempo. Los pavimentos se clasifican principalmente en función de la superficie de rodadura, estos pueden ser pavimentos rígidos donde se emplea concreto hidráulico o flexibles donde el aglutinante suele ser el asfalto.

El asfalto es un material de origen orgánico y de acuerdo a la Secretaria de Comunicaciones y Transportes SCT, es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por Asfáltenos, Resinas y Aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida.

Diversos productos asfálticos se manejan en el mercado, sin embargo los que considera la normativa de la SCT en México son tres, cementos asfálticos, emulsiones

asfálticas y los asfaltos rebajados, este último actualmente es el que menor empleo tiene dentro de la construcción de carreteras.

La superficie de rodamiento de un pavimento flexible o también conocida como carpeta asfáltica, está conformada por una mezcla asfáltica que a su vez está formada por un ligante asfáltico, materiales pétreos y en ocasiones aditivos para mejorar las características de la mezcla.

A medida que se tienen avances tecnológicos los materiales sufren modificaciones y de la misma forma las combinaciones que se hacen de los mismos, tal es el caso de los asfaltos modificados que básicamente es un cemento asfáltico al cual se le han alterado sus propiedades químicas y/o físicas, dichas modificaciones se pueden hacer de diferentes maneras y con diferentes productos pero siempre buscando optimizar las características termo mecánicas del asfalto. Algunas de las modificaciones físicas se hacen con fillers o fibra, para el caso de las modificaciones químicas puede hacerse por medio de ácido polifosfórico, aire y temperatura, además la modificación polimérica se hace con plastomeros, elastómeros y hule reciclado según la SCT.

En la modificación de asfaltos de tipo polimérica se encuentra el asfalto ahulado que será objeto de estudio en el presente trabajo. Referente a la normatividad existente en el país la N CMT 4 05 002/01, *Calidad de materiales asfálticos modificados* señala una clasificación que abarca cuatro campos que va desde la modificación con polímero tipo 1 hasta la de tipo 3 y una cuarta que contempla el hule molido de NFU donde define dos tipos de granulometría con la cual debe cumplir el polvo.

En el presente trabajo se pretende evaluar el comportamiento de una mezcla asfáltica incorporando hule en polvo de NFU siguiendo la metodología del protocolo propuesto por la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. AMAAC. Dicho protocolo es una nueva metodología para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño.

Respecto a los métodos de diseño de mezclas asfálticas se han tenido avances significativos que van desde lo desarrollado por Hveem en 1930 donde las condiciones

de compactación por amasado suelen ser muy representativas a lo que sucede en obra sin embargo el costo del equipo, la movilidad y el tamaño del equipo no fueron tan fácil de manejar lo que dejó el camino muy amplio para que Marshall con su equipo barato y portátil llegara a ser el método más empleado en México y en el mundo aunque su proceso de compactación por impacto no es igual de representativo que el propuesto por Hveem.

En el año de 1993 el método SUPERPAVE (Pavimentos Asfálticos de Comportamiento Superior) el cual fue producto del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP) de los Estados Unidos trajo consigo una serie de mejoras para el diseño de mezclas que van desde la selección del ligante asfáltico, selección de los pétreos y la compactación de la mezcla por medio del compactador giratorio (SGC) que representa una compactación similar a la que se lleva a cabo en obra.

Con el empleo de hule de NFU, se ha observado en algunos países que es un adecuado recurso para mejorar las características de la carpeta asfáltica y también se contribuye al cuidado del medio ambiente, lo que ayuda al progreso de una localidad.

Si bien es cierto que los asfaltos modificados con hule de llanta no son algo nuevo, parece interesante ver una mancuerna entre la parte de investigación científica con en el cuidado del medio ambiente siempre buscando la forma de dar un enfoque sustentable a las obras de infraestructura vial.

1.1 OBJETIVO

Analizar el efecto que tiene el hule molido de llantas en desuso como componente en mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño siguiendo la metodología del protocolo AMAAC PA-MA 01/2013 en los niveles I, II, III y IV.

1.1.1 OBJETIVOS PARTICULARES

Determinar con el uso del polvo de NFU, el porcentaje óptimo (en peso) en los pétreos, empleado en la mezcla asfáltica para que la capa de rodadura cumpla con las propiedades mecánicas y así soportar sin deformarse (plásticamente) el deterioro debido a las solicitaciones del tráfico vehicular.

Demostrar que el concreto asfáltico ahulado tiene un comportamiento por lo menos igual o incluso puede ser mejor bajo condiciones de servicio, mediante el análisis de las propiedades que el hule puede aportar a los pavimentos flexibles mediante la incorporación por vía seca.

Demostrar que se puede contribuir al cuidado del medio ambiente empleando los NFU promoviendo el reciclaje.

1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

La finalidad de una carretera es ayudar a optimizar tiempos de traslado, para vehículos automotores usados para transporte de personas o bien para transporte de carga. Para cumplir con este propósito la superficie de rodamiento en una carretera debe brindar las condiciones de seguridad y comodidad cumpliendo con las normas y especificaciones que marca la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Por lo expuesto anteriormente nace la siguiente pregunta de investigación:

De acuerdo al protocolo AMAAC ¿Cuál será el comportamiento de las mezclas con un contenido de hule de 0%, 1% y 2% en cada categoría del protocolo, así como su relación entre mezclas?

1.3 DELIMITACIÓN

Los ensayos realizados son los especificados en el protocolo AMAAC en su edición 2013, considerando abordar los niveles I, II, III y IV, con un contenido de hule de 0%, 1% y 2%. Las pruebas realizadas se hacen por duplicado para corroborar la información obtenida.

1.4 JUSTIFICACIÓN

México es un país principalmente consumidor de tecnología, al mismo tiempo se generan residuos que por lo regular no reciben un tratamiento adecuado posterior a su vida útil como lo es el caso de los NFU, desechos que crecen a medida que aumentan los progresivos niveles de motorización, por tanto es conveniente incentivar una gestión adecuada que permita beneficios aun cuando termina su vida útil, que sea amigable con el medio ambiente y a su vez favorezca a la infraestructura del transporte mediante el mejoramiento de las carreteras ya que son las principales vías de desplazamiento de personas y bienes.

La Figura I muestra cómo se incrementa el número de vehículos registrados cada año, esto exhibe que a su vez la demanda de carreteras también aumenta.

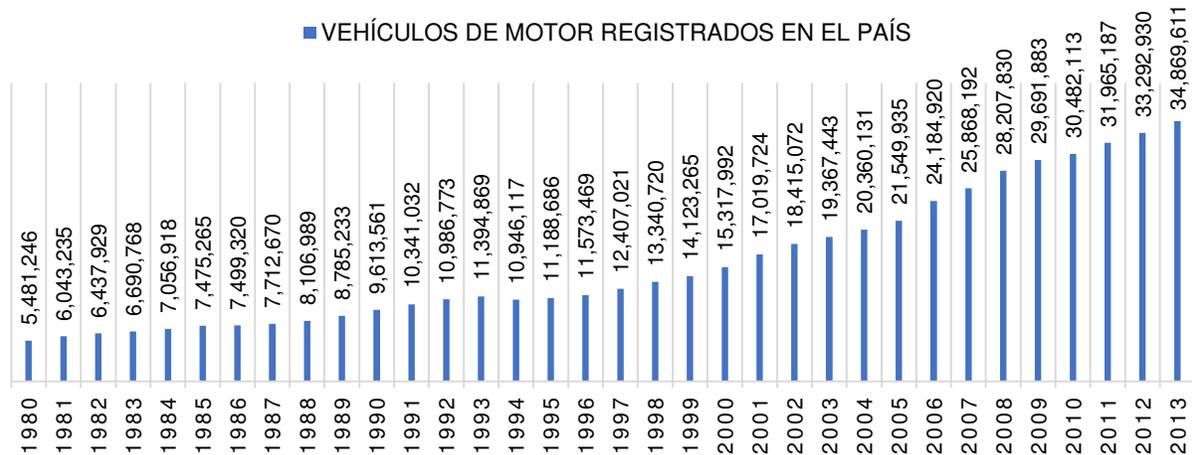


Figura I. Estadísticas de vehículos de motor registrados en circulación (Fuente [1]).

De acuerdo al INEGI en el país se tienen registrados 34 869 611 vehículos de los cuales el aproximadamente el 67% son automóviles o sea 23 362 639.

Para hacer un cálculo aproximado de la cantidad de neumáticos que se generan cada año en México, se realiza una correlación donde se considera que un auto particular cambia sus neumáticos cada 4 años, entonces se tiene aproximadamente 23 362 639 neumáticos mismos que quedan en desuso cada año.

La Figura II muestra los porcentajes de distintos tipos de vehículos, donde se puede observar que el mayor porcentaje son automóviles.

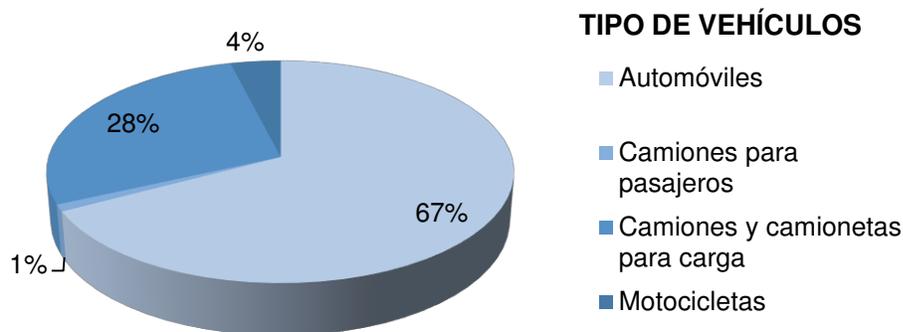


Figura II.- Estadísticas por tipo de vehículo (Fuente [1]).

Actualmente en México se cuenta con una longitud de 378 923 km de carreteras (al cierre del 2013), la Tabla I muestra como como ha ido incrementado la longitud de la red carretera según su superficie de rodamiento con el paso de los años desde el 2001 hasta 2011.

Años	Total	Pavimentada			Revestida	Terracería	Brechas mejoradas
		Subtotal	Cuatro o más carriles	Dos carriles			
2001	330 005	110 910	10 348	100 562	147 474	6 490	65 131
2002	337 168	113 125	10 137	102 988	148 586	6 693	68 764
2003	349 037	117 023	10 578	106 445	151 433	13 661	66 920
2004	352 072	116 923	10 969	105 954	156 501	15 500	63 148
2005	355 796	122 678	11 231	111 447	153 065	7 167	72 886
2006	356 945	123 354	11 328	112 026	154 496	10 525	68 570
2007	360 075	127 173	11 616	115 557	156 184	10 149	66 569
2008	364 612	131 245	11 974	119 271	151 288	8 937	73 142
2009	366 807	136 157	11 972	124 185	147 714	8 798	74 138
2010	371 936	138 404	12 640	125 764	150 404	8 782	74 346
2011	374 262	141 361	13 041	128 320	148 782	8 805	75 314

Tabla I.- Evolución de longitud de la red carretera según su superficie (Fuente [2]).

Por lo tanto se deduce que a medida que se incrementa el número de vehículos con el tiempo también tiende a aumentar la longitud de carreteras, que demandan un pavimento con una adecuada superficie de rodamiento para la circulación de los vehículos, esto conlleva a un incremento año con año en la generación de NFU que ya han cumplido su vida útil y de no darse un seguimiento adecuado para el manejo de estos residuos puede representar un grave problema de contaminación ambiental.

2 ANTECEDENTES

Existe una preocupación considerable en relación a la disposición final de neumáticos usados ya que estos no cuentan con un adecuado uso después de haber cumplido su periodo de vida útil para el que fue diseñado lo que ha dado pie para buscar soluciones sobre el manejo eficiente de estos residuos.

Los neumáticos o llantas presentan el inconveniente de que se producen en grandes volúmenes por lo tanto tienen dificultades en su almacenamiento, es por ello que se busca dar un adecuado tratamiento a dichos neumáticos buscando la forma de no verlos como un residuo tóxico ni peligroso sino al contrario disponerlos como una materia prima para el aprovechamiento en distintos materiales de construcción.

2.1 NEUMÁTICOS FUERA DE USO NFU

Por años en México se ha tenido la problemática con las llantas que terminan en lugares inadecuados utilizando un espacio que puede ser aprovechable para espacios de recreación, deportivos, etc.

Actualmente una solución parcial es enterrar la basura en sitios que no son aptos por el riesgo de contaminación ya que se convierten en un desecho no biodegradable de larga vida, su lenta degradación es también un problema, pues cada neumático puede tardar cinco siglos en degradarse [3]. Además secretan aceites y otros materiales tóxicos que se filtran al subsuelo encontrando salida hacia los mantos acuíferos contaminando corrientes de agua.

Otro factor que genera problemas de salud severos es debido a la proliferación de insectos, aproximadamente un millón de mosquitos se desarrollan en el interior de una llanta que contenga agua estancada. Las ratas y los mosquitos transmiten enfermedades peligrosas como: rabia, paludismo, hepatitis viral (tipo B), fiebre del dengue, fiebre amarilla y malaria. [8]

2.1.1 COMPONENTES DE LOS NEUMÁTICOS

Las llantas están compuestas por diferentes componentes de los cuales los principales son hule, negro de humo, acero y materia textil.

Los tipos de caucho que más se emplean son los naturales (NR), los de estireno-butadieno (SBR) y los poli butadienos (BR), poliisoprenos (IR), etc. Los cuales entran en proporciones variables según el destino o la aplicación específica que vaya a tener. [4]

A continuación se muestran los principales componentes de una llanta.

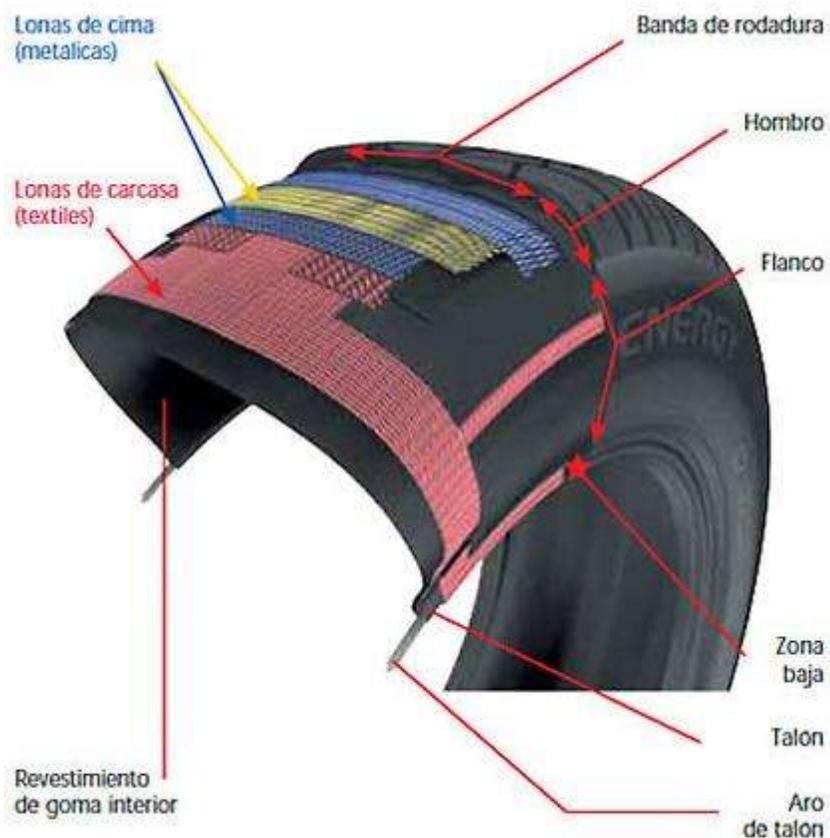


Figura III.- Componentes de las llantas. (Fuente [5])

2.1.2 PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE HULE MOLIDO.

Básicamente existen dos formas para la obtención del hule molido de acuerdo a Josep M. Gruas I Pauls [6], una es por medio de molido a temperatura ambiente o también conocido como sistema mecánico y la otra por criogénesis o sistema criogénico.

2.1.2.1 MOLIDO A TEMPERATURA AMBIENTE

Se trata de hacer pasar el triturado por molinos clásicos constituidos por un rotor y el estator que lo rodea. Previamente al molido se ha tenido que separar el componente metálico para evitar daños al molino, lo que normalmente se hace con separadores magnéticos dispuestos sobre las cintas. Se trata de equipos más ligeros que los trituradores, tanto en peso como en potencia, y su rendimiento es más bajo. Todo el proceso se realiza a temperatura ambiente, aunque la energía transmitida al caucho durante la molienda eleva su temperatura hasta 80 °C.

La molido que procede de este tipo posee mayor superficie específica y por tanto es más reactiva y absorbente con el asfalto, produciendo en menor tiempo y a menor requerimiento de temperatura, mayores propiedades de viscosidad. Sin embargo para llegar a tamaños de partícula más reducidos, se requiere mayor consumo energético y mayor desgaste de la maquinaria empleada; por lo que es más costoso.

2.1.2.2 MOLIDO POR CRIOGÉNESIS

Consiste en enfriar el NFU a temperaturas por debajo de los -60 °C para conseguir rigidez y poder molerse con molinos clásicos de impacto y bolas. El enfriamiento se consigue, haciendo entrar en contacto el neumático troceado con nitrógeno líquido existiendo diversas formas de hacerlo.

Según varios expertos, la partícula procedente de este tipo de molido no es la más adecuada para la utilización en los asfaltos debido a las características de corte angular, le confieren una superficie específica menor; necesitando mayores tiempos de reacción o digestión, mayor temperatura y produciendo menores viscosidades al asfalto. Además,

debido a la baja temperatura se favorece la condensación del vapor de agua presente en el ambiente, con lo que el polvo de hule obtenido debe secarse antes de su almacenamiento.

2.1.3 APLICACIONES DE LOS NFU

Cuando el neumático a finalizado con su vida útil para el cual fue diseñado tiene diferentes formas de empleo que van desde el recanalado, recauchado, en obras de ingeniería, decoración, elementos de señalización, etc. Algunas de las aplicaciones se mencionan enseguida.

El recanalado se podría definir como un paso previo a ser un desecho sólido como lo son los NFU, consiste en remarcar el dibujo primario en aquellos que no han perdido más de un 75% de su profundidad original. Sin embargo un tiempo más tarde se convertirán finalmente en residuo.

El recauchado es una práctica bastante extendida que permite, tanto en frío como en caliente disponer de neumáticos seminuevos ya que mantienen del antiguo la carcasa, sobre la que se aplica una banda de rodadura nueva.

Los neumáticos al margen de recibir alguno de los tratamientos anteriores que según la referencia [4], son los procesos más ecológicos y económicos de reutilización, reciben otros usos como pueden ser:

Cuando el neumático esta entero.- Arrecifes artificiales, como rompeolas, pistas provisionales, obras de ingeniería civil, aislamientos, decoración,

Con el neumático en tiras o en trozos.- Rellenos ligeros, drenajes de gases en vertedero, Recogida de lixiviados, campos de futbol, camas para ganado, calzado, baldosas etc.

Otras aplicaciones cuando el neumático se tritura.- Pistas de atletismo, campos de juego y gimnasios, pistas ecuestres e instalaciones ganaderas, elementos de señalización para carreteras, retentor de humedad en usos agrícolas, regenerador de goma, etc.

Se sabe también de tecnologías como lo son la pirolisis y termólisis que se encuentran en etapas de investigación y desarrollo. Otras más son la producción de combustible TDF (Tire Derived Fuel), el empleo en carreteras en líneas muy específicas de actuación, utilización como combustible con el aprovechamiento de la energía térmica.

Sin embargo, por las experiencias obtenidas en España y Estados Unidos estas tecnologías no son capaces de absorber las grandes cantidades de neumáticos que se generan día a día [4], lo que conlleva a seguir almacenando neumáticos en los vertederos hasta que nuevas líneas de investigación indiquen mejores soluciones, sin embargo en empleo en pavimentos flexibles parece ser una opción interesante ya que las carreteras pueden fungir como grandes silos horizontales para el alojamiento de millones de NFU.

2.2 RECICLADORES EN MÉXICO

En la empresa FOLHA VERDE [7], se pone a la venta polvo de neumático que no contiene acero y nylon, normalmente se vende por toneladas, el tamaño del polvo es de 0.3 a 0.7 mm, de 1.5 a 3 mm y de 2 a 3 pulgadas.

2.3 USO DE HULE MOLIDO EN CARRETERAS DE MÉXICO

Se tiene conocimiento de su empleo en la calzada Tlalpan en 1970 en la ciudad de México, además Caminos y Puentes Federales (CAPUFE), lo utilizo en autopistas como México-Puebla, México-Querétaro, México-Córdoba, México-Cuernavaca y Pátzcuaro-Uruapan. [9]

En nuestro país, el uso de hule molido ha estado orientado a la construcción de carpetas de graduación abierta, a partir de 1994 (CAPUFE) inicio la rehabilitación de autopistas con la especificación de asfalto ahulado. [8]

2.4 INCORPORACIÓN DE POLVO DE NFU EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

La primera aproximación con carácter comercial para el empleo del hule de llanta se hizo en la década de 1960 por Charles McDonald en Phoenix Arizona, donde logro patentar su aplicación en tratamientos superficiales y de bacheo. El empleo de asfalto con hule molido en mezclas asfálticas comenzó a generalizarse en 1985 en los estados de Arizona y California. [6]

Actualmente existen básicamente dos sistemas de incorporación en las mezclas, por vía húmeda y por vía seca.

La técnica por vía húmeda consiste en mezclar previamente el polvo de neumático con el asfalto para su posterior empleo como ligante en la mezcla asfáltica.

La técnica por vía seca consiste en incorporar el hule triturado como parte del agregado pétreo, es decir el hule forma parte de la granulometría y se dosifica en proporción al peso de los agregados.

2.5 USO DE HULE MOLIDO EN OTROS PAÍSES

Países como Canadá, Estados Unido, España, etc. Están llevando a cabo desde hace algunos años programas para implementar el uso de NFU en pavimentos asfálticos bajo los argumentos de que los recursos es decir agregados y cemento asfáltico cada vez son más escasos y por ende más costoso, sin embargo por experiencias de los distintos países esta técnica posee potenciales beneficios técnicos, económicos y medioambientales.

3 ESTADO DEL ARTE DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN MÉXICO

México posee una infraestructura vial con superficies de rodamiento elaboradas principalmente a base de mezcla asfáltica, por ello es importante conocer la evolución que se ha tenido y el futuro que se avecina en relación a los pavimentos flexibles.

Actualmente en México se utiliza en mayor porcentaje el asfalto producido por las seis Refinerías, operadas por Petróleos Mexicanos (PEMEX) y están ubicadas en Tula, Hidalgo. Salamanca, Guanajuato. Cadereyta, Nuevo León. Ciudad Madero, Tamaulipas. Salina Cruz, Oaxaca. Minatitlán, Veracruz. Sin embargo no solo PEMEX provee asfalto ya que existen empresas que importan asfalto de países vecinos.

El concreto asfáltico también conocido como mezcla asfáltica en caliente o simple y sencillamente “HMA” (hot mix asphalt) es un material ampliamente utilizado en todo el mundo, está conformado por la mezcla de un ligante asfáltico y un agregado mineral en diferentes proporciones según los requerimientos del diseño.



Figura IV.- Superficie de rodamiento con deformación permanente.

Uno de los principales problemas que tienen las calles de pavimento flexible son las deformaciones permanentes, para lo cual el Ensayo de la rueda cargada de Hamburgo arroja información sobre la deformación que puede sufrir la carpeta.

3.1 TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

De acuerdo al procedimiento de mezclado la SCT clasifica de la siguiente forma las mezclas asfálticas.

3.1.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Son las elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar y mezclar uniformemente los componentes de la mezcla. Estas mezclas, a su vez, se clasifican así:

3.1.1.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre (1.5") 37.5mm y (3/8") 9.5mm. Normalmente se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos que requieren una alta resistencia estructural, o bien, en renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes.

3.1.1.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA ABIERTA

Es la mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal entre (0.5") 12.5mm y (1/4") 6.3mm que satisfagan los requisitos de calidad correspondientes. Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, no tienen función estructural y por lo general, se construyen sobre una carpeta de granulometría densa. El objetivo es satisfacer los requerimientos de calidad de rodamiento del tránsito al permitir que el agua de lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la carpeta.

Esto incrementa la fricción de las llantas con la superficie de rodadura, se minimiza el acuaplaneo, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal.

Las mezclas asfálticas de granulometría abierta no deben colocarse en zonas susceptibles al congelamiento ni donde la precipitación sea menor de 600mm por año. Estas mezclas por tener un alto grado de vacíos y estar expuestas a la intemperie son muy susceptibles al envejecimiento y desgranamiento a corto plazo. Por ello, cuando se aplican estas como capa de rodadura, se debe programar el mantenimiento de dos a cinco años aproximadamente, donde se recupere mediante fresado, esta capa y se coloque una nueva. La ventaja es que son capas de un espesor pequeño y así protegen las capas inferiores y se le proporciona una superficie adecuada al usuario que circula sobre ella.

3.1.1.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DISCONTINUA, TIPO SMA.

Es la mezcla en caliente uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría discontinua, con tamaño nominal entre (3/4") 19.0mm y (3/8") 9.5mm que satisfagan los requisitos de calidad establecidos. Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, aunque también pueden utilizarse en capas inferiores en carreteras de alto tránsito por su aporte estructural. Cuando se usan 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 agua de lluvia forme una película continua sobre la superficie del pavimento. Esto incrementa la fricción de las llantas, minimiza el acuaplaneo, minimiza la cantidad de agua proyectada a los vehículos adyacentes, mejora la visibilidad del señalamiento horizontal y reduce el ruido hacia el entorno por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura.

Estas mezclas son un legado de la tecnología alemana al desarrollo de la infraestructura mexicana, pues aportan resistencia estructural y textura inmejorables. El inconveniente es por la alta cantidad de cemento asfáltico necesario (además de requerir fibras para evitar el escurrimiento) resultan muy costosas y para su empleo es necesario revisar la relación costo beneficio.

3.1.2 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 sub-clasifican de la siguiente forma.

3.1.2.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA

Es una mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica y o asfalto rebajado y materiales pétreos. Tiene un tamaño nominal entre (1.5") 37.5mm y (3/8") 9.5mm. Se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que la intensidad del tránsito es igual o menor a un millón de ejes equivalentes. También en donde no se requiere de una alta resistencia estructural, en renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes y muy comúnmente para la reparación de baches.

3.1.2.2 MORTERO ASFÁLTICO

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborado con emulsión asfáltica o asfalto rebajado, agua y arena con tamaño máximo de 2.36mm (malla #8). Se coloca como capa de rodadura sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica.

3.1.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL SISTEMA DE RIEGOS

Se construyen mediante la aplicación de uno o dos riegos de un material asfáltico, intercalados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de tamaños decrecientes que, según su denominación, satisfagan los requisitos de calidad. Las carpetas por el sistema de riegos se clasifican en carpetas de uno, dos o tres riegos.

Las carpetas de un riego o la última capa de las carpetas de dos o tres riegos pueden ser premezcladas o no. Es habitual que se coloquen sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, nueva o existente, como una capa de rodadura para proporcionar resistencia al derrapamiento y al pulimento.

3.2 METODOS DE DISEÑO

Tanto en México como en el resto del mundo el método de diseño mayormente empleado es el de Marshall debido a que el equipo no es caro y es muy portable, sin embargo el método de compactación de laboratorio por impacto no simula la densificación de la mezcla que ocurre bajo compactación en un pavimento real.

Ahora bien, las metodologías han ido evolucionando al paso del tiempo y en función de los adelantos tecnológicos hasta alcanzar formas similares de compactación por amasado tanto en laboratorio como en campo, como lo es el caso de la incorporación del compactador giratorio.

3.2.1 MÉTODO DE DISEÑO HVEEM

Este procedimiento de diseño de mezclas fue desarrollado por Francis Hveem aproximadamente en 1930 quien fue ingeniero en materiales e investigador del Departamento de Transporte de California. [13]

El método Hveem implica un análisis de densidad/vacíos y estabilidad, así como la determinación de la resistencia de la mezcla al hinchamiento por presencia de agua. Las principales ventajas del método es el uso del procedimiento de compactación por amasado que representa de manera general la densificación de un pavimento real. [13]

El principio del método Hveem consiste en un material pétreo graduado al que se le han incorporado diferentes cantidades de asfalto, la resistencia que ofrecen las mezclas ya compactadas a los esfuerzos laterales que se provocan al aplicarse una carga vertical, es función de la cantidad y tipo de asfalto incorporado a la mezcla y del acomodo y características de las partículas del material pétreo. La mezcla asfáltica compactada dentro de un molde, le transmite a este lateralmente una cierta fracción de la presión vertical aplicada. Dicha presión lateral varía inversamente con la resistencia interna de la mezcla. Las presiones laterales se miden por medio del estabilómetro de Hveem para determinar el porcentaje de estabilidad correspondiente a las mezclas ensayadas. Los porcentajes de estabilidad varían de cero a cien, en donde el valor cero

corresponde a un líquido y el valor de cien a un cuerpo rígido que no transmite presión lateral. [13]

El cohesiómetro es el dispositivo que mide la resistencia cohesiva de la película asfáltica que recubre el agregado pétreo, sujetando a un esfuerzo de flexión al mismo espécimen utilizado para medir la estabilidad.

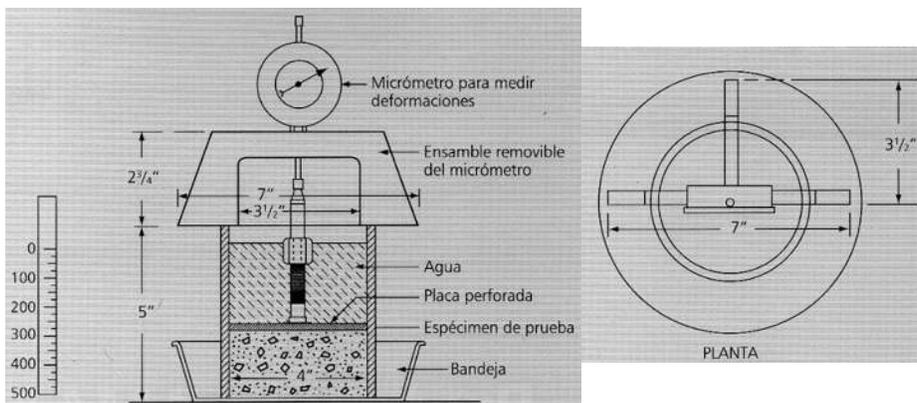
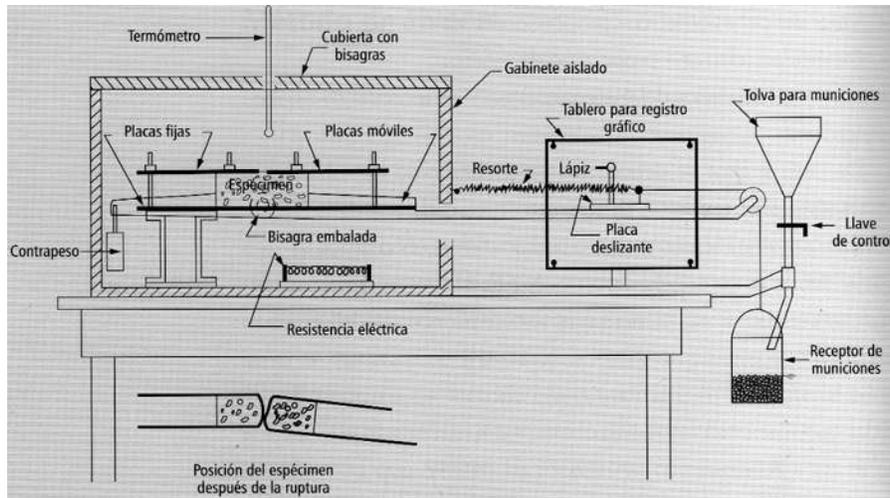


Figura V.- Cohesiómetro de Hveem (Fuente [13])

La prueba de expansión es un índice de la resistencia de una mezcla asfáltica compactada al reblandecimiento y desintegración provocados por el agua. De esta manera el contenido óptimo de asfalto será el porcentaje máximo que admita la mezcla sin perder estabilidad. [13]

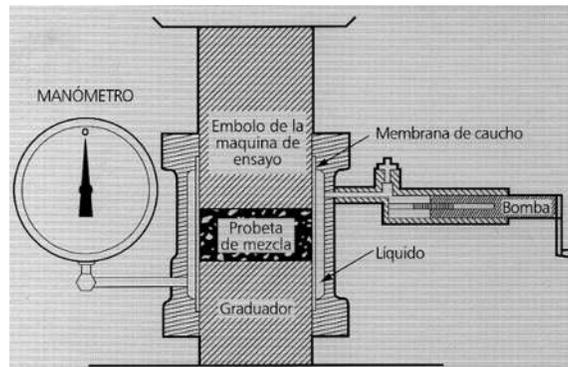


Figura VI.- Croquis del equipo para la prueba de Expansión (Fuente [13]).

3.2.2 MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL

El método Marshall fue descrito por primera vez en México en las normas de construcción de la SCT en el año de 1981. Se basa en la determinación de la estabilidad y el flujo en especímenes cilíndricos, compactados axialmente con un sistema determinado (por impacto) y probados a una temperatura de sesenta grados centígrados.

Fue desarrollado por el ingeniero Bruce Marshall, trabajador del Departamento de carreteras del Estado de Mississippi, aproximadamente en los años treinta. Una de las virtudes del método es la importancia que asigna a la propiedad densidad/vacíos de la mezcla, además de que el equipo requerido no es caro, es portátil y tiene una gran facilidad de instalar laboratorios de control de calidad equipados adecuadamente en la zona de construcción. [13]



Figura VII.- Prensa para prueba Marshall (Fuente [15]).

El método Marshall es aplicable originalmente a mezclas en caliente con tamaño máximo de agregado (TMA) de 1", sufriendo una modificación para que tenga aplicación en mezclas de TMA mayores a 1.5". [13]

El valor de estabilidad expresa la resistencia estructural de la mezcla compactada y está afectada principalmente por el contenido de asfalto, la composición granulométrica y el tipo de agregado. En especial el valor de la estabilidad es un índice de la calidad del agregado. [13]

El valor de flujo representa la deformación requerida, en el sentido del diámetro del espécimen, para producir su fractura. Es un indicador de la tendencia de la mezcla para alcanzar una condición plástica y consecuentemente de la resistencia que ofrecerá la carpeta a deformarse bajo la acción de las cargas impuestas por los vehículos. [13]



Figura VIII.- Compactador Marshall (Fuente [16]).

3.2.3 MÉTODO DE DISEÑO SUPERPAVE

En el año de 1987 se inició el Programa estratégico de investigación de carreteras (SHRP) Strategic Highway Research Program en los Estados Unidos, el cual consistió en llevar a cabo una gestión de investigación con 50 millones de dólares para el desarrollo de nuevas especificaciones, ensayos y normas de diseño para materiales asfálticos a fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de las mismas.

De esta forma inicia el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement). Este método evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (Agregado mineral y asfalto), y posteriormente su interacción cuando están mezclados (mezcla asfáltica).



Figura IX.- Molde para Especímenes de 6", y accesorio de extracción.



Figura X.- Molde para Especímenes de 4", y accesorio de extracción.

3.2.3.1 AGREGADO MINERAL.

El agregado mineral representa uno de los parámetros fundamentales en el desempeño de mezclas asfálticas, para lo cual se tienen dos tipos de propiedades especificadas, a) Propiedades de consenso y b) Propiedades de origen.

- a) Las Propiedades de consenso se refiere a la angularidad del agregado grueso; angularidad del agregado fino; partículas alargadas y aplanadas; y equivalente de arena.
- b) La tenacidad mediante la prueba de desgaste de Los Ángeles; la durabilidad a través de la prueba de intemperismo acelerado; y la prueba de materiales deletéreos.



Figura XI.- Cuarteador Mecánico.

3.2.3.2 CEMENTO ASFÁLTICO

Las pruebas SUPERPAVE para cementos asfálticos miden propiedades físicas que pueden estar directamente relacionadas con el desempeño en campo a través de principios ingenieriles, además las pruebas se realizan con temperaturas que simulan las condiciones que el pavimento tendrá una vez puesto en servicio.

SUPERPAVE enfoca sus especificaciones sobre pruebas al cemento asfáltico en condiciones que simulan las tres etapas críticas durante la vida del asfalto, la primera etapa se refiere a pruebas realizadas en el asfalto original (Transportación, almacenamiento y manejo). La segunda etapa representa el asfalto durante la producción, mezcla y construcción; es simulada por las especificaciones mediante el envejecimiento del asfalto en el Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO). Este procedimiento expone una película delgada de asfalto a calor y aire para aproximar el envejecimiento que sufre el asfalto durante su mezcla y construcción.

La tercera etapa ocurre cuando envejece el cemento asfáltico desde que se coloca en la mezcla asfáltica, y carpeta asfáltica, hasta el fin de su vida de diseño para la cual fue planeado. Esta etapa se simula en la vasija de envejecimiento a presión (PAV), mediante la exposición de muestras de asfalto a calor y presión, para representar el envejecimiento del pavimento a lo largo de los años de servicio.

3.2.3.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los requerimientos del diseño de mezclas asfálticas de SUPERPAVE. Requerimientos volumétricos de la mezcla son: vacíos de aire; vacíos del agregado mineral y vacíos llenos de asfalto. El contenido de vacíos de aire es una propiedad importante que se utiliza como base para la selección del contenido del cemento asfáltico.

SUPERPAVE define los vacíos del agregado mineral (VAM), como la suma del volumen de vacíos de aire y del asfalto efectivo en una muestra compactada. Representa los vacíos entre las partículas del agregado. Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje de VAM que contiene cemento asfáltico. Consecuentemente, VFA es el volumen de cemento asfáltico efectivo, expresado como el porcentaje de VAM.

La Proporción de polvo es otro requerimiento de la mezcla, es la proporción de polvo; se calcula como la relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz (#200) 0.075 mm y el contenido de asfalto efectivo en porcentaje de peso total en la mezcla, menos el porcentaje de asfalto absorbido.

Otro requerimiento de la mezcla Susceptibilidad a la humedad, el ensayo de susceptibilidad a la humedad para evaluar una HMA al desprendimiento se basa en la Norma AASHTO T-283, Resistencia de mezclas bituminosas compactadas al daño inducido por humedad. Este ensayo, que no se basa en el desempeño, sirve para dos propósitos; primero, identificar si una combinación de cemento asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua; segundo, mide la efectividad de los aditivos anti-desprendimiento o de mejora de adherencia.



Figura XII.- Compactador Giratorio.

3.2.4 PROTOCOLO AMAAC PA-MA 01/2013

El Protocolo AMAAC se desarrolló en el año 2008 por la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. al tener la necesidad de contar en México 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 Richkarday 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 Anguas, 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)
- ✓ Instituto del Asfalto (E.U.)
- ✓ SemMaterials (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 el 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.

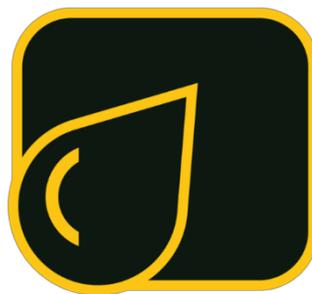


Figura XIII.- Representación simbólica de AMAAC.

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, ya que el 95% de las carreteras del mundo están hechas de este material. Las mezclas asfálticas diseñadas con el Protocolo AMAAC tienen un comportamiento superior a los construidos tradicionalmente que las diseñadas con el método Marshall. 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 México. 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.

4 PROTOCOLO AMAAC PA-MA 01/2013

La infraestructura carretera de un país es sinónimo de desarrollo, cada metro cuadrado de pavimento que se construye determina en ocasiones la calidad de vida de los residentes, al ser México un país con recursos naturales bastos donde se extrae petróleo, es fundamental conocer, aplicar y utilizar los subproductos que se producen internamente.

A nivel mundial las distintas fuentes mencionan que las estructuras de pavimento están formadas en un 95% de pavimentos flexibles y solo el 5% de pavimentos rígidos, por tal motivo es prudente estudiar y en la medida de lo posible mejorar los pavimentos flexibles ya que al ser mayoría y conociendo las condiciones en las que se encuentran dichos pavimentos en México no es difícil identificar que algo no se está haciendo adecuadamente en lo referente al diseño, construcción y mantenimiento de los mismos.

Los pavimentos flexibles en su superficie de rodadura utilizan mezclas asfálticas, para lo que al presente trabajo compete se abordara lo relativo a una mezcla asfáltica densa en caliente.

Una HMA está constituida principalmente por un ligante asfáltico el cual puede ser un cemento asfáltico o un cemento asfáltico modificado que hace la función de aglutinar las partículas. El agregado mineral o pétreo le da características de resistencia y rigidez a la HMA.

Una de las características principales del cemento asfáltico es su susceptibilidad térmica ya que sus propiedades dependen de la temperatura, es por ello que prácticamente todos los ensayos deben llevar especificado la temperatura a la cual se realizó la prueba.

En México se ha venido fortaleciendo la metodología de diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño de la AMAAC, debido a que se han impartido cursos para lograr la capacitación y certificación de personal en toda la república mexicana, además al ser elemento base en el presente trabajo se presentan

enseguida los principales requisito que debe cumplir una mezcla asfáltica para cumplir con las condiciones de servicio, seguridad y de resistencia.

4.1 CRITERIO 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 II 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 II, para ajustar el criterio. El criterio que resulte más exigente de estas dos columnas será el nivel para el cual se evaluará la mezcla.

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 3,000,000	<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 3,000,000 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

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

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



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

4.2 NIVEL I

4.2.1 SELECCIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

En este contexto es importante considerar que debe haber afinidad entre el material pétreo y el asfalto. Si el agregado pétreo, o mejor dicho, la superficie de la partícula de agregado presentan mayor afinidad al agua que al asfalto, la primera es atraída hacia la superficie de la partícula, desalojando la película de asfalto. Entonces queda destruida la adherencia entre ambos materiales, que es necesaria para estabilizar la carpeta. Este tipo de agregados pétreos se denomina hidrófilos. Es decir, que presentan afinidad por el agua. A los materiales pétreos que presentan mayor afinidad por el asfalto que por el agua se les llama hidrófobos. [13]

4.2.1.1 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 III.

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

Tabla III.- Designación del tipo de mezcla en función del tamaño nominal.

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

Tamaño nominal del material pétreo mm (pulg)						
Designación	Abertura mm	37.5 (1 1/2")	25 (1")	19 (3/4")	12.5 (1/2")	9.5 (3/8")
2"	50	100 - 100	-	-	-	-
1 1/2"	37.5	90 - 100	100-100	-	-	-
1"	25	90	90-100	100 - 100	-	-
3/4"	19	-	90	90 - 100	100-100	-
1/2"	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

Tabla IV.- Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (puntos de control).

A manera de ejemplo, la Figura XV, se muestran los límites establecidos para una mezcla con tamaño nominal de 19 mm (3/4"). 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.

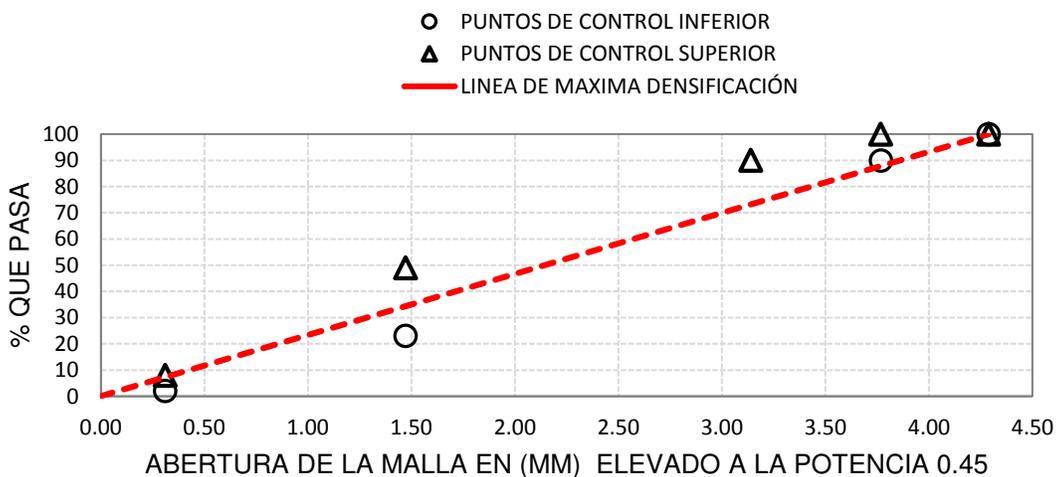


Figura XV.- Granulometría para mezclas con tamaño nominal 19 mm (3/4").

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

Tamaño de la mezcla mm (pulg)	Granulometría Fina	Granulometría Gruesa
37.5 mm (1 1/2")	> 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 #4)	N/A (granulometría no estándar)	

Tabla V.- Definición de 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)	

Tabla VI.- Características de las mezclas de granulometría densa, gruesa y fina.

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 figura XVI. En caso de no cumplir con lo estipulado en dicha tabla, se debe cambiar el tamaño máximo de la mezcla.

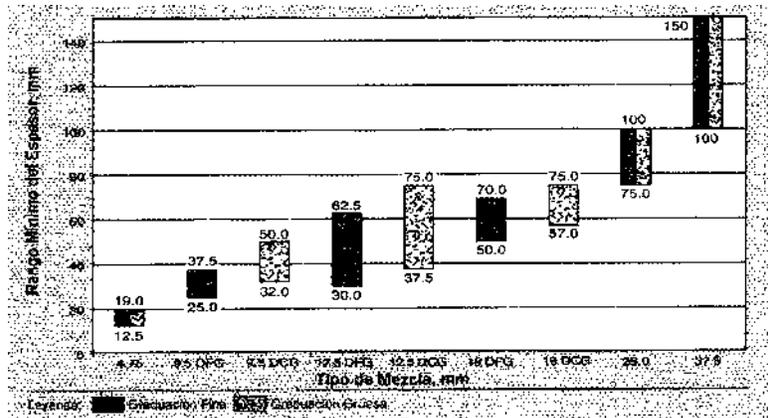


Figura XVI.- Recomendaciones para el rango mínimo del espesor para mezclas de granulometría densa.

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

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).

4.2.1.2 CALIDAD DE LOS AGREGADOS PETREÓS

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

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 VII.- Requisitos de calidad de la fracción gruesa 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	15 máx. (Capas estructurales) 12 máx. (Capas de rodadura)

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

Para resumir AMAAC en sus publicaciones hace las siguientes recomendaciones para realizar un diseño de la mezcla, partiendo de una adecuada selección de los agregados.

- El material pétreo será producto de trituración.
- Para los niveles de diseño III y IV se recomienda una relación 3:1 para el ensayo “determinación de las partículas planas y alargadas”.
- Se deben realizar las siguientes pruebas a los agregados pétreos.
 - ✓ 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).

4.2.2 SELECCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Se debe seleccionar en función de la temperatura máxima y mínima que se espera en el lugar de aplicación, de acuerdo con el ejemplo del anexo 1 o con la norma de SCT N CMT 4 05 004 Calidad de materiales asfálticos grado PG.

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 IX. Para cementos asfálticos modificados las temperaturas mencionadas deben ser proporcionadas por el proveedor.

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

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

Al hablar de un cemento asfáltico de grado PG, se considera de la siguiente forma, en el caso por ejemplo del PG 70-22, se refiere por sus siglas a que ha sido seleccionado por su grado de desempeño (PG), el primer número (70) se refiere a su temperatura máxima de trabajo y el segundo número (-22) hace referencia a su temperatura mínima de trabajo.

4.2.3 DISEÑO VOLUMÉTRICO

En este apartado se establecen los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica que se indican en Tabla X. El contenido de asfalto óptimo será el necesario para obtener un porcentaje de vacíos de aire (V_a) en la mezcla del 4%. En la Tabla XI se indica el número de giros para cada nivel de tránsito.

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

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		
< 0,3	≤ 91,5	96	≤ 98	11	12	13	14	15	70-80	0.6 – 1.2
0,3 a < 3	≤ 90,5								65-78	
3 a < 30	≤ 89								65-75	
≥ 30										

Tabla X.- Valores de los parámetros volumétricos necesarios para el diseño óptimo de una mezcla asfáltica de granulometría densa.

Millones de ejes equivalentes.	Parámetros de Compactación		
	N _{ini}	N _{dis}	N _{máx}
< 0,3	6	50	75
0,3 a < 3	7	75	115
3 a < 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

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

Para la determinación de los parámetros volumétricos de la mezcla se deben emplear las fórmulas de Tabla XII.

Formula de la Propiedad volumétrica	Significado de las variables	
Gravedad especifica bruta. $G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}}$	G_{sb} P_1, P_2, P_N G_1, G_2, G_N	Gravedad especifica bruta para el agregado total Porcentajes individuales por masa de agregado Gravedad especifica bruta individual del agregado
Gravedad especifica efectiva. $G_{se} = \frac{P_{mm} + P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} + \frac{P_b}{G_b}}$	G_{se} G_{mm} P_{mm} P_b G_b	Gravedad especifica efectiva del agregado Gravedad especifica teórica máxima, obtenida en laboratorio (ASTM D 2041, AASHTO T209) de mezcla de pavimento (sin vacíos de aire) Porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100 Contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla Gravedad especifica del asfalto
Gravedad especifica máxima de la mezcla asfáltica. $G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$	G_{mm} P_{mm} P_s P_b G_{se} G_b	Gravedad especifica teórica máxima, obtenida en laboratorio de la mezcla asfáltica (sin vacíos de aire) Porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100 Contenido del agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla Contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla Gravedad especifica efectiva del agregado Gravedad especifica del asfalto
Gravedad especifica bruta de la Mezcla asfáltica compactada $G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_s}$	G_{mb} W_a W_w W_{ss}	Gravedad especifica bruta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 ó D 2726) Masa de la probeta en el aire Masa de la probeta en el agua (sin parafina) Masa de la probeta saturada y superficialmente seca
Vacíos en el agregado mineral, VAM $VAM = 100 - \frac{(G_{mb})(P_s)}{G_{sb}}$	VAM G_{sb} G_{mb} P_s	Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto) Gravedad especifica bruta del total de agregado Gravedad especifica bruta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 ó D 2726/AASHTO T 166) Contenido del agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica
Vacíos del agregado mineral, VAM. Si la composición de la mezcla es determinada como el porcentaje de la masa del agregado $VAM = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{sb}}\right)\left(\frac{100}{100 + P_b}\right)(100)$	VAM G_{mb} G_{sb} P_b	Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto) Gravedad especifica bruta de la mezcla asfáltica compactada Gravedad especifica bruta del total de agregado Contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa en la mezcla
Vacíos de aire. $V_a = (100) \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}\right)$	V_a G_{mm} G_{mb}	Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total de dicha mezcla Gravedad especifica máxima de la mezcla asfáltica Gravedad especifica bruta de la mezcla asfáltica compactada
Vacíos llenados con asfalto $VFA = \left(\frac{VAM - V_a}{VAM}\right)(100)$	VFA VAM V_a	Vacíos llenos de asfalto, porcentaje del VAM Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen total) Vacíos de aire en la mezclas compactadas, porcentaje del volumen total

Formula de la Propiedad volumétrica	Significado de las variables
<p>Asfalto absorbido</p> $P_{ba} = (100) \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{(G_{se})(G_{sb})} \right) (G_b)$	<p>P_{ba} Asfalto absorbido, porcentaje en la masa del agregado G_{se} Gravedad específica efectiva del agregado G_{sb} Gravedad específica bruta del agregado G_b Gravedad específica del asfalto</p>
<p>Contenido de asfalto efectivo</p> $P_{be} = P_b - \left(\frac{P_{ba}}{100} \right) (P_s)$	<p>P_{be} Contenido del asfalto efectivo, porcentaje del total de la mezcla P_b Contenido de asfalto, porcentaje de la masa en la mezcla P_{ba} Asfalto absorbido, porcentaje en la masa de la mezcla P_s Contenido del agregado, porcentaje del total de la masa de la masa del agregado en la mezcla asfáltica</p>
<p>Relación filler-asfalto</p> $D_p = \frac{P_{0.075}}{P_{be}}$	<p>D_p Relación filler-asfalto $P_{0.075}$ Porcentaje de material que pasa la malla #200 P_{be} Contenido del asfalto efectivo, porcentaje del total de la mezcla</p>

Tabla XII.- Secuencia de cálculo de propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.

4.2.4 SUSCEPTIBILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA 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”, dicha recomendación considera el procedimiento propuesto por la norma AASHTO T283-07, el método consiste básicamente en determinar en una mezcla asfáltica compactada el daño inducido por humedad, comparando la resistencia a tensión indirecta de una serie de especímenes acondicionados (saturados) contra otros no acondicionados (secos).

En esta prueba a manera de resumen consiste en preparar especímenes de ensaye para cada conjunto de condiciones similares de mezcla, como aquellos preparados con asfalto sin tratar, asfalto tratado con algún agente anti desprendimiento, o agregado tratado con limo. Cada conjunto o grupo de especímenes es dividido en subgrupos. Un grupo es ensayado en condición seca para la resistencia a la tensión indirecta. El otro grupo es sujeto a saturación por vacío y a un ciclo de congelamiento, seguidos por un ciclo de inmersión en agua tibia antes de ser ensayados para resistencia a la tensión indirecta. Los índices numéricos de las propiedades a la tensión indirecta se calculan de los datos de prueba obtenidos por los grupos secos y acondicionados.



Figura XVII.- Espécimen montado sobre mordaza Lottman, y espécimen después del ensayo.

La norma AASHTO T283-07, precisa a detalle el procedimiento, sin embargo algunas de las condiciones sobresalientes con las que deben de cumplir los especímenes se mencionan a continuación:

Los especímenes de prueba deben poseer un % de Va de 7% considerando una tolerancia o rango aceptable desde 6.5% hasta 7.5%, si alguna de los especímenes no cumple tendrá que desecharse y elaborar un nuevo espécimen. Esta particularidad que se presenta en este procedimiento de prueba se basa en el principio de tener condiciones más críticas para los especímenes al poseer más vacíos.

Otra de las hipótesis de usar el 7% de vacíos, tiene que ver con las condiciones de colocación de mezclas asfálticas en campo (o en tramo como le llaman algunos ingenieros) ya que si una mezcla asfáltica fue diseñada para tener 4% de vacíos (deseable), en escenarios propios inmersos en la dinámica de una obra difícilmente se dará, debido a factores como una diferencia en la temperatura de compactación en campo con respecto a la de laboratorio o debido a una insuficiente aplicación de la energía de compactación.

Es importante considerar que solo se pueden comparar el mismo número de especímenes en estado seco contra ese mismo número de especímenes en estado saturado,

Una vez que se pretende dar un resultado de la prueba de TSR este se dará en porcentaje y para todos los niveles de diseño el valor mínimo aceptable es de 80%.

4.3 NIVEL II

4.3.1 SUSCEPTIBILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA A LA DEFORMACION PERMANENTE

Para revisar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la deformación permanente se podrán realizar por medio de tres especificaciones las cuales son la Rueda Cargada de Hamburgo, el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) y con el ensaye de Pista Española.

4.3.1.1 RUEDA CARGADA DE HAMBURGO

El procedimiento así como el equipo se detallan en la recomendación AMAAC RA 01/2011 “Susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera con el analizador de rueda cargada de Hamburgo, en una mezcla asfáltica compacta”.

La prueba tiene el objetivo de determinar cuál es la susceptibilidad a la falla prematura de una mezcla asfáltica, generando una deformación permanente por rodadura que es producida por cualquiera de las siguientes causas: por una mala granulometría de los agregados pétreos, por el uso de un asfalto inadecuado o a causa de un daño inducido por humedad.

Algunas particularidades del equipo, posee un par de ruedas de acero que tienen 47 mm de ancho con un diámetro de 203.2 mm y una carga de 705 ± 4.5 N cada una. El equipo funciona a una velocidad máxima de 30.5 cm/seg haciendo 50 ± 5 pasadas por

minuto. Consta de un sistema de medición de la impresión de la rodera. Es un dispositivo transductor capaz de medir la profundidad de la rodera con una aproximación de 0.01 mm, dentro de un rango mínimo de 0 a 20mm. La toma de datos es medida al menos cada 400 pasadas, sin detener la rueda y relacionando la deformación contra el número de pasadas correspondientes.

Sistema de control de temperatura. Es un baño de agua capaz de controlar la temperatura con una variación de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, debe contar un sistema de recirculación mecánico para estabilizar la temperatura del tanque.



Figura XVIII.- Especímenes montados sobre la rueda cargada de Hamburgo.

En la Tabla XIII se indican las especificaciones que debe de cumplir un espécimen ensayado con la rueda cargada de Hamburgo de acuerdo con el nivel de tránsito vehicular.

Nivel de tránsito	Deformación máxima de 10 mm
Bajo	10 000
Medio	15 000
Alto	20 000
Muy alto	20 000

Tabla XIII.- Numero de pasadas mínimas para la deformación máxima en la prueba de Hamburgo.

4.3.1.2 ESPECIFICACIONES CON EL APA

La recomendación AMAAC RA 02/2011 “Susceptibilidad a la deformación permanente por rodera de una mezcla asfáltica por medio del analizador de pavimentos asfálticos (APA)”, es una guía para realizar ensayos evaluando el desempeño de las mezclas asfálticas, permite predecir con mayor certeza el comportamiento en campo de dichas mezclas. Se busca tener carpetas asfálticas más durables, con mayor resistencia a los esfuerzos producidos por el paso de vehículos, y por ende esperar menos deformaciones en la superficie de rodamiento.

En la Tabla XIV se indican las especificaciones que debe de cumplir un espécimen ensayado con el APA de acuerdo con el nivel de tránsito vehicular.

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

Tabla XIV.- Especificaciones de rodera máxima con el Analizador de Pavimentos asfálticos, APA para 8000 ciclos.

4.3.1.3 ESPECIFICACIONES CON EL ENSAYE DE PISTA ESPAÑOLA

La recomendación AMAAC RA 03/2011 “Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista española de ensaye de laboratorio” describe el procedimiento a seguir para determinar la resistencia a la deformación (plástica) permanente de una mezcla asfáltica, tanto para el proyecto de mezclas de laboratorio como de campo (extracción de núcleos del pavimento).

La prueba consiste básicamente en someter una muestra de mezcla asfáltica compactada, al paso de una rueda en condiciones predeterminadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida (rodadura). Este procedimiento es aplicable principalmente a las mezclas asfálticas fabricadas en caliente y destinadas para trabajar en condiciones severas de tránsito y

clima. Variando las condiciones de la prueba pueden ser de utilidad en otros tipos de mezclas.

En la Tabla XV se indican las especificaciones que debe de cumplir un espécimen ensayado con el equipo de pista española de acuerdo con el nivel de tránsito vehicular.

	Nivel de Tránsito			
	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Velocidad máxima de deformación en mm/min	0.20	0.20	0.15	0.12

Tabla XV.- 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.

4.4 NIVEL III

4.4.1 MÓDULO DINÁMICO

El módulo dinámico de una mezcla asfáltica es un parámetro esencial para poder calcular los espesores de carpeta asfáltica en los nuevos métodos de diseño de pavimentos asfálticos. Se recomienda determinarlo con el procedimiento AASHTO TP62-07 “Método de prueba estándar para la determinación de módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente (HMA), debiendo reportarlo sistemáticamente. No hay parámetros específicos en este parámetro de diseño.

Según la norma AASHTO TP62-07, en resumen el método consiste en aplica un esfuerzo de compresión axial senoidal (haversine) a un espécimen de concreto asfáltico a una temperatura y frecuencia de carga determinada. El esfuerzo aplicado y la deformación axial recuperable del espécimen se miden y se usan para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase.

Parte de la importancia y uso del ensaye, está en los valores de módulo dinámico medidos en un rango de temperaturas y frecuencias de carga que pueden ser ajustados en una curva maestra para caracterizar el concreto asfáltico para el diseño de espesores de pavimentos y análisis de comportamiento, además los valores de módulo dinámico y ángulo de fase también pueden ser usados como un criterio para el diseño de HMA.



Figura XIX.- Especímenes para ensayo de modulo dinámico.

4.5 NIVEL IV

4.5.1 FATIGA

La vida a la fatiga y la energía de falla determinada por la norma extranjera AASHTO T 321-07 (Standard Method of Test for Determining the Fatigue life of compacted Hot Mix Asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending)) emitida por la American Association of State Highway and Transportation Officials. El comportamiento de la HMA puede ser predicho más exactamente cuando estas propiedades son conocidas.



Figura XX.- Equipo para ensayo de viga sujeta a flexión con cámara ambiental sistema de control y adquisición de datos.

El fenómeno de fatiga de un material se caracteriza por su ruptura después de la aplicación repetida de un gran número de sollicitaciones (en la práctica $N > 10^4$), en donde la amplitud de la sollicitación es inferior a la carga de ruptura instantánea de la probeta. Los primeros estudios fundamentales del fenómeno de fatiga en laboratorio fueron realizados en los metales por Wöhler en 1852. Son estos los materiales para los cuales se tienen mayor conocimiento. Sin embargo, en los últimos años se han realizado

diversos estudios en materiales carreteros, concretos y materiales compuestos. En el caso de las mezclas asfálticas, éstas son sometidas a sollicitaciones de corta duración al paso de los ejes de los vehículos. La fisuración por fatiga no se presenta inmediatamente, esta se presenta con el tiempo debido a la repetición de cargas en la base de la carretera a causa de esfuerzos de tracción que se acumulan a cada paso de los neumáticos.

Un componente se ve sometido a fatiga cuando soporta cargas alternadas: la rueda de un ferrocarril, la biela de un motor de explosión, entre otros. Pese a diseñarse estas piezas por debajo de su límite elástico, con un número suficiente de ciclos, las piezas se rompen. El 90% de las piezas que se rompen en servicio fallan debido a esta insidiosa patología. Esto lo descubre August Wöhler, hacia el año 1860, y propone unos límites a las tensiones de diseño en función del número de ciclos que se requieran para una pieza.

Existen diferentes tipos de ensayos de laboratorio para la determinación de la vida a la fatiga de la mezcla asfáltica. Estos ensayos se pueden clasificar en dos grandes grupos: ensayos homogéneos y no homogéneos.

En el primer grupo se encuentran el ensayo triaxial, ensayo de tensión-compresión simple en probetas cilíndricas y ciertos ensayos de (cizallamiento). Los ensayos no homogéneos son los ensayos de flexión (en 2, 3 o 4 puntos) y el ensayo de compresión diametral.

En el caso de los ensayos homogéneos, el estado de esfuerzos y de deformaciones es el mismo en cada punto de la probeta ensayada. Esto permite que los ensayos homogéneos den acceso a la ley de comportamiento sin la necesidad de utilizar hipótesis complementarias. Los ensayos no homogéneos necesitan de la incorporación de hipótesis y la realización de cálculos más o menos complejos para obtener ese comportamiento. Experimentalmente se ha observado que la dispersión en los ensayos homogéneos es menor y reduce notablemente el número de evaluaciones necesarias para determinar la curva de fatiga.

En el método de ensayo de viga a cuatro puntos la tensión se ejerce en dos puntos simétricos, se parte la muestra en tres secciones como se muestra en la Figura XXI. En ausencia de cizallamiento entre estos dos puntos, se puede aprovechar una zona de tiempo uniforme suficientemente larga.



Figura XXI.- Asignación de la tensión en la muestra del ensayo de flexión a 4 puntos.

5 DISEÑO DE LA MEZCLA

El proceso que se requiere para el adecuado diseño de una mezcla asfáltica depende de diversas variables, sin embargo principalmente tres parámetros básicos a considerar son la selección y evaluación de los agregados pétreos, la selección del cemento asfáltico y finalmente la evaluación de la combinación de ambos componentes formando una mezcla que se someterá a diversos ensayos para evaluar su comportamiento ante condiciones similares a la que se presentan en un pavimento una vez puesto en servicio.

El presente capítulo aborda la descripción del proceso llevado a cabo para elaborar el diseño de la mezcla asfáltica así como las pruebas correspondientes que se llevaron a cabo para llegar al diseño final y posterior a ello la evaluación a través de los ensayos.

Se buscó hacer un diseño primeramente con una mezcla que contenga 0% de hule de llanta, posterior a este primer diseño se agregó 1% de hule de llanta con SBR, la cual fue una segunda mezcla y después se hizo agregando el 2% de llanta con SBR, la cual conformo una tercera mezcla.

El proceso de incorporación de hule de llanta se llevó a cabo como parte de los agregados, el hule se sustituyó en el lugar del material retenido en la malla #50. Con estas tres mezclas (0%, 1% y 2%) se elaboraron especímenes que se ensayaron desde el nivel I hasta el IV con respecto al protocolo AMAAC, sin embargo se utilizó el mismo cemento asfáltico en calidad y cantidad en las tres propuestas con la finalidad de poder comparar los resultados por igualdad de circunstancias.

Se llevaron a cabo 2 procesos (A y B), para la incorporación del hule, el primero consistió en agregar el hule desde el momento que se mete al horno todo el material pétreo para alcanzar la temperatura de mezclado y el segundo (B), consistió en incorporar el hule a la mezcla segundos antes de la compactación de los especímenes.

Al usar el mismo contenido de asfalto en todas las propuestas pareciera lógico obtener diferentes resultados e incluso podría parecer que no son comparables, además lo más prudente sería haber determinado el contenido óptimo de asfalto para cada mezcla, sin embargo es una investigación en la cual como en muchas existen bastantes variables que habrá que tomar en cuenta y así de forma particular analizar cada posibilidad o forma de incorporar el hule de llanta a una mezcla asfáltica.

5.1 ANÁLISIS Y CARACTERÍSTICAS DEL HULE DE LLANTA CON SBR

Como parte de la presente investigación se realizó un estudio granulométrico al hule de llanta, donde se corrobora que tiene diferentes tamaños, todos menores a 2.36mm.

Granulometría de hule con SBR						
Peso de la muestra:				260	g.	
Malla	Abertura	Abertura ^ 0.45	Peso suelo retenido	% retenido parcial	% que pasa	
No.	mm		g	%	%	
2 in	50.8	5.8565	0.0	0.0	100.0	
1 1/2 in	36.1	5.022	0.0	0.0	100.0	
1 in	25.4	4.2872	0.0	0.0	100.0	
3/4 in	19.05	3.7666	0.0	0.0	100.0	
1/2 in	12.7	3.1384	0.0	0.0	100.0	
3/8 in	9.52	2.7567	0.0	0.0	100.0	
No. 4	4.75	2.0161	0.0	0.0	100.0	
No. 8	2.36	1.4717	0.0	0.0	100.0	
No. 16	1.18	1.0773	1.0	0.4	99.6	
No.30	0.6	0.7946	23.4	9.0	90.6	
No.50	0.3	0.5817	97.9	37.7	52.9	
No.100	0.149	0.4246	75.0	28.9	24.0	
No.200	0.074	0.3099	37.7	14.5	9.5	
Pasa No. 200			24.6	9.5	0.0	
SUMA			259.6	100.0		

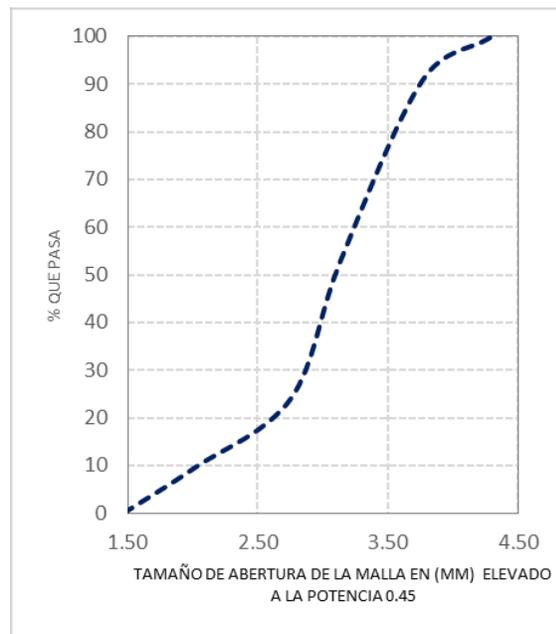


Tabla XVI.- Propiedades granulométricas del hule de llanta.

Se puede observar en la Tabla XVI que predomina el mayor porcentaje de partículas retenidas en la malla #50, para lo cual se eligió inicialmente el criterio de incorporar el hule de llanta como parte de los agregados y sustituyendo el porcentaje de 1% y 2% en relación al peso total de agregados, donde solamente se sustituyó el retenido de la malla #50 por el hule de llanta.

La Figura XXII muestra de forma más clara como se encuentra la composición granulométrica del hule.



Figura XXII.- Hule de llanta con SBR.

También se realizó una prueba donde el hule se calienta hasta 240 °C durante dos horas, con un peso inicial de 50g. Después de ese lapso de tiempo se dejó enfriar y se pesó nuevamente encontrando que el hule perdió algunas propiedades e incluso masa porque se registró una pérdida de 4g. Además se puede observar que las partículas de color que tenía el hule antes de calentarse ya no aparecen con el mismo color, ahora todo el hule aparentemente está quemado y con un color café oscuro y formando grumos, esto se puede apreciar en la figura XXIII.

Se puede deducir que si el hule alcanza temperaturas mayores a 200 °C pierde algunas propiedades, sin embargo esto será tema que esta fuera de los alcances del presente trabajo, para formar la mezcla asfáltica de la presente investigación se

requieren temperaturas no mayores a 160°C, ya que por el asfalto empleado (Grado PG70-22) la temperatura de Mezclado recomendada es de 155°C y la de compactación de 145°C.



Figura XXIII.- Comparativa entre hule quemado y hule nuevo de llanta con SBR.

La figura XXIV muestra como se ve el hule de llanta después de ser calentado durante 2 horas.



Figura XXIV.- Hule de llanta con SBR quemado.

5.2 BANCO DE MATERIAL PÉTREO

El material pétreo con el cual se trabajó proviene del banco denominado La Letra Ubicado en la carretera Puebla–Azumiatla a la altura del km 11, con coordenadas UTM 576348Este y 2094142Norte en la Zona 14Q a una altura de 2160m aproximadamente sobre el nivel medio del mar.

Es importante recalcar que el agregado es un derivado de una roca ígnea extrusiva, este tipo de rocas se forman por el enfriamiento y solidificación del magma que aflora en la superficie de la tierra. Este tipo de agregado es basalto donde una de sus características predominante es su color gris oscuro o en ocasiones negro. [12]

En la cantera los pétreos reciben tratamiento de trituración total y cribado. El banco de extracción La Letra esta inventariado por el centro SCT Puebla por la Unidad General de Servicios Técnicos (2012) con el número 130. [11]



Figura XXV.- Vista aérea del Banco La Letra.



Figura XXVI.- Planta de trituración, Banco La Letra.

5.3 SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DEL AGREGADO PÉTREO

Como ya se vio en la Tabla VII y Tabla VIII, el protocolo AMAAC establece ciertos parámetros de control que se deben de cumplir tanto para la fracción fina como para la fracción gruesa, la siguiente tabla muestra las pruebas realizadas a los materiales que se emplearon así como el parámetro de referencia (donde lo requiere) y el resultado obtenido de dicho ensaye.

Característica	Parametro de referencia	Valor obtenido
Desgaste Los Ángeles, %	30 máx.	23%
Desgaste Microdeval, %	18 máx.	23%
Intemperismo acelerado	15 máx.	23%
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	90 mín.	90%
Partículas alargadas, %	Relación 3 a 1, 15% máx.	15%
Partículas lajeadas, %	Relación 3 a 1, 15% máx.	15%
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	90 mín.	90%
Equivalente de arena, %	50 mín.	55%
Angularidad, %	40 mín.	55%
Azul de metileno, mg/g	15 máx	15%
Densidad y absorción	N/A	

Tabla XVII.- Propiedades físicas inherentes de los materiales pétreos.

Además de las pruebas antes ya mencionadas, como adjuntas al proceso de diseño se realizaron también practicas recomendables como el muestro en el banco de materiales debido a que es un paso muy importante para seleccionar una muestra representativa, asimismo se realizó la reducción de las muestras para realizar cada uno de los ensayos, y el análisis granulométrico del cual se muestran los resultados en la Tabla XVIII.

Conocer el inicio del proceso de selección en campo es básico ya que las condiciones del frente pueden variar de un momento a otro así como las condiciones de trituración, al elegir el material directamente del banco se debe hacer con la finalidad de obtener una muestra representativa. La Figura XXVII Muestra la forma de cómo formar el canal para obtener una muestra que contenga todos sus tamaños en proporción.



Figura XXVII.- Proceso de muestreo en banco de material.



Figura XXVIII.- Reducción de muestras en laboratorio.

5.4 SELECCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Es importante tener un conocimiento del proceso de selección de los materiales, en ese sentido la selección del cemento asfáltico debe llevar el siguiente orden.

- ✓ Determinación de las condiciones climáticas del proyecto utilizando una base de datos del clima.
- ✓ Seleccionar la confiabilidad.
- ✓ Determinar las temperaturas de diseño.
- ✓ Verificar el grado de desempeño del cemento asfáltico.
- ✓ Obtener la curva de la relación viscosidad temperatura para el mezclado y compactado en laboratorio.

La presente tesis pretende abordar una evaluación del comportamiento de la mezcla asfáltica con hule molido, donde no necesariamente requiere una ubicación geográfica para el emplazamiento de la mezcla que se evalúa y describe en párrafos posteriores. Sin embargo al estar trabajando con protocolo AMAAC se requiere la utilización de un cemento asfaltico grado PG.

El asfalto utilizado es un PG70-22, el cual se eligió porque cubre los requerimientos de forma aproximada para la zona centro del País donde no se tienen temperaturas extremas, sin embargo el hecho de realizar un estudio para la selección del cemento asfaltico según la clasificación de grado de desempeño (PG), queda fuera de los alcances del presente trabajo, ya que para ello existe toda una metodología que se basa principalmente en la revisión de las estadísticas de los días más calurosos, durante varios años, para establecer el promedio estadístico de los 7 días más calurosos reportados en lugar donde se construirá la carretera, entre otros parámetros que se relacionan con la intensidad y velocidad del tráfico vehicular.

5.5 DISEÑO DE LA MEZCLA DE PRUEBA

El diseño volumétrico de la mezcla juega un rol fundamental en el diseño de mezclas, cabe mencionar que los pasos iniciales para el diseño son la selección de los materiales como el agregado, ya que este forma el mayor porcentaje en peso y en volumen en la conformación de una mezcla asfáltica.

Una vez seleccionado el agregado a emplear a través de los ensayos correspondientes, se debe hacer la selección de la estructura del agregado de diseño por medio de un proceso de prueba y error, básicamente consiste en mezclar en diferentes porcentajes los agregados disponibles. Normalmente 3 mezclas de prueba son empleadas para este propósito, para lo cual se calcula la granulometría de las mezclas de prueba por medio de combinaciones matemáticas de las granulometrías individuales de los materiales.

La granulometría individual de los tres materiales empleados se muestra en la Tabla XVIII.

MALLA ^ 0.45	# MALLA	% PASA		
		GRAVA 3/4"	GRAVA 1/2"	ARENA
4.29	1"	100.0	100.0	100.0
3.77	3/4"	98.2	100.0	100.0
3.14	1/2"	50.0	88.8	100.0
2.76	3/8"	24.5	53.7	99.4
2.02	# 4	2.7	5.4	91.4
1.47	# 8	2.0	1.8	61.1
1.08	# 16	1.9	1.7	39.2
0.79	# 30	1.9	1.6	26.7
0.58	# 50	1.9	1.6	20.0
0.42	# 100	1.8	1.6	16.0
0.31	# 200	1.7	1.5	12.9

Tabla XVIII.- Granulometría de los tres materiales empleados.

Se deben evaluar las tres mezclas según recomendaciones del método SUPERPAVE así como las combinaciones de los materiales combinados.

Inicialmente se propusieron tres propuestas de acuerdo a la Tabla XIX.

GRAVA 3/4"	15%	27%	50%
GRAVA 1/2"	30%	27%	14%
ARENA	55%	46%	36%
# MALLA	MEZCLA 1	MEZCLA 2	MEZCLA 3
1"	100.0	100.0	100.0
3/4"	99.7	99.5	99.1
1/2"	89.1	83.5	73.4
3/8"	74.4	66.8	55.5
# 4	52.3	44.2	35.0
# 8	34.5	29.2	23.3
# 16	22.4	19.0	15.3
# 30	15.4	13.2	10.8
# 50	11.8	10.1	8.4
# 100	9.6	8.3	6.9
# 200	7.8	7.9	5.7

Tabla XIX.- Propuestas granulométricas.

Para apreciar con mayor detalle el comportamiento de las combinaciones se muestran sobrepuestas en el siguiente gráfico.

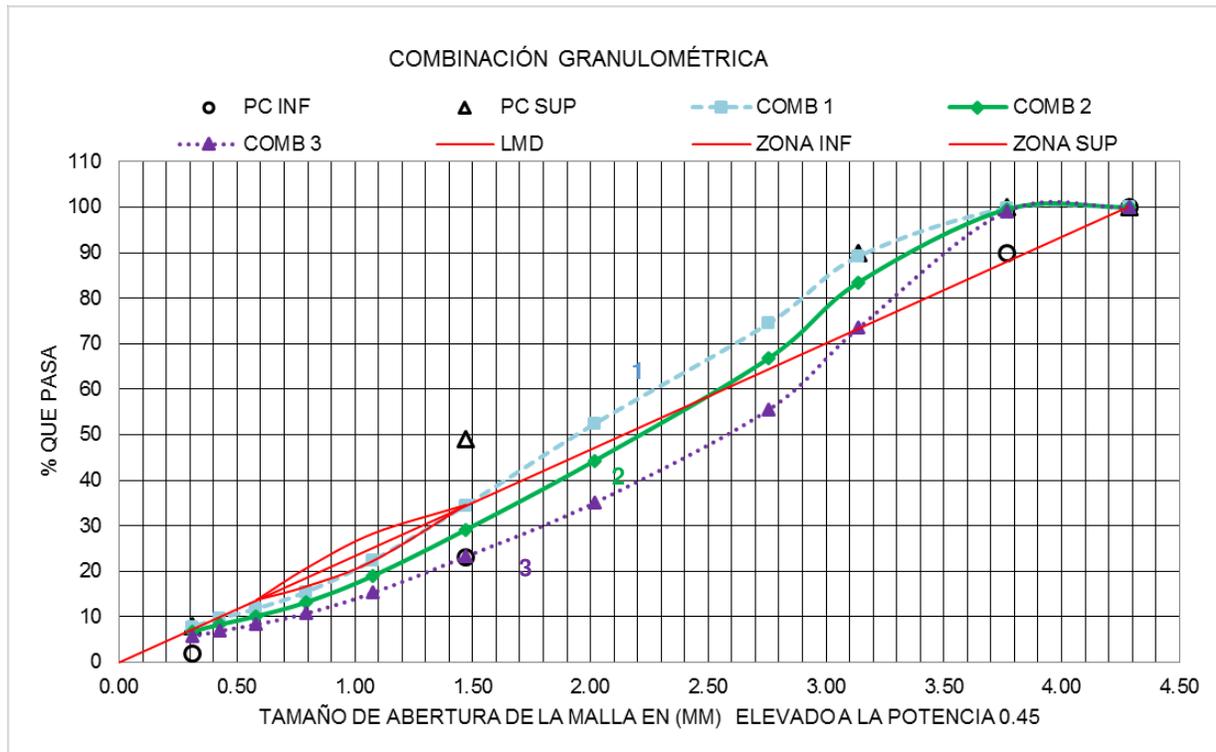


Figura XXIX.-Representación gráfica de las tres propuestas granulométricas.

Para fines didácticos y de investigación es conveniente iniciar con estas tres propuestas por que muestran mayor variación entre sí, se tiene una granulometría fina (cuadro) una granulometría intermedia y una granulometría gruesa (triangulo).

También se puede apreciar lo que sucede haciendo variaciones en los porcentajes de los tres materiales componentes de las distintas combinaciones granulométricas, asimismo ninguna de las tres propuestas mostradas anteriormente están cerca de la línea punteada que representada la línea de máxima densificación lo cual es benéfico porque mientras más cerca se esté de la línea de máxima densificación menor espacio quedara para el asfalto.

Se utilizó una combinación de tres agregados porque técnicamente es más viable para los fines de la investigación, sin embargo el hecho de tener solo dos o incluso un solo agregado facilita los trabajos en obra y resulta ser más económico que usar tres o más.

Para la presente investigación los tres agregados provienen del mismo banco de materiales con tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ " y arena.

Un vez calculadas las propuestas en base a las diferentes combinaciones de granulometría de los agregados se procedió a calcular el Pb (contenido de asfalto inicial) para cada una de las propuestas, enseguida se hizo la dosificación de los seis especímenes (dos para cada propuesta) para calcular el Gmb con un peso de 4.5kg c/u y un diámetro de 150mm (6") de altura variable para someterse a compactación en el compactador giratorio (a 100 giros) y seis dosificaciones (dos para cada propuesta) para determinación del Gmm con un peso de 1.5kg c/u. Además se realizaron las pastillas por duplicado para corroborar y tener mayor seguridad en los resultados obtenidos.

Para la determinación del Gmm se usó la norma ASTM D-2041-03 y para la determinación de Gmb se usó la norma ASTM-D2726.

Las siguientes imágenes muestran el material durante cada uno de los respectivos ensayos realizados a la mezcla.



Figura XXX.- Especímenes para Gmb.

Fecha de elaboración de los Especímenes	# Especímen	Altura promedio (mm)	Diametro promedio (mm)	C.A. (%)	(I) Peso al aire (g)	(III) Peso sumergido	(II) Peso SSS (g)	Absorcion (%) $((II-I)/(II-III))*100$	Gmb I/(II-III)
27/05/2014	Prop. 1A	111.9	150	5.7	4680.1	2764.1	4690.3	0.530	2.430
27/05/2014	Prop. 1B	112.4	150	5.7	4717.5	2792.6	4723.0	0.285	2.444
27/05/2014	Prop. 2A	113.7	150	5.6	4695.9	2770.6	4704.2	0.429	2.429
27/05/2014	Prop. 2B	113.6	150	5.6	4685.8	2760.3	4694.9	0.470	2.422
27/05/2014	Prop. 3A	116.6	150	5.5	4675.3	2730.4	4685.9	0.542	2.391
27/05/2014	Prop. 3B	116.8	150	5.5	4701.9	2749.6	4713.2	0.575	2.395

Tabla XX.- Cálculos para la obtención de Gmb.



Figura XXXI.- Especímen para Gmm.

Gmb Promedio	(IV) Peso del Material	(VI) Peso del Picnómetro + Material + Agua	(V) Peso del Picnómetro + Agua	Gmm IV/(IV+V-VI)	Gmm Promedio	h @ Nini	Est Gmb @ Nini
2.437	1572.3	2305.8	1353.2	25.0°C	2.537	2.533	125.7
	1572.1	2303.4	1353.2		2.528		126.6
2.425	1561.5	2298.3	1353.1	25.4°C	2.534	2.532	128.7
	1568.4	2301.5	1353.1		2.530		128.2
2.393	1563.0	2297.8	1353.1		2.528	2.524	132.3
	1561.8	2295.3	1353.1		2.521		132.4

Tabla XXI.- Cálculos para la obtención de Gmm.

Diametro del Espécimen (mm)	h @ Ndis	Est Gmb @ Ndis	Factor de corrección	Corrección Gmb @Nini	Promedio Corrección Gmb @Nini	%Gmm @ Pb, inicial			
						% Gmm @ Nini	Promedio % Gmm @ Nini	% Gmm @ Ndis	Promedio % Gmm @ Ndis
150.0	95.76	2.766	0.879	1.851	1.859	73.25	73.4	95.8	96.2
	96.67	2.761	0.885	1.866		73.52		96.7	
	95.85	2.772	0.876	1.809	1.809	71.39	71.4	95.9	95.8
	95.75	2.769	0.875	1.809		71.51		95.7	
	94.58	2.797	0.855	1.709	1.714	67.79	67.9	94.6	94.8
	95.00	2.801	0.855	1.718		67.98		95.0	

Tabla XXII.- Cálculos para estimar la obtención del contenido de asfalto inicial.

Propiedades estimadas para Pb para 4% de Va (vacíos de aire)								
Va (%) inicial	VAM (%) inicial	C	Pb estimado (%)	VAM estimado (%)	VFA estimado (%)	%Gmm @Nini Pb estimado (%)	Pbe estimado (%)	Dp (%)
3.8	15.91	0.1	5.61	15.93	74.9	73.2	4.09	1.9
4.2	16.21	0.2	5.68	16.17	75.3	71.6	4.16	1.9
5.2	17.25	0.2	5.99	17.01	76.5	69.1	4.46	1.3

Tabla XXIII.- Cálculos para estimar la obtención de 4% de vacíos.



Figura XXXII.- Picnómetro, material y agua, para determinación de Gmm.

Posterior a la determinación de los parámetros Gmm y Gmb, se determina cuál de las tres propuestas cumple o está más cerca de cumplir los requerimientos para el diseño volumétrico de mezcla citados por el protocolo AMAAC, para corroborar los valores de referencia ver la Tabla X.

Se optó por elegir la combinación granulométrica intermedia #2, ya que tiende a aproximarse más a las propiedades volumétricas deseables en una mezcla de acuerdo a la Tabla X.

Una vez que se eligió la estructura del agregado que mejor se acerca a los parámetros de referencia, se considera como contenido de asfalto estimado de 5.7%, se realizan especímenes con variación de 0.5% hacia abajo (5.2% y 4.7%) y hacia arriba (6.2% y 6.7%) sin rebasar el 1% de diferencia hacia ambos lados, esto con la finalidad de construir gráficos con el contenido de asfalto y su relación obtenida en cada espécimen de prueba con %Va, %VAM, %VFA y %Dp.

Fecha de elaboración de los Especimene	# Especimen	Altura promedio (mm)	Diametro promedio (mm)	C.A. (%)	(A) Peso al aire (g)	(C) Peso sumergido	(B) Peso SSS (g)	Absorcion (%) ((B-A)/(B-C))*100	Gmb A/(B-C)	Gmb Promedio
03/06/2014	1	111.9	150	4.7	4638.0	2728.8	4677.0	2.002	2.381	2.381
03/06/2014	2	112.4	150	4.7	4645.7	2725.2	4676.5	1.578	2.381	
03/06/2014	3	113.7	150	5.2	4701.7	2770.2	4710.4	0.448	2.423	2.419
03/06/2014	4	113.6	150	5.2	4679.9	2753.5	4691.6	0.604	2.415	
03/06/2014	5	116.6	150	5.7	4698.4	2781.0	4705.2	0.353	2.442	2.438
03/06/2014	6	116.8	150	5.7	4705.2	2779.0	4712.5	0.378	2.434	
03/06/2014	7	112.4	150	6.2	4701.0	2790.7	4704.8	0.199	2.456	2.457
03/06/2014	8	112.4	150	6.2	4719.8	2802.2	4722.6	0.146	2.458	
03/06/2014	9	111.6	150	6.7	4679.0	2769.9	4681.5	0.131	2.448	2.449
03/06/2014	10	113.9	150	6.7	4781.9	2832.7	4784.3	0.123	2.450	

Tabla XXIV.- Obtención de las propiedades con diferentes contenidos de asfalto.

# Especimen	Gmm	Gmm Promedio	Gse (Pb 5.6%)	Va (%)	VAM (%)	VFA (%)	Pba (%)	Pbe (%)	Dp (%)
1	2.567	2.567	2.771	7.27	17.12	57.52	0.46	4.26	1.15
2	2.567			7.27	17.11	57.55	0.46	4.26	1.15
3	2.547	2.547		4.87	16.08	69.70	0.46	4.76	1.03
4	2.547			5.21	16.38	68.19	0.46	4.76	1.03
5	2.528	2.528		3.40	15.89	78.58	0.46	5.27	0.93
6	2.528			3.73	16.17	76.94	0.46	5.27	0.93
7	2.508	2.508		2.09	15.84	86.80	0.46	5.77	0.85
8	2.508			2.02	15.78	87.19	0.46	5.77	0.85
9	2.489	2.489		1.67	16.58	89.90	0.46	6.27	0.78
10	2.489			1.57	16.49	90.47	0.46	6.27	0.78

Tabla XXV.- Propiedades obtenidas con diferentes contenidos de asfalto.



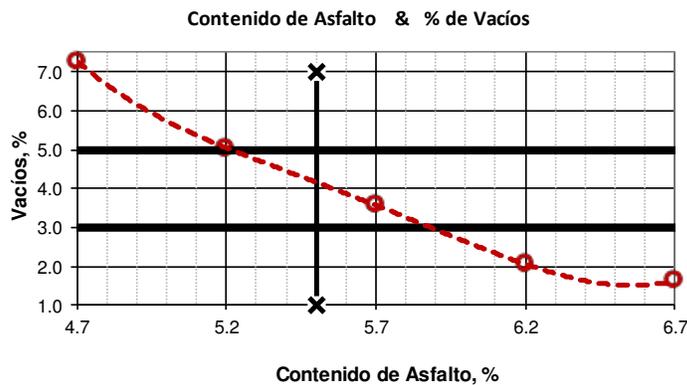
Figura XXXIII.- Especímenes con diferentes contenidos de asfalto.

Es pertinente mencionar que los especímenes que contienen el 6.7% de contenido de asfalto muestran cierto escurrimiento en la muestra lo que hace pensar a decir de los compañeros laboratoristas que dicha pastilla está excedido en cuanto al contenido de asfalto se refiere, esto es una observación realizada de forma visual, ya que esa misma pastilla muestra un brillo mucho mayor que el resto de las muestras que contienen menor % de asfalto, sin embargo la mejor determinación del contenido de asfalto se hará a continuación.

5.5.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

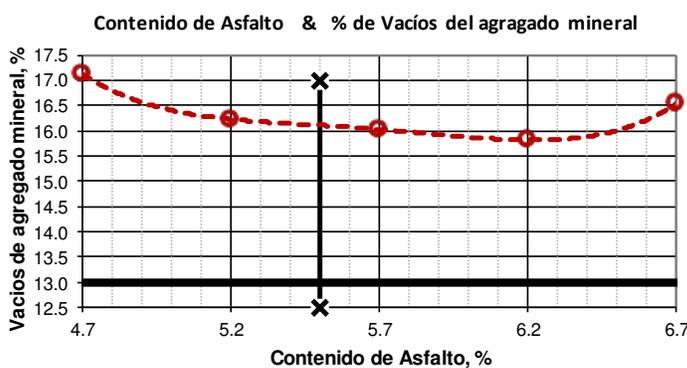
Una vez obtenidas las propiedades volumétricas de cada mezcla se construyen los gráficos que permiten interpolar cual es contenido óptimo de asfalto para la granulometría propuesta en la mezcla asfáltica buscando una relación de vacíos de 4%.

Se observa en los siguientes gráficos una línea con “x” en los extremos que indica el %Va de 4%, el cual es el que se busca.



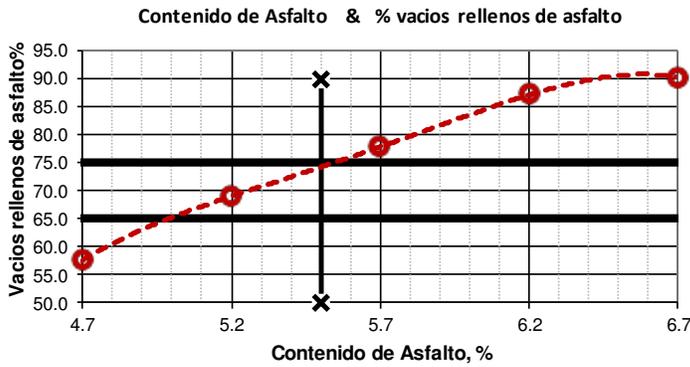
C.A. (%) Promedio	C.A. (%)	Va (%)	Va (%) Promedio
4.700	4.7	7.27	7.269
	4.7	7.27	
5.200	5.2	4.87	5.041
	5.2	5.21	
5.700	5.7	3.40	3.566
	5.7	3.73	
6.200	6.2	2.09	2.056
	6.2	2.02	
6.700	6.7	1.67	1.623
	6.7	1.57	

Tabla XXVI.- Obtención del % de asfalto para un 4% de vacíos.



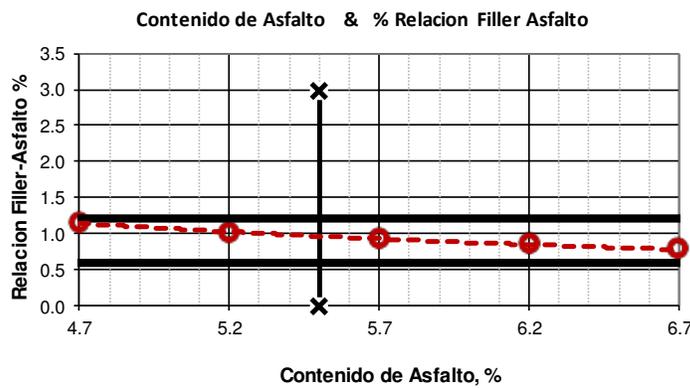
C.A. (%) Promedio	C.A. (%)	VAM (%)	VAM (%) Promedio
4.700	4.7	17.12	17.118
	4.7	17.11	
5.200	5.2	16.08	16.228
	5.2	16.38	
5.700	5.7	15.89	16.028
	5.7	16.17	
6.200	6.2	15.84	15.814
	6.2	15.78	
6.700	6.7	16.58	16.532
	6.7	16.49	

Tabla XXVII.- % de VAM para un % de asfalto que cumple con el 4% de Va.



C.A. (%) Promedio	C.A. (%)	VFA (%)	VFA (%) Promedio
4.700	4.7	57.52	57.536
	4.7	57.55	
5.200	5.2	69.70	68.943
	5.2	68.19	
5.700	5.7	78.58	77.758
	5.7	76.94	
6.200	6.2	86.80	86.998
	6.2	87.19	
6.700	6.7	89.90	90.180
	6.7	90.47	

Tabla XXVIII.- % de VAF para un % de asfalto que cumple con el 4% de Va.



C.A. (%) Promedio	C.A. (%)	Dp (%)	Dp (%) Promedio
4.700	4.7	1.15	1.147
	4.7	1.15	
5.200	5.2	1.03	1.026
	5.2	1.03	
5.700	5.7	0.93	0.928
	5.7	0.93	
6.200	6.2	0.85	0.847
	6.2	0.85	
6.700	6.7	0.78	0.779
	6.7	0.78	

Tabla XXIX.- Rel. filler-asfalto con un % de asfalto que cumple con el 4% de Va.

Ya que se grafican los resultados obtenidos, se señala el punto donde se indican los parámetros que se buscan como %Va, %VAM, %VFA y %Dp.

5.5.2 VERIFICACIÓN DE LA MÁXIMA DENSIFICACIÓN

Para verificar la máxima densificación es necesario determinar el valor de la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada a los giros máximos y la gravedad específica teórica máxima. Para esto se compactan dos especímenes al contenido óptimo de asfalto a los giros máximos (Nmax) que para el presente trabajo fueron de 160 (para un nivel de tránsito de 3 a 30 millones de ejes equivalentes) y se preparan dos mezclas para obtener la gravedad específica teórica máxima al contenido óptimo de asfalto. Las alturas registradas a cada nivel de giro para cada uno de los especímenes se muestran en la Tabla XXXII.

# Especimen	Ø =	150	mm	N=	8	100	160	Cálculo Gmb @ Nini		
	Pb diseño	Peso al aire g	Peso Sumergido g	Peso SSS g	h @ Nini	h @ Ndes	h @ Nmax	Correc. Gmb @ Nini	Gmb @ Nini	Promedio Gmb @ Nini
A	5.5	4649.2	2788.1	4652.5	118.0	98.8	95.9	0.813	2.027	2.104
B	5.5	4632.6	2783.0	4635.6	125.0	110.8	109.0	0.872	2.181	

Tabla XXX.- Características de Especímenes para Nmax.

# Especimen	Pb diseño	Cálculo Gmb @ Ndis			Cálculo Gmb @ Nmax		Gmm =	2.535		
		Correc. Gmb @ Ndis	Gmb @ Ndis	Promedio Gmb @ Ndis	Gmb @ Nmax	Promedio Gmb @ Nmax	%Gmm @Nini	%Gmm @Ndis	%Gmm @Nmax	
A	5.5	0.971	2.420	2.440	2.494	2.497	83.0%	96.3%	98.5%	
B	5.5	0.984	2.460		2.501					

Tabla XXXI.- Obtención de parámetros para la máxima densificación.

Para corroborar si se ha realizado un adecuado diseño de mezcla los parámetros (%Gmm@Nini, %Gmm@Ndis y %Gmm@Nmax) deben compararse con los requerimientos para el diseño volumétrico de mezclas marcados en la Tabla X, ya que los parámetros de compactación se siguieron de acuerdo a la Tabla XI.

	# Especimen	# Especimen
Numero de giros	A	B
N	Altura (h)	Altura (h)
5	122.1	128.2
6	120.5	127.0
7	119.2	126.0
8	118.0	125.0
9	116.9	124.2
10	116.0	123.5
15	112.6	120.9
20	110.3	119.1
25	108.6	117.7
30	107.2	116.7
40	105.0	115.1
50	103.5	113.9
60	102.2	113.0
70	101.2	112.3
80	100.3	111.7
100	98.8	110.8
115	97.9	110.2
125	97.4	109.9
150	96.3	109.2
160	95.9	109.0

Tabla XXXII.- Registro de alturas en compactador giratorio para Nmax.

Se puede apreciar en la Tabla XXXI que (%Gmm@Nini) cumple con el parámetro de referencia (<90.5%), sin embargo (%Gmm@Ndis) esta 0.3% por arriba del parámetro de referencia (96.0%) así como también (%Gmm@Nmax) se encuentra 0.5% por arriba del parámetro de referencia (98.0%). Lo que indica que el diseño está prácticamente dentro de los parámetros de aceptación en lo referente al nivel de compactación giratoria.

5.6 SUCEPTIBILIDAD AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD, TSR

Este Ensayo básicamente mide la resistencia de la mezcla asfáltica compactada a los daños propiciados por la humedad. Se realizaron ocho pastillas de acuerdo a la norma AASHTO T283-07, para cada una de las mezclas (con 0%, 1% y 2% de hule de llanta). Enseguida a cada una de las pastillas se determinó su Gmb, de donde se obtuvo sus respectivos % de Va, lo que sirvió para hacer dos grupos (diferentes colores) en cada mezcla.



Figura XXXIV.- Especímenes para TSR.

Estos especímenes son del método de incorporación A.

Mezcla con el 0% de hule. Método A.

NORMATIVA: AASHTO T-283-07								
CONDICIÓN DE ESPÉCIMEN			SECO			SATURADO		
IDENTIFICACIÓN DE ESPÉCIMEN			3	5	6	4	7	8
GEOMETRÍA	No. DE GIROS	#	53	55	65	54	59	61
	DIÁMETRO, mm	D	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	ALTURA, mm	t	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
ASTM D 2726	MASA DEL ESPÉCIMEN EN AIRE, g	A	1102.0	1103.0	1102.2	1102.0	1101.7	1102.0
	MASA DEL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B	1110.7	1110.9	1110.3	1113.4	1108.2	1108.2
	MASA DEL ESPÉCIMEN SUMERGIDO EN AGUA, g	C	644.0	643.6	643.5	646.9	641.8	641.9
	VOLUMEN DEL ESPÉCIMEN (B - C), cm ³	E	466.7	467.3	466.8	466.5	466.4	466.3
	GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA, (A / E)	Gmb	2.361	2.360	2.361	2.362	2.362	2.363
ASTM D2041	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA	Gmm	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535
PRE-ACONDICIONAMIENTO	VACÍOS [100 (Gmm - Gmb) / Gmm], %	Va,%	6.9	6.9	6.9	6.8	6.8	6.8
	VACÍOS EN VOLUMEN, cm ³	Va', cm ³	32.0	32.3	32.0	31.8	31.8	31.6
	MASA EL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B'	-	-	-	1127.3	1125.2	1126.5
	VOLUMEN DE AGUA ABSORBIDA (B' - A), cm ³	J'	-	-	-	25.3	23.5	24.5
	GRADO DE SATURACIÓN (100 J' / Va'), %	S'	-	-	-	79.5	73.8	77.4
	CARGA EN LIBRAS		2036.0	1931.0	1962.0	1644.0	1631.0	1665.0
ENSAYE	CARGA, N	P	9067.8	8600.2	8738.2	7321.9	7264.0	7415.5
	ESFUERZO, (2000 * P / π t D), kPa.	S1, S2	909.1	862.2	876.1	734.1	728.3	743.4
	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (CALIFICACIÓN DEL 0 AL 5)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SE AGRIETO Ó ROMPIÓ EL AGREGADO		no	no	no	no	no	no
	ESFUERZO PROMEDIO, kPa		882.5			735.3		
	TSR (S2 / S1) * 100, %		83.3					

Tabla XXXIII.- Cálculos para TSR, 0% de hule, método A.

En este ensayo la resistencia al daño inducido por humedad TSR, expresada en % cumple con el procedimiento de la recomendación AMAAC RA 04/2010.

Se obtuvo 83.3% > 80%, por tanto cumple con el protocolo AMAAC.

Mezcla con el 0% de hule, especímenes secos o no acondicionados. Método A.

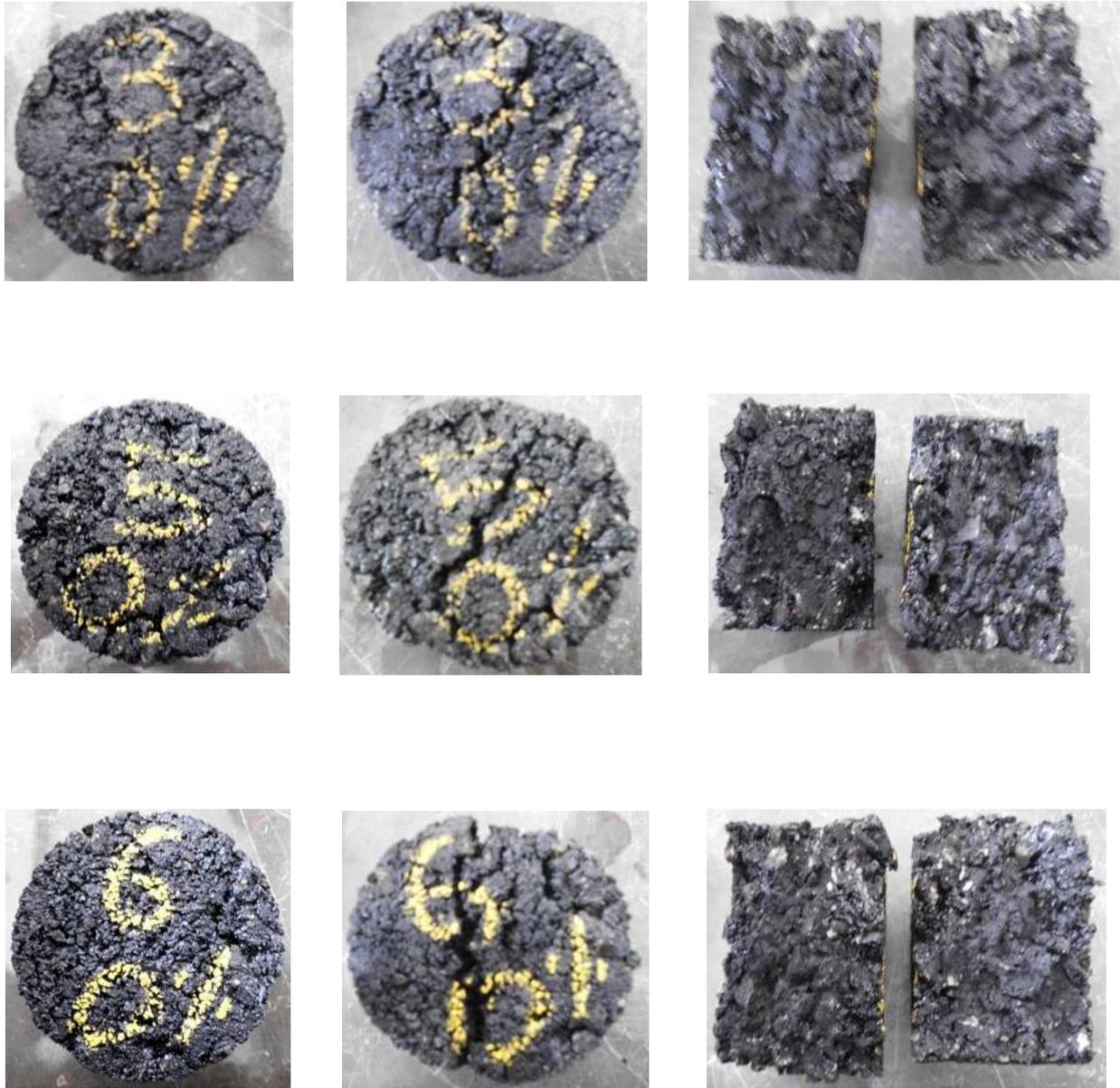


Figura XXXV.- Especímenes no acondicionados para TSR, 0% de hule, método A.

Mezcla con el 0% de hule, especímenes saturadas o acondicionadas. Método A.

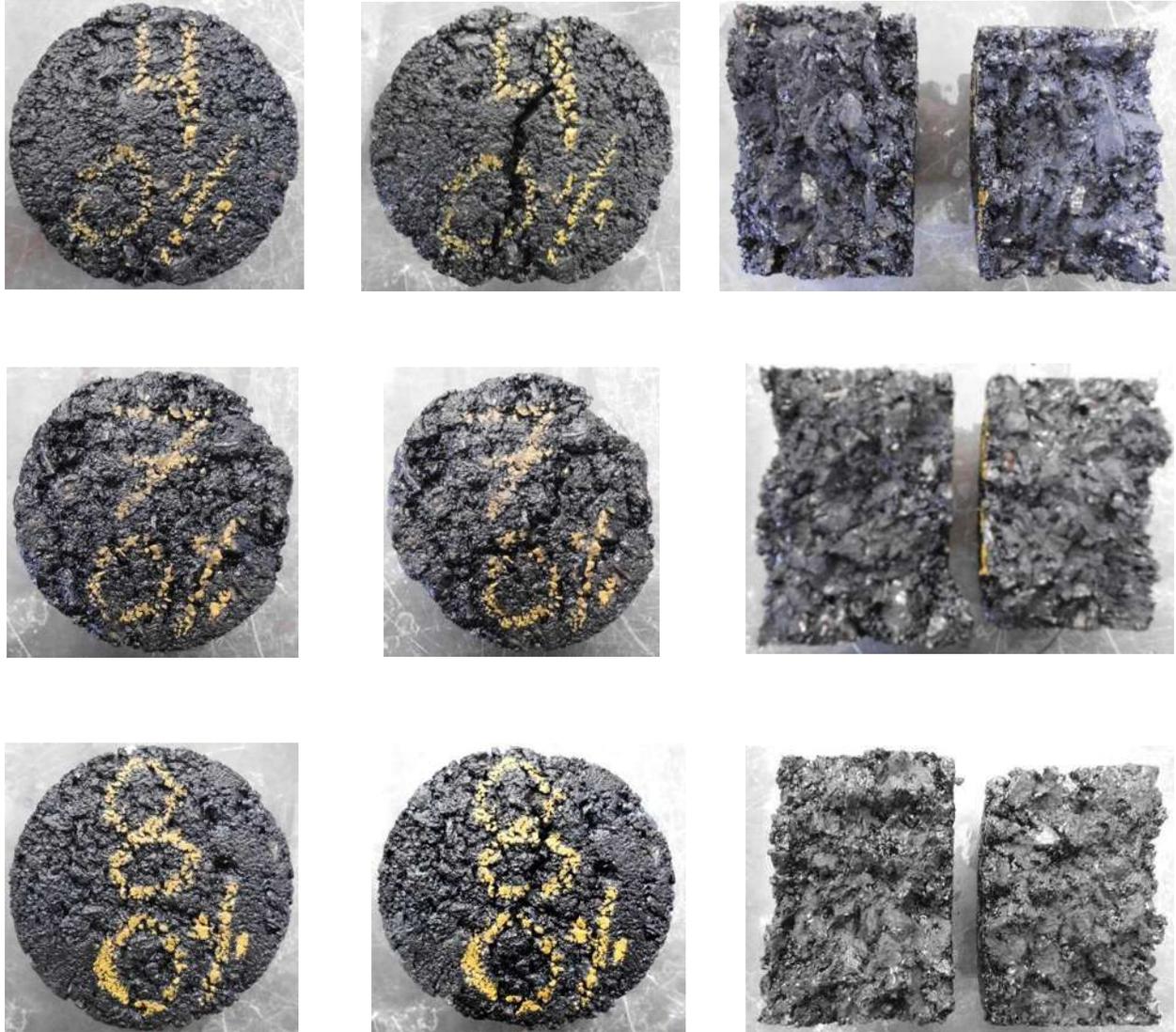


Figura XXXVI.- Especímenes acondicionados para TSR, 0% de hule, método A.

Mezcla con el 1% de hule. Método A.

NORMATIVA: AASHTO T-283-07								
CONDICIÓN DE ESPÉCIMEN			SECO			SATURADO		
IDENTIFICACIÓN DE ESPÉCIMEN			2	3	4	5	6	7
GEOMETRÍA	No. DE GIROS	#	48	64	78	66	72	45
	DIÁMETRO, mm	D	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	ALTURA, mm	t	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
ASTM D 2726	MASA DEL ESPÉCIMEN EN AIRE, g	A	1099.8	1102.1	1102.0	1101.2	1103.1	1100.7
	MASA DEL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B	1111.0	1110.2	1111.5	1108.4	1114.3	1111.2
	MASA DEL ESPÉCIMEN SUMERGIDO EN AGUA, g	C	642.9	642.4	644.3	643.6	643.9	641.8
	VOLUMEN DEL ESPÉCIMEN (B - C), cm ³	E	468.1	467.8	467.2	464.8	470.4	469.4
	GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA, (A / E)	Gmb	2.349	2.356	2.359	2.369	2.345	2.345
ASTM D2041	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA	Gmm	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535
PRE-ACONDICIONAMIENTO	VACÍOS [100 (Gmm - Gmb) / Gmm], %	Va,%	7.3	7.1	6.9	6.5	7.5	7.5
	VACÍOS EN VOLUMEN, cm ³	Va', cm ³	34.3	33.0	32.4	30.4	35.3	35.2
	MASA EL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B'	-	-	-	1124.8	1129.4	1127.6
	VOLUMEN DE AGUA ABSORBIDA (B' - A), cm ³	J'	-	-	-	23.6	26.3	26.9
	GRADO DE SATURACIÓN (100 J' / Va'), %	S'	-	-	-	77.5	74.6	76.5
	CARGA EN LIBRAS		1999.0	1989.0	1980.0	1685.0	1662.0	1431.0
ENSAYE	CARGA, N	P	8903.0	8858.5	8818.4	7504.6	7402.1	6373.3
	ESFUERZO, (2000 * P / π t D), kPa.	S1, S2	892.6	888.1	884.1	752.4	742.1	639.0
	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (CALIFICACIÓN DEL 0 AL 5)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SE AGRIETO Ó ROMPIÓ EL AGREGADO		no	no	no	no	no	no
	ESFUERZO PROMEDIO, kPa		888.3			711.1		
	TSR (S2 / S1) * 100, %		80.1					

Tabla XXXIV.- Cálculos para TSR, 1% de hule, método A.

En este ensayo la resistencia al daño inducido por humedad TSR, expresada en % cumple con el procedimiento de la recomendación AMAAC RA 04/2010.

Se obtuvo 80.1% > 80%, por tanto cumple con el protocolo AMAAC.

Mezcla con el 1% de hule, especímenes secos o no acondicionados. Método A.

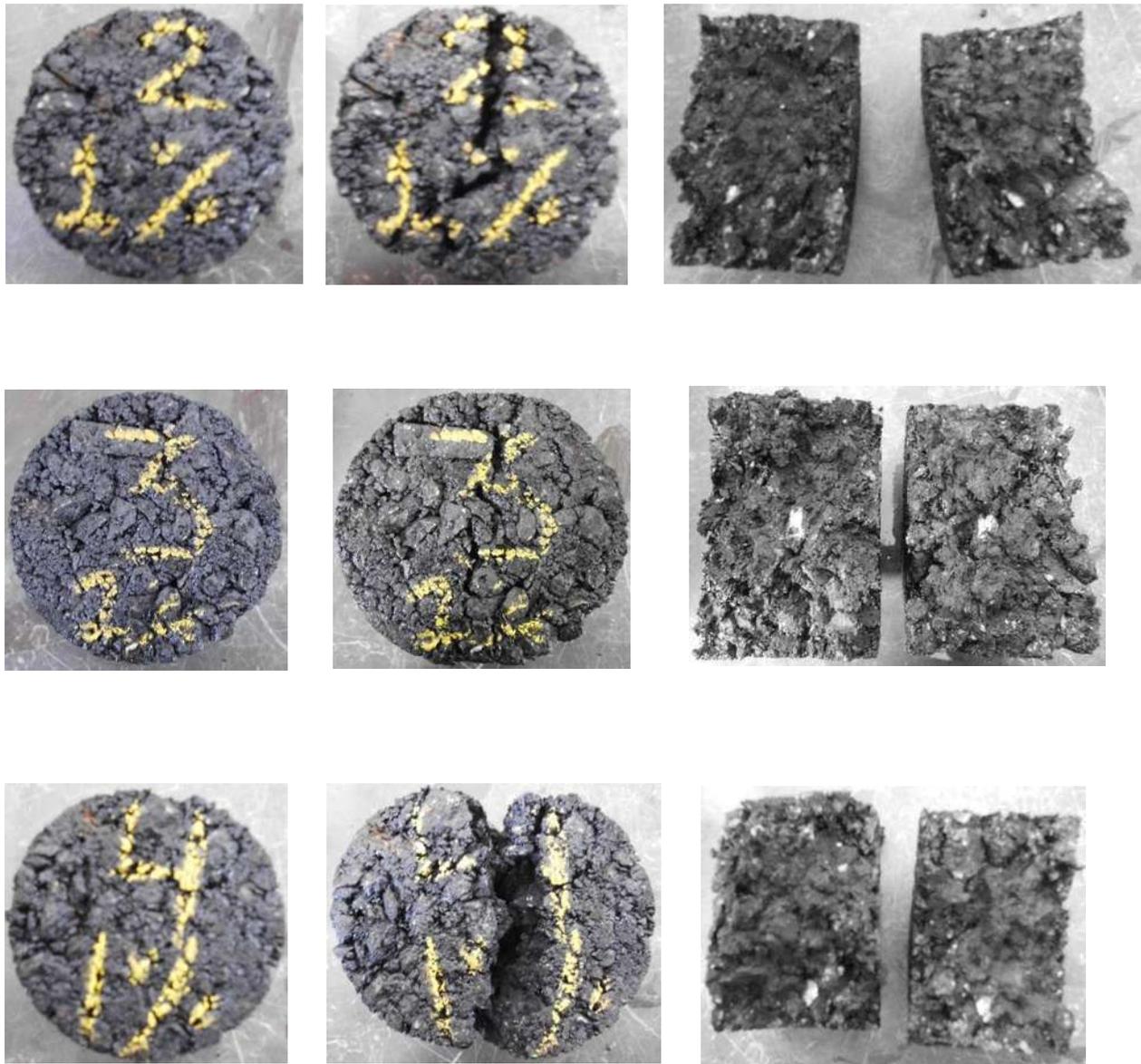


Figura XXXVII.- Especímenes no acondicionados para TSR, 1% de hule, método A.

Mezcla con el 1% de hule, especímenes saturados o acondicionados. Método A.

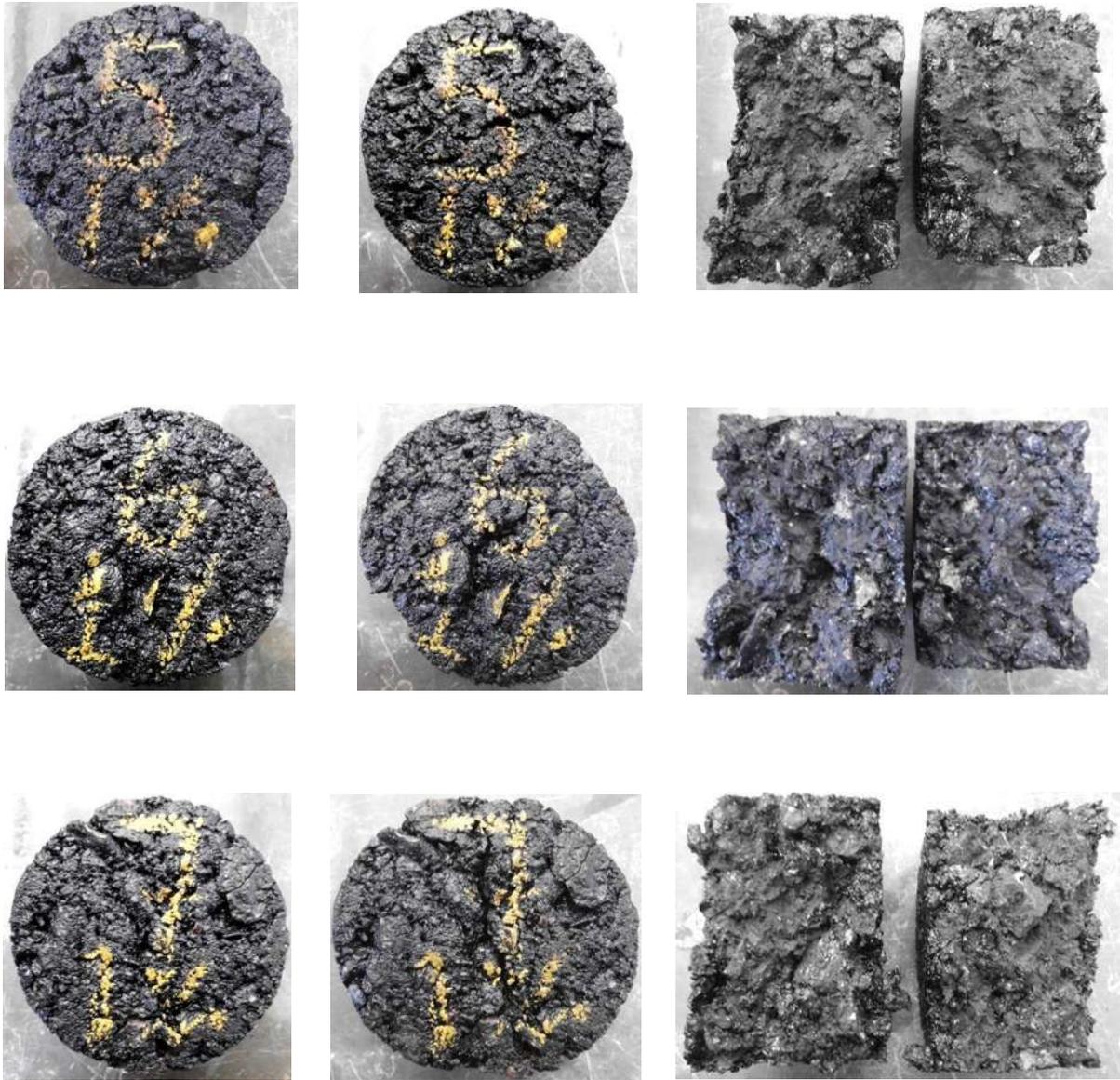


Figura XXXVIII.- Especímenes acondicionados para TSR, 1% de hule, método A.

Mezcla con el 2% de hule. Método A.

NORMATIVA: AASHTO T-283-07			SECO				SATURADO			
CONDICIÓN DE ESPÉCIMEN			SECO				SATURADO			
IDENTIFICACIÓN DE ESPÉCIMEN			1	2	3	4	5	6	7	8
GEOMETRÍA	No. DE GIROS	#	28	31	27	25	30	24	26	29
	DIÁMETRO, mm	D	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	ALTURA, mm	t	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
ASTM D 2726	MASA DEL ESPÉCIMEN EN AIRE, g	A	1104.6	1103.5	1103.2	1103.7	1104.0	1103.1	1104.9	1104.3
	MASA DEL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B	1118.4	1115.4	1116.7	1118.8	1117.5	1116.3	1120.1	1118.3
	MASA DEL ESPÉCIMEN SUMERGIDO EN AGUA, g	C	637.9	637.8	634.6	639.6	640.8	636.5	638.9	634.6
	VOLUMEN DEL ESPÉCIMEN (B - C), cm ³	E	480.5	477.6	482.1	479.2	476.7	479.8	481.2	483.7
	GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA, (A / E)	Gmb	2.299	2.311	2.288	2.302	2.316	2.299	2.296	2.283
ASTM D2041	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA	Gmm	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535
PRE-ACONDICIONAMIENTO	VACÍOS [100 (Gmm - Gmb) / Gmm], %	Va,%	9.3	8.8	9.7	9.2	8.6	9.3	9.4	9.9
	VACÍOS EN VOLUMEN, cm ³	Va', cm ³	44.7	42.2	47.0	44.0	41.2	44.7	45.4	48.1
	MASA EL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B'	-	-	-	-	1133.1	1137.7	1137.5	1141.9
	VOLUMEN DE AGUA ABSORBIDA (B' - A), cm ³	J'	-	-	-	-	29.1	34.6	32.6	37.6
	GRADO DE SATURACIÓN (100 J' / Va'), %	S'	-	-	-	-	70.7	77.5	71.9	78.2
	CARGA EN LIBRAS		2146.0	1735.0	1418.0	1801.0	2360.0	1369.0	1147.0	1435.0
ENSAYE	CARGA, N	P	9557.7	7727.2	6315.4	8021.2	10510.8	6097.2	5108.4	6391.1
	ESFUERZO, (2000 * P / π t D), kPa.	S1, S2	958.2	774.7	633.1	804.2	1053.8	611.3	512.1	640.7
	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (CALIFICACIÓN DEL 0 AL 5)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
	SE AGRIETO Ó ROMPIÓ EL AGREGADO		no	no	no	no	no	no	no	no
	ESFUERZO PROMEDIO, kPa		792.6				704.5			
	TSR (S2 / S1) * 100, %		88.9							

Tabla XXXV.- Cálculos para TSR, 2% de hule, método A.

En este ensayo la resistencia al daño inducido por humedad TSR, expresada en % cumple con el procedimiento de la recomendación AMAAC RA 04/2010.

Se obtuvo 88.9% > 80%, por tanto cumple con el protocolo AMAAC.

Mezcla con el 2% de hule, especímenes secos o no acondicionados. Método A.

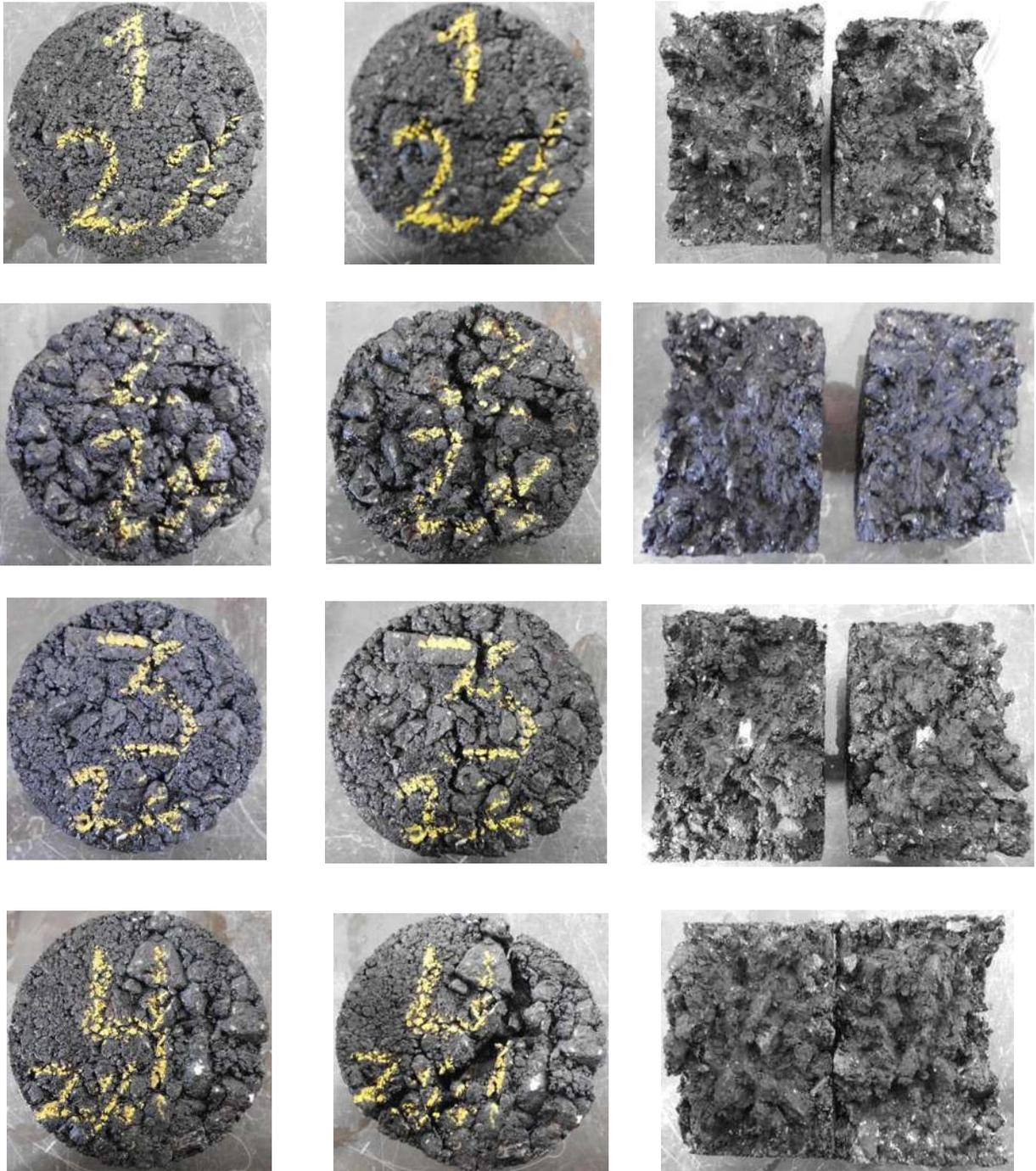


Figura XXXIX.- Especímenes no acondicionados para TSR, 2% de hule, método A.

Mezcla con el 2% de hule, especímenes saturados o acondicionados. Método A.

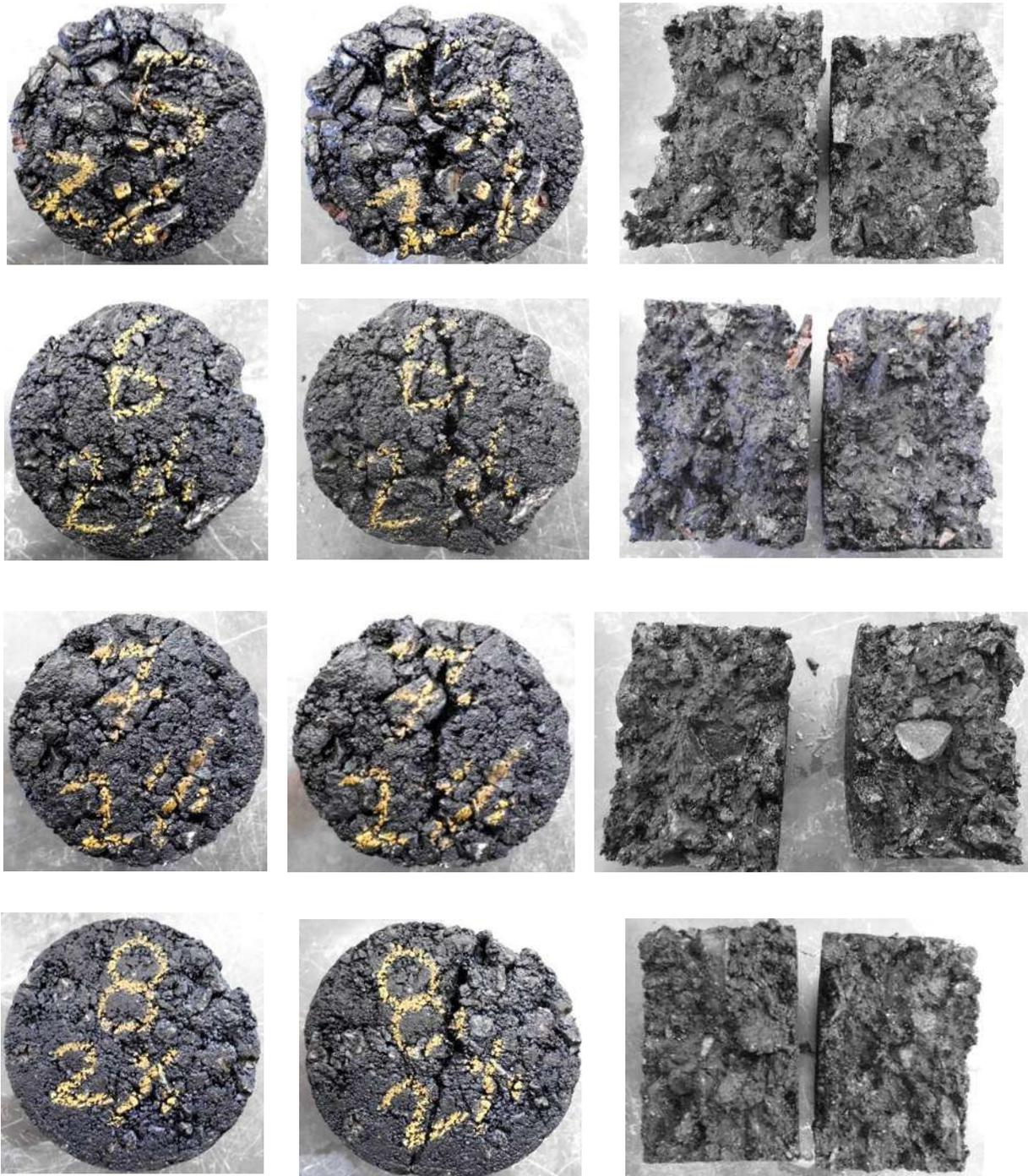


Figura XL.- Especímenes acondicionados para TSR, 2% de hule, método A.

Mezcla con el 1% de hule. Método B.

NORMATIVA: AASHTO T-283-07										
CONDICIÓN DE ESPÉCIMEN			SECO				SATURADO			
IDENTIFICACIÓN DE ESPÉCIMEN			1	5	7	8	2	3	4	6
GEOMETRÍA	No. DE GIROS	#	78	60	93	52	94	122	77	92
	DIÁMETRO, mm	D	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	ALTURA, mm	t	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
ASTM D 2726	MASA DEL ESPÉCIMEN EN AIRE, g	A	1102.1	1102.8	1102.9	1102.8	1099.0	1103.0	1102.6	1102.3
	MASA DEL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B	1112.3	1115.3	1113.5	1112.4	1108.7	1113.9	1112.5	1113.2
	MASA DEL ESPÉCIMEN SUMERGIDO EN AGUA, g	C	647.0	645.4	646.2	644.0	644.4	648.4	644.4	643.7
	VOLUMEN DEL ESPÉCIMEN (B - C), cm ³	E	465.3	469.9	467.3	468.4	464.3	465.5	468.1	469.5
	GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA, (A / E)	Gmb	2.369	2.347	2.360	2.354	2.367	2.369	2.355	2.348
ASTM D2041	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA	Gmm	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535
PRE-ACONDICIONAMIENTO	VACÍOS [100 (Gmm - Gmb) / Gmm], %	Va,%	6.6	7.4	6.9	7.1	6.6	6.5	7.1	7.4
	VACÍOS EN VOLUMEN, cm ³	Va', cm ³	30.5	34.9	32.2	33.4	30.8	30.4	33.1	34.7
	MASA EL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B'	-	-	-	-	1122.2	1126.9	1126.4	1129.6
	VOLUMEN DE AGUA ABSORBIDA (B' - A), cm ³	J'	-	-	-	-	23.2	23.9	23.8	27.3
	GRADO DE SATURACIÓN (100 J' / Va), %	S'	-	-	-	-	75.4	78.6	71.8	78.7
	CARGA EN LIBRAS		2458.0	2231.0	2777.0	2323.0	2294.0	2233.0	1858.0	2508.0
ENSAYE	CARGA, N	P	10947.3	9936.3	12368.0	10346.0	10216.9	9945.2	8275.0	11170.0
	ESFUERZO, (2000 * P / π t D), kPa.	S1, S2	1097.5	996.2	1240.0	1037.2	1024.3	997.1	829.6	1119.8
	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (CALIFICACIÓN DEL 0 AL 5)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SE AGRIETO Ó ROMPIÓ EL AGREGADO		no	no	no	no	no	no	no	no
	ESFUERZO PROMEDIO, kPa		1092.7				992.7			
	TSR (S2 / S1) * 100, %		90.8							

Tabla XXXVI.- Cálculos para TSR, 1% de hule, método B.

En este ensayo la resistencia al daño inducido por humedad TSR, expresada en % cumple con el procedimiento de la recomendación AMAAC RA 04/2010.

Se obtuvo 90.8% > 80%, por tanto cumple con el protocolo AMAAC.

Mezcla con el 1% de hule, especímenes secos o no acondicionados. Método B.



Figura XLI.- Especímenes no acondicionados para TSR, 1% de hule, método B.

Mezcla con el 1% de hule, especímenes saturados o acondicionados. Método B.



Figura XLII.- Especímenes acondicionados para TSR, 1% de hule, método B.

Mezcla con el 2% de hule. Método B.

NORMATIVA: AASHTO T-283-07			SECO				SATURADO			
CONDICIÓN DE ESPÉCIMEN			SECO				SATURADO			
IDENTIFICACIÓN DE ESPÉCIMEN			1	2	3	4	5	6	7	8
GEOMETRÍA	No. DE GIROS	#	116	63	37	69	62	59	64	74
	DIÁMETRO, mm	D	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	ALTURA, mm	t	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
ASTM D 2726	MASA DEL ESPÉCIMEN EN AIRE, g	A	1102.7	1103.0	1102.6	1101.8	1103.3	1102.8	1103.2	1102.9
	MASA DEL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B	1113.9	1113.9	1113.0	1113.4	1113.2	1115.6	1112.9	1112.6
	MASA DEL ESPÉCIMEN SUMERGIDO EN AGUA, g	C	641.2	635.8	630.9	636.3	639.6	635.7	635.9	634.9
	VOLUMEN DEL ESPÉCIMEN (B - C), cm ³	E	472.7	478.1	482.1	477.1	473.6	479.9	477.0	477.7
	GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA, (A / E)	Gmb	2.333	2.307	2.287	2.309	2.330	2.298	2.313	2.309
ASTM D2041	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA	Gmm	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535
PRE-ACONDICIONAMIENTO	VACÍOS [100 (Gmm - Gmb) / Gmm], %	Va,%	8.0	9.0	9.8	8.9	8.1	9.3	8.8	8.9
	VACÍOS EN VOLUMEN, cm ³	Va', cm ³	37.7	43.0	47.1	42.5	38.4	44.9	41.8	42.6
	MASA EL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B'	-	-	-	-	1132.1	1135.2	1135.5	1136.0
	VOLUMEN DE AGUA ABSORBIDA (B' - A), cm ³	J'	-	-	-	-	28.8	32.4	32.3	33.1
	GRADO DE SATURACIÓN (100 J' / Va'), %	S'	-	-	-	-	75.1	72.2	77.2	77.6
	CARGA EN LIBRAS		2266.0	1922.0	1545.0	1810.0	2079.0	1633.0	1823.0	1745.0
ENSAYE	CARGA, N	P	10092.2	8560.1	6881.0	8061.3	9259.3	7273.0	8119.2	7771.8
	ESFUERZO, (2000 * P / π t D), kPa.	S1, S2	1011.8	858.2	689.9	808.2	928.3	729.1	814.0	779.2
	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (CALIFICACIÓN DEL 0 AL 5)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SE AGRIETO Ó ROMPIÓ EL AGREGADO		no	no	no	no	no	no	no	no
	ESFUERZO PROMEDIO, kPa		842.0				812.6			
	TSR (S2 / S1) * 100, %		96.5							

Tabla XXXVII.- Cálculos para TSR, 2% de hule, método B.

En este ensayo la resistencia al daño inducido por humedad TSR, expresada en % cumple con el procedimiento de la recomendación AMAAC RA 04/2010.

Se obtuvo 96.5%>80%, por tanto cumple con el protocolo AMAAC.

Mezcla con el 2% de hule, especímenes secos o no acondicionados. Método B.

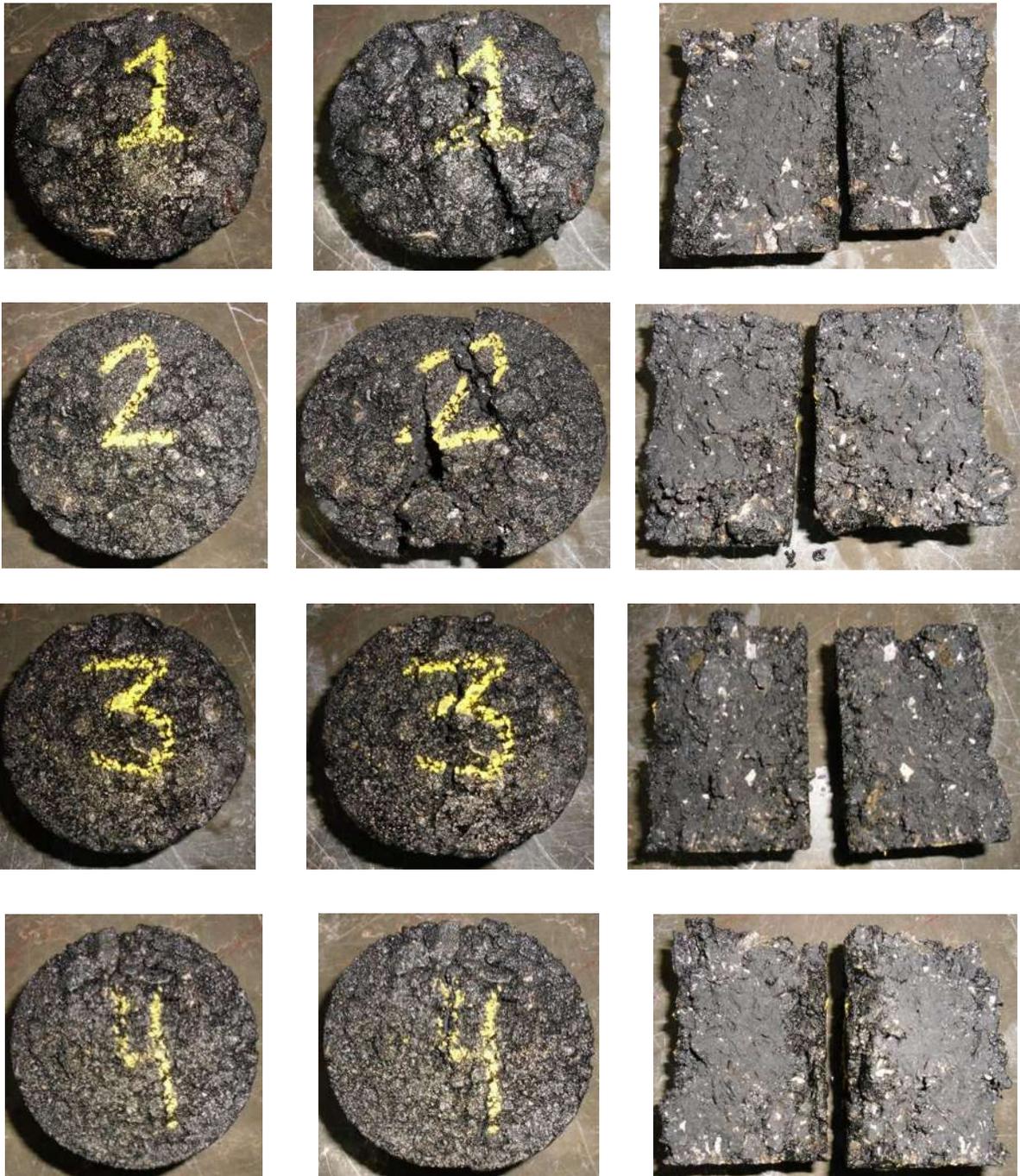


Figura XLIII.- Especímenes no acondicionados para TSR, 2% de hule, método B.

Mezcla con el 2% de hule, pastillas saturadas o acondicionadas. Método B.



Figura XLIV.- Especímenes acondicionados para TSR, 2% de hule, método B.

Posteriormente se realizaron 2 repeticiones más con el método B con el 1% y 2% de hule de llanta, sin embargo en ninguno de los casos se presentó agrietamiento o rompimiento del agregado por lo que solo se mostraran las tablas de resultados de cada uno omitiendo las fotografías.

Mezcla con el 1% de hule. Método B.

NORMATIVA: AASHTO T-283-07			SECO				SATURADO			
CONDICIÓN DE ESPÉCIMEN			SECO				SATURADO			
IDENTIFICACIÓN DE ESPÉCIMEN			2	4	6	8	1	3	5	7
GEOMETRÍA	No. DE GIROS	#	116	63	37	69	62	59	64	74
	DIÁMETRO, mm	D	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	ALTURA, mm	t	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
ASTM D 2726	MASA DEL ESPÉCIMEN EN AIRE, g	A	1102.0	1103.5	1097.9	1102.5	1104.2	1102.1	1100.1	1103.5
	MASA DEL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B	1113.7	1116.7	1113.9	1113.8	1116.2	1116.3	1114.0	1114.2
	MASA DEL ESPÉCIMEN SUMERGIDO EN AGUA, g	C	643.7	643.2	637.1	649.3	643.7	640.0	645.1	645.6
	VOLUMEN DEL ESPÉCIMEN (B - C), cm ³	E	470.0	473.5	476.8	464.5	472.5	476.3	468.9	468.6
	GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA, (A / E)	Gmb	2.345	2.331	2.303	2.374	2.337	2.314	2.346	2.355
ASTM D2041	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA	Gmm	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535
PRE-ACONDICIONAMIENTO	VACÍOS [100 (Gmm - Gmb) / Gmm], %	Va,%	7.5	8.1	9.2	6.4	7.8	8.7	7.5	7.1
	VACÍOS EN VOLUMEN, cm ³	Va', cm ³	35.3	38.2	43.7	29.6	36.9	41.5	34.9	33.3
	MASA EL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B'	-	-	-	-	1131.8	1134.4	1125.3	1129.4
	VOLUMEN DE AGUA ABSORBIDA (B' - A), cm ³	J'	-	-	-	-	27.6	32.3	25.2	25.9
	GRADO DE SATURACIÓN (100 J' / Va'), %	S'	-	-	-	-	74.8	77.7	72.1	77.8
	CARGA EN LIBRAS		2372.0	2547.0	2307.0	2564.0	2178.0	2273.0	2265.0	2262.0
ENSAYE	CARGA, N	P	10564.3	11343.7	10274.8	11419.4	9700.2	10123.4	10087.7	10074.4
	ESFUERZO, (2000 * P / π t D), kPa.	S1, S2	1059.1	1137.3	1030.1	1144.8	972.5	1014.9	1011.3	1010.0
	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (CALIFICACIÓN DEL 0 AL 5)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SE AGRIETO Ó ROMPIÓ EL AGREGADO		no	no	no	no	no	no	no	no
	ESFUERZO PROMEDIO, kPa		1092.8				1002.2			
	TSR (S2 / S1) * 100, %		91.7							

Tabla XXXVIII.- Cálculos para TSR, 1% de hule, método B.

Se obtuvo 91.7% > 80%, por tanto cumple con el protocolo AMAAC.

Mezcla con el 2% de hule. Método B.

NORMATIVA: AASHTO T-283-07										
CONDICIÓN DE ESPÉCIMEN			SECO				SATURADO			
IDENTIFICACIÓN DE ESPÉCIMEN			1	2	3	4	5	6	7	8
GEOMETRÍA	No. DE GIROS	#								
	DIÁMETRO, mm	D	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	ALTURA, mm	t	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
ASTM D 2726	MASA DEL ESPÉCIMEN EN AIRE, g	A	1096.6	1103.1	1083.2	1100.8	1099.6	1102.9	1103.1	1100.1
	MASA DEL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B	1104.1	1116.2	1095.0	1114.5	1113.1	1115.3	1114.3	1113.3
	MASA DEL ESPÉCIMEN SUMERGIDO EN AGUA, g	C	627.0	641.6	600.4	639.0	639.3	639.0	636.6	646.0
	VOLUMEN DEL ESPÉCIMEN (B - C), cm ³	E	477.1	474.6	494.6	475.5	473.8	476.3	477.7	467.3
	GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA, (A / E)	Gmb	2.298	2.324	2.190	2.315	2.321	2.316	2.309	2.354
ASTM D2041	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA	Gmm	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535
PRE-ACONDICIONAMIENTO	VACÍOS [100 (Gmm - Gmb) / Gmm], %	Va,%	9.3	8.3	13.6	8.7	8.4	8.7	8.9	7.1
	VACÍOS EN VOLUMEN, cm ³	Va', cm ³	44.5	39.5	67.3	41.3	40.0	41.2	42.6	33.3
	MASA EL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B'	-	-	-	-	1129.0	1135.6	1134.9	1135.9
	VOLUMEN DE AGUA ABSORBIDA (B' - A), cm ³	J'	-	-	-	-	29.4	32.7	31.8	35.8
	GRADO DE SATURACIÓN (100 J' / Va'), %	S'	-	-	-	-	73.4	79.3	74.7	107.4
	CARGA EN LIBRAS		2367.0	2229.0	2349.3	2452.0	1788.0	1355.0	1777.0	1640.0
ENSAYE	CARGA, N	P	10542.0	9927.4	10463.2	10920.6	7963.3	6034.8	7914.3	7304.1
	ESFUERZO, (2000 * P / π t D), kPa.	S1, S2	1056.9	995.3	1049.0	1094.8	798.4	605.0	793.4	732.3
	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (CALIFICACIÓN DEL 0 AL 5)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SE AGRIETO Ó ROMPIÓ EL AGREGADO		no	no	no	no	no	no	no	no
	ESFUERZO PROMEDIO, kPa		1049.0				732.3			
	TSR (S2 / S1) * 100, %		69.8							

Tabla XXXIX.- Cálculos para TSR, 2% de hule, método B.

En este ensayo la resistencia al daño inducido por humedad TSR, expresada en % cumple solo parcialmente con el procedimiento de la recomendación AMAAC RA 04/2010, ya que una pastilla se elevó demasiado con él %Va.

Se obtuvo 69.8% < 80%, por tanto no cumple con el protocolo AMAAC.

Mezcla con el 1% de hule. Método B.

NORMATIVA: AASHTO T-283-07										
CONDICIÓN DE ESPÉCIMEN			SECO				SATURADO			
IDENTIFICACIÓN DE ESPÉCIMEN			1	3	6	7	2	4	5	8
GEOMETRÍA	No. DE GIROS	#								
	DIÁMETRO, mm	D	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	ALTURA, mm	t	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
ASTM D 2726	MASA DEL ESPÉCIMEN EN AIRE, g	A	1103.3	1102.6	1103.0	1104.2	1103.4	1104.4	1104.3	1103.8
	MASA DEL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B	1111.9	1112.3	1113.8	1116.7	1114.2	1114.3	1115.8	1113.8
	MASA DEL ESPÉCIMEN SUMERGIDO EN AGUA, g	C	640.5	644.8	646.8	647.9	643.3	647.9	645.4	644.1
	VOLUMEN DEL ESPÉCIMEN (B - C), cm ³	E	471.4	467.5	467.0	468.8	470.9	466.4	470.4	469.7
	GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA, (A / E)	Gmb	2.340	2.359	2.362	2.355	2.343	2.368	2.348	2.350
ASTM D2041	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA	Gmm	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535
PRE-ACONDICIONAMIENTO	VACÍOS [100 (Gmm - Gmb) / Gmm], %	Va,%	7.7	7.0	6.8	7.1	7.6	6.6	7.4	7.3
	VACÍOS EN VOLUMEN, cm ³	Va', cm ³	36.2	32.5	31.9	33.2	35.6	30.7	34.8	34.3
	MASA EL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B'	-	-	-	-	1128.6	1127.2	1131.5	1129.5
	VOLUMEN DE AGUA ABSORBIDA (B' - A), cm ³	J'	-	-	-	-	25.2	22.8	27.2	25.7
	GRADO DE SATURACIÓN (100 J' / Va'), %	S'	-	-	-	-	70.7	74.2	78.2	75.0
	CARGA EN LIBRAS		2687.0	2494.0	2664.0	2408.0	2076.0	2442.0	2052.0	2137.0
ENSAYE	CARGA, N	P	11967.2	11107.6	11864.8	10724.6	9246.0	10876.0	9139.1	9517.6
	ESFUERZO, (2000 * P / π t D), kPa.	S1, S2	1199.8	1113.6	1189.5	1075.2	927.0	1090.4	916.2	954.2
	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (CALIFICACIÓN DEL 0 AL 5)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SE AGRIETO Ó ROMPIÓ EL AGREGADO		no	no	no	no	no	no	no	no
	ESFUERZO PROMEDIO, kPa		1144.5				971.9			
	TSR (S2 / S1) * 100, %		84.9							

Tabla XL.- Cálculos para TSR, 1% de hule, método B.

En este ensayo la resistencia al daño inducido por humedad TSR, expresada en % cumple con el procedimiento de la recomendación AMAAC RA 04/2010.

Se obtuvo 84.9% > 80%, por tanto cumple con el protocolo AMAAC.

Mezcla con el 2% de hule. Método B.

NORMATIVA: AASHTO T-283-07										
CONDICIÓN DE ESPÉCIMEN			SECO				SATURADO			
IDENTIFICACIÓN DE ESPÉCIMEN			3	4	5	6	1	2	7	8
GEOMETRÍA	No. DE GIROS	#								
	DIÁMETRO, mm	D	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	ALTURA, mm	t	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
ASTM D 2726	MASA DEL ESPÉCIMEN EN AIRE, g	A	1100.3	1100.8	1100.2	1099.8	1101.4	1101.7	1100.1	1100.2
	MASA DEL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B	1112.7	1113.4	1113.6	1112.8	1114.7	1114.2	1112.1	1112.3
	MASA DEL ESPÉCIMEN SUMERGIDO EN AGUA, g	C	639.3	640.3	645.2	637.6	641.2	635.9	643.9	641.9
	VOLUMEN DEL ESPÉCIMEN (B - C), cm ³	E	473.4	473.1	468.4	475.2	473.5	478.3	468.2	470.4
	GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA, (A / E)	Gmb	2.324	2.327	2.349	2.314	2.326	2.303	2.350	2.339
ASTM D2041	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA	Gmm	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535	2.535
PRE-ACONDICIONAMIENTO	VACÍOS [100 (Gmm - Gmb) / Gmm], %	Va,%	8.3	8.2	7.3	8.7	8.2	9.1	7.3	7.7
	VACÍOS EN VOLUMEN, cm ³	Va', cm ³	39.4	38.9	34.4	41.4	39.0	43.7	34.2	36.4
	MASA EL ESPÉCIMEN EN CONDICIÓN SSS, g	B'	-	-	-	-	1132.5	1134.2	1125.0	1127.9
	VOLUMEN DE AGUA ABSORBIDA (B' - A), cm ³	J'	-	-	-	-	31.1	32.5	24.9	27.7
	GRADO DE SATURACIÓN (100 J' / Va), %	S'	-	-	-	-	79.7	74.4	72.7	76.1
	CARGA EN LIBRAS		2343.0	2569.0	2429.0	2002.0	1882.0	1917.0	2097.0	2171.0
ENSAYE	CARGA, N	P	10435.1	11441.7	10818.1	8916.4	8381.9	8537.8	9339.5	9669.1
	ESFUERZO, (2000 * P / π t D), kPa.	S1, S2	1046.2	1147.1	1084.6	893.9	840.3	856.0	936.3	969.4
	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (CALIFICACIÓN DEL 0 AL 5)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SE AGRIETO Ó ROMPIÓ EL AGREGADO		no	no	no	no	no	no	no	no
	ESFUERZO PROMEDIO, kPa		1042.9				900.5			
	TSR (S2 / S1) * 100, %		86.3							

Tabla XLI.- Cálculos para TSR, 2% de hule, método B.

En este ensayo la resistencia al daño inducido por humedad TSR, expresada en % cumple con el procedimiento de la recomendación AMAAC RA 04/2010.

Se obtuvo 86.3% > 80%, por tanto cumple con el protocolo AMAAC.

En síntesis los resultados obtenidos para el TSR son satisfactorios, sin embargo en la mayoría de los casos el % de vacíos es superior al 7% que marca la recomendación AMAAC, por tanto se intuye se aun con un porcentaje de vacíos mayor el resultado final puede estar dentro de los parámetros aceptables por AMAAC.

# De repeticiones	Contenido de hule/método de incorporación	TSR (%)
1	0%	83
	1% Método A	80
	2% Método. A	89
2	1% Método. B	91
	2% Método. B	97
3	1% Método. B	92
	2% Método. B	70
4	1% Método. B	85
	2% Método. B	86

Tabla XLII.- Resumen de resultados TSR.

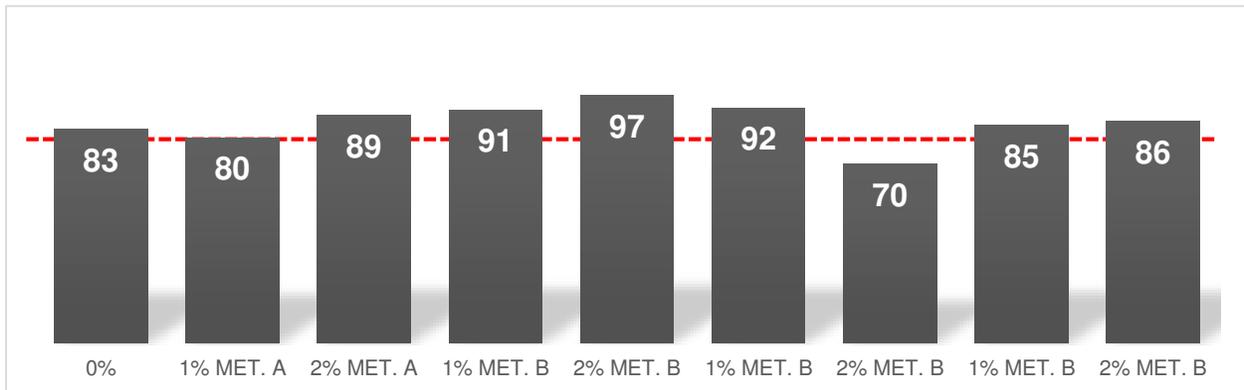


Figura XLV.- Resultados obtenidos TSR.

5.7 RUEDA CARGADA DE HAMBURGO

Mezcla con el 0% de hule. Método A.

Gmm= 2.535

Fecha de elaboración de Espécimen	Cont. de hule / No. de Espécimen	No. de giros	Altura Promedio (mm)	Diámetro Promedio (mm)	C. A. (%)	(A) Peso al aire (g)	(C) Peso sumergido (g)	(B) peso SSS (g)	Absorción (%) $\frac{(B-A)}{(B-C)} \cdot 100$	Gmb A/(B-C)	% Va
14-08-14	0%, #1	52	95.00	150.00	5.5	3816.1	2219.5	3832.2	0.998	2.366	6.7
14-08-14	0%, #2	66	95.00	150.00	5.5	3814.8	2226.6	3837.9	1.434	2.368	6.6
14-08-14	0%, #3	58	95.00	150.00	5.5	3815.7	2225.4	3835.6	1.236	2.370	6.5
14-08-14	0%, #4	58	95.00	150.00	5.5	3817.1	2226.5	3836.8	1.223	2.370	6.5

Tabla XLIII.- Volumetría de especímenes de Hamburgo, 0% de hule, método A.

Colocación	Espécimen	Temp. °C	Última pasada del Ensayo.	Deformación en la última pasada. (mm)
Lado Izquierdo	0%, #1	50	20000	1.611
Lado Izquierdo	0%, #2	50		
Lado Derecho	0%, #3	50	20000	3.521
Lado Derecho	0%, #4	50		

Tabla XLIV.- Deformación en especímenes en Hamburgo, 0% de hule, método A.

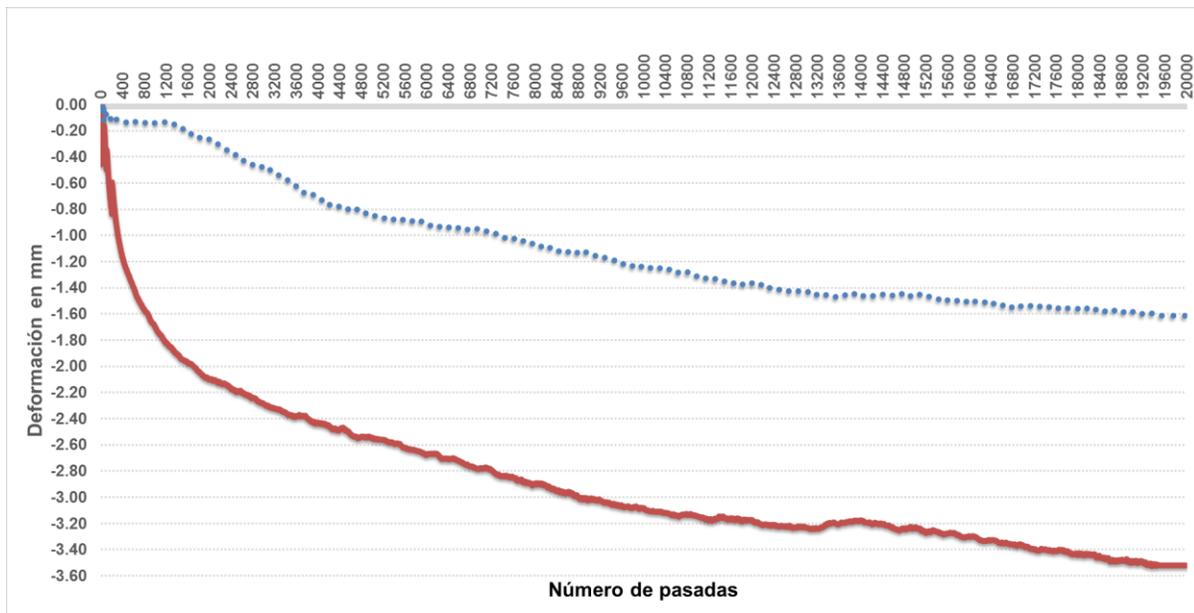


Figura XLVI.- Deformación en Hamburgo con 0% de hule, método A.

No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)
0	0.000	0.000	5200	-0.865	-2.562	10400	-1.254	-3.120	15600	-1.492	-3.276
400	-0.127	-1.168	5600	-0.882	-2.621	10800	-1.281	-3.134	16000	-1.496	-3.301
800	-0.139	-1.567	6000	-0.913	-2.676	11200	-1.333	-3.170	16400	-1.513	-3.330
1200	-0.133	-1.816	6400	-0.935	-2.711	11600	-1.358	-3.170	16800	-1.546	-3.362
1600	-0.206	-1.971	6800	-0.952	-2.764	12000	-1.362	-3.176	17200	-1.536	-3.399
2000	-0.267	-2.096	7200	-0.977	-2.794	12400	-1.402	-3.216	17600	-1.549	-3.412
2400	-0.365	-2.169	7600	-1.021	-2.852	12800	-1.426	-3.230	18000	-1.558	-3.442
2800	-0.458	-2.242	8000	-1.067	-2.894	13200	-1.452	-3.239	18400	-1.571	-3.449
3200	-0.516	-2.321	8400	-1.111	-2.949	13600	-1.462	-3.207	18800	-1.587	-3.487
3600	-0.624	-2.379	8800	-1.131	-3.001	14000	-1.446	-3.176	19200	-1.596	-3.490
4000	-0.707	-2.434	9200	-1.157	-3.029	14400	-1.449	-3.208	19600	-1.611	-3.521
4400	-0.778	-2.477	9600	-1.213	-3.065	14800	-1.446	-3.237	20000	-1.611	-3.521
4800	-0.807	-2.541	10000	-1.239	-3.085	15200	-1.460	-3.273			

Tabla XLV.- Deformaciones en mm @400 pasadas con 0% de hule, método A.



Figura XLVII.- Especímenes de Hamburgo deformados, con 0% de hule, método A.

En este ensayo la susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera se hizo con el analizador de rueda cargada de Hamburgo (HWT), de acuerdo al procedimiento marcado en la recomendación AMAAC RA 01/2011.

Por tanto cumple sin problema con el protocolo AMAAC al tener una deformación en promedio de 2.566mm, lo cual es menor a 10mm para un nivel de tránsito muy alto a las 20 000 pasadas que marca el protocolo.

Mezcla con el 1% de hule. Método A.

Gmm= 2.535

Fecha de elaboración de Espécimen	Cont. de hule / No. de Espécimen	No. de giros	Altura Promedio (mm)	Diámetro Promedio (mm)	C. A. (%)	(A) Peso al aire (g)	(C) Peso sumergido (g)	(B) peso SSS (g)	Absorción (%) $((B-A)/(B-C))*100$	Gmb A/(B-C)	% Va
14-08-14	1%, #1	47	95.00	150.00	5.5	3816.4	2223.5	3834.9	1.148	2.368	6.6
14-08-14	1%, #2	48	95.00	150.00	5.5	3815.2	2227.1	3838.7	1.458	2.367	6.6
14-08-14	1%, #3	47	95.00	150.00	5.5	3816.9	2225.3	3840.5	1.461	2.363	6.8
14-08-14	1%, #4	46	95.00	150.00	5.5	3817.3	2223.8	3839.3	1.362	2.363	6.8

Tabla XLVI.- Volumetría de especímenes de Hamburgo, 1% de hule, método A.

Colocación	Espécimen	Temp. °C	Última pasada del Ensayo.	Deformación en la última pasada. (mm)
Lado Izquierdo	1%, #3	50	20000	1.928
Lado Izquierdo	1%, #4	50		
Lado Derecho	1%, #1	50	20000	3.862
Lado Derecho	1%, #2	50		

Tabla XLVII.- Deformación en especímenes en Hamburgo, 1% de hule, método A.

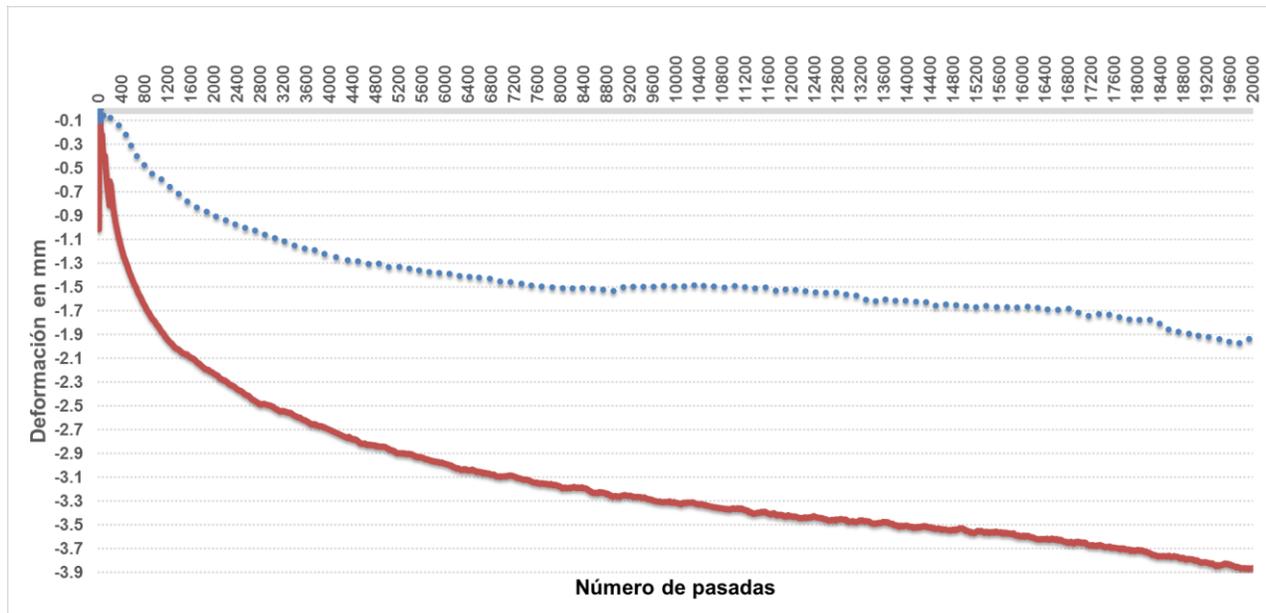


Figura XLVIII.- Deformación en Hamburgo con 0% de hule, método A.

No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)
0	0.000	0.000	5200	-1.332	-2.897	10400	-1.478	-3.325	15600	-1.672	-3.562
400	-0.158	-1.156	5600	-1.359	-2.930	10800	-1.501	-3.358	16000	-1.667	-3.595
800	-0.468	-1.644	6000	-1.375	-2.983	11200	-1.497	-3.376	16400	-1.685	-3.618
1200	-0.638	-1.933	6400	-1.414	-3.036	11600	-1.505	-3.401	16800	-1.681	-3.649
1600	-0.794	-2.091	6800	-1.430	-3.075	12000	-1.508	-3.425	17200	-1.740	-3.671
2000	-0.890	-2.222	7200	-1.459	-3.089	12400	-1.536	-3.424	17600	-1.741	-3.689
2400	-0.974	-2.352	7600	-1.493	-3.142	12800	-1.548	-3.456	18000	-1.771	-3.710
2800	-1.037	-2.485	8000	-1.507	-3.175	13200	-1.575	-3.462	18400	-1.811	-3.763
3200	-1.103	-2.540	8400	-1.504	-3.191	13600	-1.599	-3.474	18800	-1.877	-3.777
3600	-1.174	-2.621	8800	-1.523	-3.235	14000	-1.612	-3.504	19200	-1.917	-3.814
4000	-1.230	-2.695	9200	-1.491	-3.252	14400	-1.624	-3.520	19600	-1.958	-3.830
4400	-1.277	-2.776	9600	-1.493	-3.292	14800	-1.649	-3.537	20000	-1.928	-3.862
4800	-1.306	-2.829	10000	-1.491	-3.311	15200	-1.666	-3.559			

Tabla XLVIII.- Deformaciones en mm @400 pasadas con 0% de hule, método A.



Figura XLIX.- Especímenes de Hamburgo deformados, con 1% de hule, método A.

En este ensayo las susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera se hizo con el analizador de rueda cargada de Hamburgo (HWT), de acuerdo al procedimiento marcado en la recomendación AMAAC RA 01/2011.

Por tanto cumple sin problema con el protocolo AMAAC al tener una deformación en promedio de 2.895mm, lo cual es menor a 10mm para un nivel de transito muy alto a las 20 000 pasadas que marca el protocolo.

Mezcla con el 2% de hule. Método A.

Gmm= 2.535

Fecha de elaboración de Espécimen	Cont. de hule / No. de Espécimen	No. de giros	Altura Promedio (mm)	Diámetro Promedio (mm)	C. A. (%)	(A) Peso al aire (g)	(C) Peso sumergido (g)	(B) peso SSS (g)	Absorción (%) $\frac{(B-A)}{(B-C)} * 100$	Gmb A/(B-C)	% Va
18-08-14	2%, #1	64	95.00	150.00	5.5	3815.0	2225.8	3838.1	1.433	2.366	6.7
18-08-14	2%, #2	64	95.00	150.00	5.5	3815.4	2229.1	3843.8	1.759	2.363	6.8
18-08-14	2%, #3	44	95.00	150.00	5.5	3815.9	2230.6	3846.3	1.882	2.362	6.8
18-08-14	2%, #4	49	95.00	150.00	5.5	3815.7	2219.9	3839.4	1.463	2.356	7.1

Tabla XLIX.- Volumetría de especímenes de Hamburgo, 2% de hule, método A.

Colocación	Espécimen	Temp. °C	Última pasada del Ensayo.	Deformación en la última pasada. (mm)
Lado Izquierdo	2%, #1	50	20000	1.749
Lado Izquierdo	2%, #2	50		
Lado Derecho	2%, #3	50	20000	2.913
Lado Derecho	2%, #4	50		

Tabla L.- Deformación en especímenes en Hamburgo, 2% de hule, método A.

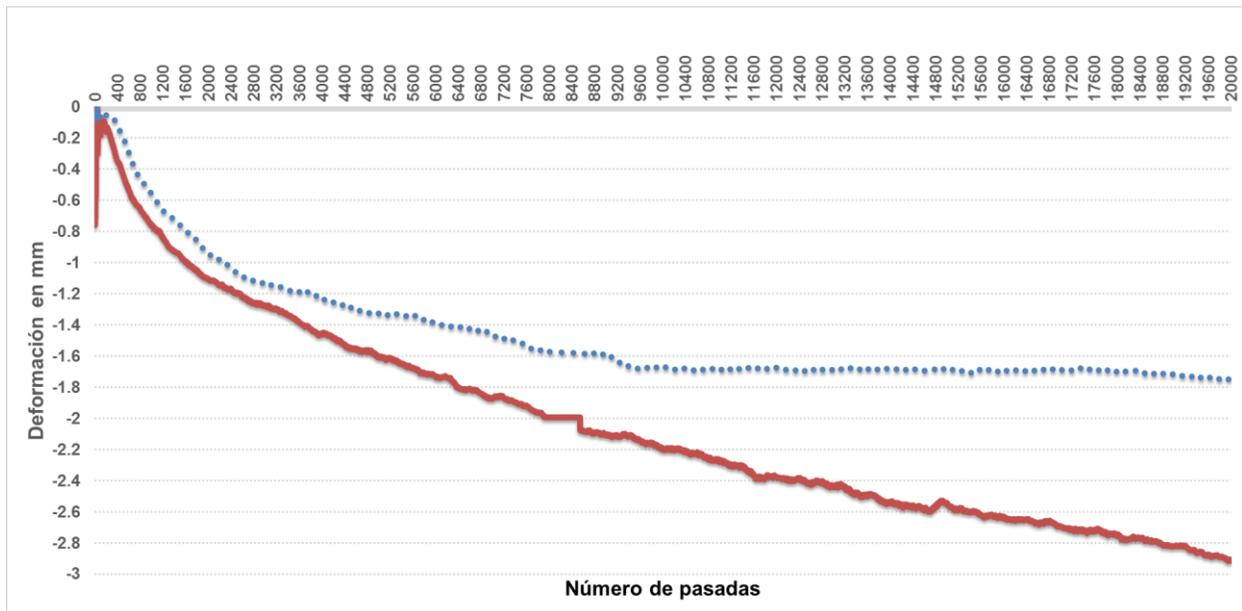


Figura L.- Deformación en Hamburgo con 2% de hule, método A.

No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)
0	0.000	0.000	5200	-1.343	-1.612	10400	-1.681	-2.206	15600	-1.686	-2.621
400	-0.116	-0.348	5600	-1.337	-1.678	10800	-1.687	-2.255	16000	-1.705	-2.633
800	-0.462	-0.656	6000	-1.389	-1.729	11200	-1.688	-2.299	16400	-1.695	-2.651
1200	-0.664	-0.840	6400	-1.412	-1.805	11600	-1.680	-2.364	16800	-1.690	-2.665
1600	-0.801	-0.991	6800	-1.436	-1.839	12000	-1.677	-2.376	17200	-1.695	-2.715
2000	-0.943	-1.107	7200	-1.489	-1.867	12400	-1.698	-2.389	17600	-1.689	-2.714
2400	-1.035	-1.172	7600	-1.530	-1.917	12800	-1.688	-2.411	18000	-1.702	-2.751
2800	-1.118	-1.262	8000	-1.574	-1.993	13200	-1.682	-2.444	18400	-1.709	-2.766
3200	-1.158	-1.302	8400	-1.581	-1.993	13600	-1.685	-2.499	18800	-1.718	-2.811
3600	-1.190	-1.383	8800	-1.583	-2.096	14000	-1.688	-2.539	19200	-1.732	-2.817
4000	-1.232	-1.453	9200	-1.632	-2.111	14400	-1.691	-2.560	19600	-1.739	-2.874
4400	-1.278	-1.532	9600	-1.679	-2.142	14800	-1.685	-2.567	20000	-1.749	-2.913
4800	-1.325	-1.562	10000	-1.674	-2.190	15200	-1.698	-2.589			

Tabla LI.- Deformaciones en mm @400 pasadas con 2% de hule, método A.



Figura LI.- Especímenes de Hamburgo deformados, con 2% de hule, método A.

En este ensayo la susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera se hizo con el analizador de rueda cargada de Hamburgo (HWT), de acuerdo al procedimiento marcado en la recomendación AMAAC RA 01/2011.

Por tanto cumple sin problema con el protocolo AMAAC al tener una deformación en promedio de 2.331mm, lo cual es menor a 10mm para un nivel de tránsito muy alto a las 20 000 pasadas que marca el protocolo.

Mezcla con el 1% de hule. Método B.

Gmm= 2.535

Fecha de elaboración de Espécimen	Cont. de hule / No. de Espécimen	No. de giros	Altura Promedio (mm)	Diámetro Promedio (mm)	C. A. (%)	(A) Peso al aire (g)	(C) Peso sumergido (g)	(B) peso SSS (g)	Absorción (%) $((B-A)/(B-C)) * 100$	Gmb A/(B-C)	% Va
26-08-14	1%, #1	59	95.00	150.00	5.5	3816.1	2225.6	3836.5	1.266	2.369	6.6
26-08-14	1%, #2	58	95.00	150.00	5.5	3816.1	2227.4	3836.9	1.292	2.371	6.5
26-08-14	1%, #3	59	95.00	150.00	5.5	3814.1	2219.0	3837.4	1.440	2.357	7.0
26-08-14	1%, #4	54	95.00	150.00	5.5	3811.0	2221.3	3838.0	1.670	2.357	7.0

Tabla LII.- Volumetría de especímenes de Hamburgo, 1% de hule, método B.

Colocación	Espécimen	Temp. °C	Última pasada del Ensayo.	Deformación en la última pasada. (mm)
Lado Izquierdo	1%, #3	50	20000	3.398
Lado Izquierdo	1%, #4	50		
Lado Derecho	1%, #1	50	20000	2.573
Lado Derecho	1%, #2	50		

Tabla LIII.- Deformación en especímenes en Hamburgo, 1% de hule, método B.

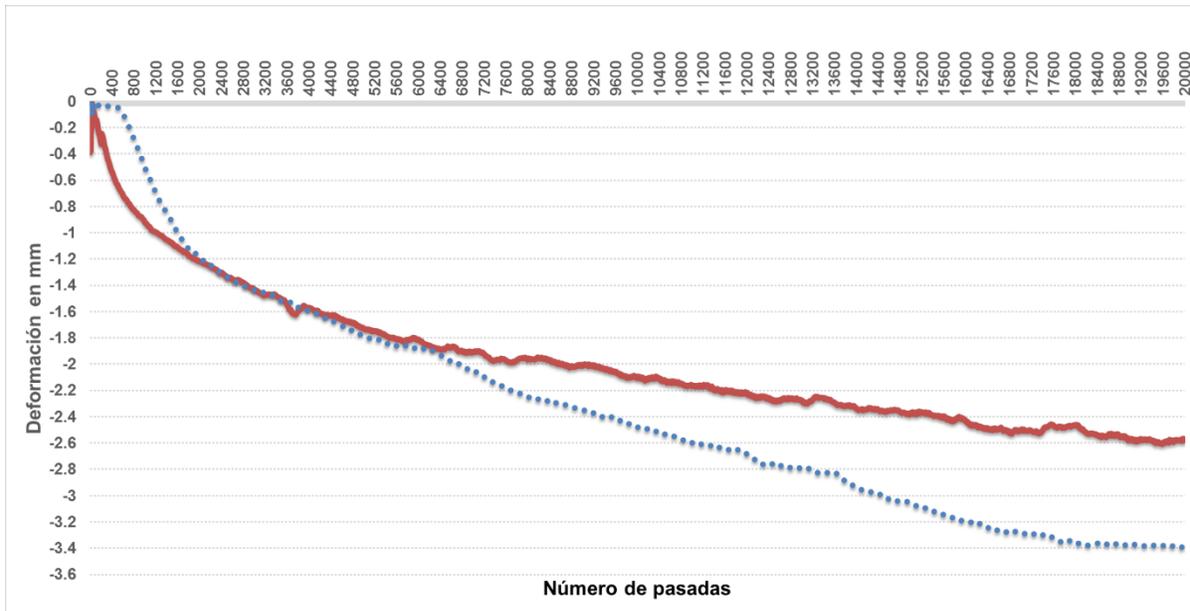


Figura LII.- Deformación en Hamburgo con 1% de hule, método B.

No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)
0	0.000	0.000	5200	-1.803	-1.745	10400	-2.519	-2.111	15600	-3.143	-2.395
400	-0.031	-0.533	5600	-1.859	-1.811	10800	-2.570	-2.145	16000	-3.188	-2.430
800	-0.284	-0.823	6000	-1.878	-1.809	11200	-2.607	-2.158	16400	-3.241	-2.483
1200	-0.691	-0.993	6400	-1.929	-1.884	11600	-2.645	-2.204	16800	-3.273	-2.514
1600	-0.990	-1.109	6800	-2.014	-1.898	12000	-2.683	-2.217	17200	-3.287	-2.502
2000	-1.185	-1.218	7200	-2.094	-1.921	12400	-2.758	-2.260	17600	-3.321	-2.460
2400	-1.311	-1.308	7600	-2.177	-1.970	12800	-2.788	-2.259	18000	-3.353	-2.465
2800	-1.399	-1.379	8000	-2.251	-1.965	13200	-2.809	-2.271	18400	-3.363	-2.540
3200	-1.457	-1.473	8400	-2.283	-1.968	13600	-2.829	-2.288	18800	-3.369	-2.544
3600	-1.523	-1.546	8800	-2.326	-2.011	14000	-2.941	-2.332	19200	-3.376	-2.567
4000	-1.591	-1.570	9200	-2.372	-2.014	14400	-2.990	-2.344	19600	-3.381	-2.595
4400	-1.665	-1.627	9600	-2.408	-2.059	14800	-3.041	-2.361	20000	-3.398	-2.573
4800	-1.749	-1.681	10000	-2.478	-2.101	15200	-3.082	-2.363			

Tabla LIV.- Deformaciones en mm @400 pasadas con 1% de hule, método B.



Figura LIII.- Especímenes de Hamburgo deformados, con 1% de hule, método B.

En este ensayo las susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera se hizo con el analizador de rueda cargada de Hamburgo (HWT), de acuerdo al procedimiento marcado en la recomendación AMAAC RA 01/2011.

Por tanto cumple sin problema con el protocolo AMAAC al tener una deformación en promedio de 2.985mm, lo cual es menor a 10mm para un nivel de transito muy alto a las 20 000 pasadas que marca el protocolo.

Mezcla con el 2% de hule. Método B.

Gmm= 2.535

Fecha de elaboración de Espécimen	Cont. de hule / No. de Espécimen	No. de giros	Altura Promedio (mm)	Diámetro Promedio (mm)	C. A. (%)	(A) Peso al aire (g)	(C) Peso sumergido (g)	(B) peso SSS (g)	Absorción (%) $\frac{(B-A)}{(B-C)} * 100$	Gmb A/(B-C)	% Va
18-08-14	2%, #1	93	95.00	150.00	5.5	3815.9	2225.3	3843.7	1.718	2.358	7.0
18-08-14	2%, #2	64	95.00	150.00	5.5	3816.0	2216.8	3850.5	2.112	2.336	7.9
18-08-14	2%, #3	57	95.00	150.00	5.5	3815.2	2228.5	3846.2	1.916	2.358	7.0
18-08-14	2%, #4	69	95.00	150.00	5.5	3815.7	2230.3	3848.2	2.009	2.358	7.0

Tabla LV.- Volumetría de especímenes de Hamburgo, 2% de hule, método B.

Colocación	Espécimen	Temp. °C	Última pasada del Ensayo.	Deformación en la última pasada. (mm)
Lado Izquierdo	2%, #1	50	20000	2.092
Lado Izquierdo	2%, #2	50		
Lado Derecho	2%, #3	50	20000	3.732
Lado Derecho	2%, #4	50		

Tabla LVI.- Deformación en especímenes en Hamburgo, 2% de hule, método B.

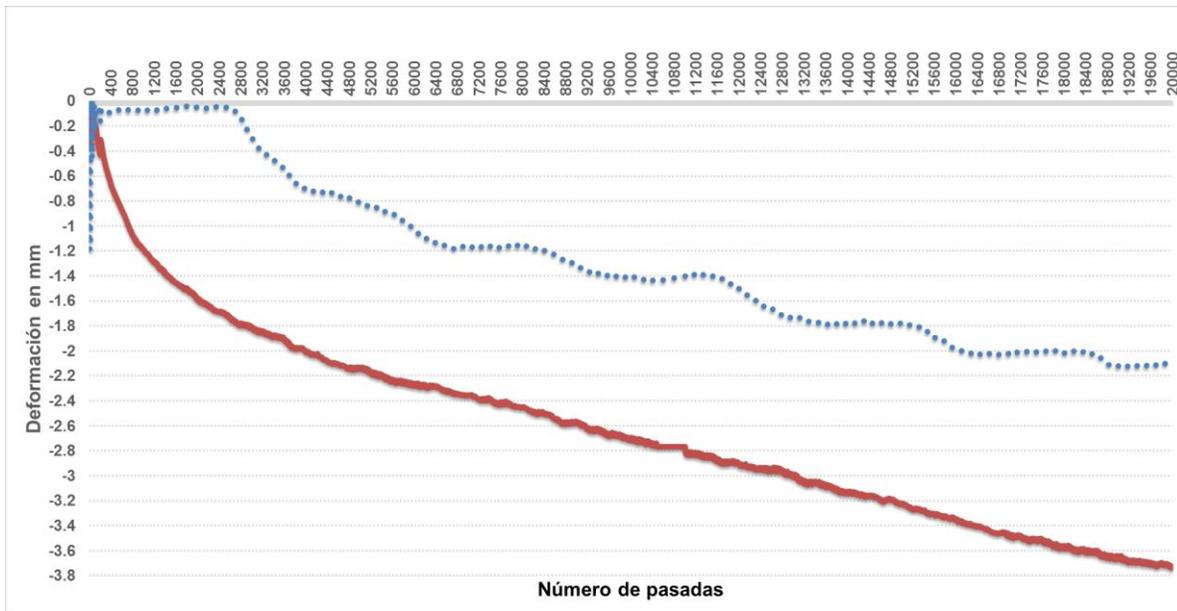


Figura LIV.- Deformación en Hamburgo con 2% de hule, método B.

No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)	No. de Pasadas	Def. lado Izq. (mm)	Def. lado Der. (mm)
0	0.000	0.000	5200	-0.843	-2.176	10400	-1.432	-2.738	15600	-1.887	-3.310
400	-0.086	-0.663	5600	-0.906	-2.238	10800	-1.415	-2.766	16000	-1.981	-3.343
800	-0.071	-1.075	6000	-1.023	-2.271	11200	-1.382	-2.831	16400	-2.020	-3.402
1200	-0.067	-1.292	6400	-1.133	-2.288	11600	-1.407	-2.871	16800	-2.026	-3.461
1600	-0.051	-1.456	6800	-1.169	-2.342	12000	-1.500	-2.902	17200	-2.006	-3.478
2000	-0.050	-1.595	7200	-1.167	-2.391	12400	-1.627	-2.952	17600	-2.008	-3.509
2400	-0.046	-1.689	7600	-1.172	-2.416	12800	-1.710	-2.977	18000	-2.013	-3.562
2800	-0.134	-1.790	8000	-1.155	-2.453	13200	-1.749	-3.059	18400	-2.015	-3.595
3200	-0.410	-1.849	8400	-1.195	-2.497	13600	-1.783	-3.079	18800	-2.100	-3.638
3600	-0.534	-1.911	8800	-1.279	-2.586	14000	-1.780	-3.126	19200	-2.119	-3.675
4000	-0.698	-2.011	9200	-1.364	-2.621	14400	-1.775	-3.165	19600	-2.116	-3.707
4400	-0.724	-2.083	9600	-1.405	-2.685	14800	-1.782	-3.187	20000	-2.092	-3.732
4800	-0.773	-2.139	10000	-1.407	-2.698	15200	-1.796	-3.269			

Tabla LVII.- Deformaciones en mm @400 pasadas con 2% de hule, método B.



Figura LV.- Especímenes de Hamburgo deformados, con 2% de hule, método B.

En este ensayo las susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera se hizo con el analizador de rueda cargada de Hamburgo (HWT), de acuerdo al procedimiento marcado en la recomendación AMAAC RA 01/2011.

Por tanto cumple sin problema con el protocolo AMAAC al tener una deformación en promedio de 2.912mm, lo cual es menor a 10mm para un nivel de transito muy alto a las 20 000 pasadas que marca el protocolo.

5.8 MÓDULO DINÁMICO

La norma AASHTO TP 62-07 en el apartado que se refiere al método menciona que durante el ensayo se aplica un esfuerzo de compresión axial senoidal (haversine) a un espécimen de concreto asfáltico a una temperatura y frecuencia de carga determinada. El esfuerzo aplicado y la deformación axial recuperable del espécimen se miden y se usan para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase.



Figura LVI.- Especimen para módulo montado para ensaye.

El módulo dinámico se interpreta como el valor absoluto del módulo complejo que define las propiedades elásticas en el rango lineal visco-elástico del material sometido a unas cargas sinusoidales.

Entonces el modulo complejo se define como el numero complejo que define la relación entre esfuerzo y deformación para un material visco elástico lineal.

Existen diferentes representaciones del módulo y el Angulo de fase pero las más comunes son las curvas isotérmicas, curvas isócronas, curvas en el plano Cole-Cole (o plano complejo), curva en el espacio Black.

Temp. (°C)	Frecuencia (Hz)	Mod. dinámico (Mpa)	Ang. de fase (deg)	Deformación recuperable (µe)	Deformación permanente (µe)
20	25.0	9582.83	20.80	68.02	167.03
20	10.0	8297.47	20.70	84.26	190.16
20	5.0	7333.43	21.00	87.41	214.35
20	1.0	5048.82	24.10	101.05	210.15
20	0.5	4322.14	25.30	106.88	238.26
20	0.1	3059.29	26.80	118.39	380.07

Tabla LVIII.- Resultados en espécimen #1 con 0% de hule.

Temp. (°C)	Frecuencia (Hz)	Mod. dinámico (Mpa)	Ang. de fase (deg)	Deformación recuperable (µe)	Deformación permanente (µe)
20	25.0	6715.55	20.30	82.24	321.74
20	10.0	5666.76	20.20	113.66	364.88
20	5.0	4880.50	21.10	122.82	471.06
20	1.0	3282.30	24.00	152.32	523.85
20	0.5	2756.15	24.70	163.81	615.32
20	0.1	1819.98	25.50	191.13	896.57

Tabla LIX.- Resultados en espécimen #2 con 0% de hule.

Temp. (°C)	Frecuencia (Hz)	Mod. dinámico (Mpa)	Ang. de fase (deg)	Deformación recuperable (µe)	Deformación permanente (µe)
20	25.0	6605.45	20.60	76.46	372.96
20	10.0	5676.76	20.80	108.14	596.79
20	5.0	4975.15	21.60	110.47	302.00
20	1.0	3360.63	24.60	129.48	223.93
20	0.5	2805.28	25.70	123.68	208.14
20	0.1	1888.26	27.10	136.78	430.05

Tabla LX.- Resultados en espécimen #1 con 1% de hule.

Temp. (°C)	Frecuencia (Hz)	Mod. dinámico (Mpa)	Ang. de fase (deg)	Deformación recuperable (µe)	Deformación permanente (µe)
20	25.0	6284.74	18.40	77.83	442.19
20	10.0	5526.52	18.90	104.12	317.20
20	5.0	4844.84	19.70	103.55	373.59
20	1.0	3319.66	22.70	116.47	392.62
20	0.5	2786.63	23.70	114.01	426.79
20	0.1	1846.71	25.30	110.05	542.94

Tabla LXI.- Resultados en espécimen #2 con 1% de hule.

Temp.(°C)	Frecuencia (Hz)	Mod. dinámico (Mpa)	Ang. de fase (deg)	Deformación recuperable (µe)	Deformación permanente (µe)
20	25.0	6847.87	19.90	71.28	384.86
20	10.0	6006.27	21.10	96.88	380.33
20	5.0	5349.75	21.70	94.17	262.53
20	1.0	3567.41	25.50	108.59	179.20
20	0.5	2986.12	26.70	106.64	168.85
20	0.1	1970.06	27.60	100.44	234.83

Tabla LXII.- Resultados en espécimen #1 con 2% de hule.

Temp.(°C)	Frecuencia (Hz)	Mod. dinámico (Mpa)	Ang. de fase (deg)	Deformación recuperable (µe)	Deformación permanente (µe)
20	25.0	7502.14	17.70	59.46	176.03
20	10.0	6288.64	17.90	89.56	231.09
20	5.0	5453.14	18.70	91.80	250.36
20	1.0	3767.15	21.50	102.53	245.86
20	0.5	3173.58	22.40	100.11	255.76
20	0.1	2118.92	23.50	95.12	315.31

Tabla LXIII.- Resultados en espécimen #2 con 2% de hule.

Fecha de elaboración de Especimen	Cont. de hule / No. de Especimen	No. de giros	Altura Promedio (mm)	Diámetro Promedio (mm)	C. A. (%)	(A) Peso al aire (g)	(C) Peso sumergido (g)	(B) peso SSS (g)	Absorción (%) ((B-A)/(B-C))*100	Gmb A/(B-C)	% Va
11-08-14	0%, #1	45	190.00	150.00	5.5	7629.9	4442.9	7688.3	1.799	2.351	7.3
11-08-14	0%, #2	35	190.00	150.00	5.5	7626.8	4401.1	7661.2	1.055	2.339	7.7
11-08-14	1%, #1	43	190.00	150.00	5.5	7629.0	4409.6	7681.9	1.617	2.331	8.0
11-08-14	1%, #2	48	190.00	150.00	5.5	7630.7	4439.1	7680.3	1.530	2.354	7.1
11-08-14	2%, #1	40	190.00	150.00	5.5	7680.6	4418.2	7684.1	0.107	2.352	7.2
11-08-14	2%, #2	49	190.00	150.00	5.5	7628.3	4427.6	7684.6	1.729	2.342	7.6

Tabla LXIV.- Volumetría de especímenes para módulo dinámico antes de cortar.

Gmm= 2.535

Fecha de elaboración de Especimen	Cont. de hule / No. de Especimen	Altura Promedio (mm)	Diámetro Promedio (mm)	C. A. (%)	(A) Peso al aire (g)	(C) Peso sumergido(g)	(B) peso SSS (g)	Absorción (%) ((B-A)/(B-C))*100	Gmb A/(B-C)	% Va
19-08-14	0%, #1	150.44	101.64	5.5	2845.5	1672.5	2854.4	0.753	2.408	5.0
19-08-14	0%, #2	149.32	101.08	5.5	2794.8	1627.9	2802.8	0.681	2.379	6.2
19-08-14	1%, #1	152.72	100.59	5.5	2849.7	1662.5	2861.6	0.992	2.377	6.3
19-08-14	1%, #2	151.96	100.91	5.5	2877.7	1689.9	2883.8	0.511	2.410	4.9
19-08-14	2%, #1	150.07	100.90	5.5	2818.8	1645.2	2827.5	0.736	2.384	6.0
19-08-14	2%, #2	152.01	100.77	5.5	2876.6	1684.8	2884.8	0.683	2.397	5.4

Tabla LXV.- Volumetría de especímenes para módulo dinámico.



Figura LVII.- Equipo para extracción de núcleos para Modulo Dinámico.

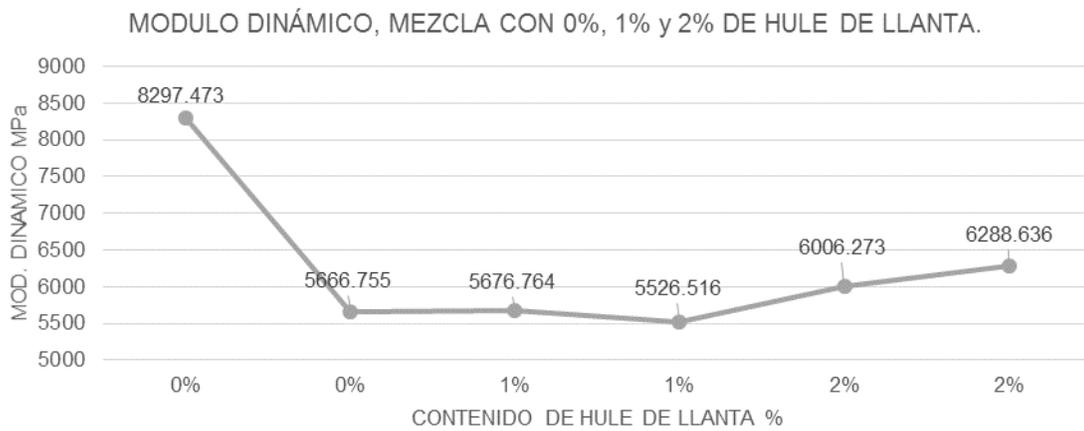


Figura LVIII.- Comparativa de resultados de modulo dinámico con las tres mezclas.

Contenido de hule (%)	Temp. (°C)	Frecuencia (Hz)	Mod. dinámico (Mpa)
0%	20	10	8297.473
0%	20	10	5666.755
1%	20	10	5676.764
1%	20	10	5526.516
2%	20	10	6006.273
2%	20	10	6288.636

Tabla LXVI.- Resultados obtenidos para módulo de dinámico.

Se observa similitud en los resultados obtenidos, sin embargo uno de los especímenes soporto mucho más esto posiblemente está asociado al % de Va que tienen los especímenes, y claro está que para tomar un criterio representativo se deberían de hacer un mayor número de ensayos.



Figura LIX.- Equipo para secado de Especímenes de Modulo Dinámico.

La serie de ensayos para el desarrollo de curvas maestras para usar en respuesta de pavimentos y análisis de comportamiento debe ser llevada a cabo a -10 , 4.4 , 21.1 , 37.8 y 54°C a frecuencias de carga de 0.1 , 0.5 , 1.0 , 5 , 10 y 25 Hz para cada una de las temperaturas. Cada uno de los especímenes de prueba, individualmente instrumentado con LVDTs, debe ser ensayado para cada una de las 30 combinaciones de temperatura y frecuencia de carga comenzando con la temperatura más baja y procediendo a la más alta. El ensayo a una temperatura dada debe comenzar con la frecuencia más alta de carga y proceder con la más baja.

Los especímenes de prueba cumplen con las dimensiones de 150 mm extraídos de las mezclas compactadas en el compactador giratorio. El diámetro promedio de los especímenes está entre 100 y 104 mm. La altura promedio del espécimen de prueba está entre 147.5 y 152.5 mm.



Figura LX.- Núcleo para Modulo Dinámico después de ser cortado.



Figura LXI.- Muestra de campo para extracción de núcleos.

En ocasiones se requieren núcleos de tramos carreteros ya en funcionamiento, la figura anterior es una muestra de campo.

5.9 FATIGA

El método de ensayo en viga de cuatro puntos es una prueba ampliamente utilizada en los Estados Unidos, país de origen del programa SHRP para el estudio de la fatiga en mezclas asfálticas, en México forma parte de las especificaciones del protocolo AMAAC y corresponde al nivel IV. Esta prueba se diseñó para evitar la concentración de daños en el centro de la viga observada en el ensayo de flexión de tres puntos.



Figura LXII.- Equipo de corte para vigas.

Una de las características de este ensayo es que se requiere un compactador lineal ya que el tipo de aparato de compactación puede influenciar los resultados del ensayo. Es recomendado cortar la viga de una losa grande compactada con rodillo vibratorio.

La dimensión final requerida, después del corte, de los especímenes son 380 ± 6 mm de longitud, 50 ± 6 mm de altura y 63 ± 6 mm de ancho.



Figura LXIII.- Espécimen compactado en Compactador lineal.

Gmm= 2.535

Fecha de elaboración de Especimen	Cont. de hule / No. de Especimen	Longitud Promedio (mm)	Espesor Promedio (mm)	Ancho Promedio (mm)	C. A. (%)	(A) Peso al aire (g)	(C) Peso sumergido (g)	(B) peso SSS (g)	Absorción (%) ((B-A)/(B-C))*100	Gmb A/(B-C)	% Va
18-08-14	0%, A	4572.00	6985.00	1524.00	5.5	11019.1	6547.9	11137.0	2.569	2.401	5.3
18-08-14	0%, B	4572.00	6985.00	1524.00	5.5	11360.3	6727.6	11429.1	1.463	2.416	4.7
18-08-14	1%, A	4572.00	6985.00	1524.00	5.5	11073.8	6525.5	11148.7	1.620	2.395	5.5
18-08-14	1%, B	4572.00	6985.00	1524.00	5.5	11331.1	6702.9	11386.7	1.187	2.419	4.6
18-08-14	2%, A	4572.00	6985.00	1524.00	5.5	11343.4	6704.2	11402.2	1.252	2.415	4.8
18-08-14	2%, B	4572.00	6985.00	1524.00	5.5	11101.2	6570.0	11174.4	1.590	2.411	4.9

Tabla LXVII.- Volumetrías de especímenes para viga. (Sin Cortar).

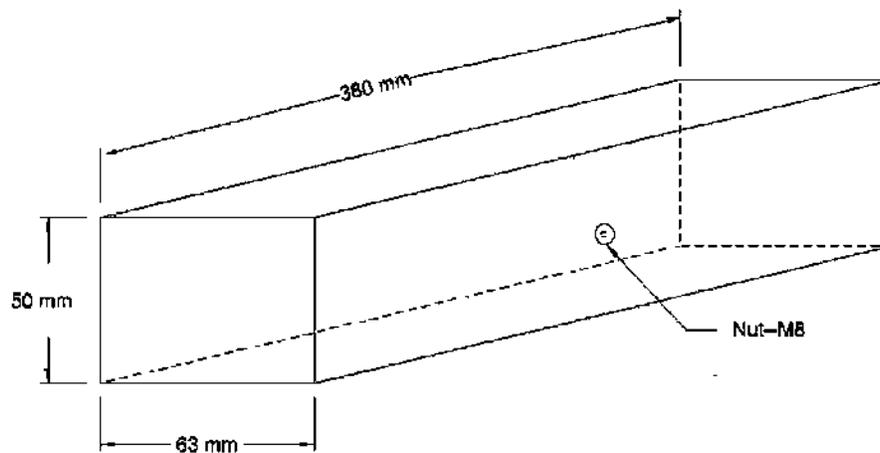


Figura LXIV.- Dimensiones de las vigas.

Gmm= 2.535

Fecha de elaboración de Especimen	Cont. de hule / No. de Especimen	Longitud Promedio (mm)	Espesor Promedio (mm)	Ancho Promedio (mm)	C. A. (%)	(A) Peso al aire (g)	(C) Peso sumergido (g)	(B) peso SSS (g)	Absorción (%) $\frac{(B-A)}{(B-C)} \times 100$	Gmb A/(B-C)	% Va
22-08-14	0% #1A	380.00	64.33	51.00	5.5	2960.8	1756.1	2973.3	1.027	2.432	4.0
22-08-14	0% #2A	379.50	64.18	51.55	5.5	3003.0	1777.0	3010.9	0.640	2.434	4.0
22-08-14	0% #3B	380.25	64.16	51.40	5.5	3020.8	1790.1	3025.3	0.364	2.446	3.5
22-08-14	0% #4B	379.75	64.44	51.72	5.5	3064.6	1812.2	3066.7	0.167	2.443	3.6
22-08-14	1% #5A	380.25	63.80	51.45	5.5	3006.2	1774.2	3012.1	0.477	2.428	4.2
22-08-14	1% #6B	380.00	63.85	50.84	5.5	2993.7	1775.4	2995.4	0.139	2.454	3.2
22-08-14	1% #7A	380.00	64.10	51.19	5.5	2986.1	1759.8	2988.0	0.155	2.431	4.1
22-08-14	1% #8B	379.75	64.22	51.33	5.5	3018.2	1789.9	3023.1	0.397	2.447	3.5
22-08-14	2% #9A	379.75	62.43	52.39	5.5	2988.9	1766.5	2990.1	0.098	2.443	3.6
22-08-14	2% #10B	379.50	63.42	51.51	5.5	2946.9	1742.6	2954.6	0.635	2.431	4.1
22-08-14	2% #11A	380.50	63.22	51.57	5.5	3012.9	1789.3	3014.8	0.155	2.459	3.0
22-08-14	2% #12B	379.25	63.43	50.57	5.5	2929.5	1732.9	2934.0	0.375	2.439	3.8

Tabla LXVIII.- Volumetrías de especímenes para viga. (Cortadas).

La siguiente imagen muestra una viga sometida a 600microdeformaciones, y se puede observar el tipo de fractura que se produjo en sus cuatro lados.

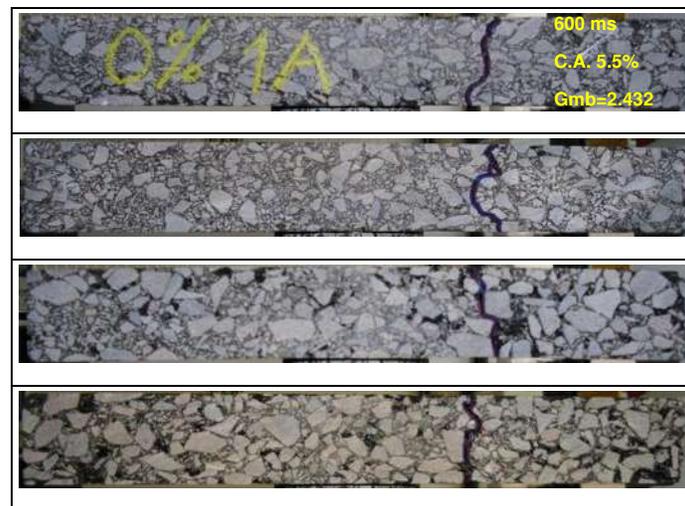


Figura LXV.- Viga ensayada a 600ms, se remarca la grieta que se generó.

Mezcla con el 0% de hule. Método A.

Especímen	Def. promedio	Esfuerzo inicial	Rigidez inicial	Ciclo de falla
0%, #1	595.91	2545.00	4278.80	472737.00
0%, #2	606.13	2720.00	4565.55	231362.00

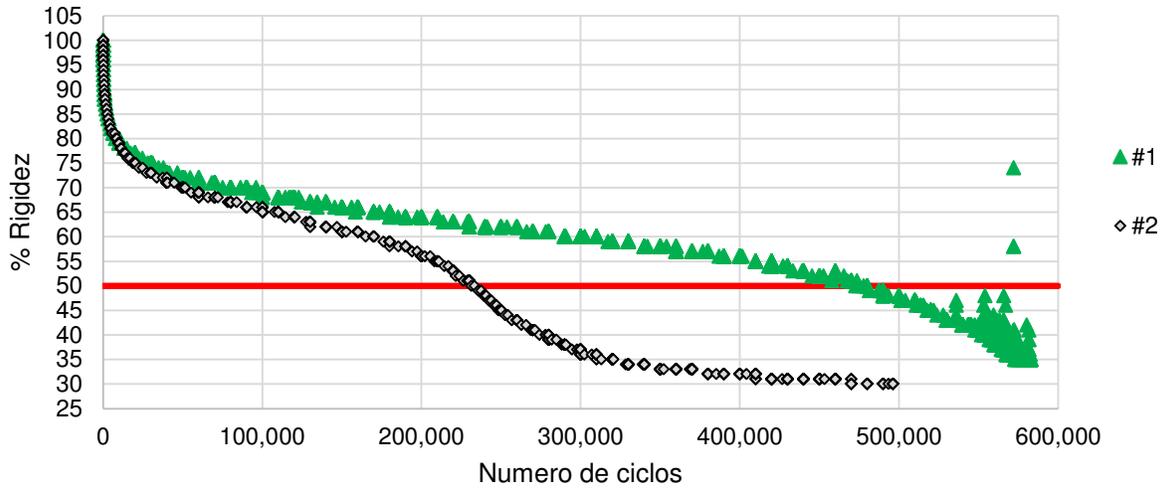


Figura LXVI.- Vigas con 0% de hule, a 600ms.

Especímen	Def. promedio	Esfuerzo inicial	Rigidez inicial	Ciclo de falla
0%, #3	791.03	3469.00	4476.81	186781.00
0%, #4	794.04	3981.00	5049.67	85906.00

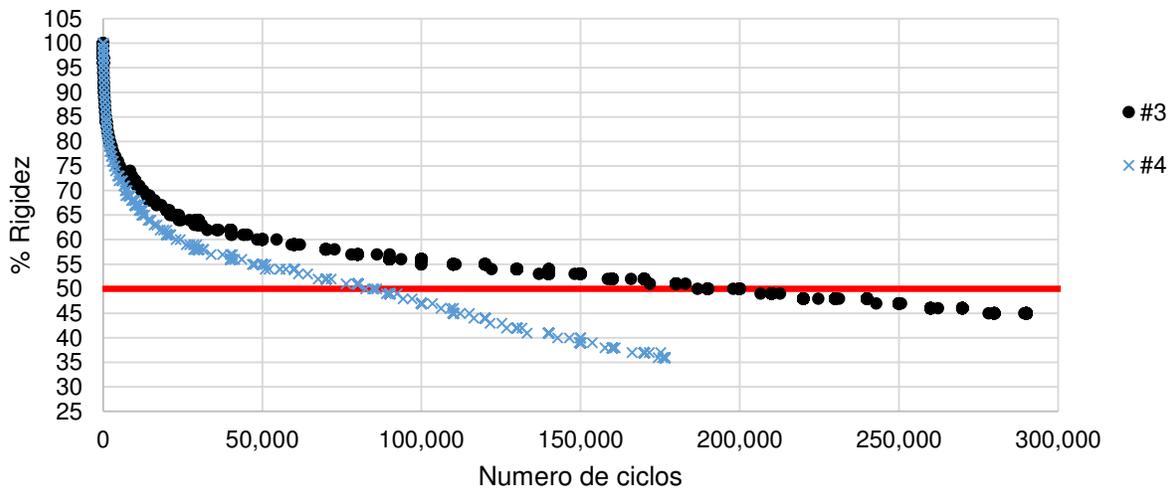


Figura LXVII.- Vigas con 0% de hule, a 800ms.

Mezcla con el 1% de hule. Método A.

Especímen	Def. promedio	Esfuerzo inicial	Rigidez inicial	Ciclo de falla
1%, #5	600.18	2644.00	4489.18	410000.00
1%, #6	597.12	2864.00	4783.37	1470000.00

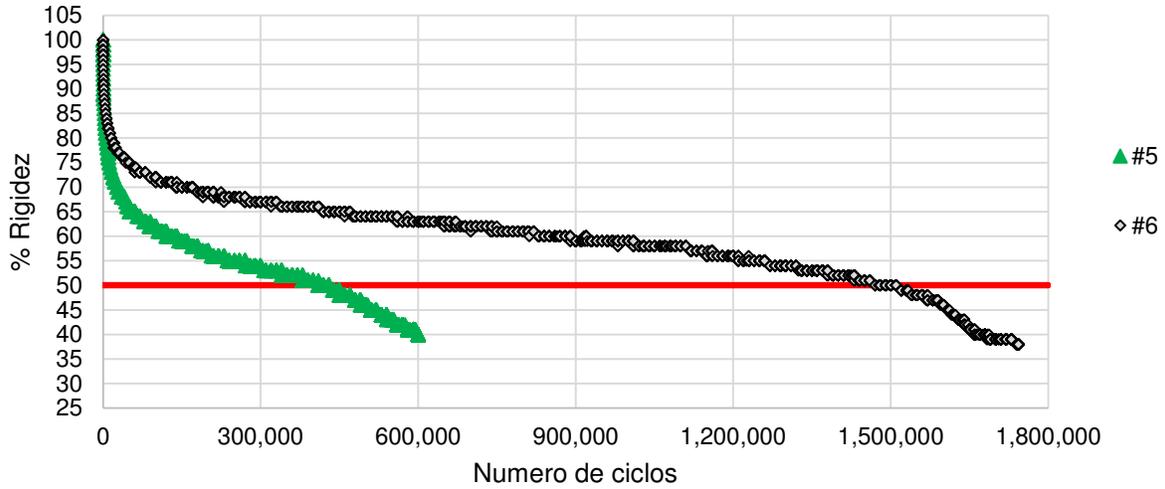


Figura LXVIII.- Vigas con 1% de hule, a 600ms.

Especímen	Def. promedio	Esfuerzo inicial	Rigidez inicial	Ciclo de falla
1%, #7	805.05	3338.00	4218.10	108301.00
1%, #8	799.56	3463.00	4329.77	189414.00

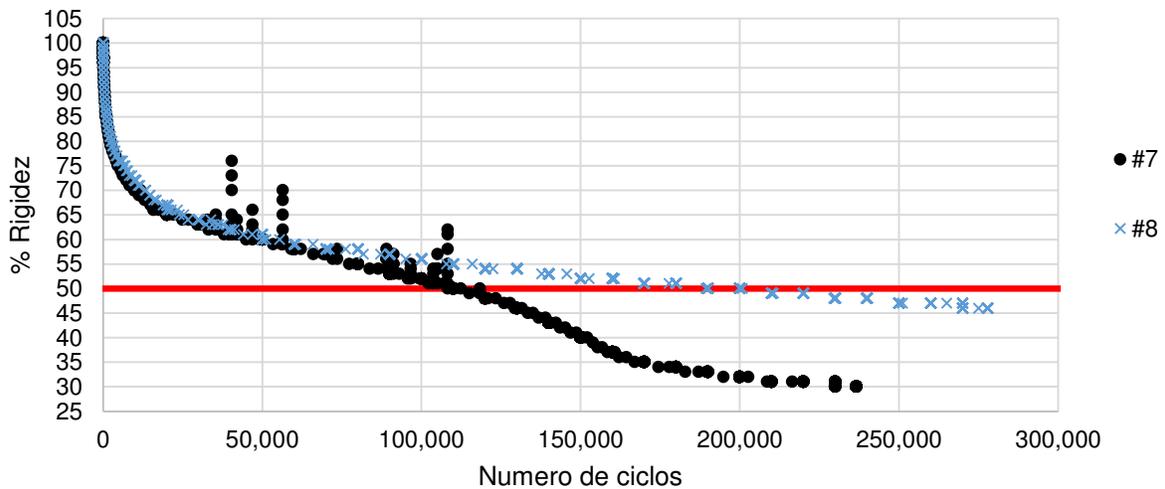


Figura LXIX.- Vigas con 1% de hule, a 800ms.

Mezcla con el 2% de hule. Método A.

Especímen	Def. promedio	Esfuerzo inicial	Rigidez inicial	Ciclo de falla
2%, #9	594.97	2280.00	3800.84	570010.00
2%, #10	600.93	2046.00	3451.30	302084.00

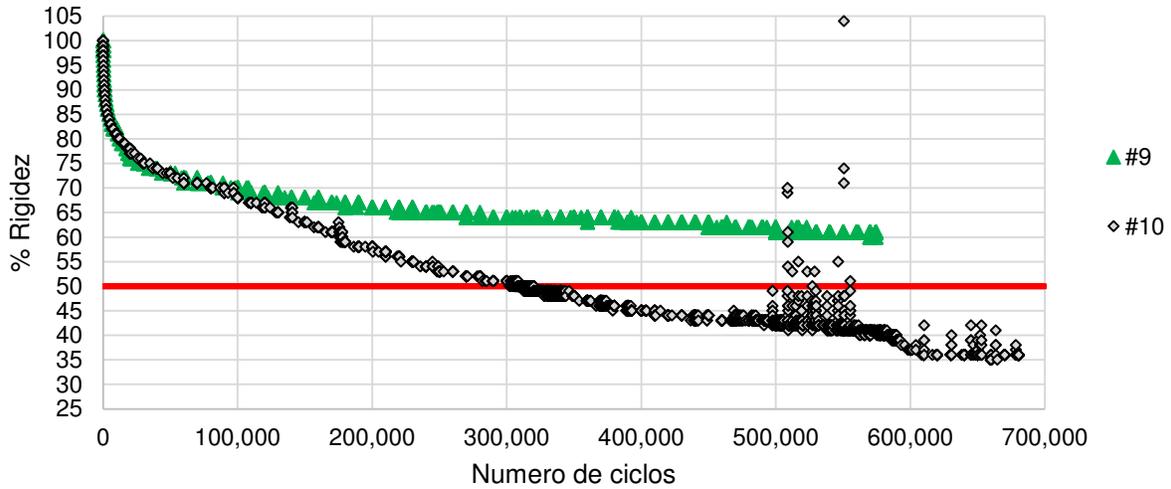


Figura LXX.- Vigas con 2% de hule, a 600ms.

Especímen	Def. promedio	Esfuerzo inicial	Rigidez inicial	Ciclo de falla
2%, #11	790.07	3342.00	4150.40	338002.00
2%, #12	798.09	2816.00	3517.47	770020.00

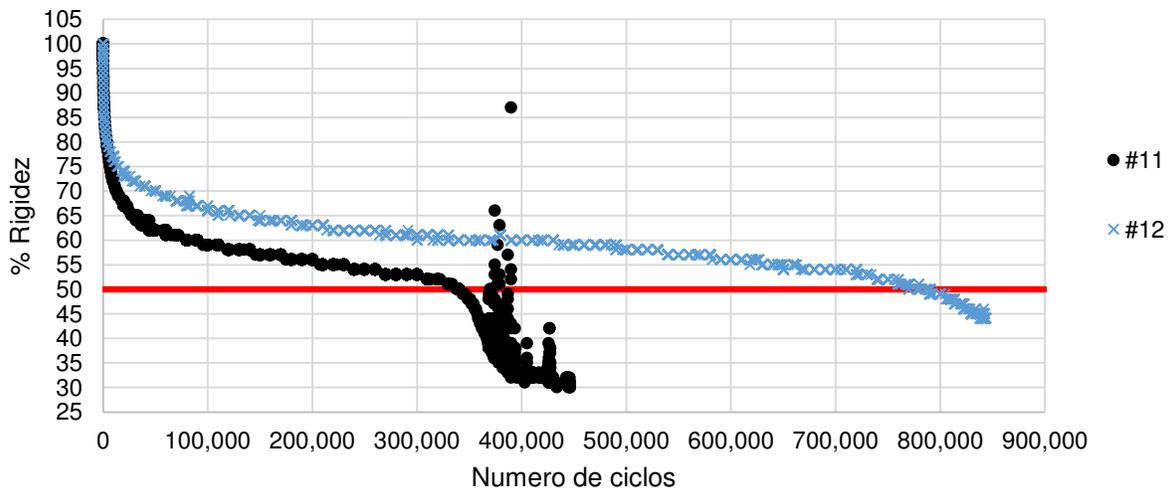


Figura LXXI.- Vigas con 2% de hule, a 800ms.

Resultados de vigas sometidas a flexión.

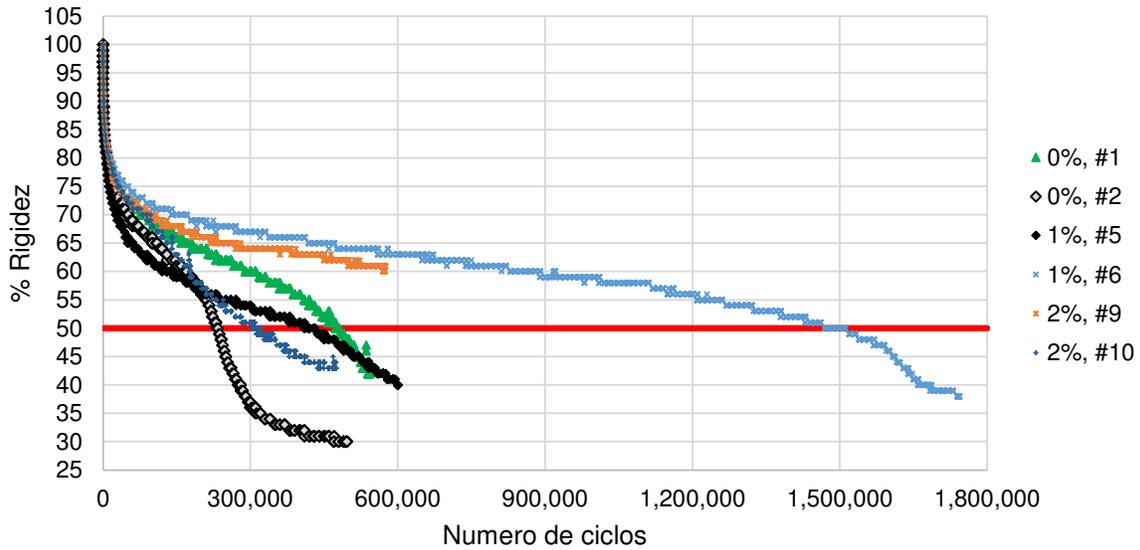


Figura LXXII.- Vigas con 0%, 1% y 2% de hule, a 600ms.

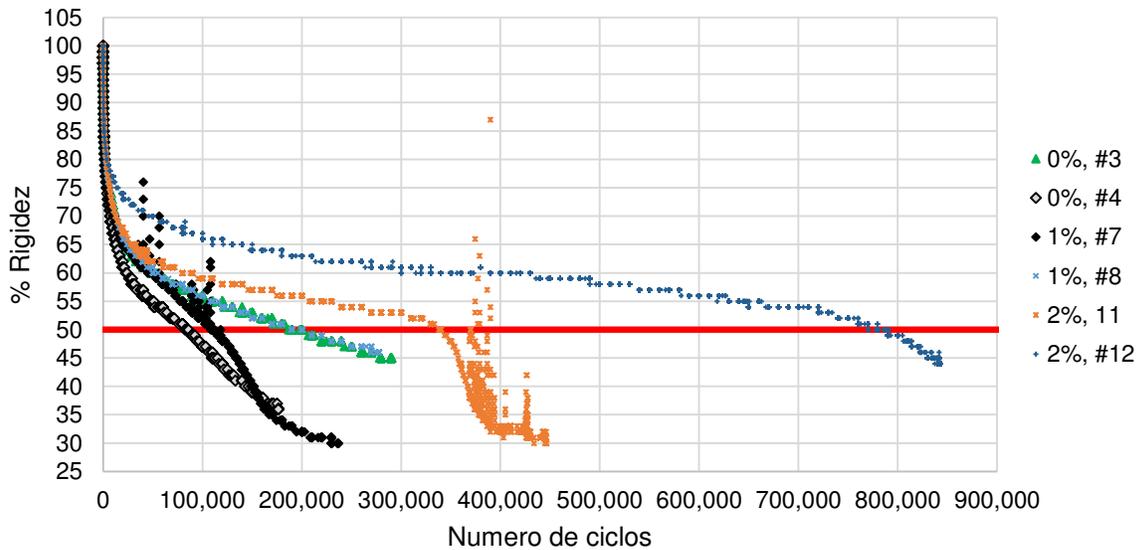


Figura LXXIII.- Vigas con 0%, 1% y 2% de hule, a 800ms.

CONCLUSIONES

Este trabajo me permitió aprender el procedimiento adecuado para realizar un diseño de una mezcla asfáltica de granulometría densa, me gustaría resaltar que una vez hecho el diseño de la mezcla con 0% de hule aprendí que podemos experimentar agregando una gran cantidad de materiales como aditivos en la combinación de los agregados pero ello no significa que todos tengan un buen comportamiento en la mezcla asfáltica cuando se someten a pruebas de desempeño.

Durante el desarrollo de la investigación pude identificar parámetros fundamentales que impactan en gran medida el diseño, desde la adecuada selección de los pétreos, la combinación de los mismos y el procedimiento en el laboratorio de cribado, dosificación, calentamiento, mezclado, curado y compactación de la mezcla. Estas son solo algunas fases o variables del diseño que tuve la oportunidad de aprender haciéndolas por propia mano, habilidad o conocimientos que seguramente no hubiese logrando adquiriendo solo la parte teórica del diseño.

Puedo decir que después de analizar las tres mezclas (0%, 1% y 2% de hule) se obtuvieron comportamientos muy similares en los cuatro niveles del protocolo, entonces se deduce que la incorporación de hule molido de llanta de NFU no perjudica el comportamiento de la mezcla y por lo tanto puede ser una opción viable para el uso y aprovechamiento de residuos como los NFU y con ello coadyuvar al medio ambiente.

Sin lugar a dudas de forma personal considero que el comportamiento de las mezclas con 1% y 2% poseen un comportamiento mejor en los ensayos de TSR y Hamburgo ya que tienen una mayor cantidad de vacíos (mayor al 7% que pide la norma) y como analogía son condiciones similares a las de una obra porque difícilmente se alcanza el 4% de Va debido a la misma dinámica de la obra, a menos que se lleve un estricto control de calidad por parte de un laboratorio que este monitoreando el proceso constructivo. Además los ensayos de TSR y Hamburgo fueron los que más se repitieron. Sin embargo considero que si se realiza un diseño con el contenido óptimo de asfalto en

las mezclas con 1% y 2% seguramente disminuirán los vacíos y serán aún más resistentes a la deformación permanente.

Dicho de otra forma el comportamiento de las tres mezclas cumple con las especificaciones para TSR y Hamburgo marcadas en el protocolo AMACC, sin embargo considero que para la evaluación de Módulo Dinámico y Fatiga se deberían realizar un mayor número de ensayos ya que los obtenidos muestran mucha dispersión y no deja claro diferencias entre comportamientos de las diferentes mezclas.

En base a los resultados obtenidos, opte por analizar un espécimen para TSR, con los parámetros de la tabla siguiente tratando de hacer una analogía entre el laboratorio y la colocación de la mezcla asfáltica en una obra, claro está que habrá muchas otras variables a considerar, pero será una buena aproximación a las condiciones de una obra donde se emplea carpeta asfáltica con hule de llanta siempre y cuando la incorporación del hule se realice por la vía seca.

ESPÉCIMEN PARA TSR		
EN LABORATORIO		
Mezcla	1102.96	g
Agregado	1021.50	g
2% Hule	20.80	g
Asfalto	60.66	g
Gmm	2.535	g
%Vacíos	7.00	%
% C.A.	5.50	%
EN OBRA		
Peso de la mezcla=	1.10	kg
Vol. Del espécimen=	0.000498729	m ³
Altura Del espécimen=	0.06	m
Diametro Del espécimen=	0.10	m
Camino tipo=	C	
Ancho de corona=	7.00	m
Espesor de la carpeta asfáltica=	0.10	m
Vol. Requerido @ ml de carp. asfáltica =	0.70	m ³
Peso de la Mezcla req. @ ml de carp. asfáltica =	1,548.08	kg
Peso de la Mezcla req. @ 1km =	1,548.08	ton
Peso del hule que se req. @ 1 km de carretera, (2% de Hule en relacion al agregado) =	29.10	ton

Tabla LXIX. Trasladando la información obtenida a campo.

Se ilustra como la mezcla que contiene el 2% de hule puede emplear 29ton de hule de llanta en un camino tipo C con un espesor de carpeta asfáltica de 10cm, entonces

de acuerdo al protocolo AMAAC se puede emplear en carreteras federales tipo D, alimentadoras, estatales y municipales así como vialidades urbanas donde el tránsito sea de medio a bajo ya que cumple con un TSR mayor al 80% y una deformación permanente 33% menor al límite permitido para un tránsito incluso muy alto (más de 30 millones de ejes equivalentes). Lógicamente la mezcla con el 1% también cumple con dichos parámetros y aprovecha 14.5ton de hule para las condiciones antes mencionadas, cabe resaltar que los valores de laboratorio empleados en la tabla corresponden a la dosificación de inversas para especímenes con 7% de Va, recordando que en el diseño de la mezcla se busca un 4% de Va, por tanto son condiciones más críticas.

Estas cifras mencionadas cumplirán partiendo del supuesto que la selección del asfalto para el sitio de la obra fue coincidente con el asfalto empleado en laboratorio el cual fue un PG 70-22.

Por otro lado queda claro que si se puede emplear el hule de llanta en mezclas asfálticas para construir superficies de rodadura sustentables amigables con el medio ambiente, sin embargo habrá que revisar los costos de producción del hule de llanta para la granulometría empleada en el presente trabajo, por ende se deduce que efectivamente se pueden aprovechar los millones de NFU en pavimentos flexibles.

Considero importante adquirir más dominio y práctica en los laboratorios del país para continuar con esta buena intención de capacitar a los técnicos encargados de obra y al personal encargado de diseño de nuestra infraestructura del transporte, comento esto porque tuve la oportunidad de interactuar en cursos que impartió la AMAAC para personal de laboratorios de todo México, algunos, gente con mucha experiencia y me di cuenta que se tiene poco o nulo conocimiento del equipo y procedimiento para realizar un diseño que no sea Marshall, está claro que los costos de los equipos para hacer un diseño con protocolo no son económicos, sin embargo también creo que abriendo las puertas y capacitando a ingenieros como es mi caso se habrá un abanico de posibilidades para extender y difundir el conocimiento adquirido y de esta forma ya no serán metodologías desconocidas en ciertos lugares de México.

REFERENCIAS

- [1] Estadísticas de vehículos de motor registrados en circulación, Instituto Nacional De Estadística y Geografía (INEGI).
- [2] Anuario Estadístico 2011 y 2013, Secretaria de comunicaciones y Transportes (SCT). México.
- [3] La importación de llantas usadas en Baja California, <http://www.jornada.unam.mx/2009/06/01/eco-g.html>.
- [4] Empleo de polvo de neumáticos fuera de uso en mezclas bituminosas, INTEVIA, Valencia España 2007.
- [5] <http://www.neumaticosmenorca.com/es/neumaticos>.
- [6] Josep M. Gruas I Pauls (2009). Efecto de la utilización de mezclas bituminosas con polvo de neumático sobre las características funcionales del pavimento. Tesis de especialización.
- [7] Trituración y fabricación de polvo a base de llantas de desecho. http://www.rsrenovado.com/polvo_de_llanta.html
- [8] Asfalto ahulado, Tesis de licenciatura, Yuriria Hernández Sánchez, (2004).
- [9] Reciclado de hule de neumático en mezclas asfálticas densas utilizando para el diseño el protocolo AMAAC, Tesis de Maestría, Jesús Murillón Duarte, (2012).
- [10] Crean en la UNAM, método para reciclar llantas, boletín UNAM-DGCS-262, http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2008_262.html
- [11] Inventario de Banco de Materiales, Centro SCT Puebla, Unidad General de Servicios Técnicos, (2012).
- [12] Manuel Zárate Aquino, México (2011). Diseño de pavimentos flexibles, Segunda parte, Asociación Mexicana del Asfalto A. C. Segunda Edición,
- [13] Manuel Tinoco Zamudio, México (2011). Historia y Evolución de las mezclas asfálticas en las carreteras de México, Asociación Mexicana del Asfalto, A. C.
- [14] Publicación técnica 271 imt.
- [15] <http://www.jetmaterials.com/wp-content/uploads/2012/04/s213-marshall1.jpg>
- [16] <http://www.racperu.com.pe/rpu/img/p/52-143-thickbox.jpg>

Guido Radelat Egües, (1990). Metodología de la investigación para ingenieros en vías, Publicación técnica No. 12, Instituto Mexicano del Transporte. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. México.

Félix Edmundo Pérez Jiménez y Cols. (2006). Estudio diseño y control de mezclas bituminosas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Asociación Española de la Carretera. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Carlos Crespo Villalaz (2010). Vías de comunicación, cuarta edición. Ed. Limusa. México.

Asphalt Rubber Usage Guide (2006). State of California Department of Transportation (Caltrans), Materials Engineering and Testing Services Office of Flexible Pavement Materials. Ca. USA

Departamento de infraestructura del transporte y territorio, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Normativa de la Secretaria de comunicaciones y Transportes (SCT). México.

Ing. Álvaro Gutiérrez Muñiz. QuimiKao S.A. De C.V. Asociación Mexicana del Asfalto A.C. San Luis Potos, S.L.P. 2011, México.

Dr. Jorge Cepeda Aldape, Asociación Mexicana del Asfalto A.C. San Luis Potos, S.L.P. 2011, México.

Ing. Noé Hernández F., SemMaterials México, Asociación Mexicana del Asfalto A.C. San Luis Potos, S.L.P. 2011, México.

<http://bitumenengineering.com/miscellaneous/asphalt-rubber-demand-in-california-usa>

http://www.fisica.unam.mx/noticias_llantasbasurero2012.php

<http://old.latribuna.hn/2009/07/19/exitoso-proyecto-privado-de-agricultura-ecologica-reciclando-llantas/>

<http://walhez.com/wp-content/uploads/2012/06/Reciclaje-Logo.jpg>

<http://www.tiendaverde.com.mx/reciclar-llantas/>

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

http://cybertesis.upc.edu.pe/upc/2006/llosa_gj/html/TH.2.html

<http://www.revan.mx/productos.html>

<http://www.pisosdellanta.com.mx/contacto/>

<http://www.reciclajedelnoreste.com/>