



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



---

**División de Estudios de Posgrado de la Facultad de  
Ingeniería Civil**

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

**“ANÁLISIS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS  
RECICLADAS EN CALIENTE BAJO LOS  
PARAMETROS DE LOS ENSAYOS DE TSR,  
MÓDULO DINÁMICO Y ENERGÍA DE FRACTURA”**

**Tesis que para obtener el Grado de Maestro en Infraestructura  
del Transporte presenta: Paul Alejandro Sandoval Huerta**

**Director de Tesis: Doctor Jorge Alarcón Ibarra**

**Morelia, Michoacán – México**

**Febrero-2016**

## Índice de Contenido

AGRADECIMIENTOS .....	5
RESUMEN.....	6
ABSTRACT .....	7
INTRODUCCIÓN .....	8
ANTECEDENTES .....	8
OBJETIVOS.....	13
CONTENIDO DE LA TESIS .....	14
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO .....	15
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS. COMPOSICIÓN, DETERIORO Y REHABILITACIÓN .....	15
1.1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.2 PAVIMENTOS.....	16
1.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	19
1.4 PROPIEDADES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS..	21
1.4.1 Estabilidad.....	22
1.4.2 Durabilidad.....	22
1.4.3 Flexibilidad.....	23
1.4.4 Resistencia a la fatiga .....	23
1.4.5 Resistencia al fracturamiento por baja temperatura.....	23
1.4.6 Resistencia al daño por humedad .....	23
1.4.7 Resistencia al deslizamiento.....	24
1.4.8 Trabajabilidad.....	24
1.5 DETERIOROS Y MODELO DE FALLA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	25
1.6 DESCRIPCIÓN DE FALLAS EN PAVIMENTOS Y REHABILITACIÓN.....	30
1.6.1 Agrietamiento .....	30
1.6.2 Agrietamiento tipo cocodrilo.....	31
1.6.3 Distorsión o roderas .....	32
1.6.4 Desprendimiento .....	33
1.6.5 Disgregación.....	34
1.6.6 Superficie lisa .....	35
1.7 CONSERVACIÓN DE CARRETERAS.....	36
1.7.1 Descripción de las condiciones existentes en el firme .....	37

1.7.2	Identificación de las alternativas viables de rehabilitación .....	37
1.7.3	Evaluación de las alternativas de rehabilitación estructural.....	38
1.7.4	Selección de la alternativa óptima.....	39
CAPÍTULO 2. MARCO METODOLÓGICO .....		41
RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....		41
2.1	PERSPECTIVA HISTÓRICA DEL RECICLAJE .....	41
2.2	INTRODUCCIÓN.....	43
2.3	ASFALTO ENVEJECIDO .....	45
2.4	PROCEDIMIENTOS PARA RECUPERAR UN PAVIMENTO .....	46
2.4.1	Fresado de un pavimento.....	47
2.4.2	Selección de la profundidad de fresado .....	47
2.4.3	Inspeccionar el proceso de fresado .....	48
2.4.4	Desglose Agregada Durante Fresado .....	48
2.4.5	Demolición de un pavimento .....	49
2.5	CONTAMINACIÓN DENTRO DEL RAP .....	50
2.6	ALMACENAMIENTO Y PROCESAMIENTO DEL RAP .....	51
2.6.1	Tipos de trituradoras.....	55
2.6.2	Clima .....	55
2.6.3	Separar por fracciones el RAP .....	56
2.6.4	Ventajas y desventajas de las diferentes opciones de procesamiento RAP ..	57
2.6.5	Almacenamiento para minimizar la segregación.....	58
2.6.6	Almacenamiento para minimizar la humedad .....	58
2.7	MUESTREO Y PRUEBAS PARA EL RAP .....	59
2.7.1	RAP Variabilidad .....	59
2.7.2	Muestreo y Pruebas de Frecuencia .....	60
2.7.3	Método de muestreo.....	60
2.7.4	Métodos de prueba .....	63
2.8	MÉTODOS PARA DETERMINAR CONTENIDO DE ASFALTO EN EL RAP Y LA RECUPERACIÓN DE LOS PÉTREOS .....	64
2.8.1	Método de ignición .....	65
2.8.2	Extracción solvente .....	66
CAPÍTULO 3. EXPERIMENTACIÓN .....		67
3.1	INTRODUCCIÓN.....	67
3.2	PLANTEAMIENTO .....	68

3.3	MATERIALES EMPLEADOS .....	70
3.3.1	Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP) .....	70
3.3.2	Agregado pétreo virgen.....	75
3.3.3	Asfalto de aportación.....	77
3.4	GRANULOMETRÍAS DE DISEÑO.....	78
3.5	PROCESO EXPERIMENTAL.....	82
3.6	PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO .....	86
3.7	PROCEDIMIENTO DE COMPACTACIÓN .....	88
3.8	VOLUMETRÍA.....	90
3.9	MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA ENERGÍA DE FRACTURA UTILIZANDO EL DISCO COMPACTO A TENSIÓN.....	93
3.10	MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR EL MÓDULO DINÁMICO .....	100
3.11	MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD (TSR) .....	108
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		116
4.1	INTRODUCCIÓN.....	116
4.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE ENERGÍA DE FRACTURA.....	117
4.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO .....	119
4.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE TSR .....	120
CONCLUSIONES.....		130
BIBLIOGRAFÍA.....		134

# **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios,  
a mis padres Raúl y Bertha,  
y a mi hermano Edgar por ser mi apoyo y siempre creer en mí.**

## **RESUMEN**

En la actualidad nuestro medio ambiente ha sufrido un gran deterioro, siendo el factor principal en estos cambios las actividades humanas. Esto ha generado grandes problemáticas, como pueden ser: contaminación del aire y del agua, extinción de especies, agotamiento de recursos naturales, el impacto del incremento de la población y la disminución de calidad de vida de las personas, entre otras. Esta situación nos dirige a hacer un cambio en como desarrollamos nuestras actividades y cuales procesos tecnológicos y constructivos pueden ser reestructurados para reducir el impacto negativo que tienen sobre el medio ambiente.

En este trabajo se pretende analizar una nueva técnica para diseñar y construir mezclas asfálticas, intentando minimizar el consumo de grandes cantidades de recursos naturales, energía y espacio. Además, se busca establecer las bases para futuras investigaciones enfocadas a reutilizar los pavimentos asfálticos que han concluido su vida útil en nuevas mezclas asfálticas.

A lo largo de la investigación se revisan los aspectos más relevantes de los pavimentos asfálticos, entre los que destacan: su clasificación respecto a sus características de servicio y los deterioros más habituales que se presentan en ellos. Se especifica la metodología de la técnica de reciclado de pavimentos asfálticos, sus aplicaciones, la descripción de los materiales y equipos empleados. También se mencionan algunos de los criterios y normas existentes para la fabricación de este tipo de mezclas.

Por último, se describen los trabajos realizados durante la estancia en los laboratorios de SemMaterials México, en la ciudad de Puebla, en el que se analizaron las características y desempeño de las mezclas asfálticas con material reciclado.

Palabras clave: Reciclado, pavimento, mezcla asfáltica, fresar y rehabilitación.

## **ABSTRACT**

At the present our environment has deteriorated significantly, the main factor of these changes are human activities. This has created major problems, such as: air pollution and water, species extinction, depletion of natural resources, the impact of population growth and declining quality of life of people, among others. This situation leads us to make a change in how we develop our activities and determine which technological and construction processes can be restructured to reduce the negative impact on the environment.

In this work a new technique was implemented to design and build roads, trying to minimize the consumption of large amounts of natural resources, energy and space. In addition, it seeks to establish the basis for future research aimed at reuse in new asphalt mixes, asphalt pavements that have completed their useful life.

Throughout the research, the most important aspects of asphalt pavements are reviewed. The remarkable aspects are: their classification regarding service features and the most common deteriorations that occur in them. The methodology of the technique of recycling asphalt pavements, applications, description of materials and equipment used is specified. Some of the criteria and existing standards for making such mixtures, are also mentioned.

Finally, the work performed during the stay of research in the laboratories of SemMaterials Mexico, in the city of Puebla are described. In these laboratories, were analyzed the characteristics and performance of asphalt mixtures of recycled material.

# **INTRODUCCIÓN**

## **ANTECEDENTES**

Las condiciones de nuestro entorno advierten un agotamiento grave de los recursos utilizados en la construcción de carreteras, principalmente los que se emplean en la realización de pavimentos asfálticos, generando un encarecimiento en la adquisición de nuevos productos. Además de una creciente concientización del impacto que generamos a nuestro medio ambiente, la sobre explotación de los bancos de material es un grave factor para el deterioro de nuestros ecosistemas.

Estos problemas nos obligan a actualizar nuestras técnicas de construcción, conservación y rehabilitación de la red carretera de México en busca de la sostenibilidad del medio ambiente y una optimización tecnológica en el proceso de elaboración de pavimentos asfálticos.

Una definición de la sostenibilidad es, "el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades", (Principio 3° de la Declaración de Río, 1992).

Debido a ello, las empresas líderes en la elaboración de mezclas asfálticas se han preocupado por desarrollar tecnologías de construcción más competitivas que sean más amigables con la naturaleza, y han optado por el reciclado de pavimentos asfálticos, recuperando los materiales que componen la capa de rodadura que han concluido con su vida útil y que sus condiciones de servicio han dejado de ser satisfactorias para transitar sobre de ella de una manera cómoda y segura, para después diseñar nuevas mezclas asfálticas que contengan un cierto porcentaje de éste material recuperado y también reduciendo la gran cantidad de residuos que se derivan de los procesos de reparación o reconstrucción.

Pero en México, el procedimiento más común para la construcción de una nueva carretera o durante la conservación de una existente es mediante la utilización de nuevos materiales como son agregados pétreos y asfalto. Esta técnica requiere de la explotación de grandes cantidades de recursos naturales no renovables, lo que genera un enorme y negativo impacto a nuestro medio ambiente.

Sin embargo, en las actuales obras de rehabilitación o conservación de los pavimentos asfálticos, se ha vuelto más común el uso de fresado o recuperación de las capas asfálticas deterioradas que son retiradas para su posterior reposición con un mezcla asfáltica nueva. El empleo de ésta técnica genera un gran volumen de material completamente reutilizable, desde los agregados pétreos hasta el asfalto que se encuentra en su contenido son totalmente aptos para poder ser utilizados en nuevos pavimentos.

Lamentablemente, en su mayoría éste material simplemente se desecha, desperdiciando el gran valor económico que se encuentra contenido en sus materiales, además de generar un gran daño a nuestros ecosistemas.

Son evidentes las grandes ventajas que aportan las técnicas de reciclaje, un notable aprovechamiento en el uso de los materiales empleados y un bajo impacto ambiental. Pero contradictoriamente, aun no se extiende el uso de las técnicas de reciclado, en

especial el caso del reciclado en caliente en planta, lo cual ha generado incertidumbre y poco interés por utilizar ésta técnica.

Se entiende por “Reciclado de Pavimentos Asfálticos en Caliente en Planta” al proceso en el cual los materiales recuperados de los pavimentos asfálticos deteriorados o de mezclas nuevas que no han sido utilizadas por ser un excedente o por no cumplir con las especificaciones de proyecto, se mezclan en una central de fabricación con pétreos vírgenes, asfalto nuevo y/o agentes rejuvenecedores, en las propiedades adecuadas, para producir una nueva mezcla en caliente que cumpla con los requerimientos de calidad, resistencia y durabilidad exigidos para el tipo de capa en que será utilizada (Alarcón, 2003).

Una de las ventajas de reutilizar el material proveniente de las mezclas asfálticas es que se reduce el consumo de nuevos materiales para su fabricación, esto implica beneficios ambientales que incluyen la disminución de emisiones de dióxido de carbono junto con otros gases que afectan a calidad del aire, cuya acumulación produce un incremento en la retención de radiación solar cerca de la superficie terrestre; lo que causa aumentos en la temperatura y el calentamiento global, previene el deterioro de los bancos de material existentes, lo que representa una recuperación en el entorno físico de nuestro medio ambiente. Cabe destacar que también los volúmenes de vertido se reducen considerablemente, lo cual implica una reducción en los gastos de acopio, la contaminación y destrucción que esto implica.

El uso del pavimento asfáltico recuperado o RAP, como lo llamaremos a lo largo del proyecto por sus siglas en inglés (Reclaimed Asphalt Pavement), en las mezclas asfálticas nuevas tiene ventajas obvias para el medio ambiente y para la parte económica de los proyectos, lo que hace del reciclado de pavimentos asfálticos en planta en caliente sea una excelente práctica de sostenibilidad. Una de las ventajas de utilizar asfalto recuperado es que reduce la cantidad de cemento asfáltico virgen que sería necesario en la construcción de nuevas carreteras. Cuando el RAP se incorpora en un nuevo pavimento, el cemento asfáltico del pavimento antiguo se vuelve a

activar, formando parte del aglutinante que mantiene unidos los agregados pétreos de la mezcla asfáltica nueva.

Las mezclas asfálticas son el material ideal para la sostenibilidad de la construcción de pavimentos. Manteniendo sus propiedades de funcionabilidad que caracterizan a un pavimentos flexible, es suave al rodamiento, por lo que los vehículos consumen menos combustible y producen menos emisiones; es silencioso, por lo que construir paredes de absorción de ruidos no son necesarias para mitigar el ruido; es seguro, porque proporciona una excelente capacidad de agarre; y es duradera, por lo que el camino nunca necesitará ser eliminado o reemplazado por completo.

La reconstrucción total de un pavimento flexible se vuelve prácticamente en desuso con un pavimento asfáltico con material reciclado. El pavimento de asfalto reciclado se diseña y se construye para durar, sin necesidad de una rehabilitación o la reconstrucción de las capas inferiores que funcionan como soporte de la capa de rodadura, dejando solo una renovación periódica en la capa superficial expuesta al desgaste por el rodamiendo de los neumáticos del tránsito.

Refiriéndose al uso de técnicas de reciclado de mezclas asfálticas, las dependencias gubernamentales o encargadas del control de calidad exigen que las mezclas asfálticas recicladas se comporten igual o mejor que las mezclas convencionales. Uno de los inconvenientes que se presentan es debido a que los ensayos que se utilizan con mayor frecuencia no son representativos para definir con exactitud el desempeño de los materiales reciclados, es por este motivo que se hace necesario el uso de métodos nuevos que se ajusten de manera más precisa al comportamiento de mezclas recicladas.

Otro motivo para utilizar nuevos parámetros de evaluación en el diseño de mezclas asfálticas es el escaso número de factores que se utilizan en los métodos convencionales.

Este procedimiento que a pesar de aún no tener gran popularidad en México, en Estados Unidos de América y todo el continente Europeo cuenta con una gran experiencia. Durante los últimos años han desarrollado diferentes pruebas para determinar de una manera más exacta el comportamiento y desempeño de las mezclas asfálticas recicladas, lo que ha permitido realizar nuevos métodos y criterios de diseño con parámetros más precisos.

Tomando en cuenta toda la información anterior se decidió realizar una extensa investigación que nos permitiera conocer de manera exacta el comportamiento de las mezclas asfálticas recicladas en caliente. Para lo cual, era necesario evaluar las mezclas con las pruebas y equipos más modernos, lo que llevo a una búsqueda en el país del laboratorio más capacitado para realizar la investigación.

Contactamos al laboratorio SemMaterials México en Cholula, Puebla, que cuenta con equipo y tecnología para un análisis completo de concretos asfálticos, asfaltos tecnología SHRP (MP1) y diseño de mezclas grado Superpave hasta nivel 3. Como respuesta, se nos hizo la invitación para hacer una estancia de investigación y trabajar en uno de sus proyectos.

Con el apoyo y colaboración de sus técnicos y de sus laboratorios que están certificados en diseño de mezclas y caracterización de agregados por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), además de la certificación AMAAC-IMT (Grado Superpave No. 3 y Nivel 4 de Protocolo AMAAC) en Diseño de Mezcla, se realizó el proyecto de “Análisis de mezclas asfálticas recicladas en caliente bajo los parámetros de los ensayos de TSR, Módulo Dinámico y Energía de Fractura”.

Para realizar el análisis del comportamiento de las mezclas asfálticas se eligieron las pruebas de Energía de Fractura, Módulo Dinámico y TSR (Tensile Strength Ratio). Además, se pretende definir si estas pruebas reflejan la información necesaria para ser utilizadas como las pruebas de evaluación estándar para controlar y diseñar las mezclas asfálticas recicladas en caliente.

Con los resultados obtenidos se pretende impulsar el uso de la técnica de reciclado de mezclas asfálticas y concientizar que estas mezclas son una excelente opción en la construcción, rehabilitación o conservación de carreteras.

## **OBJETIVOS**

El objetivo general de esta tesis es determinar el desempeño de las mezclas asfálticas recicladas en caliente haciendo una comparativa con mezclas asfálticas con materiales vírgenes.

Es necesario cumplir con los siguientes objetivos particulares para lograr alcanzar el objetivo general, los objetivos particulares son:

- Analizar las características físicas básicas de la fracción gruesa y fina del agregado pétreo virgen mediante las pruebas de diseño y control de calidad que establece el Protocolo AMAAC.
- Determinar el contenido de asfalto y la granulometría que presenta el RAP al llegar a la planta.
- Comparar los resultados de los ensayos obtenidos de las mezclas asfálticas recicladas con las características de mezclas asfálticas con materiales vírgenes y determinar si su comportamiento es similar.
- Extender el conocimiento de las mezclas asfálticas recicladas en caliente y determinar hasta qué nivel la rigidez que sufre el RAP puede afectar el comportamiento de las mezclas.
- Definir criterios y recomendaciones para el diseño, fabricación y control de calidad de las mezclas asfálticas recicladas en caliente.
- Crear las bases para realizar un Protocolo de mezclas asfálticas recicladas en caliente.

## **CONTENIDO DE LA TESIS**

En el capítulo 1, se revisan los aspectos más relevantes de los pavimentos asfálticos y sus clasificaciones. Además, se describe las características más representativas de las mezclas asfálticas que conforman la capa de rodadura en los pavimentos asfálticos y los deterioros más habituales que se presentan en ellos. Por último se describen algunos de los métodos de rehabilitación más utilizados en México para la reparación de los fallos de los firmes asfálticos.

En el capítulo 2, se presenta la metodología de la técnica de reciclado de pavimentos asfálticos, sus aplicaciones a nivel mundial, la descripción de los materiales y equipos empleados, y por último, la secuencia del proceso de reciclado. También se mencionan algunos de los criterios y normas existentes para la fabricación de este tipo de mezclas.

En el capítulo 3, se describen los trabajos realizados en los laboratorios de SemMaterials México, en la ciudad de Puebla. Se analizan las características de los materiales empleados, el procedimiento para el diseño y fabricación de los especímenes, y la manera en como acondicionar y realizar las pruebas a los especímenes.

Además se describen las pruebas de laboratorio empleadas en el proyecto para la evaluación de las mezclas asfálticas que son Energía de Fractura, Módulo Dinámico y Resistencia al Daño Inducido por Humedad.

En el capítulo 4, se analizan los resultados de cada ensayo, comparando las características mecánicas de las mezclas asfálticas recicladas contra las mezclas con materiales vírgenes.

Por último, se exponen las conclusiones de los resultados obtenidos de las pruebas, se hacen recomendaciones en los procesos de diseño, fabricación y control de calidad para las mezclas asfálticas recicladas.

# **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO**

## **PAVIMENTOS ASFÁLTICOS. COMPOSICIÓN, DETERIORO Y REHABILITACIÓN**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

A lo largo de la historia las carreteras han conectado las ciudades principales con las zonas de intercambio comercial, de producción industrial, con centros de salud, de educación, lugares de recreación y vivienda, y cada día se realizan nuevas construcciones de estos sitios lo cual exige un constante crecimiento de la red carretera.

Las carreteras forman la principal vía de distribución en México, movilizan el 96.4 % de los pasajeros y el 57.5 % de la carga en todo el país, por lo cual la importancia de mantener las carreteras en óptimas condiciones se vuelve vital en el diseño y

conservación de un pavimento. El papel de las carreteras se ha vuelto fundamental para el desarrollo económico y social de una población.

De acuerdo con el Atlas de la Red Carretera de México, entre los años 2007 y 2008 se tenía una red asfaltada de 136,780 km mientras que la longitud carretera pavimentada con concreto hidráulico limitadamente llegaba a los 3,097 km, representando el 2.3 % de las carreteras revestidas con asfalto. Es claro el uso común de los pavimentos asfálticos en México; de la misma forma que ocurre en casi todo el mundo (Espinosa et al., 2012).

Pero el uso de pavimentos asfálticos se ha extendido, ya que no solamente se utilizan para construcción de carreteras y calles, sino también en pistas de aeropuertos, en estacionamientos, áreas deportivas, pistas de pruebas para vehículos, entre otras.

Las mezclas asfálticas asumen un papel fundamental en los pavimentos flexibles no sólo por los volúmenes requeridos en su construcción, sino porque constituyen la parte más costosa de los mismos y la superficie por la que transitan diariamente millones de vehículos, que resuelven gran parte de las necesidades de movilidad en las sociedades.

Por tal motivo, mantener en las mejores condiciones de servicio una vialidad se ha vuelto la mayor preocupación para reducir los costos de operación, una superficie de rodamiento en mal estado traerá consigo incrementos y retrasos en la transportación de productos.

## **1.2 PAVIMENTOS**

Se llama pavimento al conjunto de capas relativamente horizontales de materiales seleccionados y adecuadamente compactados; estructuradas de tal manera que reciban en forma directa los esfuerzos producidos por el tránsito y los transmite a los

estratos inferiores en forma disipada (Figura. 1.1), proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente.

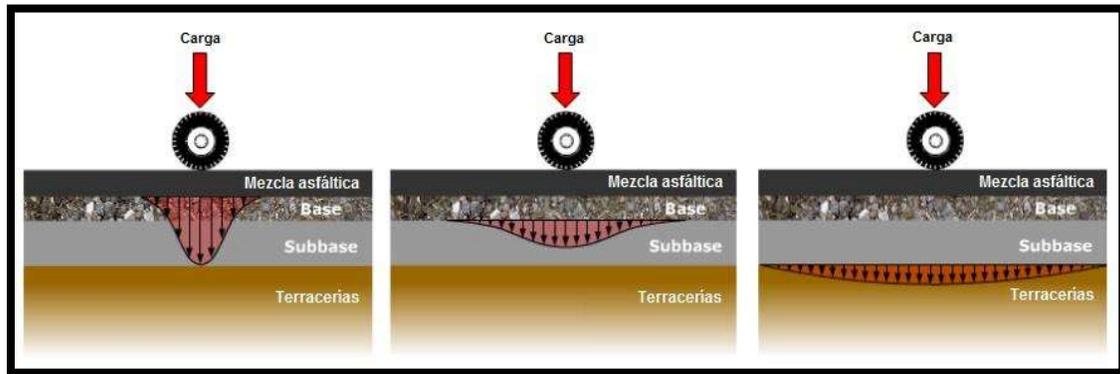


Figura 1.1. Tensiones producidas por el tráfico a un pavimento asfáltico en capas (Fuente: HAPI, Asphalt Pavement Guide).

Los pavimentos deben proporcionar una superficie de rodadura segura, cómoda y de características permanentes que soporten las cargas del tráfico rodado durante un período de tiempo determinado. Deben repartir las presiones impuestas por el tráfico pesado, de forma que a las terracerías sólo llegue una pequeña parte de aquellas, compatible con su capacidad de soporte y además deben proteger a las terracerías de la intemperie y en especial de la lluvia (Alarcón, 2003).

Los pavimentos deben de contar con una serie de características funcionales, entre las que destacan las referentes a la superficie del pavimento o capa de rodadura, las cuales afectan directamente a los usuarios. Las principales características superficiales que deben de cumplir los pavimentos son: resistencia al desplazamiento, una superficie regular tanto transversal como longitudinal, un nivel de ruido de rodadura bajo, una baja reflexión de luminosidad durante la noche y un rápido desalajo de agua.

Pero además existen características estructurales de los pavimentos, las cuales están relacionadas con las de los materiales empleados para su construcción, usados en sus diferentes capas y con sus espesores. Las diferentes propiedades intrínsecas de los

materiales y los distintos espesores de la capas dan lugar a discontinuidades de tensiones y/o deformaciones en los planos de contacto, por lo que el proyecto de una capa ha de armonizarse con el de las restantes a fin de conseguir un buen comportamiento estructural en conjunto.

Los pavimentos de carreteras se clasifican de acuerdo a los materiales que los componen y a la manera que tienen de transferir los esfuerzos y deformaciones generados por el tráfico.

Siguiendo los criterios tradicionales, suelen clasificarse en dos grandes grupos, pavimentos rígidos y pavimentos asfálticos o flexibles.

Los pavimentos rígidos son aquellos formados por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la sub-rasante o sobre una capa, de material pétreo seleccionado, la cual se denomina sub-base. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto el apoyo de las capas subyacentes ejerce influencia en el diseño del espesor del pavimento.

Los pavimentos asfálticos constan de una capa de mezcla asfáltica soportada sobre una capa de base y subbase compuestas de materiales granulares. La parte superior del pavimento, conocida como capa de rodadura, es la que soporta directamente las cargas del tráfico, aportando además las características funcionales. Tiene la función estructural de absorber los esfuerzos verticales y horizontales.

En este trabajo nos enfocaremos únicamente en los pavimentos asfálticos o llamados también “flexibles”.

### 1.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS

La mezcla asfáltica se puede definir como una combinación de agregados minerales, aglomerados mediante un ligante asfáltico y mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el comportamiento funcional de la misma como pavimento (Cepeda, 2002).

Para fines de diseño, se considera a la mezcla asfáltica como un sistema trifásico compuesto por una fase sólida, constituida por el agregado pétreo, una fase líquida, dada por el cemento asfáltico y una fase gaseosa que constituye el aire (PROTOCOLO AMAAC PA-MA-001, 2008). La figura 1.2 muestra el diagrama de fases.

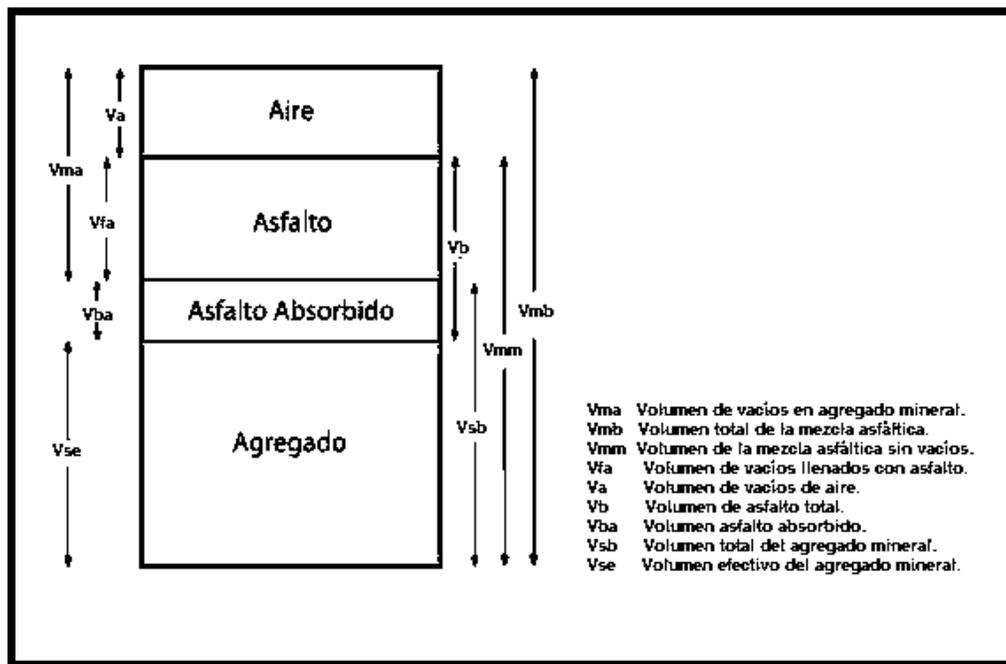


Figura 1.2. Diagrama de fases de una mezcla asfáltica con la definición de sus características volumétricas.

Existen varias clasificaciones de mezclas asfálticas, pero según la normativa del Instituto Mexicano del Transporte la primera clasificación se divide por el medio que se emplee para su incorporación o aplicación, como se indica a continuación:

- En caliente. Se utiliza en la elaboración de carpetas, mezclas, morteros y estabilizaciones. Su vehículo de aplicación es el calor y el material asfáltico utilizado es un cemento asfáltico.
- En frío. Se utiliza en la elaboración de carpetas, mezclas, morteros, riegos y estabilizaciones. Su vehículo de aplicación es el agua y el material asfáltico es utilizado es un emulsión asfáltica.

Las mezclas asfálticas en caliente se clasifican a su vez en:

- Mezcla asfáltica de granulometría densa. Es una mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre 37.5 milímetros (1½ in) y 9.5 milímetros (¾ in). Se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural.
- Mezcla asfáltica de granulometría abierta. Es una 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 12.5 milímetros (½ in) y 6.3 milímetros (¼ in). Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, no tienen función estructural y generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa.
- Mezcla asfáltica de granulometría discontinua, tipo SMA. Es una mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría discontinua, con tamaño nominal entre 19.0 milímetros (¾ in) y 9.5 milímetros (¾ in). Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, aunque también pueden utilizarse en capas inferiores en carreteras de alto tránsito.

La mezcla asfáltica en caliente se representa así, porque tanto el agregado pétreo, como el asfalto, se calientan antes del mezclado; es un tipo de mezcla compuesta por un 93 a 97 % de agregado pétreo y por un 3 a 7 % de asfalto, con respecto a la masa total de la mezcla. En el presente trabajo todas las mezclas realizadas serán del tipo de mezcla asfáltica en caliente.

#### **1.4 PROPIEDADES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

El diseño de una mezcla asfáltica consiste básicamente en la selección del tipo y granulometría del agregado a emplear, y de la selección del tipo y contenido de asfalto, de tal manera que se obtengan las propiedades deseadas en la mezcla y se satisfagan los requisitos específicos del proyecto. La selección apropiada de los materiales que constituirán la mezcla y de sus proporciones correctas, requiere el conocimiento de las propiedades más significativas de las mezclas, y de su influencia en el comportamiento del pavimento (Cepeda, 2002).

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la geología del material.

Las cualidades funcionales del firme residen fundamentalmente en su superficie, su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción. Para una aplicación específica e independientemente del procedimiento de diseño empleado, las propiedades relevantes en una mezcla asfáltica en caliente son:

- Estabilidad
- Durabilidad
- Flexibilidad
- Resistencia a la fatiga
- Resistencia al fracturamiento por bajas temperaturas
- Resistencia al daño por humedad
- Resistencia al deslizamiento
- Trabajabilidad

#### **1.4.1 Estabilidad**

Esta propiedad se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir la deformación y el desplazamiento, debidos a las cargas que resultan del tránsito vehicular. Un pavimento es estable cuando conserva su forma; y es inestable cuando desarrolla deformaciones permanentes, corrugaciones y otros signos de desplazamiento de la mezcla.

La estabilidad depende sobre todo, de la fricción interna y la cohesión. La fricción interna depende de la textura superficial, forma de la partícula, y granulometría del agregado; así como de la densidad de la mezcla, y la cantidad y tipo de asfalto; mientras que la cohesión depende del contenido de asfalto. La cohesión se incrementa con el incremento del contenido de asfalto, hasta un punto óptimo, después del cual el aumento en el contenido de asfalto forma una película demasiado gruesa en las partículas de asfalto, lo que produce una pérdida de fricción entre las partículas de agregado.

#### **1.4.2 Durabilidad**

Es la propiedad de la mezcla asfáltica que describe su capacidad para resistir los efectos del Intemperismo, como son: el aire, agua, temperatura. Estos pueden

provocar envejecimiento del asfalto, desintegración del agregado y desprendimiento de la película de asfalto del agregado. Una buena mezcla asfáltica no debe sufrir envejecimiento excesivo durante la vida en servicio. Esta propiedad se relaciona con el espesor de la película de asfalto, y con los vacíos de aire.

### **1.4.3 Flexibilidad**

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para amoldarse, sin sufrir agrietamiento o fisuración, a los asentamientos y movimientos graduales de la base y la subrasante. En ocasiones esta propiedad presenta conflictos con los requerimientos de estabilidad.

### **1.4.4 Resistencia a la fatiga**

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir cargas repetidas causadas por el paso de los vehículos. El agrietamiento por fatiga está relacionado con el contenido y la rigidez del asfalto. Aunque también debe señalarse que la resistencia a la fatiga depende en gran medida de la relación entre el espesor estructural de la capa y la carga.

### **1.4.5 Resistencia al fracturamiento por baja temperatura**

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no agrietarse en condiciones de bajas temperaturas. Depende principalmente de la rigidez del asfalto a bajas temperaturas.

### **1.4.6 Resistencia al daño por humedad**

Es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través de la mezcla asfáltica. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla

compactada, y por tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento.

#### **1.4.7 Resistencia al deslizamiento**

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no perder adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento, en particular cuando está húmeda. Una resistencia al deslizamiento baja se relaciona generalmente con las características del agregado y el contenido de asfalto, conocidas como macrotextura.

#### **1.4.8 Trabajabilidad**

Es la propiedad relacionada con la facilidad con que la mezcla asfáltica es colocada y compactada *in situ*. Una buena mezcla debe ser capaz de permitir su colocación y compactación, sin que se requiera un esfuerzo demasiado grande. Esta propiedad, generalmente depende de uno, o una combinación, de los siguientes factores: características del agregado, la granulometría, el contenido, y la viscosidad del asfalto.

Hay algunos otros factores que no siempre son tomados en cuenta en el diseño y conservación de los pavimentos, pero su efecto puede tener especial importancia en su deterioro, ya que ayudan a que se generen problemas como:

- La desenvuelta de las mezclas.
- La fisuración por esfuerzos térmicos.
- La fisuración y degradación superficial por efecto del hielo.
- La pérdida de capacidad portante de las terracerías en épocas de deshielo o lluvia.
- Los posibles deterioros en invierno por acción de fundentes químicos, etc.

## **1.5 DETERIOROS Y MODELO DE FALLA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Las carreteras se diseñan y se construyen para que estén en servicio por un determinado número de años, llamado horizonte de proyecto de la obra. Al concluir este período de tiempo, es necesario realizar una evaluación para determinar si necesitan trabajos de conservación, rehabilitación o un completo rediseño en la estructura del pavimento.

Cuando una mezcla asfáltica se utiliza para construir un pavimento, se encontrará sujeta a diversos factores que afectarán sus características iniciales y reducirán su vida útil. Estas acciones se dividen principalmente en el paso de los vehículos y el medio ambiente; y contribuyen en diferente medida al daño o falla de la mezcla. Las condiciones que presenta un pavimento cuando este pierde las características de servicio para las que fue diseñado se definirán como falla.

Existen dos clases de fallas que se presentan en los pavimentos:

- La primera, llamada “falla estructural”, consta de un colapso en la estructura del pavimento, de una o más de sus capas, lo que ocasiona una reducción en la capacidad de carga impuesta por el tráfico, y, en general, se debe a que el tránsito que ha soportado la construcción es mayor al que se calculó para su vida útil. Aunque en otras ocasiones, la falla estructural se presenta en forma prematura; es decir, mucho antes de terminar su vida útil y, entonces, se debe a espesores pequeños de pavimento, o que los materiales usados eran de mala calidad, y combinando uno de estos factores con un mal drenaje o una baja compactación.
- La segunda, es llamada “falla funcional”, consiste en deficiencias superficiales del pavimento a las que se asocian precisamente el índice de servicio, que afectan en mayor o menor grado la capacidad del pavimento de proporcionar al usuario un tránsito cómodo y seguro. De acuerdo con el tipo de camino del cual se trate, pues se puede tener una superficie de rodamiento con

deformaciones que son aceptables para caminos secundarios; pero inconvenientes para autopistas.

Los tipos de fallas no están necesariamente relacionados, pero pueden establecerse que cuando se presenta una falla estructural, también ocurrirá en un plazo más o menos corto la falla funcional. En ocasiones una falla funcional que no se atiende a su debido tiempo, puede también conducir a una falla estructural.

Entre los distintos sistemas de falla de las estructuras sometidas a esfuerzos encontramos el del ablandamiento del material de la misma, causado por la localización de deformaciones en un dominio espacial concreto de la estructura, de modo que, en lugar de haber un único estado tensión-deformación homogéneo, aparece un estado inelástico en la zona de localización de las deformaciones, permaneciendo el resto de la estructura en el dominio elástico (García, 2014).

En general, en la punta de una grieta, distinguimos una zona caracterizada por tener un comportamiento no lineal y que concentra el reblandecimiento del material, lo que conlleva una disminución en la resistencia de tensiones y un aumento de las deformaciones. Rodeando a esta zona se encuentra otra caracterizada por experimentar un endurecimiento que supone un mantenimiento o aumento en la resistencia de las tensiones con un aumento de las deformaciones. Dependiendo del tamaño relativo de estas dos zonas y de la estructura, podemos distinguir tres tipos de comportamiento distinto, según observamos en la figura 1.3:

- El primero de ellos, característico de los materiales frágiles, se caracteriza por un tamaño despreciable de las zonas de ablandamiento y endurecimiento respecto al de la estructura, de modo que la fractura se concentra prácticamente en un punto en la punta de la grieta. En este caso la relación tensión-deformación se mantiene lineal hasta el momento del alcance de la tensión máxima, instante en el que se produce una rotura frágil con rápida propagación de la fisura y la consiguiente pérdida de la resistencia de

tensiones sin deformación adicional. Este comportamiento se corresponde con el indicado en la figura 1.4 a.

- El segundo tipo, característico de los materiales dúctiles, se caracteriza porque el tamaño de la zona de endurecimiento es mucho mayor que el de la zona de ablandamiento, además de tener dicha zona de endurecimiento un tamaño considerable frente al de la estructura. En este caso, una vez alcanzada la tensión máxima, el material es capaz de mantenerse resistiendo dicha tensión mientras sigue deformándose de manera no lineal, antes de que se produzca la propagación de la fisura y la correspondiente pérdida de tensión, según observamos en la figura 1.4 b.
- Finalmente, en el tercer caso, característico de los materiales cuasi-frágiles, la zona de ablandamiento es considerablemente superior a la de endurecimiento y tiene un tamaño considerable respecto al de la pieza o estructura. El comportamiento no lineal se inicia antes de alcanzar la carga crítica, aumentando la tensión y la deformación hasta llegar a dicha carga. Una vez alcanzada la carga crítica se produce la localización de la fisura y comienza a disminuir la resistencia tensional considerablemente si bien se sigue deformando el material. Este comportamiento se corresponde con el indicado en la figura 1.4 c.

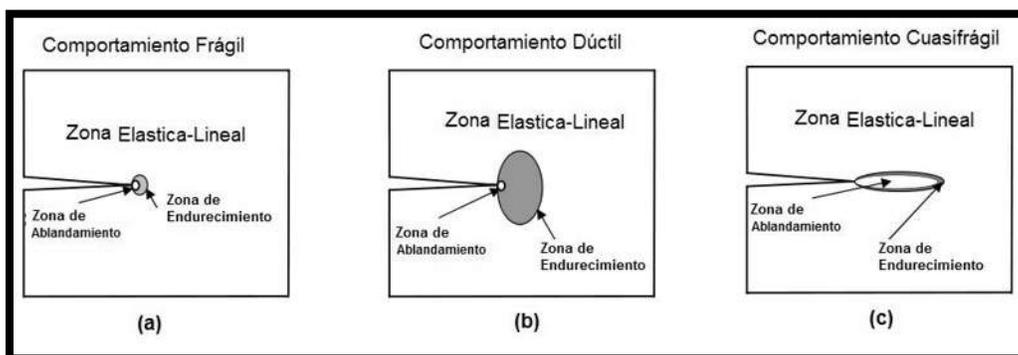


Figura 1.3. Zona elástica, zona de ablandamiento y zona de endurecimiento.

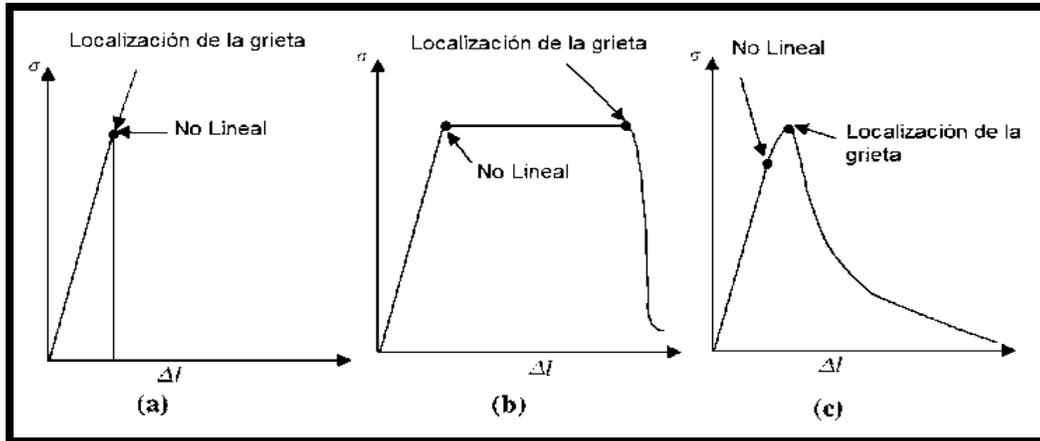


Figura 1.4. Comportamiento frágil, dúctil y cuasi-frágil.

En relación a los materiales cuasi-frágiles se distinguen tres zonas características en una fisura o fractura, según podemos observar en la figura 1.5:

- En la primera de las zonas, la zona fisurada, la fisura se encuentra abierta y el material totalmente degradado, siendo incapaz de transmitir tensiones.
- En la segunda zona, denominada zona en proceso de fractura, el material ya ha alcanzado la tensión máxima resistente y por tanto ha alcanzado la fractura, pero todavía es capaz de transmitir tensiones gracias a la presencia de puentes de material sano y a la superposición y distribución espacial del material pétreo.
- En la tercera y última zona, la zona sana, el material no ha sido sometido todavía a tensiones que hayan alcanzado la tensión máxima.

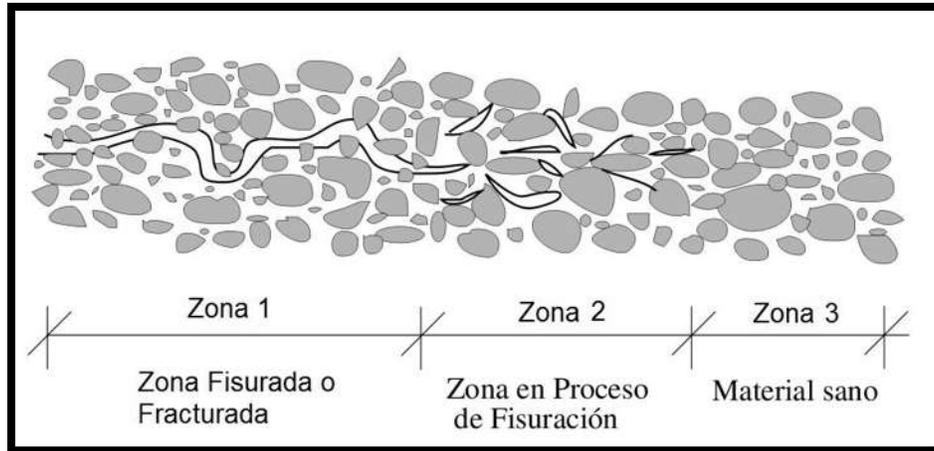


Figura 1.5. Zonas características de una grieta.

La zona en proceso de fisuración corresponde con la zona inelástica de ablandamiento y en los materiales cuasi-frágiles adquiere un tamaño considerable frente al de la pieza o estructura y muy superior al de la zona de endurecimiento, por lo que este comportamiento se corresponde con el tercer tipo mostrado en la figura 1.3 (c).

Las causas de que los pavimentos se degraden están en la insuficiencia de capacidad de los materiales que lo conforman para soportar sin fallar las tensiones y deformaciones que origina una determinada sollicitación (cargas del tráfico, modificaciones de forma debidas a asentamientos o a hinchamientos, o cambios de temperatura), o en la pérdida de cohesión de los aglomerantes asfálticos por acciones diversas como cambios de temperatura, por efecto del agua o el envejecimiento (ACESA, 1983).

El tipo de falla que se presente en un pavimento dependerá de cómo se relacionen en cada caso, los efectos del tráfico, las características mecánicas y los espesores de los materiales de las capas del pavimento, y el soporte de las capas inferiores.

## 1.6 DESCRIPCIÓN DE FALLAS EN PAVIMENTOS Y REHABILITACIÓN

Son muy numerosas las diferentes causas que pueden originar estos tipos de fallas, la presencia de condiciones no previstas en el diseño; como drenaje, tránsito, clima, defectos en la construcción, control de calidad inadecuado, o mala calidad de los materiales.

A continuación, se describen diferentes tipos de fallas que se presentan en el pavimento y sus causas.

### 1.6.1 Agrietamiento

Pueden presentarse longitudinalmente o transversalmente al eje de la carretera, con una abertura mayor a 3 mm (Figura 1.3). El agrietamiento puede deberse a defectos en la composición de la carpeta asfáltica, como podría ser:

- Endurecimiento del asfalto a temperaturas bajas.
- Baja ductilidad.
- Cargas aplicadas por tránsito superiores a las contempladas en el diseño.

La forma de reparar este tipo de falla varía desde el simple sellado de las fisuras hasta el bacheo en caja en zonas muy dañadas y la posterior construcción de una sobre carpeta en el las zonas menos dañadas de un pavimento muy agrietado.



Figura 1.3. Falla por agrietamiento.

### 1.6.2 Agrietamiento tipo cocodrilo

Este tipo de fallas se puede presentar en forma de grietas interconectados dando la apariencia de una piel de cocodrilo (Figura 1.4), dicha falla es causada por flexiones excesivas de la carpeta, colocada sobre una subrasante o sub-base inestables. Este tipo de fallas obliga a una atención inmediata ya que es falla progresiva que termina con la disgregación de la carpeta asfáltica.

Las reparaciones permanentes consistirán en remover la carpeta y lo que sea necesario de la base, sub-base, y subrasante de tal manera de obtener un soporte firme. Se efectúan los cortes rectangulares o cuadrados de tal manera que dos de sus lados sean perpendiculares a la dirección del tránsito. Las paredes de la excavación deberán ser verticales, la amplitud de la excavación deberá incluir toda el área agrietada y por lo menos unos 30 cm. más del pavimento en buenas condiciones. Debe instalarse sub-drenaje si la causa de la falla fue el agua. El siguiente paso consiste en aplicar un riego de impregnación a las paredes verticales; se llena la excavación con mezcla asfáltica y se compacta adecuadamente utilizando rodillos metálicos si el área es grande, o placa vibratoria si el área es pequeña.

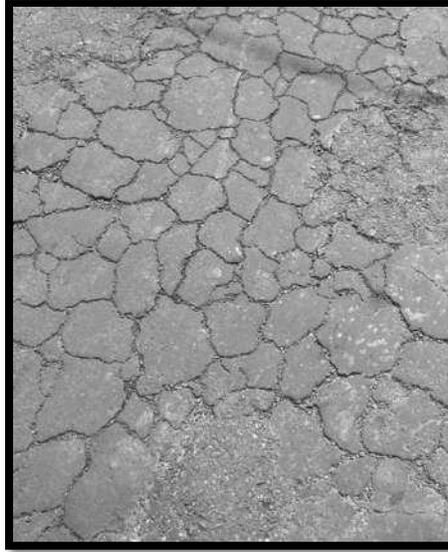


Figura 1.4. Falla por agrietamiento de piel de cocodrilo.

### 1.6.3 Distorsión o roderas

Estas fallas se presentan como deformaciones del perfil transversal, tanto por hundimiento a lo largo de las rodadas como por elevación de las áreas vecinas adyacentes a las rodadas (Figura 1.5). Las distorsiones generalmente se deben a:

- Cargas y repeticiones no previstas en el diseño.
- Contenidos elevados de asfalto.
- Mala calidad de las capas que subyacen a la carpeta debido a problemas de compactación.
- Exceso de finos.
- Plasticidad en los suelos donde se desplanta el pavimento.
- Una nivelación deficiente.
- Construir durante la presencia de lluvia.
- Mal desempeño en el proceso constructivo.
- El tránsito el frenado y arranque.
- Los asfaltos muy blandos.
- Diseño inadecuado de la mezcla.

Para la reparación de este tipo de fallas se rellena la rodera en forma continua para mantenimiento rutinario y se programa un mantenimiento periódico. En los casos más severos será necesario recuperar la capa de rodadura más parte de la base para estabilizar de 15 a 20 cm, con asfalto o cemento Portland y reforzar la estructura. Colocar nueva capa de rodadura del espesor necesario.



Figura 1.5. Falla por distorsión.

#### **1.6.4 Desprendimiento**

Esta falla se presenta por la pérdida parcial del agregado pétreo dejando expuestas áreas aisladas de la capa de apoyo (Figura 1.6), este tipo de falla se debe a un gran número de causas entre los que se podrían citar:

- Esparcido irregular del asfalto.
- Propiedades inadecuadas del asfalto.
- Agregado pétreo inadecuado por falta de adherencia (afinidad) con en el asfalto.
- Agregado sucio, con polvo adherido.
- Presencia de lluvia durante el esparcido o antes del fraguado del asfalto.
- Contenidos deficientes de asfalto.

- Humedad excesiva de las capas subyacentes.

La desintegración de la carpeta también se presenta en carpetas asfálticas por oxidación, o en carpetas relativamente recientes con escaso contenido de asfalto.

Las reparaciones de este tipo de daños pueden variar desde la simple aplicación de riego de sello con o sin agregados dependiendo de la magnitud del daño, hasta en ocasiones a una reconstrucción.



Figura 1.6. Falla por desprendimiento.

### 1.6.5 Disgregación

Esta es una falla de desintegración progresiva, consiste en la separación de los agregados pétreos o parte de la carpeta (Figura 1.7), desprendiéndose el material que forma la base en la que se apoya la capa de rodadura. Las causas que pueden originar esta falla son:

- Poca penetración (< 0.5 cm) del riego de impregnación en bases hidráulicas.
- Dosificación insuficiente de asfalto en bases tratadas con cemento asfáltico, aplicado en caliente, rebajado o emulsificado.
- Asfalto inadecuado o de mala calidad.
- Espesor insuficiente de la capa de rodadura.

- Baja compactación durante la construcción de las capas.
- Colocación de la carpeta en presencia de lluvia.
- Utilización de agregados sucios o contaminados.

Cuando la falla se encuentra en sus inicios, podrá efectuarse un mantenimiento preventivo, que consiste en un riego de mortero asfáltico, si la falla se encuentra muy avanzada, y la superficie es muy extensa se necesitará la colocación de una capa correctiva y una nueva capa de rodadura (carpeta asfáltica o tratamiento superficial).



Figura 1.7. Falla por disgregación.

### 1.6.6 Superficie lisa

Esta falla se caracteriza porque la superficie de la carpeta asfáltica pierde su macrotextura y se vuelve lisa (Figura 1.8), reduciendo la adherencia que existe entre el neumático y el pavimento. La superficie resbalosa es una de los problemas más serios en pavimentos en lo que concierne a accidentes. Este daño puede deberse en la carpeta a:

- Pulimento de los agregados.
- Desprendimiento de los agregados.
- Mal drenaje superficial.

- Exceso de asfalto en la dosificación.
- Uso de un asfalto muy blando.
- Derrame de solventes.

La reparación que generalmente se recomienda, si el daño es moderado es utilizar un tratamiento superficial para mejorar las condiciones superficiales, si el problema es muy grave será necesario un fresado superficial (< 1 cm) o la colocación de una nueva carpeta de rodadura.



Figura 1.8. Falla por alisamiento.

## 1.7 CONSERVACIÓN DE CARRETERAS

Las carreteras aún antes de ser terminadas requieren una atención constante a su conservación, ya que sus características especiales quedan expuestas al ataque permanente de agentes naturales y al efecto de cargas que soportan sus elementos estructurales. Por esto, es indispensable someterlas a una vigilancia continua y concederles especial atención a fin de mantenerlas en mejores condiciones de servicio. El estado en que se encuentren los caminos y en particular sus pavimentos influyen en forma decisiva en los costos de operación, que incluye el desgaste y

consumo de combustibles propios de los vehículos y su natural influencia en los precios de los artículos que se transportan, pero sobre todo en la seguridad, comodidad y tiempo de traslado de los usuarios.

Tomando en cuenta el constante aumento del número de vehículos y de sus velocidades de operación y cargas, se ha desarrollado un proceso de selección de alternativas en conservación de pavimentos asfálticos, las cuales se pueden resumir en cuatro fases:

### **1.7.1 Descripción de las condiciones existentes en el firme**

- Recopilación de información preliminar (localización y longitud del tramo, clase de carretera, sección del firme existente, geometría de la carretera, características del tráfico, características de las capas inferiores del firme).
- Descripción del firme (condiciones superficiales y condiciones estructurales).

### **1.7.2 Identificación de las alternativas viables de rehabilitación**

- Conservación normal. Comprende los trabajos rutinarios y sistemáticos necesarios para mantener en buenas condiciones y en lo posible con las mismas características, todas las partes y elementos estructurales con las cuales se construyó la carretera, como son: superficie de rodamiento, acotamientos, drenaje, taludes, zonas laterales y señalamientos; en lo relativo a mantenimiento de la carpeta asfáltica consiste en trabajos de: bacheos, taponamiento de grietas, nivelaciones, sobrecarpetas y riegos de sello.
- Rehabilitación o reconstrucción. Incluye aquellas obras requeridas para reponer totalmente o en alguna de sus partes, un tramo de carretera, sin alterar sus especificaciones geométricas o estructurales.

- Mejoramiento o modernización. Se modifican las características geométricas y estructurales del camino especialmente en lo concerniente a pavimentos y puentes, para aumentar su nivel de servicio y resolver los problemas originados por incrementos en el volumen de tránsito y en las cargas de vehículos.

### 1.7.3 Evaluación de las alternativas de rehabilitación estructural

Una vez se ha tomado la decisión de mejorar la capacidad estructural del firme, se dispone de varias técnicas diferentes para llevarla a cabo. Entre las más importantes podríamos comentar las siguientes:

- *Técnicas convencionales o clásicas.* Se trata de las técnicas usuales que se utilizan de forma generalizada en la actualidad. Con estos métodos, los deterioros más importantes se corrigen colocando una capa de refuerzo superficial a base de materiales vírgenes. Si los deterioros son muy importantes, se procede a eliminar el grosor defectuoso y se substituye por nuevas capas bituminosas.
- *Técnicas de reciclado.* Este tipo de métodos se basan en la reutilización de los materiales del pavimento deteriorado. Junto con estos materiales envejecidos, se pueden añadir otros elementos (agentes rejuvenecedores, nueva mezcla bituminosa, etc.). Estas técnicas se pueden dividir en varios tipos diferentes, que exponemos brevemente a continuación:
  1. Reciclado “in situ” en caliente. Se reutiliza la totalidad de los materiales extraídos del firme envejecido mediante un tratamiento con aportación de calor que se realiza en el mismo lugar de la obra. El pavimento se calienta mediante unos quemadores y se fresa un grosor determinado. Este material es mezclado normalmente con agentes químicos rejuvenecedores y con nueva mezcla. Finalmente, la nueva mezcla se extiende y se compacta mediante procedimientos convencionales.

2. Reciclado “in situ” en frío con cemento. Este es un procedimiento que se basa en el fresado en frío de un cierto grosor del firme envejecido y el mezclado de este material con un conglomerante hidráulico (cemento normalmente). El nuevo material se extiende y se compacta definiendo una sólida base para posteriores refuerzos.
3. Reciclado “in situ” en frío con emulsiones bituminosas (RFSE). Esta técnica, permite reutilizar la totalidad de los materiales extraídos del firme envejecido en condiciones técnicas, económicas, sociales y ambientales muy favorables.
4. Reciclado en planta. Este procedimiento permite reciclar el conjunto o sólo una cierta proporción de material envejecido mediante una central asfáltica adaptada. Al ser el porcentaje de material envejecido relativamente bajo, esta metodología permite corregir problemas graves de dosificación o calidad de los materiales.

#### **1.7.4 Selección de la alternativa óptima**

Tras un detenido análisis de todas las alternativas existentes se debe elegir la que se estime más conveniente en cada situación. Una vez conocida la técnica a emplear, un estudio de laboratorio determina la fórmula de trabajo (dosificación de todos los elementos de la mezcla reciclada) y el procedimiento de construcción.

Los problemas que todavía en la actualidad afectan el buen mantenimiento de los pavimentos son:

- Falta de oportunidad en la ejecución de los trabajos, los cuales se hace con frecuencia en época de lluvias o cuando los pavimentos se encuentran muy deteriorados.
- Empleo de materiales pétreos de baja calidad o de productos asfálticos inadecuados.
- Utilización de procedimientos constructivos obsoletos.

En México, la cultura de la conservación y mantenimiento de carreteras se ha venido desarrollando en los últimos años sin alcanzar aún el nivel deseado. Por ello la necesidad de desarrollar y aplicar nuevas técnicas que puedan satisfacer las necesidades que exigen nuestras carreteras. Es así que la técnica de reciclado de pavimento se vuelve una excelente opción para mantener en óptimas condiciones las carreteras y proporcionar un tránsito cómodo y seguro a los usuarios que las transitan.

## **CAPÍTULO 2. MARCO METODOLÓGICO**

### **RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

#### **2.1 PERSPECTIVA HISTÓRICA DEL RECICLAJE**

La industria de la pavimentación en Estados Unidos de América ha tenido un gran éxito con los pavimentos de asfalto reciclado. El reciclaje de pavimentos asfálticos se remonta a 1915, pero no se convirtió en una práctica común hasta la década de 1970 cuando los precios del asfalto se dispararon como consecuencia del embargo petrolero árabe. Los diseñadores de pavimentos asfálticos reaccionaron ante esta situación mediante el desarrollo de métodos de reciclaje para reducir la demanda de ligante asfáltico, y así, reducir los costos de pavimentación con mezclas asfálticas.

En España, desde el año 2007 hasta el año 2001, se llevó el proyecto de Investigación Estratégica de Carreteras más Seguras y Sostenibles, mejor conocido como Proyecto Fénix. El objetivo principal de esta investigación se basa en crear los conocimientos

técnicos necesarios para la obtención de tecnologías en la construcción infraestructura carretera que minimicen el impacto medioambiental y favorezcan la fabricación de mezclas asfálticas recicladas en planta en caliente.

Muchas de las prácticas que se desarrollaron inicialmente durante ese período están todavía en uso, hoy en día ya se han convertido en parte de las operaciones de cotidianas para la construcción y rehabilitación de pavimentos.

Los beneficios del reciclaje incluyen ahorros económicos y ambientales. Los beneficios ambientales incluyen la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de combustible debido a la reducida extracción y transporte de materiales vírgenes, una baja demanda de recursos no renovables, además de menos vertederos para la eliminación de los desechos de pavimentos. Los beneficios económicos incluyen ahorro en los costos de los materiales al sustituir un porcentaje de los volúmenes utilizados con material reciclado, así como la reducción de costos asociados con el transporte de materiales vírgenes al sitio de la construcción.

Durante más de tres décadas, los dos principales objetivos de las mezclas asfálticas reciclados han sido 1) las mezclas que contengan RAP deben cumplir los mismos requisitos que una mezcla compuesta de materiales vírgenes, y 2) la mezcla que contenga RAP debe de comportarse igual o mejor que las mezclas con materiales vírgenes.

Encuestas recientes han informado de que en los E. U. A. el contenido medio de RAP en nuevas mezclas asfálticas es de alrededor de 12 % a 15 %. Uno de los objetivos establecidos por la Asociación de Pavimentos de Asfalto Nacional (NAPA) es aumentar el contenido promedio de RAP a un 25 % a finales de 2013.

## **2.2 INTRODUCCIÓN**

El pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y del medio ambiente. Estos dos factores, junto con el envejecimiento natural de los materiales, hacen que el pavimento sufra un proceso de deterioro. Este envejecimiento y deterioro del firme conlleva una disminución paulatina en los niveles de seguridad y confort del tráfico, que al sobrepasar ciertos valores hacen necesaria una operación de conservación o rehabilitación.

La conservación de la red carretera es en la actualidad un aspecto de gran importancia debido a los recursos que moviliza. El presupuesto necesario para el mantenimiento, así como los problemas ambientales que de él se derivan, justifican la búsqueda de nuevas técnicas que permitan reducir costos y sean respetuosas con el medio ambiente. En este contexto, el reciclado de pavimentos asfálticos, como medio de racionalizar los recursos, toma un renovado protagonismo y se convierte en una necesidad.

La importancia de los pavimentos asfálticos radica en la gran cantidad de kilómetros construidos en la red carretera, además de que los materiales que lo componen son totalmente reciclables. Un pavimento asfáltico se compone de aproximadamente de 95 % de agregados pétreos (grava, arena y finos) y un 5 % de cemento asfáltico. Cuando un pavimento asfáltico se reutiliza en una nueva mezcla de asfalto, el viejo cemento asfáltico se rejuvenece convirtiéndose en parte activa del aglutinante que contiene la nueva mezcla, al igual que el antiguo agregado se convierte en parte del contenido total. Estas propiedades singulares del asfalto hacen de los pavimentos flexibles únicos y renovables.

Tras décadas de investigación e ingeniería se ha mejorado la eficiencia de los costos de convertir asfalto viejo en un recurso reutilizable que refleje un ahorro tangible. Hoy en día, los ingenieros de pavimentos, agencias gubernamentales y contratistas

consideran el asfalto viejo como un activo, la tendencia al reciclaje y la reutilización continúan ganando impulso.

El reciclado de mezclas asfálticas se perfila como una de las tecnologías de futuro que permitirá un impacto ambiental cada vez menor de las infraestructuras viarias. Básicamente se trata de aprovechar el material que se obtiene en la operación de fresado de capas asfálticas en pavimentos que ya han llegado al final de su ciclo y precisan una rehabilitación (Figura 2.1). Este material obtenido en el fresado recibe el nombre de RAP, por sus siglas en inglés (Reclaimed Asphalt Pavement).



Figura 2.1. Máquina recuperadora de pavimento asfáltico, Av. Ventura Puente.

El RAP se define como el pavimento asfáltico que ha cumplido su vida útil, que ha sido fresado o extraído y posteriormente triturado, y sus propiedades dependen directamente de varios factores como: el tipo de mezcla asfáltica del que proviene, la metodología empleada en su extracción, la capa del pavimento que se extrajo, o bien, del proyecto que proviene, lo que produce generalmente una heterogeneidad en el material, implicando algunas variaciones significativas en cuanto a la calidad de agregados pétreos, contenido y tipo de asfalto adherido, lo cual puede influir en

homogeneidad de la mezcla final que se desea fabricar, sobre todo cuando el RAP se emplea en porcentajes altos (Valdés *et al.*, 2008).

Frecuentemente, en las mezclas recicladas se utilizan porcentajes de RAP que van del 10 % al 30 % y según lo señalado en numerosas investigaciones, para estos contenidos de reciclado, las mezclas tienen un comportamiento similar a las mezclas convencionales (Kandhal *et al.*, 1995; McDaniel, *et al.*, 2000; Miró y Pérez, 2002; Alarcón y Pérez, 2003). Sin embargo, hoy en día, en algunos proyectos de rehabilitación se requiere reciclar a porcentajes mayores. Utilizando íntegramente los residuos generados producto del fresado o demolición de los pavimentos asfálticos. Desarrollando así, una construcción sostenible que minimice el gasto energético y de recursos naturales, mediante el aprovechamiento íntegro tanto del asfalto adherido como del agregado pétreo contenido en el RAP.

### **2.3 ASFALTO ENVEJECIDO**

Uno de los factores que más preocupa la estabilidad y durabilidad de un pavimento es el envejecimiento que sufre el asfalto. El envejecimiento del asfalto es un proceso de naturaleza fisicoquímica que altera su composición química y su estructura coloidal y que se manifiesta en la práctica por un endurecimiento y una pérdida de sus características mecánicas y aglomerantes.

Los principios que dominan el comportamiento de los asfaltos pueden explicarse teniendo en cuenta una serie de principios básicos. El asfalto está compuesto fundamentalmente por cinco grupos de componentes (Tabla 2.1). Cada grupo está formado por multitud de compuestos químicos y se comporta de una manera predecible.

Para mantener la estructura fisicoquímica del asfalto es importante que cada uno de los cinco grupos presente una relación muy estrecha, lo que asegurará un buen comportamiento en carretera.

Tabla 2.1. Componentes del asfalto (Fuente: Proyecto Fénix, Monografía 1).

Fracción	Descripción	Reactividad Química	Función Principal	Grupo al que pertenece
Asfaltenos (As)	Productos de condensación. Presentan el mayor peso molecular.	Baja	Agente de estructura	Asfaltenos
Bases nitrogenadas (Polares) (N)	Componentes nitrogenados de los maltenos.	Alta	Peptizante	Maltenos
Primeras Acidafinas (A1)	Hidrocarburos o resinas aromáticas.	Alta	Disolvente	Maltenos
Segundas	Hidrocarburos	Baja	Disolvente	Maltenos
Acidafinas (A2) Saturados (P)	Nafteno aromáticos. Hidrocarburos saturados o parafinas.	Baja	Gelificante	Maltenos

## 2.4 PROCEDIMIENTOS PARA RECUPERAR UN PAVIMENTO

El RAP se puede obtener de varias maneras. El método más común es a través de operaciones de fresado. Otra fuente común es la demolición total del pavimento. A continuación se analizarán las diferentes fuentes de generación de RAP.

### 2.4.1 Fresado de un pavimento

El fresado tiene una parte benéfica dentro de la rehabilitación de un pavimento asfáltico. Estas son las ventajas del fresado:

- Elimina las capas de pavimento en deterioradas.
- Mantiene la altura adecuada entre el pavimento y la parte baja de los puentes, evita el aumento de peso por acumulación de capas de pavimento en tableros de puentes.
- Evita llenar los bordillos y las bajadas de agua en las entradas de drenaje.
- Restaura el grado de rugosidad y el perfil del pavimento.
- Es un proceso de rehabilitación eficaz que se puede realizar dentro de un corto periodo, evitando un cierre prolongado de los carriles de la carretera.

### 2.4.2 Selección de la profundidad de fresado

La selección de la profundidad de fresado es una decisión del proyecto en la planificación de la rehabilitación de un pavimento. A menudo, la profundidad de fresado se basa en un examen visual de los núcleos extraídos para determinar la profundidad de grietas en la superficie y/o la ubicación de capas débiles. La eliminación de estas capas deterioradas o débiles ayuda a lograr un mayor rendimiento a largo plazo del recubrimiento aplicado.



Figura 2.2. Núcleos extraídos de campo.

### **2.4.3 Inspeccionar el proceso de fresado**

Los procesos de fresado deben ser examinados cuidadosamente para asegurarse de que el material fresado no esté contaminado con tierra, material de base, geotextiles, u otros residuos. Esto es particularmente importante para los fresados profundos o el fresado en los hombros o vías ensanchadas. Los materiales fresados que se contaminan deben usarse solamente como material para acotamientos y deben ser almacenadas por separado de RAP que se utilizará en mezclas asfálticas. Un límite máximo recomendado de material perjudicial contenido en el RAP es de un 1 %.

### **2.4.4 Desglose Agregada Durante Fresado**

Las máquinas de fresado remueven las capas de pavimento al impactar con los dientes de fresado montados en un tambor que gira a 200 rpm (Figura 2.3). Los impactos rompen y disgregan el pavimento, al arrancar a través del asfalto las partículas. La trituración de las partículas del agregado hace que la gradación del material fresado sea más fina que la gradación de los materiales de las capas de pavimento original.

La técnica de fresado tiene el inconveniente de que el tamaño de partículas obtenidas tiene una gran variabilidad, esto a causa de la dureza y fragilidad del agregado pétreo, de la rigidez del asfalto (la temperatura del pavimento en el momento del fresado), de la velocidad de la máquina de fresado y de la profundidad del corte.



Figura 2.3. Dientes del tambor de fresado.

#### **2.4.5 Demolición de un pavimento**

El RAP también se puede obtener de la demolición completa de un pavimento existente usando una excavadora o retroexcavadora. Este proceso se limita normalmente a pequeñas áreas de pavimento. Además, es un proceso lento y da como resultado grandes trozos de pavimento que pueden ser más difíciles de procesar para utilizarse como material reciclado. Cuando los escombros del pavimento están contaminados con material de capas subyacentes y/o el suelo de desplante, es mejor que este material sea triturado y utilizado para construcción de carriles de acotamiento (Figura 2.4) o como material en la capa de base.

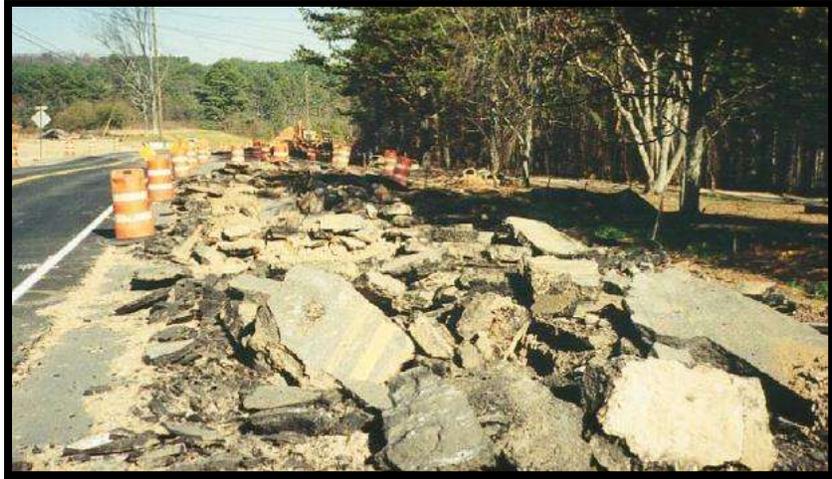


Figura 2.4. Carril de acotamiento.

## 2.5 CONTAMINACIÓN DENTRO DEL RAP

Es importante que los acopios de RAP se mantengan libres de contaminantes desde el principio de su almacenamiento. Es fácil entender que pueda crearse una mala percepción con respecto al RAP si se encuentra basura, vegetación u otros materiales que alteren el material, o si durante la puesta en obra de un pavimento de mezcla asfáltica compuesta con RAP aparece basura durante su tendido. Los conductores de los camiones que acarrear el material en el patio de maniobras de la planta deben estar claramente instruidos de donde volcarán la carga de manera que los desechos de construcción no deseado no terminen en los acopios de RAP, además, deben de limpiar las camas de los camiones antes de transportar material fresado o RAP utilizable. El personal de control de calidad de la planta y el operador del cargador también deben monitorear continuamente los acopios de RAP para asegurarse de que no contengan materiales nocivos. Si se encuentran contaminantes, deben de ser sacados de inmediato para que no se cubran con nuevo RAP limpio.

## **2.6 ALMACENAMIENTO Y PROCESAMIENTO DEL RAP**

Una mala operación en el almacenamiento y acumulación de los acopios de RAP es comúnmente mencionada como una razón por la que las autoridades son renuentes a aumentar los contenidos de RAP permisibles en las mezclas asfálticas. En esta sección se ofrece una guía sobre la administración de inventarios de RAP y opciones para su almacenamiento, trituración y cribado. Las buenas prácticas del manejo de los materiales siempre deben ser parte del programa de control de calidad para cualquier operación de producción de mezcla asfáltica. Para la producción de mezclas con alto contenido de RAP es esencial tener excelentes prácticas de manejo de materiales.

La administración de RAP debe comenzar con un análisis del inventario de la cantidad de material disponible y mezclar la producción. En este análisis es importante establecer metas realistas para la cantidad de RAP que se puede utilizar en una planta en particular. El análisis incluye cuatro pasos:

1. Un inventario de RAP disponible y de RAP genera al año.
2. Un resumen de las mezclas producidas al año por tipo de mezcla y por cliente.
3. Determinar la cantidad máxima de RAP que se puede utilizar.
4. Una comparación de la cantidad de RAP disponible a la cantidad de RAP necesario.

Se debe tener en cuenta que en este contexto, el contenido de RAP se refiere al material como un porcentaje de la mezcla total. Algunas agencias ahora tienen limitaciones específicas basadas en el porcentaje de asfalto de RAP en el contenido total de asfalto, estas especificaciones tienen importancia cuando se trata de cambiar el grado de asfalto virgen en la mezcla reciclada. Sin embargo, para un análisis de inventario, la expresión más común de contenido de RAP es representado en el porcentaje total de la mezcla.

Una de las primeras decisiones en la administración del inventario de RAP debe ser si es conveniente almacenar todo el material de RAP en un solo acopio o crear distintos

acopios, separados e identificados dependiendo del tipo de proyecto del cual provenga. La decisión probablemente dependerá de los siguientes factores:

- Si la dependencia estatal o local permite en sus especificaciones que las mezclas asfálticas producidas contengan RAP proveniente de distintos proyectos.
- Si la dependencia estatal o local permite que los acopios puedan estar formados de RAP de distintos proyectos o solo de un proyecto a la vez.
- Si el RAP es probable que se encuentre contaminado o no.
- El espacio disponible en el sitio de la planta para el procesamiento de RAP y su almacenamiento.
- La cantidad de RAP proveniente de un solo proyecto.

Algunas dependencias sugieren que durante una rehabilitación de una carretera donde se usará una mezcla asfáltica reciclada, el RAP contenido en la mezcla provenga del mismo proyecto. Esta limitación se utiliza para asegurar que el agregado pétreo y el asfalto contenido en el RAP sean de la misma calidad que los nuevos materiales.

Otro requisito que algunas agencias imponen sobre los acopios de RAP es que ningún material adicional se puede agregar a un acopio de RAP una vez almacenado y probado. Esto se conoce como un acopio de RAP "cautivo". Algunas agencias toman este mismo enfoque con los acopios de agregados pétreos vírgenes. El enfoque opuesto y más común es permitir que los acopios se estén reponiendo continuamente con material nuevo. La mayoría de las agencias utilizan este enfoque para agregados vírgenes porque hay otros controles de prueba agregada en la fuente. Esto es apropiado para RAP también si la consistencia se puede establecer a través de un plan de control de calidad del RAP.

Los objetivos básicos del procesamiento y trituración de RAP son:

1. Crear un acopio uniforme de material a partir de una recolección de diferentes materiales de RAP provenientes de diversos proyectos.
2. Separar o triturar los grandes bloques de RAP a un tamaño que pueda ser eficiente para ser incorporado a las mezclas nuevas.
3. Durante el proceso de trituración procurar minimizar la generación de material de tamaño nominal P200.

Opciones de procesamiento recomendadas:

1. Almacenar el material fresado de un proyecto en un acopio específico.
2. Muestrear y probar algunos acopios de material fresado para determinar la granulometría con la que llegó al lugar de almacenamiento y comprobar el tamaño máximo de las partículas.
3. Si el tamaño máximo de las partículas del material fresado, es demasiado pequeña como para su uso en el diseño de la mezcla asfáltica nuevas, se recomienda no procesar aún más el material.
4. Si el tamaño máximo de las partículas es demasiado grande para las mezclas deseadas, entonces será necesario:
  - a. Fraccionar el RAP sobre un tamiz igual o menor que el tamaño máximo de partícula deseado para el diseño de la mezcla asfáltica. Almacenar el RAP que pasa a través del tamiz y realizar las pruebas de caracterización de las propiedades del material. El material retenido se acumula en otro sitio para su uso en mezclas donde el tamaño máximo del agregado para el diseño sea mayor.
  - b. Triturar el material fresado para que pueda reducirse hasta un tamaño de partícula lo suficientemente pequeño para pasar a través del tamiz deseado. Esta es la opción menos deseable, ya que en el proceso de trituración se genera mucho polvo adicional, que puede obstaculizar gravemente la

cantidad de RAP que puede ser utilizado en diseños de mezcla. Cuando un contratista quiere aumentar el contenido de RAP a menudo se ve limitado por los requisitos en el diseño de la mezcla como son, vacíos en el agregado mineral o el contenido de polvo.

5. Si el material de RAP proviene de distintos proyectos será necesario realizar varios mezclados con ayuda de excavadoras, tractores o algún otro proceso que pueda homogenizar por completo el material. Esto evitará tener grandes variaciones en los contenidos de asfalto y la granulometría del material.

Durante el proceso de trituración de RAP se creará más agregado fino, lo mejor es configurar la operación de trituración para que el RAP sea cribado antes de entrar en la trituradora. Esto permitirá que las partículas más finas de RAP que pasen por el tamiz ya no pasen por la trituradora. La figura 2.5 muestra una unidad portátil de trituración de RAP que está equipado con un tamiz justo antes de la entrada de la trituradora. Sólo las partículas de RAP retenidas en el tamiz pasarán a través del proceso de trituración.

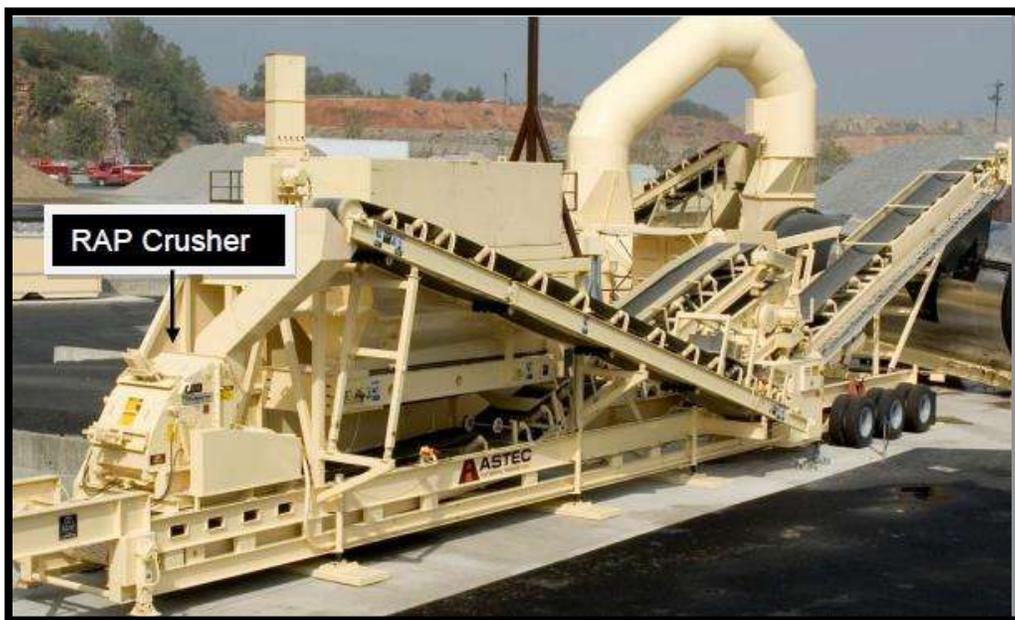


Figura 2.5. Planta procesadora de RAP.

Algunas unidades de trituración se configuran de manera que la todo el material de RAP es transportado desde la bandeja alimentadora hasta la trituradora, seguido por un circuito de recirculación después de la trituradora. El circuito de recirculación está diseñado para devolver las partículas más grandes que no pasan a través del tamiz de vuelta a la trituradora. Sin embargo, como todo el material debe pasar por la trituradora en la primera pasada, hay una gran probabilidad de que la trituración se producirá para algunas partículas más pequeñas que no necesitaban ser reducidas.

### **2.6.1 Tipos de trituradoras**

Existe una gran variedad de tipos de trituradoras se utilizan para el procesamiento de RAP. Las trituradoras que tienen mejores resultados son las de impactadores de eje horizontal (HSI) y los rompedores de tipo de molino o de rodillo son hechos específicamente para el procesamiento de RAP y están diseñados para romper los pedazos de pavimento o aglomeraciones de RAP en lugar de fracturar y reducir el tamaño del agregado pétreo.

### **2.6.2 Clima**

La humedad y la temperatura pueden afectar la trituración y el cribado de RAP. Cuando el RAP está húmedo y/o las temperaturas son calientes, el RAP tenderá a ser más pegajoso y se acumulara en las bandas alimentadores, en las mallas de los tamices, además el RAP fino se pega en las correas transportadoras acumulándose por debajo. Esto no sólo requiere más mantenimiento de las unidades de procesamiento y de los sistemas de alimentación para la producción de las mezclas, sino que también puede afectar el tamaño de la granulometría y el contenido de asfalto en el RAP.

### **2.6.3 Separar por fracciones el RAP**

El separar el RAP por fracciones es un proceso en el que se tamiza el RAP, en general se separa en dos o tres tamaños todo el material, una de las principales ventajas de dividir el RAP por fracciones de tamaño es que durante el diseño de las mezclas asfálticas con material reciclado es más fácil compensar la granulometría utilizando el RAP por fracciones que utilizándolo tal cual se obtiene de la obra, esto nos permitirá no sobrepasar ningún límite o punto de control de diseño haciendo cumplir los requisitos. Los tamaños suelen separarse en partículas mayores a 1.9 cm (3/4") o 0.95 cm (3/8"), partículas entre 0.95 cm (3/8") y 0.48 cm (3/16"), y menores de 0.48 cm (3/16"). Es recomendable que el material mayor a 1.9 cm (3/4") de tamaño sea devuelto a la trituradora, y el material triturado regrese luego a la unidad de cribado.

La decisión de fraccionar en diferentes tamaños el RAP será elegida por el productor de la mezcla, esta no se trata de una especificación aunque las agencias especializadas en el uso de RAP en mezclas asfálticas en caliente han comenzado a exigir el fraccionamiento de RAP.

## 2.6.4 Ventajas y desventajas de las diferentes opciones de procesamiento RAP

La Tabla 2.1 enumera las posibles ventajas y desventajas de las diferentes opciones de procesamiento de RAP.

Procesos	Ventajas	Desventajas
Uso de RAP sin tratamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evita más aplastamiento de las partículas de agregado de RAP, lo que puede permitir un mayor contenido de RAP en las mezclas.</li> <li>• Menor costo de opciones de procesamiento de RAP.</li> <li>• Fresados de grandes proyectos son probable que tengan un contenido de gradación y asfalto más constante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de múltiples acopios de RAP en la planta.</li> <li>• El material fresado de proyectos individuales son diferentes. Por lo tanto, cuando un acopio de fresado en particular, se agota, deben ser desarrollados nuevos diseños de mezcla con otro acopio de RAP.</li> </ul>
Cribado de RAP sin previa trituración	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limita la trituración de las partículas de agregado de RAP, lo que reduce la generación de polvo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pocas unidades de trituración y cribado de RAP están configuradas para preseleccionar RAP.</li> </ul>
Trituración de RAP a un solo tamaño	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite el RAP procesado ser utilizado en muchos diferentes tipos de mezclas asfálticas.</li> <li>• Los materiales de RAP obtenidos de múltiples fuentes generalmente proporcionan una buena uniformidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiende a aumentar el contenido de polvo en los acopios de RAP, lo que puede limitar la cantidad de RAP que se puede utilizar en los diseños de mezclas.</li> </ul>
RAP separado por tamaño de partícula	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizando acopios de RAP por tamaño de partícula proporciona una mayor flexibilidad en el desarrollo de diseños de mezcla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere más espacio en planta para múltiples acopios.</li> <li>• Puede generar un exceso de un solo tamaño de RAP si los diseños de mezcla no se equilibran.</li> </ul>

### **2.6.5 Almacenamiento para minimizar la segregación**

Al igual que con los agregados vírgenes, hay un potencial de que los materiales de RAP a sufran segregación durante su almacenamiento. Este es un problema común cuando los acopios se construyen utilizando bandas transportadoras fijas que permiten a las partículas de RAP caer largas distancias hasta el acopio. Las partículas más grandes tienen más energía cinética y tenderán a rodar hacia abajo, hacia la parte inferior de la reserva. Esto da lugar a partículas más gruesas con un contenido de asfalto más baja en la base de los acopios y material más fino con mayor contenido de asfalto en la parte superior del acopio. Este problema puede ser minimizado mediante el uso de transportadores de tipo de indexación que se extienden y aumentan el extremo de la banda transportadora como el tamaño del acopio aumenta. Si la segregación se aprecia a simple vista, se puede utilizar un cargador frontal para remezclar el acopio.

### **2.6.6 Almacenamiento para minimizar la humedad**

El contenido de humedad en los agregados pétreos vírgenes y en el RAP es el factor principal que afecta los costos de operación en planta de la velocidad de producción y el secado. La mejor práctica para minimizar la acumulación de humedad en los acopios es cubrir la reserva dentro de un edificio o construir una techumbre para evitar que la lluvia llegue penetre en el RAP (Figura 2.6). Además, es una buena práctica utilizar reservas cónicas para arrojar naturalmente la lluvia, colocar las reservas en una superficie pavimentada y en pendiente para ayudar a drenar el agua acumulada debajo del acopio.

Se debe de reducir al mínimo el uso de equipo pesado en la parte superior de los acopios para evitar la compactación del RAP. Del mismo modo, también se recomienda que los acopios de RAP se limiten a una altura de 6 metros para reducir la probabilidad de auto consolidación.



Figura 2.6. Acopio cubierto con una estructura para impedir el acceso del agua a través de la lluvia.

## 2.7 MUESTREO Y PRUEBAS PARA EL RAP

Es necesario generar un plan de muestreo y pruebas para evaluar la consistencia de los acopios de RAP y obtener propiedades representativas para su uso en los diseños de mezclas asfálticas.

### 2.7.1 RAP Variabilidad

Existe una idea errónea de que los acopios de RAP pueden tener características muy variables entre ellos, por lo tanto, usar altos contenidos de RAP en nuevas mezclas asfálticas dará como resultado una mayor variabilidad en las mezclas. Sin embargo, los acopios de RAP bien procesados tienen una gradación más consistente que la que presentan acopios de agregados pétreos vírgenes (3). Esa fue la conclusión de un

estudio realizado en 1988 por el Centro Internacional para la Investigación de Agregados (4) y se confirmó con los últimos datos recogidos por NCAT (5).



Figura 2.7. RAP procesado con apariencia uniforme.

### **2.7.2 Muestreo y Pruebas de Frecuencia**

Se debe muestrear de por al menos un conjunto de pruebas por cada 1,000 toneladas de RAP, esto se considera una buena práctica. En generalmente esta práctica se realiza más frecuente de lo que se requiere para agregados pétreos vírgenes, pero es apropiado para un componente que ocupa una gran porción de dentro de una mezcla asfáltica. Un mínimo de 10 pruebas se deben realizar en un acopio de RAP para producir buenas estadísticas para los análisis de consistencia.

### **2.7.3 Método de muestreo**

Es recomendable tomar una muestra de todos los acopios de RAP mientras están siendo construidos. Las muestras de diferentes lugares no deben de combinarse ya que los resultados de los diferentes lugares se usarán para calcular las estadísticas de

la variabilidad. Tomar una muestra en el momento de que el acopio está siendo construido será más fácil y más representativo en comparación con las muestras tomadas después, luego de que se haya formado una costra sobre el acopio de RAP. Cuando un acopio de RAP ha estado en un lugar durante algún tiempo, por lo general es difícil de intentar excavar en con una pala.

La mejor manera de muestrear los acopios existentes de RAP es con la ayuda de un cargador frontal, tal como lo describe el ensayo AASHTO T-2 o ASTM D-75-03. Este método se describe y se ilustra a continuación.

1. Se utiliza un cargador frontal para cavar en el acopio de RAP que esté listo para usarse.
2. Se vacía el cucharón en una superficie limpia para formar acopio miniatura de donde se extraerá la muestra.
3. Utilizando la parte inferior del cucharón del cargador se presiona la parte superior del acopio miniatura para crear una superficie plana.
4. El mini acopio está listo para ser muestreado.
5. Se utilizará una pala cuadrada para extraer muestras de la superficie del mini acopio.
6. Se debe muestrear de tres lugares distintos sobre la superficie del mini acopio.
7. Se combinará las muestras tomadas del mismo mini acopio. Esta muestra será más adelante dividida en porciones para ensayar.
8. El proceso se debe de repetir para obtener muestras en otros lugares del mismo acopio. No se debe de combinar muestras de diferentes lugares de procedencia.



Figura 2.8. Pasos para el método de muestreo de RAP.

### **2.7.4 Métodos de prueba**

Para la mezcla asfáltica diseñada usando RAP, los datos necesarios a partir de ensayos de prueba en el RAP serán los siguientes:

1. El contenido de asfalto del RAP.
2. La granulometría del agregado del RAP.
3. La gravedad específica bruta del agregado del RAP.
4. Las características del agregado del RAP.
5. Para diseños con altos contenidos de RAP, las propiedades del asfalto extraído del RAP.

En algunos casos, otras pruebas adicionales a los agregados pueden ser necesarias. Por ejemplo, si el RAP será utilizado en una mezcla para la superficie de un pavimento con un tráfico de alta velocidad, algunas instituciones u organismos pueden requerir pruebas para evaluar el pulimento o la composición mineralógica del agregado pétreo del RAP. Pero por lo general, las propiedades tales como abrasión y desgaste, ya no son necesario realizarlas ya que es poco probable que los agregados pétreos contenidos en el RAP hayan venido inicialmente de fuentes no aprobados para su utilización en la mezcla asfáltica inicial.

Un reciente estudio en la Universidad de Nevada en Reno y NCAT examinó varias opciones para probar el RAP y determinar los mejores métodos para la determinación de las propiedades que se han indicado anteriormente. Tres métodos se utilizaron para determinar el contenido de asfalto y recuperar los agregados pétreos para ensayos de caracterización: el método de ignición, el método de extracción por centrifugado y el método de extracción de reflujo. El tricloroetileno se utilizó como disolvente en los métodos de centrifugado y de reflujo. Los resultados del estudio indican que:

- El método de ignición produjo el contenido de asfalto más preciso para el RAP y proporcionó la variabilidad más baja en comparación con los métodos de extracción con disolventes.

- El método de extracción centrífuga tenía el menor efecto de pérdida de material pétreo.
- La gravedad específica bruta de los agregados recuperados por el método de ignición era el más cercano a los materiales originales, excepto por el agregado de piedra caliza suave. En ese caso, el agregado recuperado de la extracción centrífuga era el más cercano al material original.
- Los valores de equivalente de arena y angularidad en el agregado fino de agregados recuperados provenientes de los tres métodos eran diferentes de los materiales originales.
- Valores de abrasión para los agregados recuperados de la extracción por centrifugado eran más cercanos a los valores originales.

El Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras, NCHRP por sus siglas en inglés (The National Cooperative Highway Research Program), hace una recomendación de realizar pruebas adicionales al material recuperado para los diseños de mezclas que contengan más del 25% de RAP. Varios estudios de investigación están actualmente en curso para desarrollar procedimientos alternativos para determinar las propiedades del asfalto contenido en el RAP y métodos para seleccionar el grado del asfalto virgen para mezclas con altos contenidos de RAP.

## **2.8 MÉTODOS PARA DETERMINAR CONTENIDO DE ASFALTO EN EL RAP Y LA RECUPERACIÓN DE LOS PÉTREOS**

Dos opciones se recomiendan para determinar el contenido de asfalto RAP y la recuperación de los agregados: el método de ignición y extracciones con solventes.

Ambos métodos tienen ventajas y desventajas. En las siguientes secciones se discuten las ventajas y desventajas de estos métodos asociados.

### **2.8.1 Método de ignición**

El método más común para determinar el contenido de asfalto en el RAP y la recuperar los agregados pétreos es el método de ignición, con el ensayo AASHTO T-308 o ASTM D-6307. Las ventajas del método de ignición incluyen resultados rápidos, un tiempo corto de prueba, y no se necesitan disolventes. Un problema con este método es que con el fin de obtener un contenido de asfalto preciso para una muestra, es necesario conocer el factor de corrección de agregado. Para los materiales pétreos vírgenes, el factor de agregado de corrección se determina mediante el análisis de muestras con un contenido de asfalto conocido. La diferencia entre el contenido de asfalto conocido y el resultado de la prueba para las muestras preparadas es el factor de corrección de agregado. Sin embargo, para el RAP, no es posible tener una muestra con un contenido de asfalto conocido y, por lo tanto, no es posible determinar el factor de corrección de agregado. Sin embargo, los factores de corrección de agregado son típicamente consistentes cuando los materiales pétreos usados proceden del mismo banco de material. Por lo tanto, un factor de corrección de agregado promedio de los materiales en un lugar puede ser utilizado como el factor de corrección de agregado para el material de RAP.

Los agregados pétreos recuperados del RAP a partir del método de ignición pueden ser utilizados para el análisis granulométrico y algunas otras pruebas de caracterización de propiedades, pero no todos. Algunos tipos de agregados (por ejemplo, dolomitas) pueden tener cambios significativos en la masa cuando se calienta a 1000 °F (538 °C) en un horno de ignición. Pequeñas variaciones naturales en la mineralogía de estos agregados crean grandes variaciones en los factores de corrección de agregado en el horno ignición (como de 1 % a 2 %). Algunas agencias han alterado la prueba para reducir la temperatura del horno de ignición para minimizar este problema. Sin embargo, en algunos casos, las agencias han elegido

simplemente utilizar otros métodos para determinar el contenido de asfalto y la recuperación de los pétreos para mezclas asfálticas en su jurisdicción. En estos lugares, el contenido de asfalto para las muestras de RAP debe determinarse mediante extracciones de solventes.

### **2.8.2 Extracción solvente**

Extracción de solventes con tricloroetileno u otros disolventes se han utilizado durante décadas para determinar el contenido de asfalto de mezclas asfálticas y como método de recuperación de pétreos para pruebas adicionales. Sin embargo, el uso del método se ha reducido debido a la concientización de la salud y el medio ambiente con respecto a los disolventes clorados. Nuevos disolventes como Bromuro de propileno y algunos no halogenados (Terpeno o D-Limoneno) son disolventes que se encuentran como disolventes alternativos y están permitidos en el ensayo de AASHTO T-164, pero algunos problemas se reportaron con la eficacia de estos disolventes para eliminar el asfalto modificado con polímero. Sin embargo, algunas agencias y contratistas siguen utilizando la extracción de solventes debido a problemas con los factores de corrección de agregado en el método de horno de ignición que pueden ser altamente variables o por la ruptura de ciertos tipos de agregado. Dependiendo de las características de los agregados, el poder de solvencia del disolvente, y la dureza del asfalto contenido en el RAP, la extracción con disolvente no pueden eliminar todo el aglutinante del asfalto absorbido en el agregado pétreo. Basándose en la precisión de la información publicada, la repetibilidad y la reproducibilidad del método de ignición son más de cuatro veces mejor que el método de extracción con disolvente.

## CAPÍTULO 3. EXPERIMENTACIÓN

### 3.1 INTRODUCCIÓN

En este proyecto se pretende determinar si las mezclas asfálticas recicladas en caliente tienen las mismas características que las mezclas asfálticas con materiales vírgenes usadas habitualmente en la construcción de carreteras en México, así como, entender si las pruebas comúnmente utilizadas en el diseño y control de calidad son las recomendables para evaluar el desempeño óptimo de las mezclas.

En los laboratorios de SemMaterials México se realizó una investigación del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente con material reciclado. Mediante diferentes pruebas se pretende analizar que porcentajes de material reciclado adicionado a mezclas asfálticas son los que presentan el mejor desempeño con respecto a una mezcla formada con materiales vírgenes, y poder ser utilizados en la construcción de nuevas vialidades y proyectos de rehabilitación.

### 3.2 PLANTEAMIENTO

El proyecto abarcó diferentes etapas y fue necesario realizar un plan de trabajo, donde se analizarán las características y propiedades de los materiales, el diseño de las mezclas y por último el desarrollo de las pruebas seleccionadas para la evaluación de las mezclas. En el siguiente diagrama (Figura 3.1) se presentan las etapas y la secuencia de ellas.

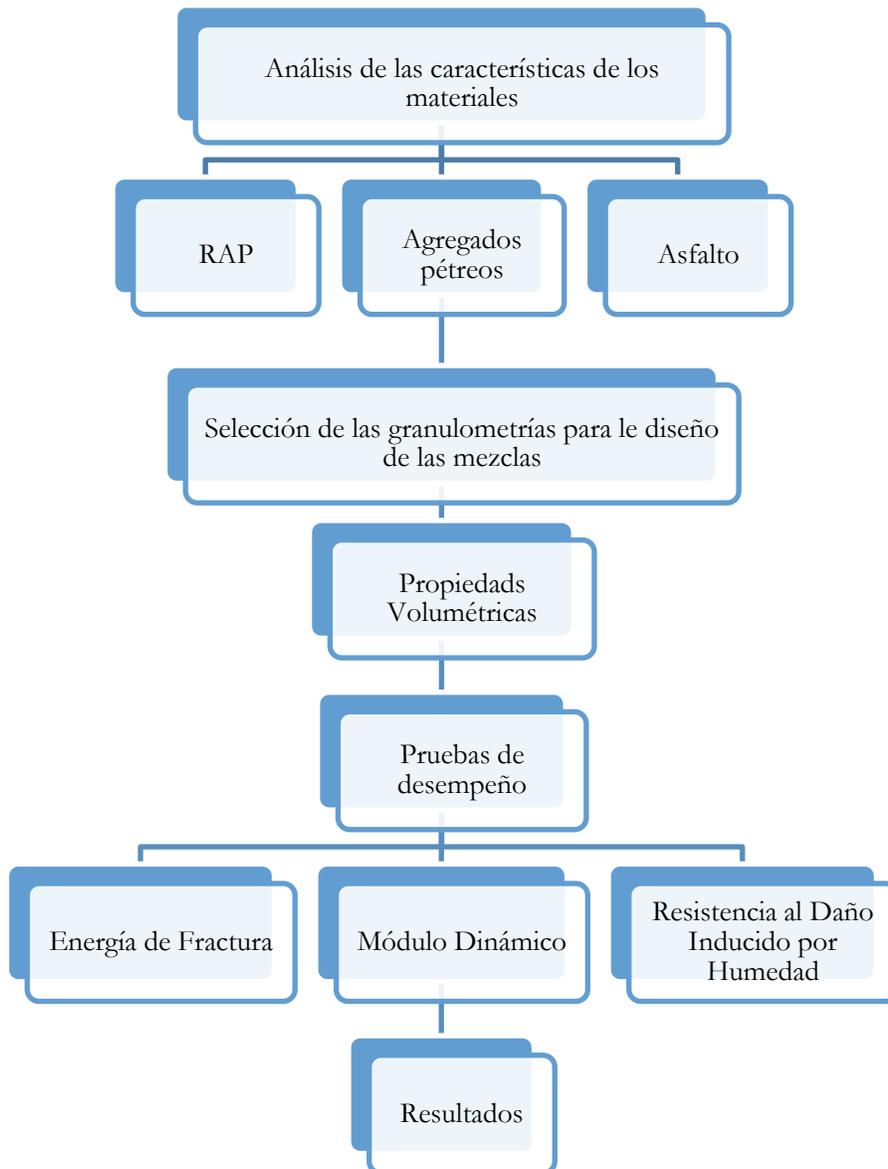


Figura 3.1. Diagrama de la secuencia de las actividades.

El pavimento se deteriora debido al paso de los vehículos y los factores climáticos. Por ello es necesario saber los parámetros que caracterizan a las mezclas asfálticas y definir sus límites de fallo, tanto por fisuración térmica o deformación plástica. Por este motivo es importante saber que ensayos son necesarios para caracterizar a la mezcla y que análisis se deben realizar a partir de los datos obtenidos.

Estas pruebas ofrecen un análisis más amplio del desempeño de las mezclas asfálticas, ofreciendo un modelo más representativo. Las pruebas realizadas intentan determinar el efecto del aumento de la rigidez por la adición del RAP.

Los ensayos se realizaron en el siguiente orden por prioridad, Energía de Fractura, Módulo Dinámico y TSR (Resistencia al Daño Inducido por Humedad).

Primero, se fabricaron especímenes para la prueba de Energía de Fractura, la prueba se realizó a diferentes temperaturas para analizar el comportamiento de un sólido durante el proceso de fractura o fisuración.

En segundo lugar, se fabricaron especímenes para la prueba de Módulo Dinámico, los cuales se ensayaron a 20 °C y a una energía de 10 Hz, generalmente el valor de módulo de rigidez que se introduce a los programas de diseño de pavimentos deterministas y que no consideran la curva maestra es el de 20 ° y 10 Hz.

Por último, se fabricaron especímenes para la prueba de TSR, la prueba se realizó con especímenes secos y acondicionados, este ensayo evalúa la falla provocada por deformación a tensión.

Cada una de estas pruebas permitirá analizar de manera específica que tipo de asfalto y que porcentaje de RAP adicionado a una mezcla son la mejor opción para ser utilizados en una estructura de pavimento nuevo. Para realizar estas pruebas se elaboraron diferentes mezclas, con cuatro contenidos distintos de RAP y tres tipos de asfaltos.

En el proyecto se empleó un diseño de mezcla que corresponde a una mezcla asfáltica de granulometría densa con las especificaciones del Protocolo AMAAC. Incorporando tres asfaltos, un AC-20 y un AMP (asfalto modificado con polímero), que son de uso común en el país para el diseño de pavimentos, y un Prototipo que fue desarrollado por SemMaterials México para contrarrestar el exceso de envejecimiento del asfalto. Con cada uno de los asfaltos se fabricaron mezclas que contuvieran el 15 %, 30 % y 45 % de RAP.

Para realizar la comparación de los datos obtenidos en las mezclas recicladas se fabricaron mezclas que solo estuvieran formadas con materiales nuevos, utilizando los tres asfaltos y agregado pétreo virgen. Con los datos obtenidos de estos especímenes se podrán comparar estos datos con respecto a los resultados de las mezclas recicladas.

### **3.3 MATERIALES EMPLEADOS**

Para poder utilizar los materiales que formarán parte de las mezclas asfálticas que se pretenden diseñar es necesario conocer sus características y condiciones, a continuación se describen cada uno de los materiales que se usarán.

#### **3.3.1 Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)**

El material reciclado fue tomado de la carretera México-Pachuca que se encuentra en rehabilitación por parte de la empresa CALCO (Calzada Construcciones S.A. de C.V.), éste material es el producto de la recuperación de la capa asfáltica que ha concluido su vida útil y es necesario retirarlo (Figura 3.2).

Inicialmente el material debió ser homogenizado debido a que en el proceso de recuperación el material era procesado en dos fracciones, una de tamaño nominal de ½" y otro de tamaño nominal de No. 4 (4.75 mm), para homogenizar todo el material se realizó el proceso de "Reducción de muestras" de acuerdo al ensayo ASTM C702-98(030), cada parte se traspalea de un lugar a otro, formando un gran cono, se repite el proceso 3 veces, al terminar esta operación se coloca la pala sobre el montículo y se aplana, aprovechando la superficie horizontal y con ayuda de la pala se divide en cuatro partes, de las partes extremas se tomaron muestras para realizar las pruebas de caracterización, granulometría, contenido de asfalto.

Se tomaron tres muestras durante el proceso de homogenización de las cuales se determinó su granulometría para conocer el estado en que se encuentra el RAP, el análisis granulométrico se llevó a cabo según el ensayo ASTM 136-06, a cada una se le realizó un proceso de incineración para determinar el contenido de asfalto y la granulometría contenida del agregado pétreo, se tomó un promedio de los resultados para su utilización en los diseños de las mezclas.



Figura 3.2. Pavimento asfáltico recuperado (RAP).



Figura 3.3. Incinerador de asfalto.

El ensayo para determinar el contenido de asfalto se encuentra estandarizado por la norma AASHTO T-308. Aunque se tendrá el inconveniente de encontrar materiales muy calientes y se debe utilizar el equipo de protección personal y las precauciones adecuadas, este es el método más fácil y preciso disponible para determinar el contenido de asfalto y proporcionar agregado limpio para otras pruebas. Se coloca la muestra dentro del equipo incinerador, NCAT (Figura 3.3), sobre dos canastillas en donde se divide el material en partes iguales, debe pesar entre 2000 gr – 4000 gr, el horno se calienta hasta temperaturas de 650 °C. Durante el proceso de ignición, la balanza interna monitorea de forma automática todo el peso de la muestra con una tolerancia de  $\pm 0.1$  gramos.

Tras un periodo de tiempo que oscila entre 20 y 40 minutos, dependiendo del peso de la muestra, el horno detecta el final del ensayo cuando se ha incinerado todo el asfalto. Después de repetir la prueba a la tres muestras se obtuvo un promedio del asfalto contenido de 5.9 % en el RAP.

En las siguientes tablas se muestran las granulometrías del material antes y después de la incineración del asfalto.

Tabla 3.1 y 3.2. Granulometrías promedio antes y después de la incineración del asfalto.

GRANULOMETRÍA RAP PROMEDIO			GRAN. RAP INCINERADO PROM.		
Tamaño abertura de malla		% Que pasa	Tamaño abertura de malla		% Que pasa
mm	plg		mm	plg	
37.5	1 1/2"	100.0%	37.5	1 1/2"	100.0%
25	1"	100.0%	25	1"	100.0%
19	3/4"	100.0%	19	3/4"	100.0%
12.5	1/2"	87.9%	12.5	1/2"	99.6%
9.5	3/8"	75.6%	9.5	3/8"	97.3%
4.75	No. 4	47.1%	4.75	No. 4	80.3%
2.36	No. 8	25.3%	2.36	No. 8	59.9%
1.18	No. 16	12.6%	1.18	No. 16	42.2%
0.6	No. 30	6.2%	0.6	No. 30	29.5%
0.3	No. 50	3.1%	0.3	No. 50	20.4%
0.15	No. 100	1.5%	0.15	No. 100	13.6%
0.075	No. 200	0.6%	0.075	No. 200	8.5%

En la figura 3.4 se muestran las curvas granulométricas del RAP antes y después del proceso de incineración de asfalto.

El material es necesario separarlo por diferentes fracciones de tamaño, para lo cual primero se necesita secarlo dentro de un horno a una temperatura constante de 60 °C durante 24 horas, se deja enfriar el material para proceder a cribarlo con ayuda de una cribadora mecánica (Figura 3.5) para separarlo en las diferentes fracciones.

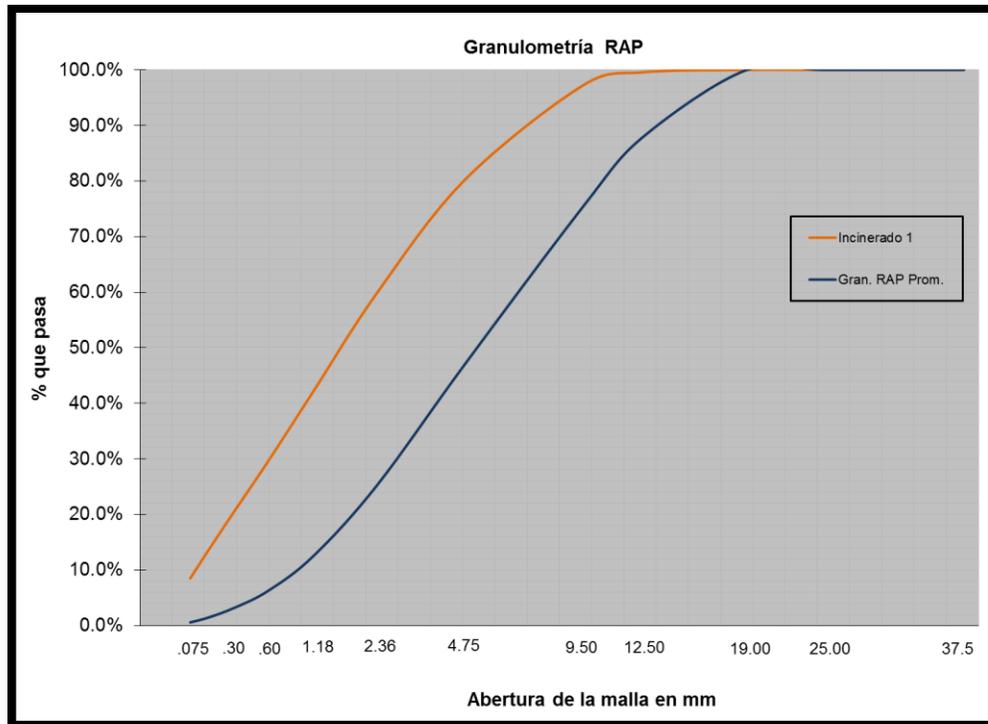


Figura 3.4. Curvas granulométricas del RAP antes y después de la incineración del asfalto.



Figura 3.5. Cribadora mecánica.

El material era identificado por tamaño y almacenado, manteniendo siempre bastante material cribado para su utilización en la construcción de los especímenes para las pruebas.

### 3.3.2 Agregado pétreo virgen

El agregado pétreo de virgen, grava y arena (Figuras 3.6 y 3.7), son extraídos del banco de material de Xometla perteneciente al municipio de Acolman, estado de México, su origen es de una cantera volcánica, y se obtienen de la trituración total y cribado de la roca.



Figura 3.6. Grava de Xometla.



Figura 3.7. Arena de Xometla.

En las tablas 3.3 y 3.4 se presentan las granulometrías de las diferentes fracciones de agregado pétreo en porcentajes que pasa el material.

Para determinar las características físicas del material se procedió a realizar las pruebas básicas que estipula el Protocolo AMAAC para que el material presente un óptimo desempeño durante la vida útil del pavimento. En las tablas siguientes se

muestran los resultados de cada prueba realizada a las diferentes fracciones del agregado pétreo.

Tabla 3.3 y 3.4. Granulometrías de la arena y de la grava.

GRANULOMETRÍA ARENA			GRANULOMETRÍA GRAVA		
Tamaño abertura de malla		% Que pasa	Tamaño abertura de malla		% Que pasa
mm	plg		mm	plg	
37.5	1 1/2"	100%	37.5	1 1/2"	100%
25	1"	100%	25	1"	100%
19	3/4"	100%	19	3/4"	100%
12.5	1/2"	100%	12.5	1/2"	85%
9.5	3/8"	100%	9.5	3/8"	56%
4.75	No. 4	94%	4.75	No. 4	7%
2.36	No. 8	63%	2.36	No. 8	1%
1.18	No. 16	44%	1.18	No. 16	1%
0.6	No. 30	32%	0.6	No. 30	1%
0.3	No. 50	22%	0.3	No. 50	1%
0.15	No. 100	15%	0.15	No. 100	1%
0.075	No. 200	11%	0.075	No. 200	1%

Tabla 3.5. Propiedades físicas de los agregados pétreos.

PROPIEDAD FÍSICA	NORMA	Arena	Grava 5/8	PROTOCOLO AMAAC
Peso Volumétrico Seco Suelto, kg/m <sup>3</sup>	ASTM C 29	1445	1501	1405
Peso Volumétrico Seco Compacto, kg/m <sup>3</sup>		1604	1597	1547
Gravedad Específica Bruta, Gsb	ASTM C 127	2.568	2.791	2.735
Gravedad Específica Aparente, Gsa		2.685	2.945	2.906
Absorción, %		1.7%	1.9%	2.2%

Tabla 3.6. Pruebas exclusivas para el agregado fino.

PRUEBAS EXCLUSIVAS EN EL AGREGADO FINO				PROTOCOLO AMAAC
Angularidad, %	AASHTO T 304	51.2%	-	40% mín.
Equivalente de Arena, %	ASTM D 2419	82.00	-	50% mín.
Azul de Metileno, mg/g	AMAAC RA 05	18	-	12 máx.

Tabla 3.7. Pruebas exclusivas para el agregado grueso.

PRUEBAS EXCLUSIVAS EN EL AGREGADO GRUESO				PROTOCOLO AMAAC
Desgaste de Los Ángeles, %	ASTM C 131	-	16%	30% máx.
Micro-Deval, %	AASHTO T 327	-	8%	15% máx.
Intemperismo Acelerado (Sulfato Sodio), %	ASTM C88	-	3.2%	15% máx.
Partículas con 1 Cara Fracturada, %	ASTM D 5821	-	97%	100%
Partículas con 2 ó más Caras Fracturadas, %		-	93%	90% mín.
Partículas Planas, %	ASTM D 4791	-	10%	10% máx.
Partículas Alargadas, %		-	1%	10% máx.

Los resultados de las pruebas básicas confirmaron que los materiales son aptos para ser utilizados como el agregado virgen para la fabricación de las mezclas.

### 3.3.3 Asfalto de aportación

Se utilizarán tres diferentes asfaltos, un AC-20 proveniente de la refinería de Tula, Hidalgo, un AMP (asfalto modificado con polímero) y un Prototipo que ha sido diseñado para mejorar el desempeño de las mezclas asfálticas que contengan RAP, ambos productos desarrollados por SemMaterials México.

Las pruebas utilizadas para la caracterización del asfalto son: Horno rotatorio de película delgada (RTFO) y vasija de envejecimiento a presión (PAV), que simulan las características de envejecimiento del asfalto.

En la tabla 3.8 se enlistan los resultados para caracterizar el grado PG (performance grade) del asfalto virgen AC-20 respecto a sus propiedades reológicas.

Tabla 3.8. Propiedades reológicas del asfalto virgen

PROPIEDADES ASFALTO VIRGEN			
Envejecimiento	Propiedad	Temperatura de prueba	Temperatura Crítica, Tc, C
<b>Original</b>	DSR G*/SIN $\delta$	Alta	76.0
<b>RTFO</b>	DSR G*/SIN $\delta$	Alta	76.0
<b>PAV</b>	DSR G*/SIN $\delta$	Intermedia	25.0
	BBR S	Baja	-12.0
	BBR m-value	Baja	-12.0
	<b>Grado PG virgen</b>	<b>76</b>	<b>-22</b>

### 3.4 GRANULOMETRÍAS DE DISEÑO

Para el diseño de los especímenes se eligió una mezcla de granulometría gruesa de tamaño nominal de 19.0 mm (3/4”), estas mezclas con función estructural se recomiendan para caminos con tránsito moderado a alto. Otras ventajas de utilizar una granulometría densa de tipo gruesa, son: permite elevaciones de espesor, incrementa la macrotextura, mejor estructura interna y una mayor durabilidad de proyecto.

Los requisitos recomendados de la granulometría (llamados también puntos de control) para el caso de un tamaño nominal del material pétreo de 19.0 mm (3/4”) son los que se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Puntos de control para carpetas asfálticas de granulometría densa de 19 mm (3/4”).

Tamaño nominal del material pétreo 19 mm (3/4")		
Designación	Abertura en mm	Porcentaje que pasa
1"	25.00	100-100
3/4"	19.00	90-100
1/2"	12.60	-90
3/8"	9.50	-
No. 4	4.75	-
No. 8	2.36	23-49
No. 16	1.18	-
No. 30	0.60	-
No. 50	0.30	-
No. 100	0.15	-
No. 200	0.075	2-8

En la figura 3.8 se muestran los límites que se marcan para este tipo de mezcla en específico. La escala de la abertura de la malla esta elevada a la potencia 0.45.

Con ayuda de estos puntos de control se diseñaran las curvas granulométricas de las mezclas y se calcularan los pesos necesarios para fabricar los especímenes.

Las mezclas diseñadas que se estudiarán están formadas por un 100 % de agregados vírgenes, mezclas compuestas por un 85 % de agregados vírgenes y un 15 % de RAP, mezclas compuestas por un 70 % de agregados vírgenes y un 30 % de RAP, y por último, mezclas compuestas por un 55 % de agregados vírgenes y un 45 % de RAP, como se muestra en la tabla 3.10.

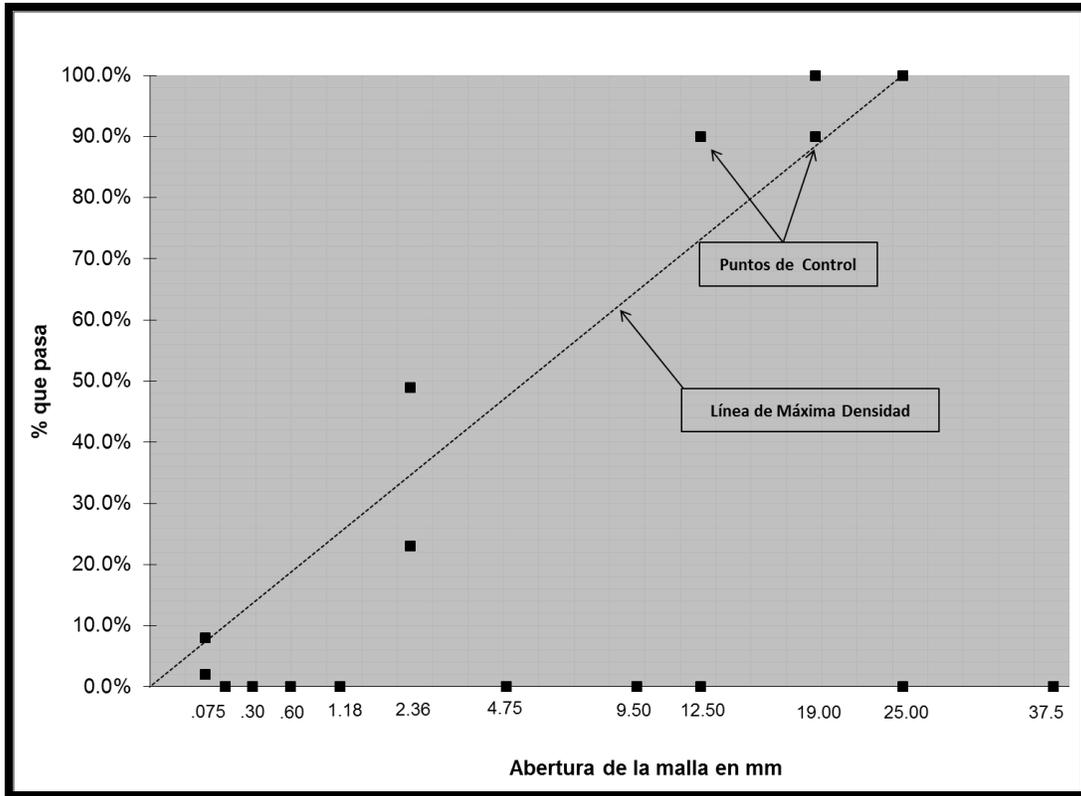


Figura 3.8. Puntos de control y línea de máxima densidad para una mezcla de tamaño nominal de 19 mm (3/4”).

Tabla 3.10. Propuestas granulométricas para las mezclas.

PROPUESTA GRANULOMÉTRICA				TMN Mezcla, mm
Banco	Xometla	Xometla	Planta CALCO	19
Fracción del Agregado	Arena	Grava 5/8	RAP	TOTAL
Propuesta 1	45%	55%		100%
Propuesta 2	38%	47%	15%	100%
Propuesta 3	32%	38%	30%	100%
Propuesta 4	25%	30%	45%	100%

Para la fabricación de los especímenes fue necesario reconstituir las curvas granulométricas de las mezclas, ya que, si se utilizaban los agregados vírgenes y el RAP tal cual se encontraban después de ser homogenizados y adicionándolos en los

porcentajes establecidos para el estudio de la investigación, las curvas no cumplían con los puntos de control que establece el Protocolo AMAAC para mezclas de granulometría densa de 19.0 mm de tamaño nominal. Por lo cual la fabricación fue resultado de adicionar las cantidades de material por tamaño de partícula necesarias para poder formar la curva granulométrica deseada.

En la tabla 3.11 se presentan las granulometrías individuales para cada tipo de mezcla respecto a su porcentaje de RAP adicionado y en la figura 3.9 se muestran las curvas granulométricas de cada mezcla.

Tabla 3.11. Granulometrías individuales para cada tipo de mezcla.

		Xometla	Xometla	Planta CALCO	0% RAP	15% RAP	30% RAP	45% RAP	Puntos de Control
Abertura de Malla		Arena	Grava 5/8	RAP	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	
1"	25	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100
3/4"	19	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	90-100
1/2"	12.6	100%	85%	88%	90%	89%	89%	88%	-90
3/8"	9.5	100%	56%	76%	76%	76%	76%	76%	-
No. 4	4.75	94%	7%	47%	46%	46%	47%	47%	-
No. 8	2.36	63%	1%	25%	29%	28%	28%	27%	23-49
No. 16	1.18	44%	1%	13%	20%	19%	18%	17%	-
No. 30	0.6	32%	1%	6%	15%	13%	12%	11%	-
No. 50	0.3	22%	1%	3%	10%	9%	8%	7%	-
No. 100	0.149	15%	1%	2%	7%	6%	6%	5%	-
No. 200	0.075	11%	0%	1%	5%	4%	4%	3%	2-8

Otro motivo por el cual se optó por realizar este procedimiento, fue el reducir los factores que pudieran generar variaciones en las pruebas, en este caso, el tamaño de los agregados en especial el del RAP, y es que uno de los mayores problemas al hablar de material reciclado es la gran variabilidad que éste presenta, dependiendo del proyecto de la que fue recuperado, sus condiciones son muy distintas en contenido de asfalto, tamaños y distribuciones del agregado pétreo, además si el pavimento recuperado presento una o varias rehabilitaciones probablemente los materiales usados habrán sido de orígenes y calidades distintas.

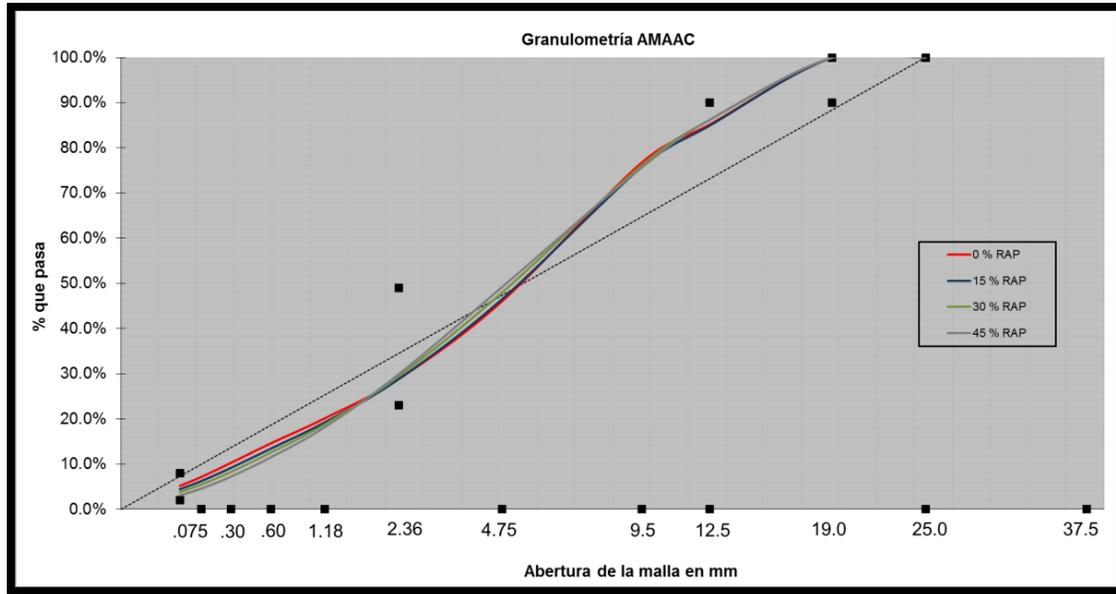


Figura 3.9. Curvas granulométricas de cada mezcla.

### 3.5 PROCESO EXPERIMENTAL

Para la evaluación de las mezclas se utilizarán tres tipos de ensayos de laboratorio, TSR (Resistencia al Daño Inducido por Humedad, Módulo Dinámico y Energía de Fractura). Cada una de estas pruebas nos aportará datos del comportamiento de las distintas mezclas adicionadas con RAP, las ventajas o desventajas de utilizar mezclas asfálticas con material reciclado y nos permitirá conocer de manera específica cuáles son los medios de falla que se podrían presentar en aplicaciones en carreteras.

Se han elaborado 32 series de especímenes, utilizando todas las combinaciones entre los porcentajes de RAP adicionados y los tipos de asfalto, en la tabla 3.12 se muestran el total de especímenes fabricados por prueba.

Tabla 3.12. Series de especímenes fabricados para cada uno de los ensayos.

ASFALTO	PRUEBA	PORCENTAJE DE RAP				TOTAL
		0%	15%	30%	45%	
AC-20	ENERGÍA DE FRACTURA	9	9	9	9	108
AMP		9	9	9	9	
PROTOTIPO		9	9	9	9	
AC-20	MÓDULO DINÁMICO	3	3	3	3	36
AMP		3	3	3	3	
PROTOTIPO		3	3	3	3	
AC-20	TSR	8	8	8	8	64
AMP		8	8	8	8	
PROTOTIPO						

Para calcular el porcentaje de vacíos de aire es necesario determinar la gravedad específica teórica máxima (Gmm), mediante el ensayo AASHTO T-209. El Gmm se calcula con la siguiente fórmula:

$$Gmm = \frac{Pmm}{\frac{Ps}{Gse} + \frac{Pb}{Gb}} \quad \text{Fórmula 3.1}$$

- Gmm = gravedad específica teórica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire)
- Pmm = porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100
- Ps = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla
- Pb = contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla
- Gse = gravedad específica efectiva del agregado
- Gb = gravedad específica del asfalto

En la tabla 3.13 se resumen los resultados obtenidos después de realizar el ensayo utilizando el contenido óptimo de asfalto para cada serie de especímenes.

Cada mezcla al contener diferentes tipos de asfaltos y porcentajes de RAP, requieren de distintos proporcionamientos de asfalto. Para calcular el contenido óptimo de asfalto es necesario realizar especímenes de prueba los cuales mantienen las mismas características como masa y granulometría, pero a cada espécimen se le dosifica un

contenido distinto de asfalto, se propone un valor y los otros dos puntos se encontrarán  $\pm 0.5$  % arriba y abajo.

Tabla 3.13. Gravedad específica teórica máxima de cada serie de especímenes.

TIPO DE ASFALTO	GMM			
	PORCENTAJE DE RAP			
	0%	15%	30%	45%
AC-20	2.610	2.607	2.608	2.585
AMP	2.606	2.599	2.582	2.588
PROTOTIPO	2.621	2.610	2.603	2.589

El contenido óptimo de asfalto será el necesario para obtener un porcentaje de vacíos de aire ( $V_a$ ) en la mezcla de 4 %. La fabricación de los especímenes debe de realizarse en el Compactador Giratorio Superpave con un ángulo de  $1.25^\circ$  y 600 kPa de presión.

El Compactador Giratorio Superpave se programa a 100 giros, es el número de giros de diseño ( $N_{dis}$ ), el cual representa la compactación que proporcionan los rodillos mientras compactan la carpeta asfáltica más el tránsito futuro. Este número de giros es el necesario para compactar una mezcla asfáltica a la densidad de diseño determinada por el número de ejes equivalentes, donde la mezcla asfáltica alcanza el 96 % de la gravedad específica teórica máxima ( $G_{mm}$ ) de la mezcla al contenido óptimo de asfalto, o en otras palabras, alcanza un 4 % de vacíos de aire.

En la tabla 3.14 se muestran los contenidos óptimos de asfalto calculados para cada serie de especímenes.

Tabla 3.14. Contenidos óptimos de asfalto de cada serie de especímenes.

CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO				
TIPO DE ASFALTO	PORCENTAJE DE RAP			
	0%	15%	30%	45%
AC-20	6.0	4.9	4.0	3.2
AMP	6.1	5.1	4.3	3.2
PROTOTIPO	5.7	4.9	4.1	3.4

Para comprobar que los valores de gravedad específica teórica máxima (Gmm) y el contenido de asfalto óptimo son los correctos, se realiza un ensayo conocido como densificación máxima o número de giros al final de la vida útil (Nmax). El Nmax oscila entre 75 y 205 giros. En términos prácticos es el número de giros que produce la máxima compactación que se debe presentar en campo. Durante los ensayos se pudo observar que después de los 160 giros la compactación que sufre los especímenes es casi nula, por lo cual se decidió que este era el número de giros necesarios para alcanzar su máxima densificación. En la siguiente tabla 3.14 se resumen los valores de densificaciones máximas para cada serie de especímenes expresadas en porcentaje de vacíos de aire.

Tabla 3.14. Densificaciones máximas para cada serie de especímenes.

Nmax				
TIPO DE ASFALTO	Densificación Máxima %			
	0%	15%	30%	45%
AC-20	3.4	3.3	3.5	3.2
AMP	3.1	2.6	2.9	2.5
PROTOTIPO	3.2	2.7	2.6	2.7

Los valores de compactación deben de ser menores que el 4.0 % de vacíos de aire con el que fue determinado el contenido óptimo de asfalto. Todos los valores se

encuentran por debajo del límite, por lo tanto son aceptables y se procede a continuar con la fabricación de los especímenes.

### 3.6 PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO

Para fabricar los especímenes se sigue el procedimiento de la norma AASHTO T-342, los materiales deben de introducirse dentro de un horno el cual debe poder mantener temperaturas de 50 °C a 260 °C, el asfalto debe estar dentro de una cubeta de metal, el agregado pétreo virgen se distribuye uniformemente en una charola, las hoyas para mezclar y las palas mezcladoras también se colocan dentro, los materiales deben de permanecer el tiempo suficiente para alcanzar la temperatura requerida para el tipo de asfalto que se vaya a usar, la temperatura de mezclado la define la carta de viscosidad de cada asfalto, en la siguiente tabla 3.15 se muestran las temperaturas de mezclado para cada asfalto. En el caso del RAP se coloca en otro horno a una temperatura constante 126 °C.

Tabla 3.15. Temperaturas de mezclado de cada asfalto.

<b>TEMPERATURAS DE MEZCLADO</b>			
<b>TIPO DE ASFALTO</b>	<b>AC-20</b>	<b>AMP</b>	<b>PROTOTIPO</b>
<b>Temperatura de mezclado</b>	<b>165 °C</b>	<b>174 °C</b>	<b>175 °C</b>

Cuando los materiales tienen la temperatura deseada, se procede a sacarlos del horno, se tara la hoyo de mezclado y se coloca dentro los agregados pétreos, se registra el peso de la masa, el cual se multiplicara por el contenido óptimo de asfalto correspondiente al tipo de asfalto y al porcentaje de RAP adicionado y se divide entre

la cantidad restante para sumar el 100 %, la cantidad resultante serán los gramos que se adicionarán de asfalto dentro de la hoya de mezclado. En el caso de las mezclas que contengan algún porcentaje de RAP es necesario registrar el peso de la cantidad de RAP adicionado utilizando una charola tarada, el peso de la masa del RAP será sumado al peso del agregado pétreo el cual será el peso total de la mezcla, una vez registrado el peso se vuelve a colocar el RAP dentro del horno para que no pierda temperatura, en espera del momento de ser mezclado con los demás materiales.

Después, se coloca la hoya en el soporte del equipo mezclador y se empotra la pala mezcladora para proceder al mezclado de todos los materiales, en el caso de las mezclas con algún porcentaje de RAP en esta parte del proceso se incorpora dentro de la hoya para ser mezclado con los demás materiales, además, para que el mezclado sea uniforme es necesario introducir dentro de la hoya una espátula y remover el material que se encuentre pegado.

Esta operación se debe hacer con rapidez para que los materiales y los aditamentos no pierdan demasiada temperatura. Cuando se ha finalizado el mezclado se vierte el material en una charola a un espesor uniforme de 25 a 50 mm, previamente recubierta con una delgada capa de aceite para que el material no se adhiera, y se introduce dentro de un horno a la temperatura de compactación que define su carta de viscosidad (Tabla 3.16). Cada  $60 \pm 5$  minutos la mezcla debe de removerse para asegurar el envejecimiento uniforme. Todas las charolas deben ser debidamente identificadas con una etiqueta que indique la hora de mezclado, el tipo de asfalto y el porcentaje de RAP adicionado.

El procedimiento de mezclado se repite para todos los especímenes de cada serie.

### 3.7 PROCEDIMIENTO DE COMPACTACIÓN

Para completar el procedimiento de compactación de los especímenes es necesario que el material que fue mezclado y los moldes que usarán durante el proceso de compactación permanezcan dos horas dentro del horno a la temperatura que se indica para cada tipo de asfalto en la tabla 3.16. Los moldes que se usarán son de 150 mm de diámetro (Figura 3.10), el diámetro de los especímenes será el mismo para realizar las tres diferentes pruebas.

Tabla 3.16. Temperaturas de compactación de cada asfalto.

<b>TEMPERATURAS DE COMPACTACIÓN</b>			
<b>TIPO DE ASFALTO</b>	<b>AC-20</b>	<b>AMP</b>	<b>PROTOTIPO</b>
<b>Temperatura de compactación</b>	<b>154 °C</b>	<b>165 °C</b>	<b>166 °C</b>

Concluido este tiempo se procede a retirar los moldes del interior del horno, es importante que los moldes, la base del molde y la parte superior se encuentren limpias y enceitadas en cada repetición del proceso de compactación para que los resultados sean comparables, se les coloca un circulo de papel por la parte inferior y superior del molde para que la mezcla al ser compactada no se quede adherida por dentro del molde y al ser extraído no sufra deformaciones o perdidas de material.



Figura 3.10. Molde de 150 mm de diámetro.

Cuando el molde se encuentre lleno de la mezcla asfáltica se procede a introducirlo dentro del Compactador Giratorio Superpave marca PINE, hay que asegurarse que la pestaña inferior del molde se introduzca adecuadamente en los pasadores de alineación de la base giratoria, el compactador previamente es calibrado para utilizar moldes de 150 mm de diámetro de acuerdo a la norma AASHTO T-312, se comprueba que el ángulo externo de giro sea de  $1.25 \pm 0.02^\circ$  y que la presión de la carga sea de  $600 \pm 18$  kPa, se introducen los valores de los parámetros que se desean obtener para los especímenes como: diámetro del molde, altura del espécimen, número de giros.



Figura 3.11. Extracción de espécimen después de ser compactado.

A continuación, se bloquea el molde firmemente en su lugar con las abrazaderas situadas en el lado izquierdo y derecho del marco giratorio. Se presiona hacia abajo las abrazaderas con firmeza. También es importante que la parte superior del molde esté firmemente sujeta, se coloca la parte superior del molde y se giran los seguros externos hasta que se encuentren bien fijos. Cuando se encuentre bien sujeto el molde se oprime el botón de arranque (START), el equipo se detendrá cuando el espécimen haya alcanzado la altura especificada, para extraer el espécimen se oprime el botón de extracción (RAM UP) y es retirado el espécimen (Figura 3.11) para ser colocado sobre una superficie plana donde se deja enfriar durante un día.

El procedimiento de compactación se repite para todos los especímenes de cada serie.

### **3.8 VOLUMETRÍA**

Después de realizar la compactación y extraer los especímenes se dejan enfriar durante 24 horas para poder proceder a calcular su Gmb para corroborar que contengan el porcentaje de vacíos de aire al que fue diseñado, el procedimiento está estandarizado a través del ensayo ASTM D-1188 ó D-2726. El procedimiento consta de los siguientes pasos, primero, pesar el espécimen seco en el aire y registrar su masa, segundo, sumergir el espécimen en una tina con agua la temperatura del agua debe ser  $25 \pm 1$  °C (Figura 3.12) y registrar su masa, y por último, sacar el espécimen de la tina secarlo superficialmente con una toalla lo más rápido posible y registrar su masa.



Figura 3.12. Espécimen sumergido.

La fórmula para calcular el  $G_{mb}$  es la siguiente:

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w} \quad \text{Fórmula 3.2}$$

Dónde:

$G_{mb}$  = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

$W_a$  = masa del espécimen seco en el aire

$W_{ss}$  = masa del espécimen superficialmente seco

$W_w$  = masa del espécimen sumergido



Figura 3.13. Especímenes después de calcular su  $G_{mb}$ .

Este procedimiento solo es aplicable a especímenes con menos del 2 % de absorción, en el caso de ser mayor, será necesario que los especímenes se recubran con parafina o parafilm. El porcentaje de vacíos de aire ( $V_a$ ), es la concentración, en volumen, del aire en la muestra de mezcla asfáltica compactada. Los vacíos de aire se expresan siempre como un porcentaje del volumen total de la mezcla. La fórmula para calcularlo es:

$$V_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right)(100) \quad \text{Fórmula 3.3}$$

Dónde:

$V_a$  = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

$G_{mm}$  = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

$G_{mb}$  = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

Si los especímenes presentan un porcentaje de vacíos de aire dentro de los parámetros se aceptan para ser usados en las pruebas de desempeño. El procedimiento para calcular el  $G_{mb}$  se repite para todos los especímenes de cada serie.

### 3.9 MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA ENERGÍA DE FRACTURA UTILIZANDO EL DISCO COMPACTO A TENSIÓN

Uno de los aportes de la mecánica clásica de fractura es el concepto de energía de fractura, el cual se entiende como un parámetro propio del material y fundamental para analizar el comportamiento de un sólido durante el proceso de fractura o fisuración.

En la curva carga-desplazamiento, ilustrada en la figura 3.14, se observa un estado de equilibrio cuando no existen esfuerzos aplicados al material. Sin embargo, una vez que se aplica una carga cuasi estática y monotónica, la tensión incrementa hasta llegar a un límite superior conocido como resistencia máxima teórica a tracción del material,  $\sigma_{th}$ , y seguidamente la carga comienza a decrecer hasta llegar a cero. En este contexto, durante la aplicación de la fuerza se realiza un trabajo,  $W_f$ , que se almacena en forma de energía de deformación hasta la separación de las partes, momento en el cual esa energía de deformación se transforma en energía de fractura, relajándose cada una de las partes de las tensiones soportadas (Valdés, 2011).

Este método de ensayo cubre la determinación de la energía de fractura ( $G_f$ ) de mezclas asfálticas utilizando un disco compacto a tensión DC(T). El ensayo Disk-shaped compact tensión test (disco compacto a tensión), desarrollado por Michael P. Wagoner en la Universidad de Illinois, se basa en la utilización de una muestra de geometría circular para determinar la energía de fractura en las mezclas asfálticas (Valdés, 2011).

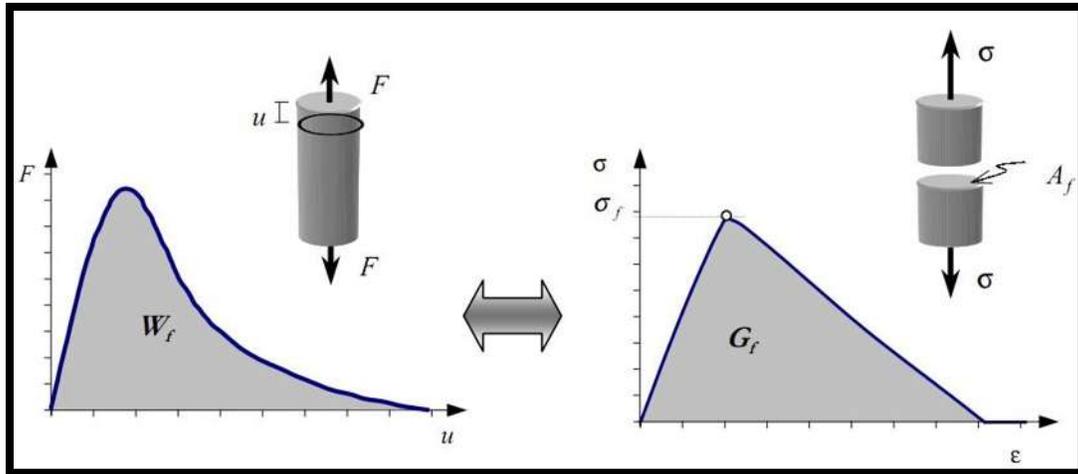


Figura 3.14. Forma esquemática de la energía de fractura (Fuente: Oller, 2001).

La energía de fractura,  $G_f$ , o también llamada energía total disipada durante el proceso de fractura,  $G_D$ , proviene de dos fenómenos bien diferenciados, señalados en la fórmula (3.4), uno que se manifiesta por el desarrollo de mecanismos plásticos, expresado por la disipación plástica por unidad de área  $\gamma^p$ , y otro de la fractura propiamente dicha, cuya disipación está representada por  $\gamma^0$ , y que se gasta en separar dos planos atómicos.

$$G_f = G_D = \gamma^p + \gamma^0 \quad \text{Fórmula 3.4}$$

De estos ensayos se puede calcular la energía disipada en el proceso de fisuración mediante la gráfica de la curva de carga–desplazamiento resultante, como la ilustrada en la figura 3.14, sobre la que se obtiene el trabajo total de fractura,  $W_f$ , calculado como el área bajo la curva señalada, de acuerdo a la fórmula 3.5. Posteriormente al dividir este trabajo realizado por el área de ligamento o fractura de la muestra, se obtiene el valor de la energía de fractura o energía total disipada durante el proceso de fractura,  $G_f$ , según se señala en la fórmula 3.6.

$$W_f = \int_0^{\Delta R} F \, du \quad \text{Fórmula 3.5}$$

$$G_f = GD =$$

Fórmula 3.6

Dónde:

$W_f$  = Trabajo de fractura

$F$  = Carga

$u$  = Desplazamiento

$G_f, GD$  = Energía de fractura o energía total disipada

$A_f$  = Área de fractura

$\Delta R$  = Deformación de rotura

Como punto de partida para su estudio se utiliza la especificación ASTM E-399 para seleccionar la geometría cilíndrica utilizada para el ensayo de una probeta denominada DC(T).

En la ASTM E-399 se describe el ensayo DC(T) para obtener el plano de fractura de probetas metálicas con geometría prismática, lo cual no favorecía el empleo de la nueva técnica de fabricación de mezclas bituminosas mediante el compactador giratorio Superpave.

Después de varias iteraciones en el laboratorio se desarrolló una geometría cilíndrica, que maximiza la longitud de la sección de fisuración y previene la rotura de la probeta a través de los agujeros de carga. La geometría y dimensiones de la probeta se indican en la figura 3.15.

Las ventajas que presenta este ensayo es el tamaño del área de fractura. La prueba de Energía de Fractura se encuentra estandarizada a través de la norma ASTM D-7313-13 Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry, fijando en su procedimiento una velocidad de desplazamiento de 0.017 mm/s y señalando que la temperatura de ejecución debe ser inferior a los 10 °C.

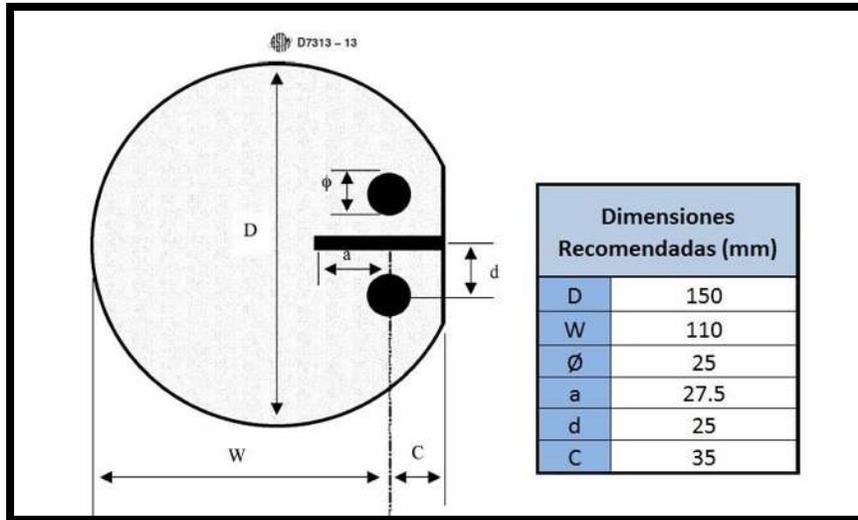


Figura 3.15. Geometría y dimensiones recomendadas para el espécimen DC (T).

El ensayo consiste en la fabricación de especímenes de forma cilíndrica de 150 mm de diámetro y de 170 mm de altura, son compactados en el compactador giratorio y deben de tener un  $7\% \pm 0.5$  de porcentaje de vacíos de aire, para lo cual es necesario realizar prediseños para obtener la masa necesaria que cumpla con la altura y el porcentaje de vacíos de aire especificados.

Los especímenes del ensayo deben ser fabricados de acuerdo con las dimensiones que se muestran en la figura 3.15. El equipo de corte deberá utilizar discos con las caras impregnadas de diamante y mantendrá mojado el espécimen con agua para minimizar el daño. Las características que debe de cumplir la muestra son las siguientes:

- El espesor de las muestras será de  $50 \pm 5$  mm.
- El corte de la ranura será realizado a la mitad de la muestra y perpendicular a las caras, deberá tener un largo de  $35 \pm 2.5$  mm.
- La superficie plana ubicada a la entrada de la grieta será cortada a  $90 \pm 5^\circ$  con respecto a la ranura.
- Los orificios de carga deben de estar perforados a  $90 \pm 5^\circ$  con respecto a las caras de la muestra. La ubicación de los orificios de carga no podrá ser superior a 5 mm de los lugares especificados.

- El diámetro se medirá en no menos de dos puntos con una precisión de 0.5 mm alrededor de la circunferencia de la muestra y luego serán promediados.



Figura 3.16. Especímenes cortados en rebanadas.

Las muestras se someten a ensayo en un marco de carga capaz de suministrar un mínimo de 20 kN (4500 lbf) en tensión. El aparato de carga debe ser capaz de mantener la boca de apertura para ruptura por desplazamiento o CMOD por sus siglas en inglés (Crack Mouth Opening Displacement) dentro del 2 % del valor objetivo durante toda la prueba. Los marcos de prueba servo-hidráulico o servo-neumático de circuito cerrado son los más recomendables. La célula de carga deberá tener una resolución de 20 N (4.5 lbf) o mejor.

Un clip medidor deberá de ser usado para medir el desplazamiento de la boca de ruptura a través de los dos puntos calibradores. El medidor deberá estar sujeto entre los puntos calibradores, tiene la capacidad de ser liberado sin daño si se rompe la probeta.

Los puntos calibradores deben ser pegados con un pegamento epóxico de secado rápido, el clip medidor quedará localizado entre ellos. Al comienzo de la prueba, el medidor de desplazamiento tendrá un desplazamiento mínimo de 6.35 mm.

Se requieren dos canales de adquisición de datos: carga y CMOD. El sistema de adquisición tendrá la capacidad de adquirir los datos en un mínimo de 25 puntos de datos por segundo.

Los especímenes son colocados dentro de la cámara del equipo CS4300 Maquina Universal Servo-Hidráulica marca Cox and Sons (Figura 3.17), en donde es controlada y monitoreada la temperatura, permanecerán como mínimo ocho horas y como máximo 16 horas para acondicionarse a la temperatura deseada para realizar la prueba. Las temperaturas propuestas para correr las muestras son: 10 °C y 0 °C.



Figura 3.17. CS4300 Maquina Universal Servo-Hidráulico.

Después del acondicionamiento de la temperatura, se inserta la muestra en los accesorios de carga y se aplica una pequeña carga de asentamiento no superior a 0.2 kN (45 lbf). La prueba se realiza a una velocidad constante de apertura de desplazamiento de 0.017 mm/s (Figura 3.18).

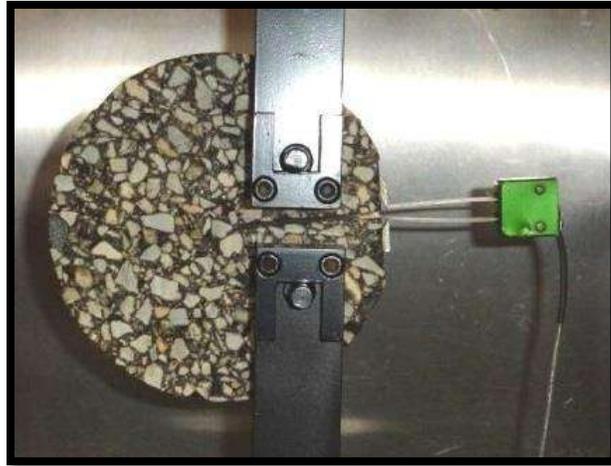


Figura 3.18. Muestra colocada dentro del marco de carga y dispositivo medidor de desplazamiento.

La prueba se completa cuando el nivel de carga posterior al de máxima se ha reducido a 0.1 kN (22 lbf). La validez de la prueba es una función de la capacidad de alcanzar el nivel de carga especificada. En la figura 3.19 se muestra un espécimen que ha sido ensayado y ha sufrido una fractura.

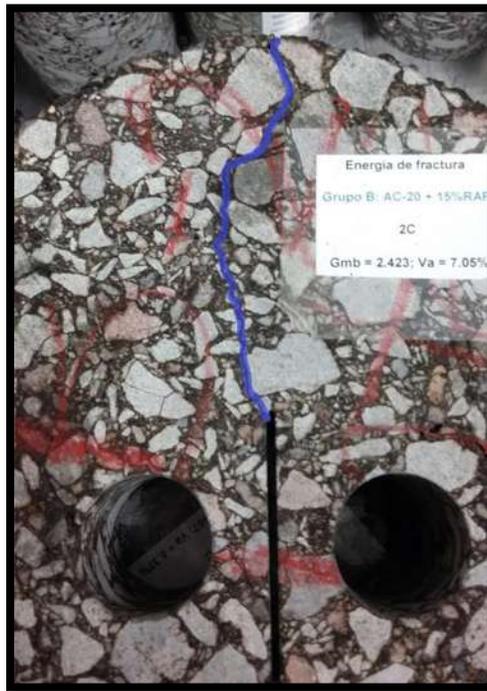


Figura 3.19. Especimen ensayado y llevado a la fractura.

### 3.10 MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR EL MÓDULO DINÁMICO

Este método de prueba cubre los procedimientos para preparar y ensayar mezcla de asfáltica en caliente para determinar el módulo dinámico y el ángulo de fase en un rango de temperaturas y frecuencias de carga. Esta prueba se encuentra estandarizada a través de la norma AASHTO T-342-11.

El procedimiento consta en aplicar un esfuerzo de compresión axial sinusoidal a un espécimen de mezcla asfáltica a una temperatura y frecuencia de carga determinada (Figura 3.20). El esfuerzo aplicado y la respuesta de deformación axial recuperable resultante de la muestra se miden y se utilizan para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase.

El módulo dinámico es el valor normal del módulo complejo, se calcula dividiendo el valor máximo del esfuerzo por el valor axial recuperable de un material sometido a una carga sinusoidal. El módulo complejo ( $E^*$ ), es un número que define la relación entre el esfuerzo y la tensión para un material viscoelástico lineal. El ángulo de fase, es el ángulo en grados entre el máximo esfuerzo aplicado sinusoidalmente y la tensión máxima que resulta en una prueba de esfuerzo controlado.

Los valores de módulo dinámica son medidos en un intervalo de temperaturas y frecuencias de carga que pueden desplazarse dentro de una curva para la caracterización de concreto asfáltico para el diseño del espesor del pavimento y el análisis de rendimiento.

Los valores de módulo dinámico y ángulo de fase son usados como parámetro de desempeño para el diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente.

Un sistema de prueba de módulo dinámico consiste en una máquina de ensayo, cámara ambiental y un sistema de medición. Una máquina de ensayo debe ser capaz de producir una carga de compresión semiverseno controlada. La máquina de ensayo

debe tener una capacidad de aplicación de carga en un rango de frecuencias de 0.1 a 25 Hz y la tensión nivel de hasta 2800 kPa.

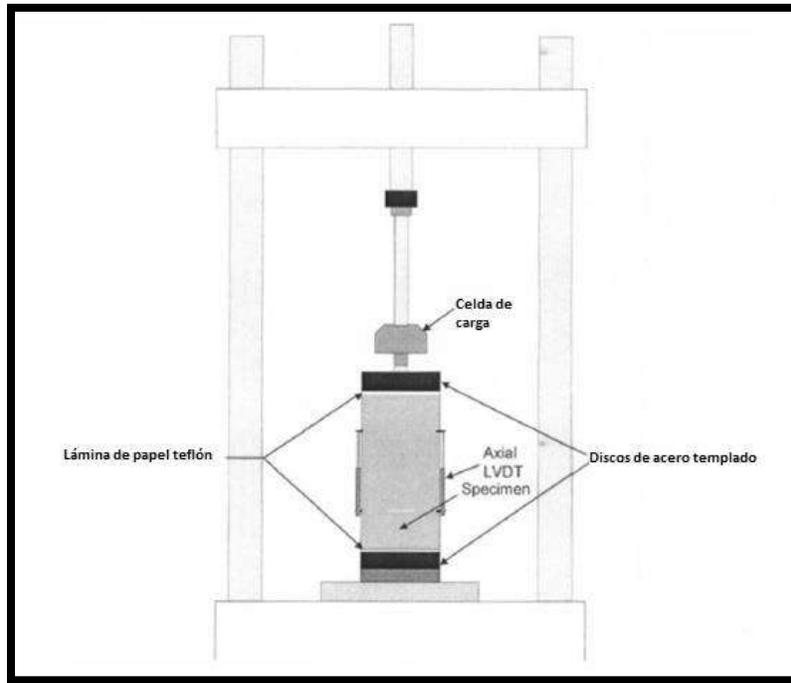


Figura 3.20. Esquema general de la prueba de Módulo Dinámico.

La cámara ambiental (Figura 3.21) deberá ser capaz de controlar la temperatura de la muestra en un rango de temperatura de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una precisión de  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Figura 3.21. Marco de carga dentro de la cámara ambiental.

El sistema de medición deberá ser completamente controlado a través de la computadora, capaz de medir y registrar la evolución temporal de la carga aplicada y las deformaciones axiales. El sistema deberá ser capaz de medir el período de la carga sinusoidal aplicada y las deformaciones resultantes con una resolución de 0.5 %.

La carga se medirá con una celda de carga electrónica que se debe encontrar en contacto con la tapa superior del espécimen. La celda de carga estará calibrada de acuerdo con la norma ASTM E-4. El sistema de medición de carga deberá tener como mínimo un rango de 0 a 25 kN con una resolución de 1.2 N.

Las deformaciones axiales se medirán con transformadores diferenciales de variables lineales, LVDT por sus siglas en inglés (Linear Variable Differential Transformers), montados entre los puntos de calibradores pegados a la muestra como se muestra en la figura 3.22.

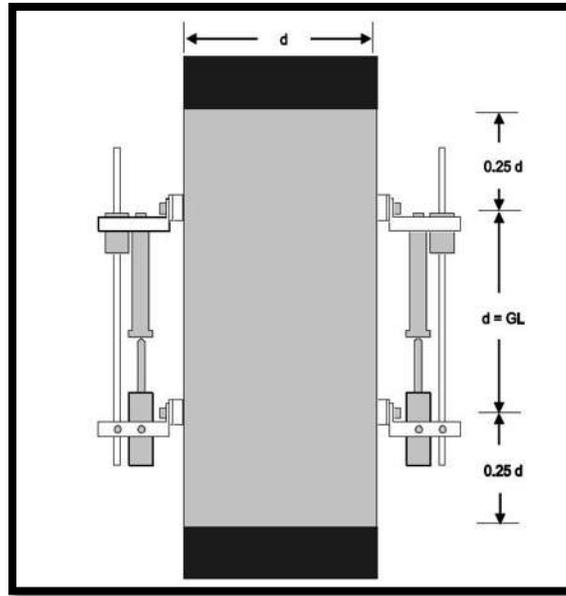


Figura 3.22. Esquema general de la localización de los LVDT.

Las deformaciones se medirán en tres ubicaciones a 120 grados de diferencia. Los medidores de desplazamiento LVDT deberán tener un rango de movimiento de 0.5 mm.

Las placas de carga, deberán tener un tamaño de  $104.5 \pm 0.5$  mm, se requiere que estén por encima y debajo del espécimen para transferir la carga de la máquina de ensayo a la muestra. En general, estas placas deben ser de acero templado. Materiales más blandos requieren una sustitución más frecuente.

La fabricación de los especímenes se realizará con ayuda del Compactador Giratorio Superpave, los cuales al término del proceso de compactación deberán de tener una altura de 170 mm. Después de realizar el proceso de compactación y extraer los especímenes, se dejan enfriar durante 24 horas para poder proceder a calcular su Gmb.

Los especímenes que cumplen con las especificaciones de altura y porcentaje de vacíos de aire son seleccionados para ser cortados con ayuda de una sierra de puntas de diamante, esto facilita la preparación de los especímenes de ensayo con extremos lisos y paralelos. La sierra de puntas de diamante de aspas simples o dobles debe

tener mecanismo de alimentación y controles de velocidad de la precisión necesaria para garantizar el cumplimiento de las medidas.

Además, se utilizará un taladro para la extracción del núcleo del espécimen el cual debe tener una broca diamantada con un tamaño de 101.6 mm de diámetro. Las medidas finales después de ser extraídos los núcleos y de ser cortados deben de ser de 100 mm de diámetro con una desviación estándar de 1 mm y una altura promedio comprendida entre 147.5 y 152.5 mm.

En general, el núcleo de la muestra tendrá un contenido de vacíos de aire menor de entre 1.5 y 2.5 % que el del espécimen antes de ser cortado.

Los extremos de todos los especímenes de ensayo deben ser lisos y perpendiculares al eje de la muestra. Los extremos de los especímenes preparados deberán cumplir las tolerancias descritas a continuación. Rechazar probetas que no cumplan estas tolerancias.

El espécimen final no se apartará de la perpendicularidad del eje de la muestra en más de 1 grado, equivalente a 2.7 mm de 152.4 mm. Este requisito se comprobará en cada muestra utilizando escuadras de acero con espaldón y galgas de medición.

Es necesario calcular el contenido de vacíos de aire que contiene el núcleo extraído, para reducir el tiempo de la prueba inmediatamente se registra el peso de la muestra sumergida en agua y su peso sumergido superficialmente seco, aprovechando que el núcleo se encuentra mojado después del proceso de extracción debido a que el taladro utiliza un sistema de refrigeración a base de inyección de agua para que el espécimen no sufra daños por el calentamiento de la broca. Los núcleos de ensayo se pueden dejar secar durante la noche, al día siguiente medir su peso seco y luego preparar las muestras para la prueba.

El número de muestras de ensayo requeridas depende del número de medidores de deformación axiales colocados por espécimen y la precisión deseada del módulo dinámico promedio. Tres muestras iguales deben ser probados para obtener un límite

de precisión deseada, menos del 15 por ciento del módulo dinámico verdadero. La tabla 3.17 resume la precisión estimada asociada con el número de especímenes.

Tabla 3.17. Relación estimada de exactitud con respecto al número de especímenes.

LVDT por Especímen	Número de Especímenes	Límite Estimado de Exactitud
2	2	± 18.0 %
2	3	± 15.0 %
2	4	± 13.4 %
3	2	± 13.1 %
3	3	± 12.0 %
3	4	± 11.5 %

Se fijan los postes de montaje para el medidor axial LVDT a los lados de la muestra con pegamento epóxico. En la figura 3.23 se muestran los detalles de los pernos de montaje y hardware de montaje LVDT. La longitud de referencia para la medición de las deformaciones axiales será  $101.6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ .

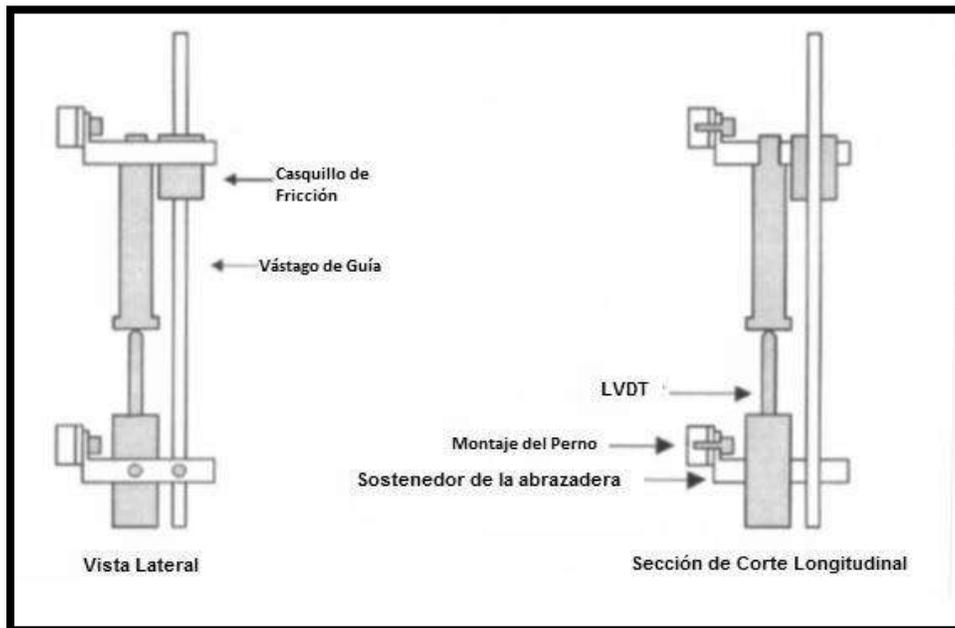


Figura 3.23. Detalles del montaje del Hardware.

La prueba se realiza a los especímenes de la menor a la más alta temperatura, es decir, desde -10 °C a 54 °C. Para acondicionar las muestras a la temperatura a la cual se desarrollará la prueba es necesario dejar los núcleos dentro de la cámara ambiental durante el tiempo que marca la tabla 3.18, cada temperatura requiere de un tiempo diferente.

Tabla 3.18. Tiempos recomendados para equilibrar la temperatura.

Temperatura del Especimen, °C	Tiempo de Temperatura de la Habitación 25 °C	Tiempo de Temperatura Previo a la Prueba, h
-10	Toda la noche	Toda la noche
4	Toda la noche	4 horas o toda la noche
21	1	3
37	2	2
54	3	1

El espécimen se monta entre los discos de acero y se centra visualmente con la intención de evitar una carga excéntrica (Figura 3.24).



Figura 3.24. Especímenes dentro de la cámara de la maquina CS4300 Universal.

Para iniciar la prueba primero se aplica una carga de contacto ( $P_{min}$ ) igual a 5 % de la carga dinámica que se aplicará a la muestra. Esto es aceptable para aumentar el esfuerzo de contacto aplicado a 20 kPa que mejora la eficacia del control de la máquina mediante la aplicación de una carga que mantendrá contacto positivo con el espécimen pero no dañará la muestra.

Se aplica una carga sinusoidal (Haverseno) a la muestra de una manera cíclica ( $P_{dinámica}$ ). La carga dinámica se debe ajustar para obtener deformaciones axiales entre 50 y 150 micro deformaciones. A continuación en la tabla 3.19 se especifican las cargas de aplicación a los especímenes.

La prueba a los especímenes se debe de probar de la temperatura más baja a la más alta, es decir, desde -20 °C a 10 °C. Respectivamente a cada temperatura, se aplicará la carga de mayor a menor frecuencia. Se dejará un período de descanso entre cada ejecución de frecuencia de 2 minutos.

Tabla 3.19. Número de ciclos para la secuencia de prueba.

Frecuencia (H)	Número de Ciclos
25	200
10	200
5	100
1	20
0.5	15
0.1	15

Para concluir la máquina genera un archivo txt, con la señal de la celda de carga y los extensómetros. Después un MACRO con las ecuaciones cargadas procesa la información y nos muestra en un archivo de EXCEL los resultados del módulo dinámico,  $|E^*|$ , el ángulo de fase,  $\theta (\omega)$ , en grados, y el complejo de módulo,  $|E^*(\omega)|$ , kPa (psi), a la frecuencia seleccionada,  $\omega$ .

Además de los datos anteriores, el análisis de datos también nos permite conocer cuatro datos indicadores de calidad: (1) el error estándar de la tensión aplicada, (2) el promedio del error estándar para las medidas de deformación, (3) el coeficiente de uniformidad de los promedios de deformación, y (4) el coeficiente de uniformidad para las mediciones del ángulo de fase.

### **3.11 MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD (TSR)**

La prueba de Resistencia al Daño Inducido por Humedad, se encuentra estandarizada por la norma AASHTO T-283. Es un método de prueba que se puede utilizar para determinar si los materiales pueden estar sujetos a pelarse y también para medir la eficacia de los aditivos. Además, mide la variación de resistencia a la deformación por tensión, resultante de los efectos de saturación y acondicionamiento acelerado con agua, con un ciclo de congelamiento y descongelamiento para mezclas asfálticas compactadas. El parámetro que se mide es el “TSR”, por sus siglas en inglés (Tensile Strength Ratio), para los niveles de diseño el valor mínimo aceptable es de 80 por ciento.

Los especímenes son ensayados a esfuerzo por tensión indirecta mediante muestras cargadas a una velocidad constante y midiendo la fuerza requerida para romper el espécimen.

La preparación de la muestras se realiza por lotes, produciendo suficiente material de mezcla asfáltica para producir al menos ocho especímenes con el contenido óptimo de asfalto para el tipo en específico de mezcla. Las medidas de las muestras serán de 150 mm de diámetro y 95 mm de espesor. Se realiza el proceso de mezclado para cada lote de especímenes por tipo de asfalto y por porcentaje de RAP adicionado.

Los especímenes deben de tener un porcentaje de vacíos de aire de  $7 \pm 0.5 \%$ , para lo cual se necesitarán realizar prediseños hasta encontrar la masa adecuada que contenga el porcentaje de vacíos de aire de diseño. Con la ayuda del Compactador Giratorio Superpave se hace la compactación de la muestra, después de que los especímenes se retiran de los moldes, se almacenan a temperatura ambiente durante  $24 \pm 3$  horas.

Después de este período a los especímenes, se realizan las siguientes pruebas y mediciones:

- Se mide el espesor y el diámetro.
- Se calcula su gravedad máxima bruta ( $G_{mb}$ ).
- Se calcula su porcentaje de vacíos de aire ( $V_a$ ).

Una vez determinado el porcentaje de vacíos de aire, los especímenes se separan en dos grupos, de al menos tres muestras cada uno, de manera que el promedio de porcentaje de vacíos de aire de un grupo sea casi igual al otro. Solo uno de los grupos de especímenes será “acondicionado” y el otro grupo se dejara sin acondicionar o como se le denomina “seco”.

Aquellas muestras que serán acondicionadas, se someterán a un vacío de saturación, a un ciclo de congelación y un ciclo de inmersión en agua caliente. Para calcular el volumen de vacíos de aire ( $V_a$ ) en centímetros cúbicos necesarios para saturar la muestra se utiliza la siguiente fórmula:

$$V_a = \frac{P_a E}{100} \qquad \text{Fórmula 3.7}$$

Dónde:

$V_a$  = Volumen de vacíos de aire, en centímetros cúbicos

$P_a$  = Vacíos de aire, en porcentaje

$E$  = Volumen de los especímenes, en centímetros cúbicos

Al grupo de especímenes secos se les envuelve con plástico de alta resistencia y se coloca dentro de una bolsa de plástico a prueba de fugas (Figura 3.25). Las muestras se colocan en el baño de agua a  $25 \pm 0.5$  °C durante 2 horas  $\pm$  10 minutos con un tirante de agua mínimo de 25 mm por encima de la superficie de los especímenes.



Figura 3.25. Especímenes en bolsas de plástico sumergidos en agua a 25 °C.

El otro grupo se acondiciona de la siguiente manera:

1. Las muestras se colocan dentro de una cámara de vacío (Figura 3.26) apoyadas un mínimo de 25 mm por encima del fondo del recipiente.
2. El recipiente se llena con agua a temperatura ambiente de manera que los especímenes tengan por lo menos 25 mm de agua por encima de su superficie.
3. Se aplica un vacío a las muestras de 10 a 26 in. Hg de presión parcial (13 a 67 kPa de presión absoluta) durante aproximadamente 5 a 10 minutos.
4. Se deja de aplicar el vacío y el espécimen se deja sumergido en agua durante aproximadamente 5 a 10 minutos.

La muestra es retirada de la cámara de vacío y secada superficialmente para registrar su peso (B<sup>1</sup>).

El volumen de agua absorbida ( $J^1$ ) en centímetros cúbicos se determina por la siguiente ecuación:

$$J^1 = B^1 - A \quad \text{Fórmula 3.8}$$

Dónde:

$J^1$  = Volumen de agua absorbida, en centímetros cúbicos

$B^1$  = Peso del espécimen superficialmente seco después de la saturación parcial al vacío, en gramos

$A$  = Peso del espécimen seco al aire, en gramos



Figura 3.26. Cámara de vacío.

El grado de saturación ( $S^1$ ) se determina dividiendo el volumen de agua absorbida ( $J^1$ ) entre el volumen de vacíos de aire ( $V_a$ ) usando la siguiente ecuación:

$$S^1 = \frac{100 J^1}{V_a} \quad \text{Fórmula 3.9}$$

Dónde:

$S^1$  = Grado de saturación, en porcentaje

Si el grado de saturación está entre 70 y 80 por %, el acondicionamiento por congelación puede continuar. Si el grado de saturación es inferior al 70 %, es necesario volver a repetir el procedimiento de saturación por vacío durante más tiempo. Pero se debe de tener cuidado, si el grado de saturación es más de 80 %, la muestra se considera dañado y se descarta.

Para los especímenes con 70 a 80 %de saturación, se les realiza un emplayado con una película de plástico y se colocan dentro de una bolsa de plástico que contenga  $10 \pm 0.5$  ml de agua y se sella. Las bolsas de plástico se colocan en un congelador a temperatura de  $-18 \pm 3$  °C durante  $24 \pm 1$  hora como se muestra en la figura 3.27.

Tan pronto se completa el ciclo de congelamiento las muestras se colocan dentro de un baño de agua a  $60 \pm 1$  °C por un período de  $24 \pm 1$  hora. Tan pronto como las muestras se colocan en el baño de agua, la bolsa y la película de plástico se retiran de cada espécimen. Las muestras deben tener como mínimo 25 mm de agua por encima de su superficie (Figura 3.28).



Figura 3.27. Especímenes envueltos dentro del congelador.



Figura 3.28. Especímenes dentro de baño de agua a 60 °C.

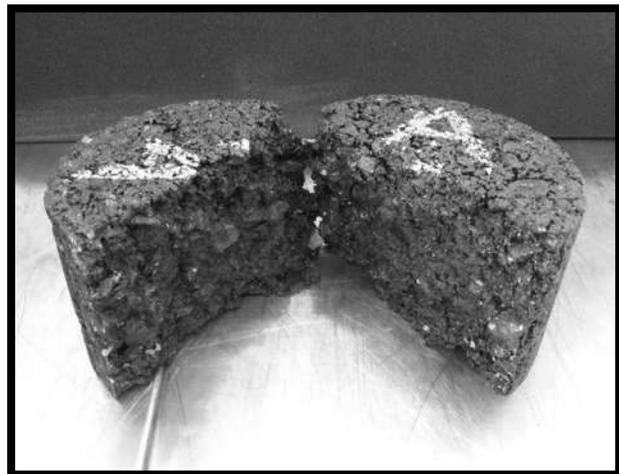
Después de  $24 \pm 1$  hora en el baño de agua, las muestras se retiran y se colocan en un baño de agua a  $25 \pm 0.5$  °C durante dos horas  $\pm 10$  minutos para que se enfríen. Las muestras deben tener un mínimo de 25 mm de agua por encima de su superficie.

Los especímenes de ambos grupos, acondicionados y secos, son retirados del baño de agua. Con el equipo encendido y preparado, se seca cuidadosamente la superficie de la muestra, se mide su espesor ( $t^1$ ), se ubica y centra en la mordaza inferior, se coloca la mordaza superior y se ubica al centro del vástago de carga.



Figura 3.29. Espécimen colocado en la máquina antes de correr la prueba.

La carga se aplica al espécimen a una deformación constante de 51 mm por minuto (Figura 3.29), hasta llevarlo a la falla o fractura. El punto de falla se define como la carga máxima obtenida. La máquina se detiene y el ejemplar fracturado se retirado para su evaluación visual (Figuras 3.30 y 3.31).



Figuras 3.30 y 3.31. Espécimen sin acondicionar con un 0 % de RAP adicionado.

La resistencia a la tensión se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$S_t = \frac{2000 P}{\pi t D} \quad \text{Fórmula 3.10}$$

Dónde:

$S_t$  = Esfuerzo a tensión, kPa  
 $P$  = Carga máxima, Newtons  
 $t$  = Espesor del espécimen, mm  
 $D$  = Diámetro del espécimen, mm

La relación de resistencia a la tensión se calcula como sigue:

$$\text{Relación de Resistencia a la tensión (TSR)} = \frac{S_2}{S_1} \quad \text{Fórmula 3.11}$$

Dónde:

$S_1$  = Resistencia promedio a la tensión del grupo seco, psi (kPa)  
 $S_2$  = Resistencia promedio a la tensión del grupo acondicionado, psi (kPa)

El valor mínimo aceptable de TSR es de 80 %.

Al concluir todas las pruebas se procedió a catalogar y concentrar todos los resultados. En el capítulo 4, se muestran y se analizan los resultados de cada ensayo y el comportamiento de cada grupo de especímenes.

## **CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

De acuerdo a lo expuesto en el Capítulo 3, con el apoyo de los ensayos de Energía de Fractura, Módulo Dinámico y TSR se ha determinado el comportamiento de mezclas asfálticas recicladas bajo los parámetros habituales de estas pruebas. Además, se ha logrado ampliar el conocimiento del efecto de aumento de rigidez que sufren las mezclas al adicionar material reciclado.

## 4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE ENERGÍA DE FRACTURA

En la tabla 4.1 se resumen los resultados obtenidos de la prueba realizada a los especímenes probados a las temperaturas de 0 °C y 10 °C para las mezclas de 0 % y 45 % de RAP. Fabricados con asfalto modificado con polímero (AMP).

Tabla 4.1. Resultados de la prueba de energía de fractura a especímenes fabricados con AMP.

	ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO			
	0 % RAP		45 % RAP	
	0 °C	10 °C	0 °C	10 °C
<b>ÁREA (mm-KN)</b>	<b>3.30</b>	<b>4.46</b>	<b>7.05</b>	<b>7.22</b>
<b>Energía de Fractura (J/m<sup>2</sup>)</b>	<b>837</b>	<b>1020</b>	<b>1709</b>	<b>1723</b>

En las figuras 4.1 y 4.2 se muestra el comportamiento de los especímenes de 0 % y 45 % de RAP a temperaturas de 0 °C y 10 °C. En las gráficas se observa que para el caso de ambos asfaltos la temperatura es una de las variables que más efecto tiene en la energía de fractura, produciéndose un cambio en la mezcla desde un comportamiento frágil a cuasi-frágil a medida que aumenta la temperatura.

Las mezclas muestran un comportamiento más frágil, presentando mayores resistencias en las mezclas a bajas temperaturas, mientras que a altas temperaturas las mezclas muestran un comportamiento más dúctil, alcanzando menores resistencias.

Además, se observa que los especímenes fabricados con 45 % de RAP presentan menores resistencias que las que soportan los especímenes fabricados con 0 % de RAP.

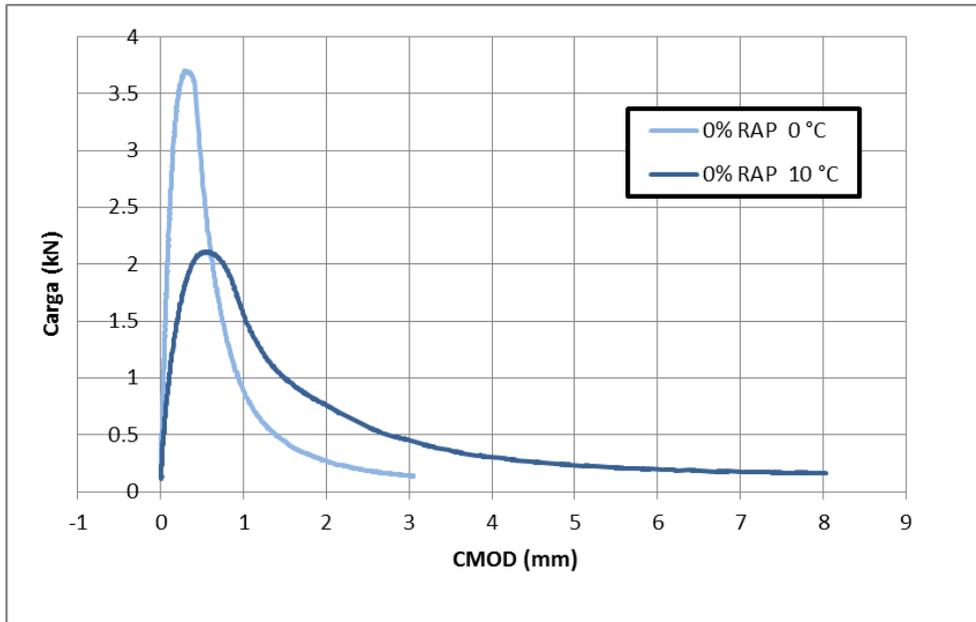


Figura 4.1. Grafica de los especímenes de 0 % RAP con AMP.

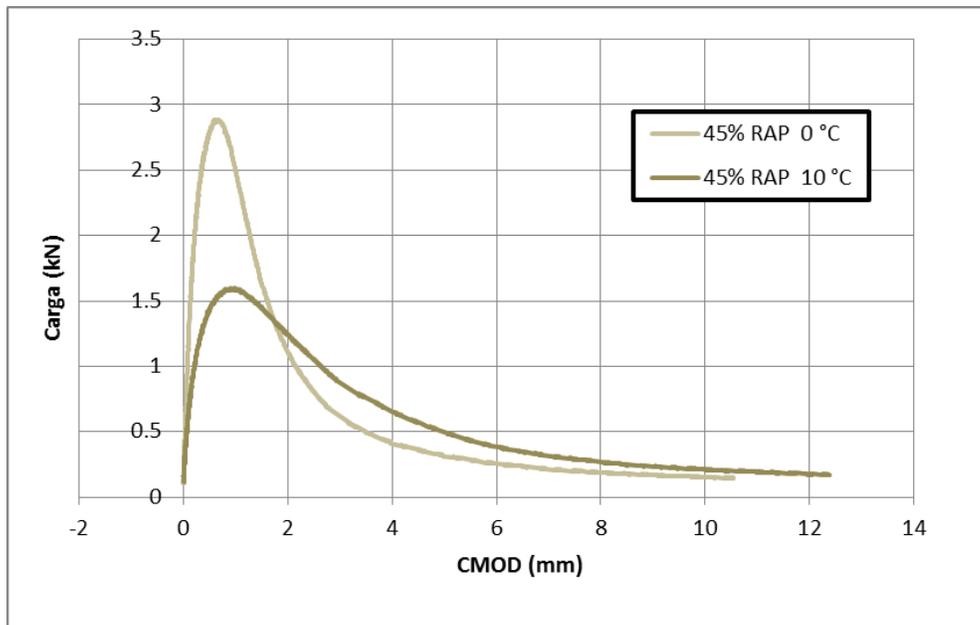


Figura 4.2. Grafica de los especímenes de 45 % RAP con AMP.

### 4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO

En la tabla 4.2 se resumen los datos obtenidos de la prueba de Módulo Dinámico ensayando los especímenes de 0 % y 45 % de RAP. Debido al tiempo que implica llevar a cabo la prueba no fue posible ensayar más especímenes. Lo cual nos habría brindado mayor información para tener un mejor panorama del comportamiento de las mezclas.

Tabla 4.2. Resumen de los datos obtenidos en la prueba de Módulo Dinámico.

<b>ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO</b>		
<b>Módulo Dinámico (MPa)</b>		
	<b>0 % RAP</b>	<b>45 % RAP</b>
	7668	9899
	6088	9757
	7659	11169
<b>Promedio</b>	<b>7138</b>	<b>10275</b>
Desv. Est.	<b>909.6</b>	<b>777.5</b>
COV	<b>12.7</b>	<b>7.6</b>

En la siguiente gráfica (figura 4.3) se muestran los valores obtenidos de Módulo Dinámico en 3 especímenes de 0 % RAP y 3 especímenes de 45 % RAP. Como se puede observar, en los 3 casos los valores de los especímenes de 45 % de RAP son notablemente mayores que los obtenidos por los especímenes del 0 % de RAP.

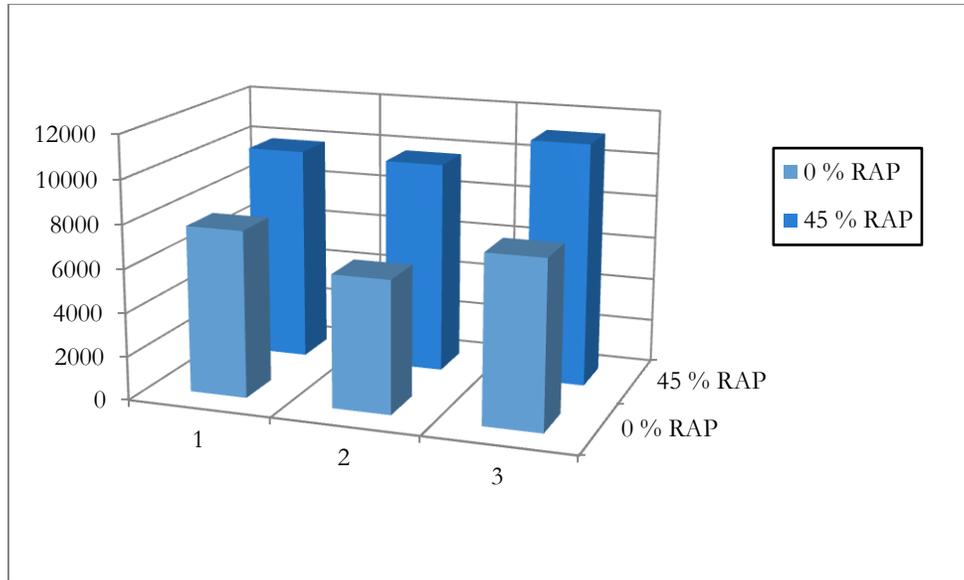


Figura 4.3. Gráfica de los especímenes de 0 % y 45 % de RAP.

#### 4.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE TSR

En la tabla 4.3 se muestran los valores más importantes calculados después de aplicar el ensayo de TSR a cada uno de los grupos de especímenes fabricados (secos y acondicionados) con los diferentes porcentajes de RAP (0, 15, 30 y 45 %) y usando un asfalto AC-20.

Tabla 4.3. Resultados obtenidos de la prueba de Resistencia al Daño por Humedad con asfalto AC-20.

ASFALTO	% RAP	Condición	Pastillas	Carga Máxima (N)	Índice Rigidez (Mpa)	Índice de Rigidez Promedio (Mpa)	Esfuerzo (Kpa)	Esfuerzo Promedio (Kpa)	TSR (%)
AC-20	0%	SECO	A3	25786.59	5521.75294	5791.9	1152.02	1119	88%
			A4	24149.86	5890.209097		1078.90		
			A6	25226.63	5963.741266		1127.00		
		ACONDICIONADO	A1	21108.81	3916.292054	4189.1	943.04	984	
			A5	21606.01	4187.211404		966.27		
			A7	23555.57	4591.729698		1050.14		
AC-20	15%	SECO	B4	26208.27	5850.060754	5702.1	1170.86	1202	89%
			B5	27393.90	5602.02356		1223.82		
			B8	27083.02	5654.076176		1209.94		
		ACONDICIONADO	B1	23500.66	5075.735454	4907.2	1049.89	1075	
			B6	23725.23	4652.005661		1058.81		
			B7	24968.71	4993.742515		1115.48		
AC-20	30%	SECO	C3	32924.85	7188.830965	7397.1	1470.92	1477	89%
			C5	32165.81	6814.790692		1437.01		
			C7	34060.46	8187.609705		1521.65		
		ACONDICIONADO	C1	30171.14	6984.06028	6261.4	1347.90	1313	
			C2	29472.91	5700.755322		1318.09		
			C4	29536.65	6115.248083		1316.78		
AC-20	45%	SECO	D2	34147.74	9081.844945	8233.1	1525.55	1486	87%
			D6	32757.15	7950.765423		1463.43		
			D8	32890.52	7666.788472		1469.39		
		ACONDICIONADO	D1	27728.30	5788.789756	5863.8	1240.07	1297	
			D3	27420.38	5429.777244		1227.59		
			D5	31737.26	6372.944165		1422.36		

Como se puede observar en la tabla, la relación de resistencia a la tensión (TSR) en todos los grupos de especímenes fabricados con AC-20 es mayor al 80 %, como indica la norma AASHTO T-283 para poder evaluar una mezcla asfáltica como aceptable para un diseño de un pavimento nuevo.

Se graficaron los valores de carga y flujo de cada una de las series de los especímenes fabricados con asfalto AC-20, en su condición seca (Figura 4.4) y acondicionada (Figura 4.5), de esta manera es más sencillo observar el comportamiento de cada mezcla.

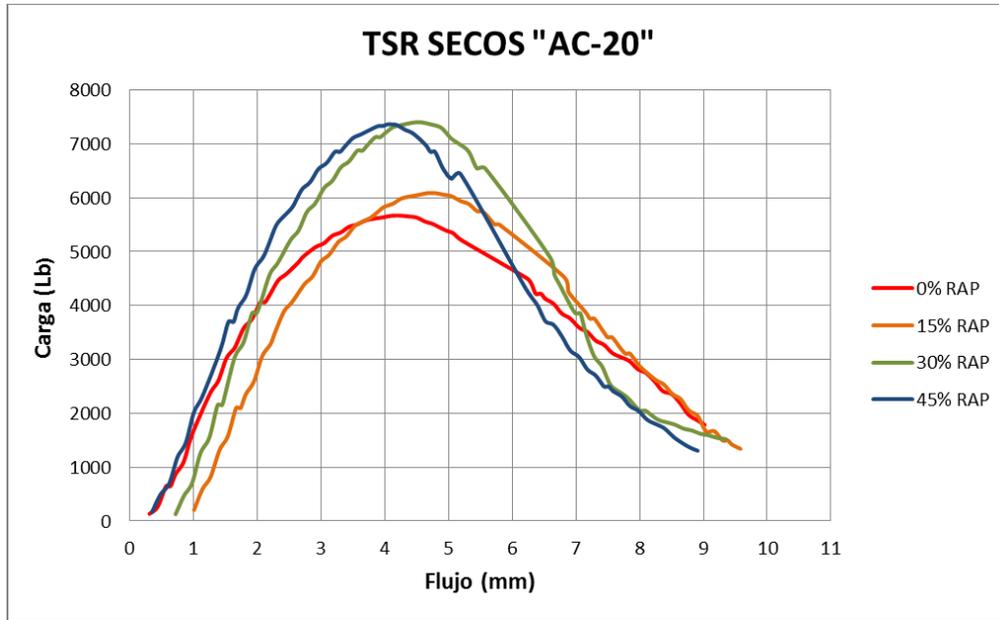


Figura 4.4. Curvas de carga-flujo de los especímenes secos con asfalto AC-20.

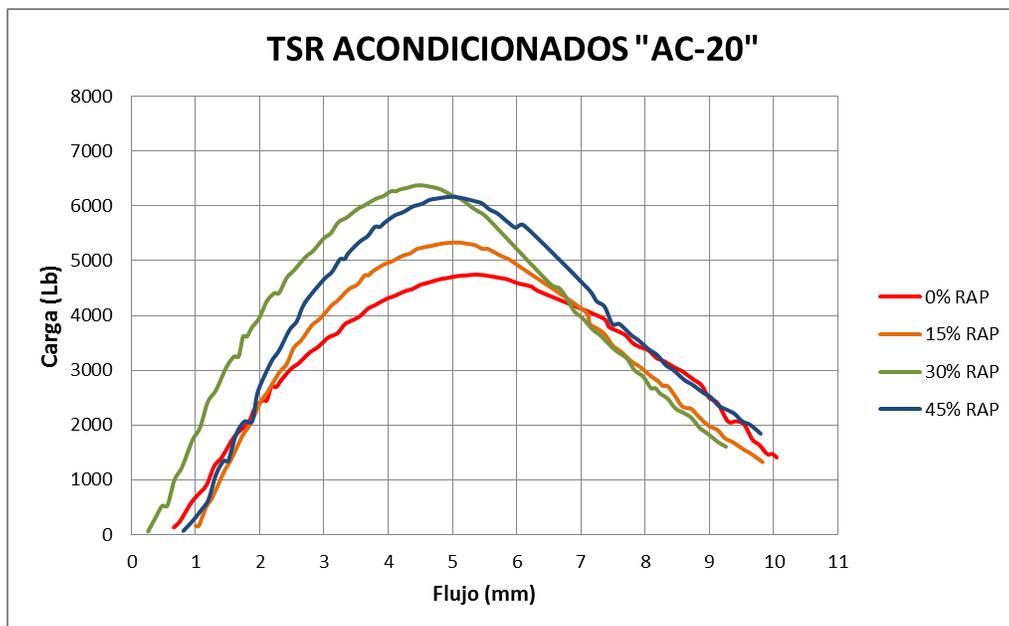


Figura 4.5. Curvas de carga-flujo de los especímenes acondicionados con asfalto AC-20.

En las gráficas se puede observar que para los dos tipos de condiciones en que fueron preparados los especímenes, cuanto mayor el porcentaje de RAP contenido en la

mezcla mayor será la resistencia a soportar esfuerzos. Sin embargo, lo que es evidente para el grupo de especímenes secos es su capacidad de soportar cargas más grandes antes de llegar a la fractura a diferencia del grupo de especímenes acondicionados, pero este otro grupo tolera mayores deformaciones antes de llegar a la falla.

En la siguiente tabla 4.4 se muestran los valores más importantes obtenidos en la prueba al ensayar cada grupo de especímenes fabricados, secos y acondicionados, con los diferentes porcentajes de RAP y usando un asfalto modificado con polímero (AMP).

Tabla 4.4. Resultados obtenidos de la prueba de Resistencia al Daño por Humedad con asfalto AMP.

ASFALTO	% RAP	Condición	Pastillas	Carga Máxima (N)	Índice Rigidez (Mpa)	Índice de Rigidez Promedio (Mpa)	Esfuerzo (Kpa)	Esfuerzo Promedio (Kpa)	TSR (%)
AMP	0%	SECO	M3	19945.75	3421.22568	3633.3	884.32	907	92%
			M7	19917.31	3422.217559		883.06		
			M2.2	20947.00	3937.40685		935.81		
			M4.2	20675.36	3752.334068		923.67		
		ACONDICIONADO	M2	18960.18	3170.598226	3202.4	841.51	833	
			M5	19503.47	3464.203559		866.54		
AMP	15%	SECO	N4	22721.03	3903.956439	4343.7	1015.06	986	96%
			N7	21852.16	3980.356779		976.25		
			N8	21835.49	4645.848488		975.50		
			N2.2	21850.20	4844.83323		976.16		
		ACONDICIONADO	N2	20941.12	3372.160949	3478.8	938.51	943	
			N5	22425.85	3913.760514		1002.93		
AMP	30%	SECO	O3	22246.39	3689.284506	4679.5	993.86	1133	98%
			O5	28058.79	5534.277428		1253.53		
			O6	25760.11	4814.973599		1150.83		
			O1	23454.56	3722.946726		1050.04		
		ACONDICIONADO	O7	25057.95	4081.099618	4085.7	1119.47	1110	
			O8	25917.02	4453.095387		1159.06		
AMP	45%	SECO	P3	32940.54	7503.539275	7049.3	1471.62	1444	95%
			P6	30808.57	6391.820054		1376.38		
			P8	33216.11	7252.424725		1483.93		
			P1	30298.63	5976.060525		6233.7		
		ACONDICIONADO	P5	31288.12	6491.310558	1397.80			

En la tabla 4.4 se puede observar que la Relación de Resistencia a la Tensión (TSR) en todos los grupos de especímenes fabricados con AMP es mayor al 80 %, que es el valor mínimo que indica la norma AASHTO T-283 para poder determinar que esta mezcla asfáltica es aceptable para un diseñar un pavimento nuevo. Además, los valores de

TSR de todos los grupos son considerablemente mayores a los que presentan los grupos fabricados con AC-20.

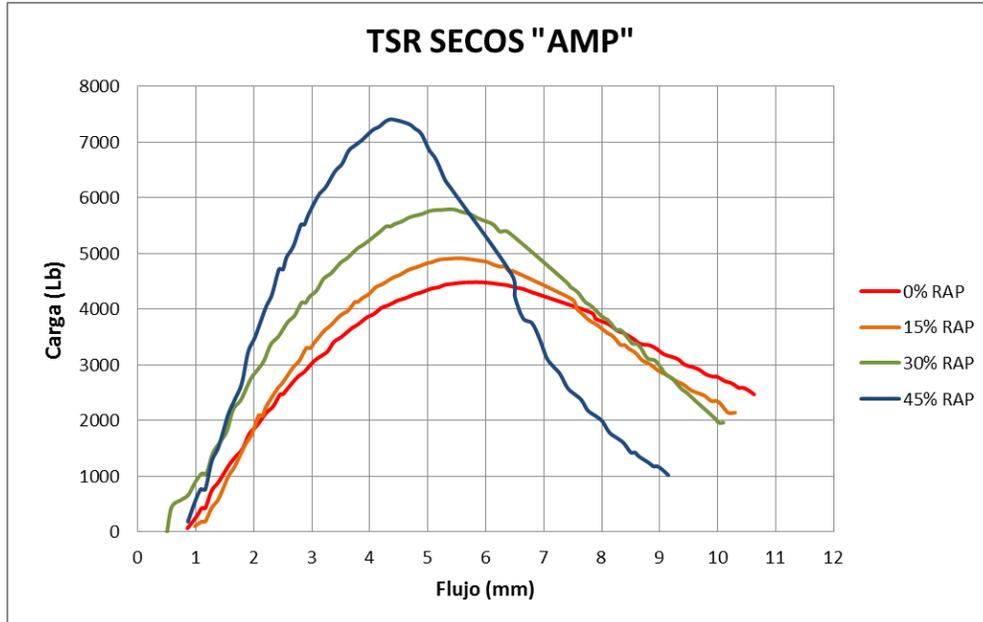


Figura 4.6. Curvas de carga-flujo de los especímenes secos con asfalto AMP.

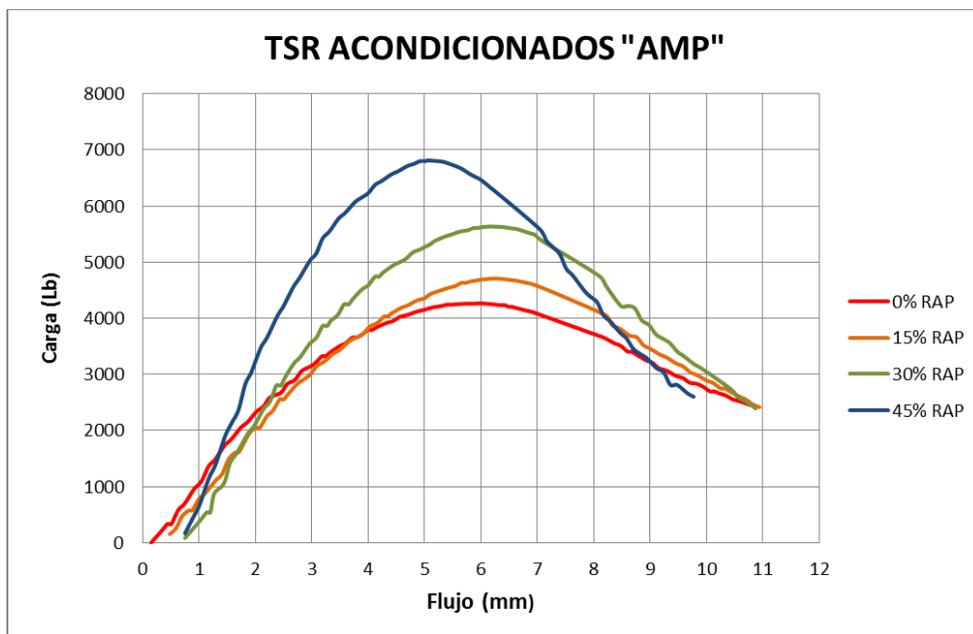


Figura 4.7. Curvas de carga-flujo de los especímenes acondicionados con asfalto AMP.

Se graficaron los valores de carga y flujo de cada una de las series de los especímenes fabricados con asfalto AMP, en su condición seca (Figura 4.6) y acondicionada (Figura 4.7), usando un promedio de los valores de las muestras.

Las gráficas nos muestran un comportamiento generalizado a resistir cargas mayores al aumentar el porcentaje de RAP contenido en las mezclas, esto se presenta en los dos tipos de grupos, secos y acondicionados, resaltando que en el caso de las mezclas con un porcentaje de 45% de RAP adicionado presenta valores notables de cargas mucho mayores antes de que la muestra llegue a la falla en comparación con las demás series de especímenes. Además, la tendencia de su comportamiento es más marcado que en el caso de los especímenes fabricados con AC-20.

Pero es necesario calcular otros parámetros para tener una mejor comprensión del desempeño de las mezclas. Como se podría tratar del Índice de Rígidez, el cual se calcula al dividir la carga máxima registrada durante el ensayo de la prueba y su deformación correspondiente, este valor nos acerca a una idea del comportamiento de la fragilidad de las mezclas, en las figuras 4.8 y 4.9 se presentan los valores obtenidos para los dos grupos de especímenes secos y acondicionados de cada tipo de asfalto usado.

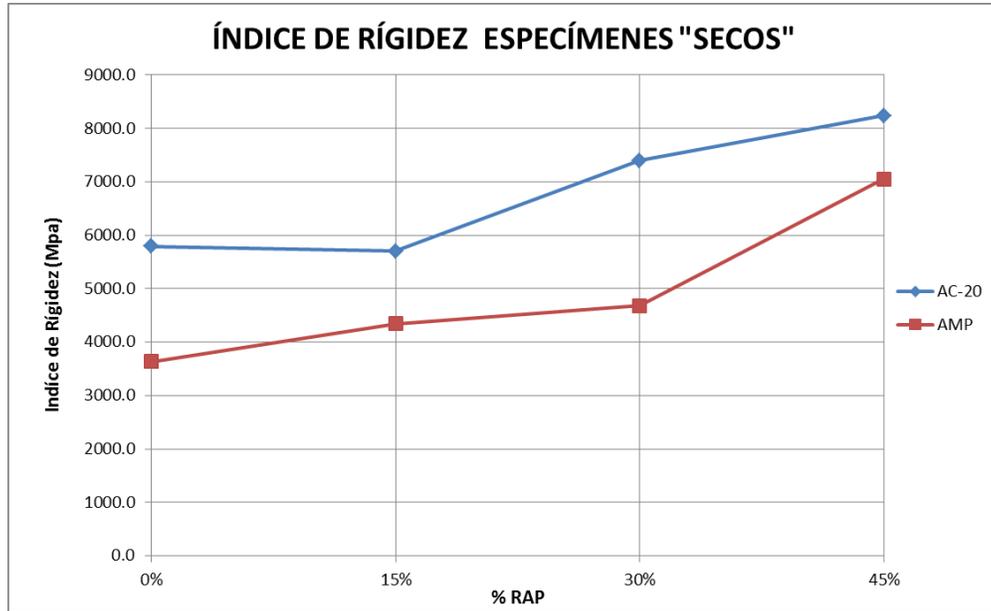


Figura 4.8. Gráficas del índice de rigidez de los especímenes secos con AC-20 y AMP.

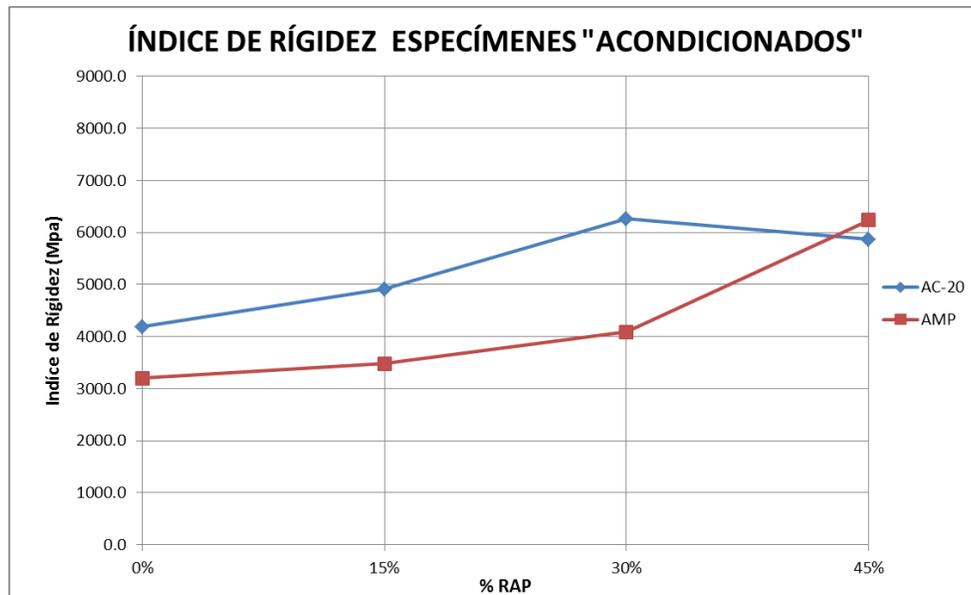


Figura 4.9. Gráficas del índice de rigidez de los especímenes acondicionados con AC-20 y AMP.

En las siguientes figuras 4.10 y 4.11 se presentan las gráficas de los valores promedios de esfuerzos contra los porcentajes de RAP adicionados de cada grupo de

especímenes. En cada gráfica se realizan distintas combinaciones entre los asfaltos utilizados y las condiciones de las muestras (secas y acondicionadas).

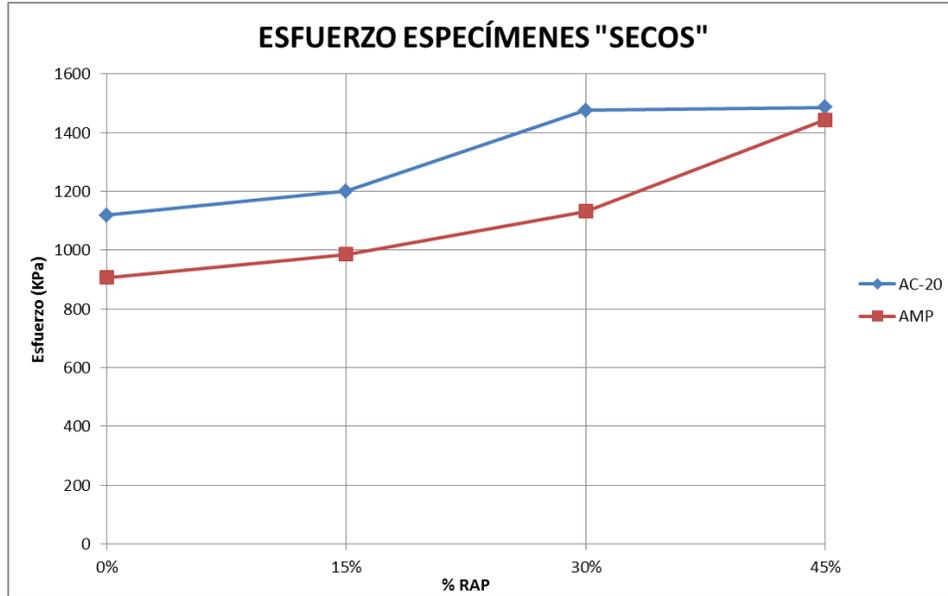


Figura 4.10. Gráficas de los esfuerzos de los especímenes secos con AC-20 y AMP.

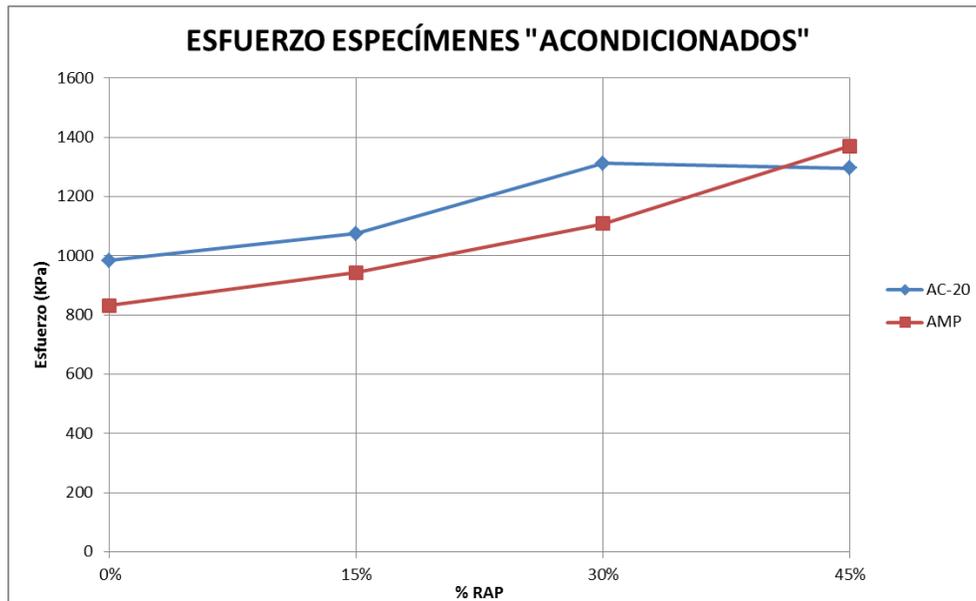


Figura 4.11. Gráficas de los esfuerzos de los especímenes acondicionados con AC-20 y AMP.

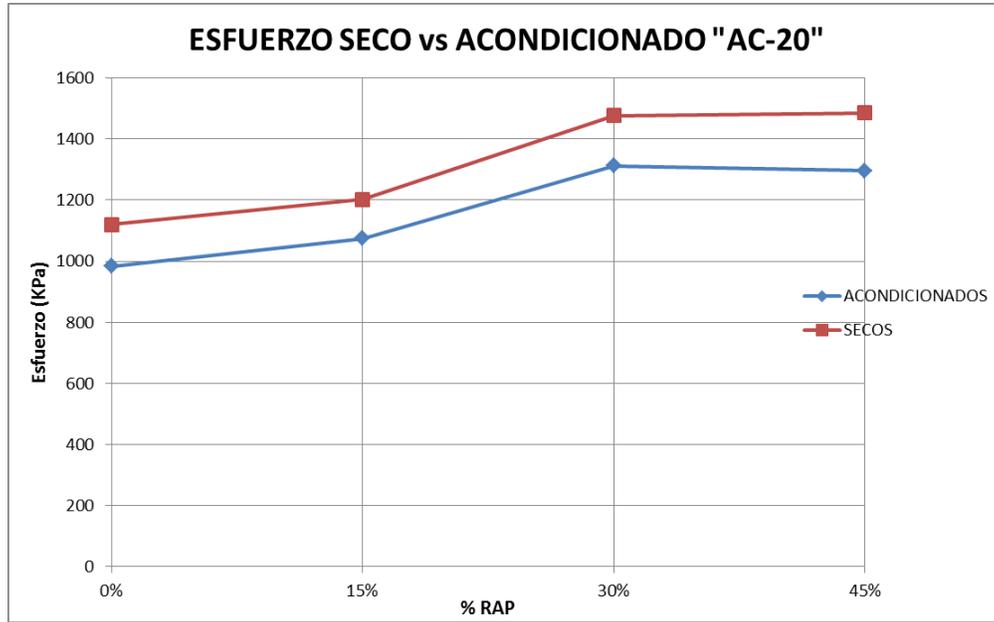


Figura 4.12. Gráficas de los esfuerzos de los especímenes secos y acondicionados con AC-20.

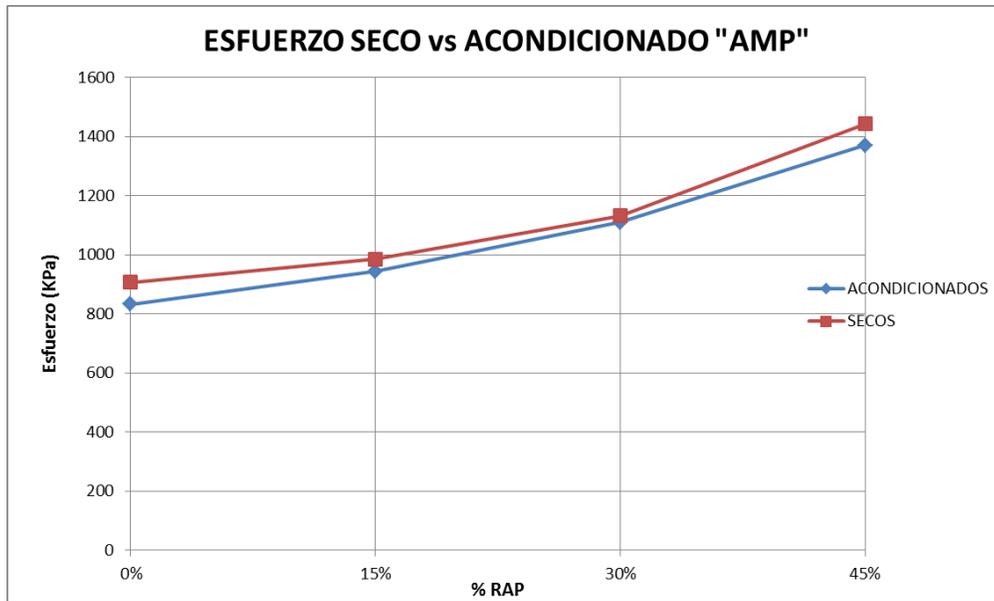


Figura 4.13. Gráficas de los esfuerzos de los especímenes secos y acondicionados con AMP.

En las gráficas donde se muestran juntos los esfuerzos secos y acondicionados (figuras 4.12 y 4.13) de cada uno de los asfaltos, se observa que el comportamiento es casi idéntico, colocándose siempre la línea de los esfuerzos secos por encima de la línea de los esfuerzos acondicionados.

En el caso del asfalto AC-20, las líneas de las gráficas presentan un incremento de esfuerzos con respecto al incremento de RAP incorporado pero después de pasar el 30 % de RAP adicionado el comportamiento cambia, en las condiciones secas los esfuerzos presentan un incremento casi nulo y en el caso de los esfuerzos en los especímenes acondicionados tienen una ligera disminución.

Para el caso del asfalto AMP, las líneas de las gráficas presentan un comportamiento casi idéntico. Presentando en ambos casos un incremento en los esfuerzos respecto al incremento de RAP adicionado.

Por último, en la figura 4.14 se muestra la Relación de Resistencia a la Tensión (TSR) de los dos asfaltos con respecto a los porcentajes de RAP adicionados. En todos los casos el TSR de los grupos de especímenes fabricados con asfalto AMP presento valores mayores que los obtenidos en los especímenes fabricados con asfalto AC-20.

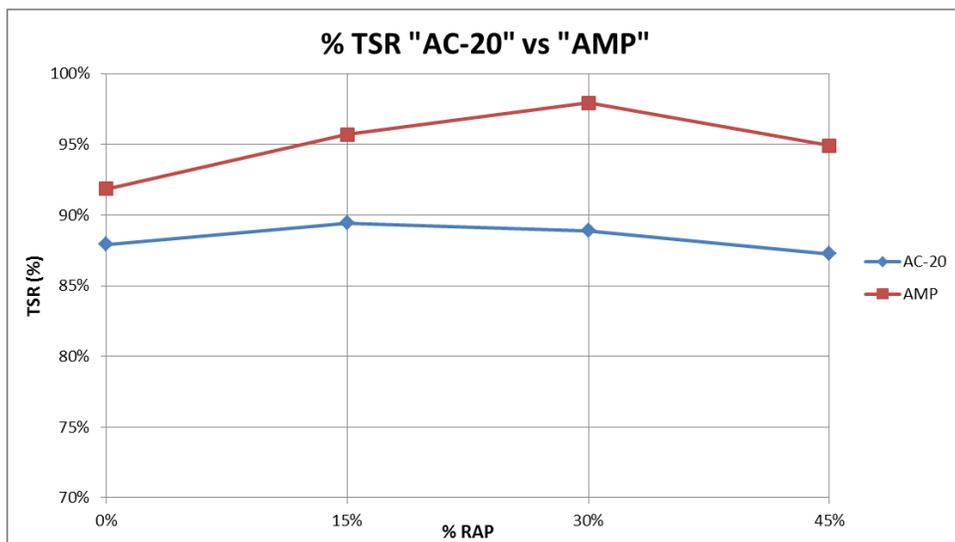


Figura 4.14. Gráficas de los porcentajes de TSR de los especímenes de AC-20 y AMP.

## **CONCLUSIONES**

Cada día aumentan los ecosistemas y las zonas naturales destruidas por el crecimiento de las actividades y de los insumos, que se requieren para satisfacer las necesidades de nuestra sociedad. En la actualidad, se ha tomado la responsabilidad de generar un menor impacto en nuestro medio ambiente desarrollando nuevas técnicas de construcción que reduzcan el daño producido.

Durante el estudio y revisión de los proyectos relacionados con éste tema de tesis, se comprobó que existen diversas instituciones académicas y gubernamentales preocupadas por el medio ambiente. Que se encuentran investigando y desarrollando tecnologías amigables con la naturaleza. Para nuestro caso, se ha avanzado mucho en la utilización de material reciclado en la construcción de nuevos pavimentos asfálticos. Específicamente, el desarrollo de equipos especializados para la recuperación del material a reciclar y para su mezclado con los demás materiales vírgenes en planta o en el lugar; metodologías para diseñar y fabricar pavimentos asfálticos reciclados; y pruebas para evaluar el desempeño de las mezclas.

Tomando en cuenta la información anterior, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en colaboración con el laboratorio de SemMaterials México, realizaron un proyecto para analizar las características de diferentes mezclas asfálticas fabricadas con la técnica de reciclado en caliente, y determinar si son aceptables para su colocación como nuevos pavimentos.

El primer paso fue caracterizar todos los materiales que se emplearían en la fabricación de las mezclas. El agregado pétreo virgen fue evaluado con las pruebas que marca el Protocolo AMAAC PA-MA-001/2008, obteniendo en todas las pruebas resultados favorables, exceptuando la prueba de Azul de Metileno que arrojó un valor ligeramente inferior al mínimo aceptable. El material reciclado (RAP) fue mezclado varias veces para tomar una muestra representativa y determinar que granulometría presenta al ser extraído, el resultado nos indica porcentajes muy altos de material de

tamaño grueso, superior a la malla no. 4 (4.75 mm), y material fino, inferior a la malla no. 200 (0.075 mm). Además, se determinó el contenido de asfalto contenido en el RAP, el cual fue muy constante en cada ensayo.

Por los resultados anteriores, se eligió utilizar el RAP en fracciones, por lo cual se tuvo que cribar y separar por tamaño de partícula. Para el manejo y almacenamiento, es importante catalogar su procedencia y tamaño, lo cual evitará mezclar RAP procedente de distintos proyectos.

En la parte de fabricación de los especímenes, se debe de ser muy preciso en el peso de cada material. La adición o disminución de uno de los materiales generará un espécimen con cualidades distintas a las de todo un lote de producción.

Una de las etapas más críticas durante la fabricación, es el mezclado y compactación, se debe de tener mucha atención en hacer cada procedimiento a las temperaturas que marca la carta de viscosidad para cada asfalto. Un cambio en la temperatura durante estos procesos nos generará un espécimen de características distintas a otro, aun cuando su contenido de asfalto, de agregado pétreo virgen y RAP sean idénticos.

Otro factor que puede alterar las características de los especímenes, es el uso correcto de los equipos e instrumentos para el mezclado y compactación. Lo cual requiere de personal bien capacitado en el manejo y operación de los equipos, deben de contar con el equipo de protección personal adecuado y que los equipos se encuentren en perfecto estado y apropiadamente calibrados.

Finalmente, los resultados de las pruebas nos indican que una de las variables que más afecta el comportamiento de las mezclas es el tipo de asfalto. Se puede observar en los especímenes fabricados con asfalto modificado con polímero, que los esfuerzos que soportan son ligeramente menores que los fabricados con AC-20 pero la ductilidad siempre es mayor en el caso del AMP.

El otro factor que nos interesa en gran medida, es el porcentaje de RAP adicionado, el comportamiento en los especímenes fabricados con AC-20 muestra una tendencia a soportar mayores esfuerzos mientras el porcentaje de RAP aumenta pero al llegar a valores entre el 30 % y 45 % decrece la capacidad para soportar esfuerzos, lo cual se hace más notable en las muestras acondicionadas en agua. A diferencia de los especímenes con AMP, que mientras aumenta el porcentaje de RAP, aumenta la capacidad de soportar esfuerzos, además, su comportamiento es sumamente similar con respecto al acondicionamiento en seco o en húmedo.

La prueba de Energía de Fractura, nos ayuda a extender el comportamiento de las mezclas asfálticas cuando se les adiciona RAP, realizando el ensayo a temperaturas de 0 y 10 °C, utilizando únicamente un asfalto modificado con polímero. En el caso de especímenes con 0 % RAP con respecto a los de 45 %, se observa que para ambos casos de temperaturas pueden resistir mayores cargas. Por otra parte, los especímenes de 45 % de RAP acumulan mayores deformaciones antes de la fractura en comparación con los de 0 % de RAP, además de que sus deformaciones son más parecidas.

Por último, los resultado de la prueba de Módulo Dinámico con especímenes fabricados con asfalto modificado con polímero, nos muestra valores considerablemente mayores en el caso de 45 % de RAP con respecto a los de 0 %.

Sería conveniente poder realizar una investigación más profunda aplicando los ensayos de Energía de Fractura y Módulo Dinámico, con la intención de conocer más a fondo el comportamiento de las mezclas asfálticas recicladas en caliente. Pero uno de los mayores inconvenientes, es el número escaso de equipos capaces de realizar la prueba que se encuentran en nuestro país.

Pero en general, el análisis generado a lo largo de la investigación nos indica que las mezclas recicladas adicionadas con RAP en comparación de las mezclas con materiales vírgenes tienen comportamientos prácticamente similares. Por lo cual, son una excelente opción para la construcción y rehabilitación de carreteras.

El siguiente paso es difundir esta técnica entre las instituciones gubernamentales y las empresas privadas encargadas del diseño y construcción de la infraestructura carretera de nuestro país. Los beneficios ecológicos y económicos que conlleva su uso son claros y nos brindarán resultados inmediatos.

## **BIBLIOGRAFÍA**

American Association of State Highway and Transportation Officials (2006), "Bulk Specific Gravity of Compacted Hot Mix Asphalt Using Saturated Surface-Dry Specimens: T 166", United States.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2006), "Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA): R 30", United States.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2006), "Standard Method for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor: T 312", United States.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2006), "Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot-Mix Asphalt Paving Mixtures: T 209", United States.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2008), "Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture Induced Damage: T 283", Washington, D.C.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2012), "Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA): T 342-11", Washington, D.C.

American Society for Testing and Materials (2014), "Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry: D7313-13", United States.

Asociación Mexicana del Asfalto A. C. (2008), "PROTOCOLO AMAAC PA-MA-001/2008: Diseño de Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa de Alto Desempeño", México.

Alarcón, J. (2003), "Estudio del Comportamiento de Mezclas Bituminosas Recicladas en Caliente en Planta", Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, UPC, Barcelona.

Calderon, S. (2011), "Métodos de Rehabilitación en Pavimentos Flexibles", Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica (2002), "M5.1. Catálogo de Deterioros de Pavimentos Flexibles", Colección de Documentos, Volumen no 11, México.

García, M. (), “Estudio de la Modelización de la Localización de Deformaciones en el Hormigón”, Tesis de Máster, Máster Universitario en Ingeniería de las Estructuras, Cimentaciones y Materiales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Garnica, P., Flores, M., Gómez, J.A. y Delgado, H. (2005), “Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas”, Publicación Técnica No 267, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro.

National Asphalt Pavement Association, <[www.asphaltpavement.org](http://www.asphaltpavement.org)>.

Normativa para la Infraestructura del Transporte, “N-CMT-4-05-001/06 Características de los Materiales, Materiales para Pavimentos, Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas, Calidad de los Materiales Asfálticos”, México.

Quesada, I. (2004), “Evaluación del Comportamiento de Diferentes Tramos de Carretera Rehabilitados utilizando Mezclas Recicladas en Frío”, Tesina, Escuela

SemMateriales México, <[www.semgroupcorp.com](http://www.semgroupcorp.com)>.

Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, UPC, Barcelona.

Valdés, G. (2011), “Evaluación del Proceso de Fisuración en las Meclas Bituminosas Mediante el Desarrollo de un Nuevo Ensayo Experimental -Ensayo Fénix-”, Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, UPC, Barcelona.

West, R. (2010), “Reclaimed Asphalt Pavement Management Best Practices”, National Center for Asphalt Technology Auburn University, Auburn, Alabama.