

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**“EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE TENSIÓN INDIRECTA Y
RESISTENCIA AL DESGASTE EMPLEANDO ASFALTOS MODIFICADOS”**

POR:

ARMANDO GALINDO DOMÍNGUEZ

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE

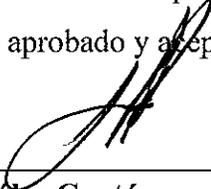
MAESTRO EN INGENIERÍA

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

AGOSTO DE 2020

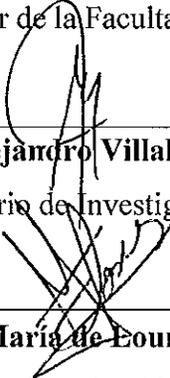


“Evaluación de mezclas asfálticas mediante tensión indirecta y resistencia al desgaste empleando asfaltos modificados”. Tesis, presentado por el Ing. Armando Galindo Domínguez como requisito parcial para obtener el grado Maestro en Ingeniería, ha sido aprobado y aceptado por:



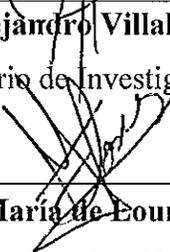
M.I. Javier González Cantú

Director de la Facultad de Ingeniería



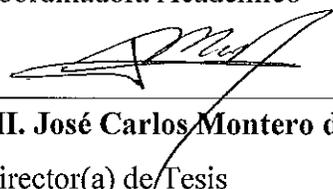
Dr. Alejandro Villalobos Aragón

Secretario de Investigación y Posgrado



M.A. María de Lourdes Flores Portillo

Coordinadora Académico



MI. José Carlos Montero de Anda

Director(a) de Tesis

Febrero 2020

Fecha

Comité:

MI. José Carlos Montero de Anda

Dra. Daphne Espejel García

MI. Antonio Portilla Ocegüera

MI. Luis Morales Gutiérrez

Derechos Reservados
Armando Galindo Domínguez

Dirección personal o de la institución

Chihuahua, Chih. México

Febrero 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

ARMANDO GALINDO DOMÍNGUEZ

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Vías Terrestres, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Mi. José Carlos Montero de Anda** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“Evaluación de Mezclas Asfálticas mediante Tensión Indirecta y Resistencia al Desgaste empleando Asfaltos Modificados”**.

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRACT

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

1. INTRODUCCIÓN

2. MATERIALES BÁSICOS

3. MEZCLAS ASFÁLTICAS

4. MÉTODO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

5. ENSAYOS A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

6. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

8. CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

REFERENCIAS

ANEXO FOTOGRAFICO

CARACTERIZACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFALTICOS

ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFALTICAS

ELABORACIÓN Y ENSAYE DE MEZCLAS ASFALTICAS

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

A T E N T A M E N T E
"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized initial 'J' followed by a horizontal line and a vertical stroke.

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

**FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.**



DIRECCIÓN

**EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized initial 'A' followed by a horizontal line and a vertical stroke.

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

AGRADECIMIENTOS

La vida me ha enseñado a ser agradecido todos los días con lo que me rodea, con lo que tengo y con lo que no.

Agradezco a Dios, a mi esposa, a mis dos grandes hijos por el inmenso apoyo y sacrificio que por muchos años me han brindado para seguir cumpliendo mis metas personales, no puedo dejar de lado a mis padres por todo el apoyo brindado por siempre.

Gracias a mis cuatro hermanos, sé que siempre han estado orgullosos de ver que he logrado los objetivos fijados y donde también ellos a su manera me educaron y sigo aprendiendo de cada uno.

A los docentes de la maestría les agradezco por haber compartido sus conocimientos con un servidor y que siempre buscaron que tuviéramos el mejor desempeño y aprendizaje posible.

Agradezco profundamente a mis revisores de tesis, mis directores de tesis por el tiempo, paciencia y entusiasmo que me dieron para sacar todo a flote.

Al Dr. Miguel Baltazar Zamora de la Universidad Veracruzana por darnos un cobijo para ingresar a la UACH y que sigue siendo un gran amigo, al Dr. Saúl Castillo por haberme impulsado a investigar y que buscó los medios para que pudiera realizar los estudios en Surfax; aquí aprovecho para dar mi reconocimiento a todos los técnicos, responsables de laboratorio y directores que me enseñaron y compartieron su tiempo conmigo.

También a todos mis compañeros de la maestría les agradezco por el apoyo, el tiempo y experiencias compartidas que nunca olvidaré.

RESUMEN

Se realizó una investigación para revisar el comportamiento de mezclas asfálticas, en México la metodología Marshall es la más utilizada para la revisión de los parámetros volumétricos, resistencia, mejor conocida como estabilidad y deformación (flujo). El método Superpave desarrollado por el Departamento de Transporte de Estados Unidos de Norteamérica, Strategic Highway Research Program (SHRP), es uno de los modelos actuales crecientes en el mercado del diseño de mezclas asfálticas cuyos orígenes datan del año 1987 y que aún se encuentran en etapas de mejora, revisión y exploración de nuevos campos de crecimiento. La revisión de la investigación contempla la revisión de los tipos de cementos asfálticos (AC-20 Salamanca, Elvaloy 4170 y Elvax 240) utilizados en conjunto con agregados pétreos con granulometría densa y cuya finalidad es evaluar su comportamiento ensayadas a la Tensión Indirecta y el ensaye Cántabro. Ambos parámetros utilizados para determinar su respuesta ante el esfuerzo, aunado a una deformación y la cohesión de las mezclas con diversos contenidos de cementos asfálticos. La finalidad de los estudios es apoyar a otras investigaciones realizadas alrededor del Protocolo AMAAC y Superpave y abre la posibilidad de utilizarse como parámetros de caracterización de mezclas asfálticas. Se determinó que en cuanto mayor era el contenido de cemento asfáltico el porcentaje de desgaste cántabro disminuía al igual que la resistencia a la tensión. Las mezclas asfálticas modificadas con termopolímero tuvieron mejor desempeño con respecto a las modificadas con una resina. En algunos casos existió una mejora de las mezclas acondicionadas contra las no acondicionadas.

Palabras clave: *Marshall, Elvaloy, Elvax, Superpave, Diseño de Mezclas, Amaac.*

ABSTRACT

An investigation was carried out to review the behavior of asphalt mixtures, in Mexico the Marshall methodology is the most widely used for the review of volumetric parameters, resistance, better known as stability and deformation (flow). The Superpave method developed by the United States Department of Transportation, Strategic Highway Research Program (SHRP), is one of the current growing models in the market for the design of asphalt mixtures whose origins date back to 1987 and which are still in stages of improvement, review and exploration of new growth fields. The review of the research contemplates the review of the types of asphalt cements (AC-20 Salamanca, Elvaloy 4170 and Elvax 240) used in conjunction with stone aggregates with dense granulometry and whose purpose is to evaluate their behavior tested at Indirect Tension and test Cantabrian. Both parameters used to determine their response to stress, together with deformation and cohesion of mixtures with different asphalt cement contents. The purpose of the studies is to support other investigations carried out around the AMAAC and Superpave Protocol and opens the possibility of being used as characterization parameters for asphalt mixtures. It was determined that the higher the content of asphalt cement, the percentage of Cantabrian wear decreased as well as the resistance to tension. Thermopolymer modified asphalt mixes performed better than resin modified. In some cases there was an improvement of the conditioned mixtures against the non-conditioned ones.

Keywords: *Marshall, Elvaloy, Elvax, Superpave, Mix Design, Amaac.*



INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. MATERIALES BÁSICOS	12
2.1 Cemento asfáltico y sus propiedades	12
2.1.1 Definición de cemento asfáltico.....	12
2.1.2 Propiedades del asfalto.....	13
2.1.2.1 Durabilidad.....	13
2.2 Clasificación de los materiales asfálticos.	21
2.2.1 Emulsiones Asfálticas.....	22
2.2.2 Asfaltos rebajados	23
2.3 Asfaltos Modificados	24
2.3.1 Definición de asfalto modificado	24
2.3.2 Características de los Asfaltos Modificados	24
2.3.3 Clasificación de los Asfaltos Modificados.....	25
2.3.4 Proceso de modificación del asfalto.....	26
3. MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	27
3.1 Definición	27
3.2 Tipos de mezclas asfálticas.....	28
3.2.1 Mezclas asfálticas de granulometría densa	29
3.2.1.1 Características de las mezclas con granulometría densa.....	29
3.2.2 Mezclas con granulometría abierta	30
4. MÉTODO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	31
4.1 Método SUPERPAVE	31
4.1.1 Ensayos al material pétreo	32
4.1.1.1 Pruebas de consenso	32
4.1.1.2 Pruebas de origen.....	32
4.1.1.3 Ensaye de azul de metileno.....	33
4.1.2 Ensayos a los ligantes	33
4.1.2.1 Viscosidad rotacional (VR)	34
4.1.2.2 Reómetro de corte dinámico (DSR).....	35
4.2 Método de diseño MARSHALL.....	35
5. ENSAYOS A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	36
5.1 Tensión Indirecta	37
5.2 Resistencia al desgaste Cántabro (UCL)	39
6. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	40
6.1 Granulometría	41
6.2 Modificantes utilizados en el asfalto	42
6.2.1 ELVAX.....	42



6.2.2	ELVALOY	43
6.3	Análisis de los asfaltos.....	45
6.3.1	Comportamiento reológico y elástico del asfalto	47
6.4	Características de diseño en las mezclas asfálticas.....	48
7.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	51
7.1	Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica SUPERPAVE	51
7.2	Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica MARSHALL	55
8.	CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	59
8.1	Resistencia a la tensión indirecta	59
8.2	Ensaye al desgaste Cántabro.....	63
8.3	Conclusiones.....	67
	REFERENCIAS	69
	ANEXO FOTOGRÁFICO	76
	AGREGADOS PÉTREOS	77
	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	78
	CARACTERIZACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS	79
	ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	81
	ELABORACIÓN Y ENSAYE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	82



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Composición coloidal del asfalto.	13
Figura 2 Equipo para realizar la Prueba de Película Delgada (RTFO).....	14
Figura 3 Ejemplo de curva viscosidad vs temperatura.	17
Figura 4 Nomograma para el índice de penetración	19
Figura 5 Esquema de la Susceptibilidad a la Temperatura.	19
Figura 6 Esquema de pruebas al asfalto.....	21
Figura 7 Proceso de incorporación del agregado con emulsión asfáltica.	23
Figura 8 Requerimientos para Mezclar Elvaloy.	26
Figura 9 Planta de elaboración de Mezcla Asfáltica discontinua.	27
Figura 10 Textura de una mezcla densa HMA.	29
Figura 11 Viscosímetro Rotacional Brookfield Instituto Mexicano del Transporte	34
Figura 12 Reómetro de Corte Dinámico (DSR) Laboratorio Surfax	35
Figura 13 Distribución de tensiones teórica.	38
Figura 14 Trituración y acopio de materiales (Banco “Taurus”).....	41
Figura 15 Curva granulométrica.	42
Figura 16 Izquierda otros tipos de modificadores – derecha micrografía de estructura de incorporación asfalto – polímero Elvaloy 4170.....	43
Figura 17 Comparativa de deformación en mezclas asfálticas con Elvaloy RET(0%, 1.5% y 2%)	44
Figura 18 Resultados de ahuellamiento, realizados con rueda de Hamburgo.	44
Figura 19 Pellet de los modificantes utilizados..	45
Figura 20 Análisis comparativo de los asfaltos utilizados.....	45
Figura 21 Análisis de los diferentes tipos asfaltos después de RTFO.	46
Figura 22 Equipos de compactación de mezclas asfálticas al derecho Compactador giratorio (Fuente: LASFALTO), lado izquierdo equipo de compactación Marshall	49
Figura 23 Probetas realizadas con Compactador Giratorio.	49
Figura 24 Proceso de mezclado de cemento asfáltico y agregados.	50
Figura 25 Determinación de la Gravedad específica teórica máxima.	50
Figura 26 Parámetros Volumétricos - metodología Superpave	54
Figura 27 Parámetros Volumétricos del diseño Marshall.....	57



Figura 28 Equipo e instalación de probeta para ensaye de Tensión indirecta.	59
Figura 29 Comportamiento de las mezclas asfálticas respecto a la carga	60
Figura 30 Comparativa de tensión indirecta vs deformación	61
Figura 31 Relación entre resistencia a la tensión y deformación	62
Figura 32 Relación entre resistencia a la tensión y contenido de cemento asfáltico	62
Figura 33 Eficiencia de las mezclas asfálticas a la Tensión Indirecta.	63
Figura 34 Probetas al Ensaye al Desgastes Cántabro	64
Figura 35 Resistencia al Desgastes Cántabro	65
Figura 36 Eficiencia de las mezclas al desgaste Cántabro (UCL).....	65
Figura 37 Relación tensión indirecta vs desgaste cántabro	66
Figura 38 Gráfico de correlación de ensayos.....	66
Figura 39 Proceso de excavación de material para trituración	77
Figura 40 Almacén de Material “Banco Taurus”	77
Figura 41 Muestreo de material triturado	77
Figura 42 Proceso de trituración de material.....	77
Figura 43 Secado de material pétreo	78
Figura 44 Proceso de cuarteo del material.....	78
Figura 45 Densidad de absorción de agregados	78
Figura 46 Prueba de Azul de Metileno	78
Figura 47 Punto de reblandecimiento	79
Figura 48 Ensaye de penetración.....	79
Figura 49 Prueba de resiliencia en asfaltos modificados.....	79
Figura 50 Ensaye de viscosidad rotacional (VR).....	79
Figura 51 Prueba de ductilidad del asfalto.	80
Figura 52 Ensaye de recuperación elástica por torsión.....	80
Figura 53 Corte para ejecución de ensaye reológico (DSR).....	80
Figura 54 Ensaye reológico del asfalto (DSR)	80
Figura 55 Separación de los agregados por tamaños.....	81
Figura 56 Vista general de los agregados	81
Figura 57 Calentamiento de materiales en horno	81
Figura 58 Mezclado de agregados y cemento asfáltico	81



Figura 59	Proceso de colocación de la mezcla en el compactador giratorio	82
Figura 60	Proceso de amasado realizado por el compactador giratorio	82
Figura 61	Probeta terminada en el compactador giratorio.....	82
Figura 62	Vista general de probetas elaboradas con compactador giratorio.	82
Figura 62	Mezcla elaborada para proceso de curado.....	83
Figura 63	Determinación de la gravedad teórica máxima (Gmm)	83
Figura 64	Colocación de probeta en picnómetro para proceso de saturación	83
Figura 65	Vista general del proceso de saturación.	83
Figura 67	Proceso de ensaye de tensión indirecta.	84
Figura 68	Vista general del ensaye de tensión indirecta.....	84
Figura 69	Probetas antes y después del ensaye Cántabro.....	84
Figura 70	Extracción de probetas, finalizado en ensaye Cántabro.....	84
Figura 71	Probetas antes del ensaye Cántabro	85
Figura 72	Probetas después del ensaye Cántabro	85
Figura 73	Probetas con cemento asfáltico AC-20	85
Figura 74	Probetas con cemento asfáltico modificado “ELVALOY”	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Materiales asfálticos por velocidad de fraguado	23
Tabla 2	Clasificación de mezclas asfálticas.....	28
Tabla 3	Caracterización del agregado mineral	41
Tabla 4	Rangos granulométricos	42
Tabla 5	Caracterización de los asfaltos después del ensaye RTFO.....	47
Tabla 6	Contenidos iniciales de cemento asfáltico.....	48
Tabla 7	Parámetros volumétricos obtenidos Superpave.....	51
Tabla 8	Parámetros volumétricos obtenidos Marshall.....	58
Tabla 9	Contenidos de cemento asfáltico	59



1. INTRODUCCIÓN.

La estructura de un pavimento flexible continúa siendo más económica respecto a las vialidades de pavimento rígido, sin embargo, éstos han presentado inconvenientes tales como agrietamientos, deformaciones y diversas fallas, debido a la baja calidad de los materiales utilizados, esto aunado a la deficiencia en los procesos constructivos y que han provocado una reducción en la vida útil de las vías terrestres.

Investigadores en el mundo han realizado diversos estudios respecto a la forma de afrontar la problemática, encontrando una solución en la inclusión de materiales, ya sea en la estructura del pavimento y/o en una capa que conforman al mismo.

En los pavimentos flexibles, la capa del pavimento que mayor resistencia presentan para soportar las cargas impuestas por el tránsito han sido las carpetas asfálticas, las cuales mezcladas con modificadores han dado respuestas favorables al comportamiento en conjunto del pavimento, dado el incremento en parámetros como su módulo elástico, baja deformación y resistencia mayores a las esperadas.

La modificación de los asfaltos es una tecnología que se está utilizando en la actualidad en los pavimentos, para su construcción, rehabilitación y conservación del pavimento. Reduciendo así los costos de mantenimiento y operación de las vías terrestres.

En México la incorporación y el conocimiento de las mezclas asfálticas modificadas continúa siendo, en algunos sectores, desconocida o no considerada debido a la falta de capacitación y el interés mostrado por el personal técnico que realiza obras de infraestructura vial. Es por lo anteriormente expuesto que se han desarrollado nuevas tecnologías para el diseño de mezclas asfálticas. *Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement)*, considerada como un sistema desarrollado para especificar cementos asfálticos, agregados minerales y las condiciones de desempeño de mezclas asfálticas con la finalidad de proporcionar pavimentos flexibles mejor diseñados, con desarrollo científico y tecnológico aplicado a las mezclas asfálticas en sus distintas variantes.

Cabe mencionar que continúan siendo de gran relevancia la dosificación de cemento asfáltico, tipo de agregado utilizado para la elaboración de una mezcla asfáltica, con características que puedan asegurar un buen funcionamiento durante la construcción y



operación. Es imprescindible realizar los ajustes necesarios durante el proceso de producción para cumplir con los parámetros granulométricos y de dosificación de cemento asfáltico y que forman parte de la importancia del control de calidad de obras.

2. MATERIALES BÁSICOS

2.1 Cemento asfáltico y sus propiedades

2.1.1 Definición de cemento asfáltico

En México la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) es la institución gubernamental que regula la emisión de la normativa para la construcción, mantenimiento y operación de carreteras y otras vías de comunicación.

Dentro de los materiales utilizados para la construcción de carreteras y principalmente en mezclas asfálticas, no puede faltar el uso de asfalto o mejor dicho cemento asfáltico.

La norma N-CMT-4-05-001/06 (Norma de Características de los Materiales) del año 2006, elaborada por la SCT lo define como:

Es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida (p.1).

Cada uno de los componentes del asfalto proporciona características diferentes debido a su procedencia variable. Los asfaltenos son partículas sólidas discretas con alta viscosidad que proveen al asfalto de elasticidad, resistencia y cohesión.

Entre los principales elementos químicos de los asfaltenos se encuentran el Niquel (Ni), Vanadio (V), Cobalto (Co), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), así como una parte de oxígeno (O), azufre (S), nitrógeno (N).

Avellán M. (2007) menciona: *“El 80- 85% de los asfaltenos son átomos de carbono, la relación C:H (carbono – hidrógeno) se encuentra entre 0.8 y 0.87. Los asfaltenos son considerados como el producto de la condensación de las resinas” (p.4).*

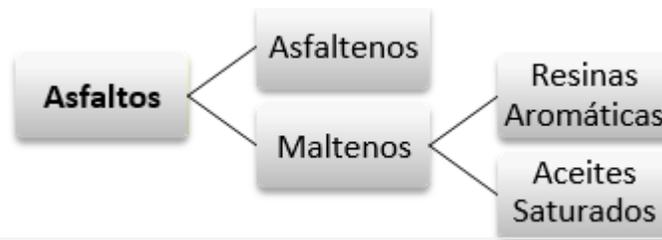


Figura 1 Composición coloidal del asfalto. Fuente: propia

Las resinas y los aceites forman el grupo de los máltenos, las primeras son muy susceptibles a la temperatura, siendo las responsables de las propiedades viscoelásticas y tras el proceso de oxidación se transforman en asfaltenos. Los aceites tienen la función de aumentar la fluidez del asfalto y de igual forma se transforman en resinas y asfaltenos.

Los materiales asfálticos tienen diversos usos entre los cuales destacan, en diferentes ramas de la construcción, carpetas asfálticas, morteros, riegos de sello, estabilizaciones de capas inferiores del pavimento, como material ligante entre las capas del pavimento y como material de impermeabilización de diversas construcciones.

2.1.2 Propiedades del asfalto

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

2.1.2.1 Durabilidad

Avellán (2007) lo define como: “Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto...” (p.5).

La película delgada de asfalto que cubre al agregado, durante el proceso de mezclado en las plantas de producción de mezcla asfáltica provoca que se presente pérdida de volátiles, oxidaciones y cambio en las propiedades viscoelásticas del asfalto.



Una de las formas de evaluar la pérdida de estas características es con equipos como el Horno de Película Delgada (TFO), y Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO).



Figura 2 Equipo para realizar la Prueba de Película Delgada (RTFO). Fuente: propia

El equipo de TFO o el RTFO, someten bajo condiciones de presión y temperatura una capa ligera de asfalto al envejecimiento prematuro del asfalto. Así mismo, someter bajo dichas condiciones al cemento asfáltico se logra tener una pérdida de asfalto.

La normativa de la Secretaria de Comunicaciones en el apartado de Métodos de muestreo y pruebas de materiales (M·MMP·4·05·010/02) menciona lo siguiente:

permite estimar el endurecimiento que sufre los cementos asfálticos que en películas de pequeño espesor se someten a los efectos del calor y el aire. La prueba consiste en someter una muestra de cemento asfáltico a un proceso de calentamiento para producir un residuo al cual, dependiendo del tipo de cemento asfáltico que se esté probando, se le realizan diversas pruebas (p.1).

En el asfalto normal una vez realizado el residuo se deben realizar ensayos de ductilidad, viscosidad dinámica y penetración. En los cementos asfálticos modificados se deben efectuar la penetración antes y después del ensaye de TFO, recuperación elástica en ductilómetro, prueba de anillo y esfera, módulo reológico de corte dinámico y ángulo de fase; así como pérdida de masa que se presentó tanto en cementos asfálticos normales o modificados.



2.1.2.2 Adhesión y cohesión.

La adhesión permite al asfalto ligarse con el agregado pétreo en la mezcla de cualquier pavimento, mientras que la cohesión es la capacidad del asfalto de mantenerse firmemente, en su puesto, unidas a las partículas de agregado en el pavimento terminado. (Asphalt Institute, 2001, p.18).

La prueba de ductilidad mide la relación entre la adhesión y la cohesión, mas no así el valor de cada una de estas dos condiciones. Este ensayo de ductilidad ha sido por mucho uno de los ensayos más recurridos en el ámbito de la caracterización de los asfaltos, pues durante la ejecución de este ensayo se determina la capacidad para deformarse un asfalto o material asfáltico bajo condiciones de geometría, temperatura y velocidad. Por lo que una briqueta de asfalto se lleva al punto de su ductilidad máxima, observándose así su relación de deformabilidad expresada en unidades de longitud.

Además de la prueba de ductilidad existen ensayos que permiten determinar el grado de consistencia de un asfalto tal como ensayo de fragilidad fraass, ensayos de penetración, ensayos de punto de reblandecimiento y viscosidad.

El Centro de Estudios de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), perteneciente al gobierno de España, específicamente la norma NLT-182/99 tiene un ensaye denominado: Punto de fragilidad Fraass de los materiales bituminosos.

“El ensayo Fraass consiste en someter a una película de material, sólido o semisólido, de asfalto y que se encuentra adherido a una placa de acero a ciclos sucesivos de flexión a temperaturas decrecientes” (NLT-182/99, p.1).

Puede decirse que una vez que el material asfáltico es llevado a una temperatura decreciente, el material adquiere rigidez en donde, durante este ensaye se observa la temperatura a la cual se presentan las primeras fracturas, fisuras o roturas en la superficie de la película.

Adicionalmente, para estimar la cohesión de los materiales bituminosos se puede contar con el ensaye de penetración, donde a través de una aguja de dimensiones estandarizadas, penetra verticalmente una muestra. Su valor se registra en decimas de



milímetro y cuyo valor de penetración se encuentra en función de la carga, tiempo de ensaye, temperatura, naturaleza del asfalto y condiciones del equipo de penetración.

Conforme a estudios realizados se ha establecido una relación del valor de penetración y la viscosidad de un asfalto; sin embargo, dada la naturaleza cambiante de éstos han hecho que exista una diversidad de valores, que establezcan una correlación definida de los mismos.

Nuestro país, principalmente la Secretaría de Comunicaciones y Transportes utiliza el ensaye de punto de reblandecimiento. Lo anterior, para estimar la temperatura en el que un material asfáltico no se comporta ni sólido ni líquido, por lo que a una muestra de asfalto que se encuentra inmersa en un anillo, le coloca una esfera (bola) y que por medio de calor transmite un incremento de temperatura a razón de 5°C por minuto, siendo así la temperatura de reblandecimiento el punto en el cual dicha esfera cae por debajo del punto inicial a una profundidad de 25 mm. Es importante mencionar que durante este proceso la muestra de asfalto se encuentra inmersa en agua o glicerina.

Otro de los parámetros a medir en un material asfáltico es la viscosidad. Asphalt Institute, (2001):

“Es una medida de la resistencia al flujo. Es un método para medir la consistencia del asfalto.” (p.257)

La viscosidad es la resistencia que opone un fluido a deformarse cuando está sometido a la acción de una fuerza que actúa durante un determinado tiempo y es consecuencia del rozamiento interno de las moléculas de este.

Un asfalto cualquiera que sea su naturaleza tiende a tener una viscosidad que varía con respecto a la temperatura. En una primera instancia los asfaltos se encontraban clasificados, en cuanto a la viscosidad bajo los parámetros enmarcados por la viscosidad cinemática, viscosidad dinámica y la viscosidad Saybolt Furol.

Respecto a la viscosidad saybolt furol es imprescindible hacer mención que ha sido uno de los ensayos utilizados en el control de calidad de los materiales asfálticos, que permite determinar la consistencia y la susceptibilidad al calor. Los ensayos se realizan a 135°C en cementos asfálticos normales para evaluar la calidad asfaltos normales (AC-5, AC-10, AC-20, AC-30) de acuerdo a la normativa de Características de los Materiales de la SCT, de 25 y 50°C para la emulsión y de 50 y 60°C para los asfaltos rebajados.



El Instituto del Asfalto (Cárdenas. J & Fonseca. E. 2009), recomendó en 1962 emplear la viscosidad Saybolt Furol del asfalto como criterio fundamental para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla. (p. 128)

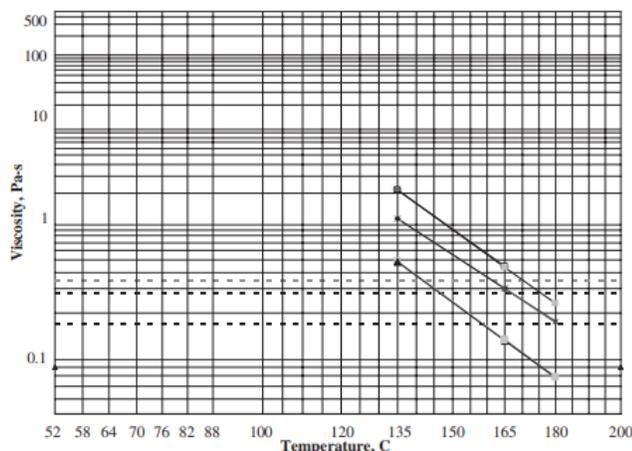


Figura 3 Ejemplo de curva viscosidad vs temperatura. Fuente: NCHRP Report 648.

Para el diseño en laboratorio de mezclas asfálticas en caliente, según la norma ASTM D-1559 (2004), Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas compactadas mediante el ensayo Marshall, establece que las temperaturas de mezclado y compactación son aquellas que corresponden a una viscosidad del asfalto de 85 ± 10 segundos Saybolt-Furol (170 ± 20 centistokes) y 140 ± 15 segundos Saybolt-Furol (280 ± 20 centistokes) respectivamente.

Actualmente se han incorporado el ensayo de viscosidad rotacional brookfield, referenciada a la norma MMP-4-05-005/02 (Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos, 2002) y de la cual se estudiará más adelante.

2.1.2.3 Susceptibilidad a la Temperatura

Un asfalto tiende a cambiar las variaciones en cuanto a la viscosidad que desarrolla, dependiendo de la temperatura a la que se encuentre, dicha susceptibilidad es distinta aun cuando el asfalto tenga el mismo grado de consistencia, lo anterior dado a la naturaleza cambiante del petróleo.

Bejarano. J. & Salgado M. (2018), describe que existen varias expresiones para definir la susceptibilidad a la temperatura, mencionando lo siguiente:



“El índice de penetración (*IP*) desarrollado por Pfeiffer y Van Doormall (1936) que describe la susceptibilidad a la temperatura de penetración de un asfalto (Forde, 2009)” (p.18).

El índice de penetración es un parámetro que determina la variación de la consistencia ante cambios de temperatura y que puede ser determinado mediante la siguiente relación:

$$IP = \left(\frac{20 - 500A}{1 + 50A} \right)$$
$$A = \left(\frac{\log(800) - \log(Pen)}{T_{AyB} - T_{pen}} \right)$$

Donde:

T_{AyB} = Temperatura entre los puntos A (Temperatura Frass) y B (Temperatura de reblandecimiento)

Pen= Valor de la penetración (100 g, 5 s) en décimas de milímetro

T_{pen}= Temperatura de penetración a la cual se realiza la prueba.

IP > +1 Poco susceptibles a la temperatura presentado un comportamiento de flujo No Newtoniano con cierta elasticidad y tixotropía.

IP < -1 Muy susceptibles a la temperatura con un comportamiento de flujo Newtoniano

-1 ≥ IP ≥ +1 Poseen características reológicas y de flujo intermedias.

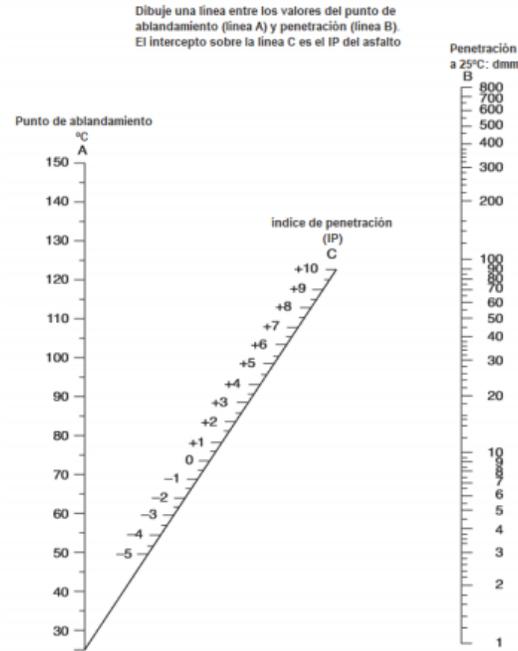


Figura 4 Nomograma para el índice de penetración Fuente: Bejarano J et al (2018)

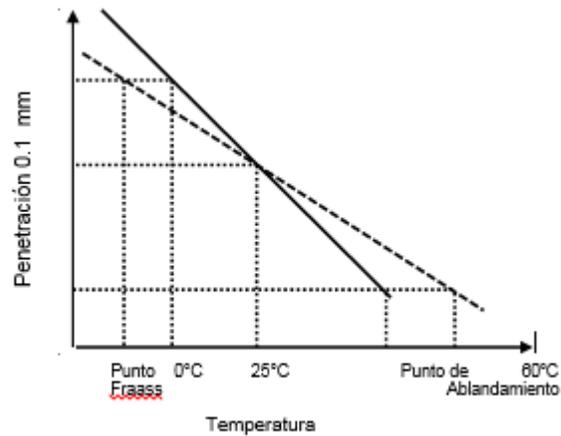


Figura 5 Esquema de la Susceptibilidad a la Temperatura. Fuente: Propia

Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado dado que representa de forma significativa el comportamiento del asfalto en condiciones de temperatura y algunas características de comportamiento que sirven de referencia de clasificación.



El IP se puede usar para proporcionar una buena aproximación del comportamiento que se espera, pero es deseable la confirmación con mediciones de rigidez o viscosidad (Bejarano et al. 2018).

2.1.2.4 Endurecimiento y envejecimiento

Debido a que el asfalto durante la construcción tiende a sufrir variaciones de temperatura, es necesario relacionarlo con el proceso de oxidación que sufre. El proceso de oxidación en un asfalto, cuando es combinado con el oxígeno, ocurre más fácilmente a altas temperaturas y en películas delgadas como lo describe Araiza. J. (2002, p. 24-25).

Un asfalto envejecido en una prueba de RTFO tendrá mayor viscosidad a la misma temperatura que un asfalto original debido al proceso de oxidación.

Una vez que el asfalto ha sido sometido a diferentes temperaturas sufre el fenómeno de endurecimiento, por lo que cada asfalto debe ser ensayado independientemente y revisar sus características de envejecimiento y ajustar las técnicas constructivas.

Algunos de los ajustes deben incluir, Ramos. B. & Muñiz. C. (2013) mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica. (p.38)

El proceso de endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción pues en las mezclas asfálticas se sigue presentado el fenómeno de oxidación por los distintos cambios naturales a los que se encuentra sometido, además de presentarse el fenómeno de polimerización.

Araiza. J.(2002), refiere que “estos procesos pueden ser retardado si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado” (p. 25).

Con el crecimiento de tecnología Superpave y avances tecnológicos a nivel mundial, existen otras pruebas de laboratorio capaces de evaluar y caracterizar los diferentes tipos de cementos asfálticos. Entre las más comunes utilizadas por el Instituto del Asfalto son:



- Ensaye a Tensión Indirecta (TDT)
- Reómetro de viga a flexión (BBR)
- Reómetro de corte dinámico (DSR)
- Horno de Película Delgada (RTFO)
- Envejecimiento a presión (PAV)
- Viscosidad Absoluta
- Viscosidad Cinemática
- Viscosidad Rotacional
- Penetración
- Punto de reblandecimiento
- Punto de Inflamación
- Solubilidad
- Ductilidad
- Recuperación Elástica
- Retenido en malla
- Horno de película delgada (TFO)
- Separación

Ensayes de laboratorio
propuestos por el Instituto del
Asfalto

Figura 6 Esquema de pruebas al asfalto. Fuente: Propia

2.2 Clasificación de los materiales asfálticos.

Los materiales asfálticos utilizados en la industria de la construcción de obras viales clasifican a éstos en tres grupos principales:

- **Cementos Asfálticos.** Utilizado en todas las mezclas asfálticas
- **Emulsiones asfálticas.** Se utiliza en elaboración en frío de carpetas asfálticas, morteros, riegos y estabilizaciones.
- **Asfaltos rebajados.** Utilizada en impregnaciones de subbases, bases hidráulicas y carpetas asfálticas en frío.



2.2.1 Emulsiones Asfálticas

Una definición y descripción detallada es el compendio realizado en la norma N-CMT-4-05-001/06 (2006) de la SCT:

“Las emulsiones asfálticas son los materiales asfálticos líquidos estables, constituidos por dos fases no miscibles, en los que la fase continua de la emulsión está formada por agua y la fase discontinua por pequeños glóbulos de cemento asfáltico. Se denominan emulsiones asfálticas aniónicas cuando el agente emulsificante confiere polaridad electronegativa a los glóbulos y emulsiones asfálticas catiónicas, cuando les confiere polaridad electropositiva.” (p. 2).

Estas emulsiones pueden ser de rompimiento rápido (utilizadas en México como riegos de liga y en algunos sistemas de riego), de rompimiento medio (para la elaboración de carpetas asfálticas en frío fabricadas en planta en cuyo caso se utiliza únicamente cuando la cantidad de finos es menor al 2% y principalmente en bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas).

Las emulsiones asfálticas de rompimiento lento N-CMT-4-05-001/06 (2006), “que comúnmente se utilizan para carpetas de mezclas en frío, elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas” (p. 4).

Adicionalmente se encuentran las emulsiones asfálticas denominadas “superestables”, donde su uso es principalmente en estabilizaciones y en trabajos de recuperación de pavimentos. Por último, existen las emulsiones de impregnación en donde su función radica en realizar la protección de las capas de subbase y base hidráulica; es decir, que sufran la pérdida de finos, humedad de compactación y protección temporal ante algún evento climático.

Actualmente las investigaciones de emulsiones asfálticas conllevan a describir dos parámetros, el primero refiriéndose a la estabilidad de una emulsión y otro a su proceso de rompimiento.

“Las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables. Sin embargo, la estabilidad de la emulsión es una definición discutible. Esta propiedad puede determinarse por la tasa de coalescencia de las gotas. Entonces eso se



puede afirmar que una emulsión es más estable mientras más lenta es la tasa de fusión de las gotas” (Mercado R. Fuentes P, 2016, p.163)

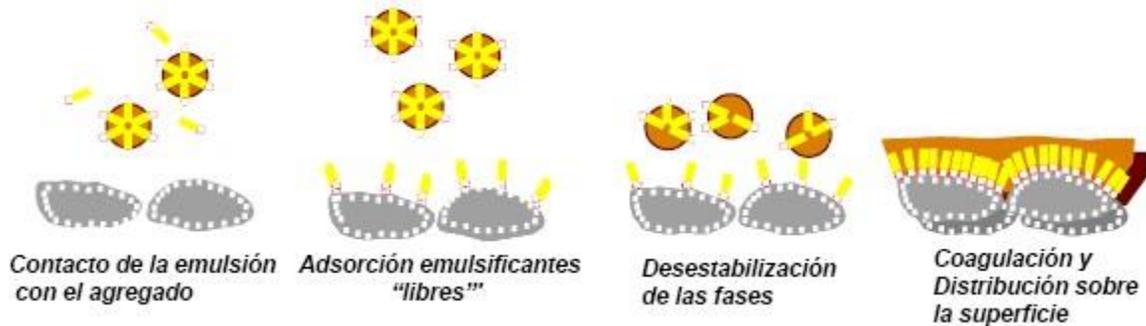


Figura 7 Proceso de incorporación del agregado con emulsión asfáltica.

2.2.2 Asfaltos rebajados

Son los materiales asfálticos líquidos de acuerdo con la norma N-CMT-4-05-001/06, compuestos de un cemento asfáltico y un disolvente; se utiliza para la elaboración de carpetas en frío, así como en impregnaciones en bases y subbases hidráulicas.

Su clasificación corresponde principalmente a la velocidad de fraguado con respecto a la norma anteriormente citada.

Tabla 1 Materiales asfálticos por velocidad de fraguado

Clasificación	Velocidad de fraguado	Tipo de solvente
FR	Fraguado Rápido	Nafta, gasolina
FM	Fraguado Medio	Queroseno
FL	Fraguado Lento	

Los asfaltos rebajados o también conocidos como “asphalt cutback”. Gierha. D. & Johnson D. (2018) describe que son asfaltos diluidos en un solvente de petróleo y que su clasificación depende de la velocidad de evaporación del disolvente: “La velocidad relativa en el que el disolvente se evapora es principalmente una función del tipo de disolvente, pero también es una función del porcentaje de asfalto residual en la reducción” (p.18).

La American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), de los Estados Unidos tiene especificaciones para los asfaltos rebajados de fraguado rápido



y medio, no así para los asfaltos de fraguado lento; la American Society for Testing and Materials contempla las especificaciones para los de fraguado lento.

Se considera de fraguado rápido donde el diluyente tiene una alta volatilidad tiene generalmente un punto de ebullición igual al de la gasolina o nafta, incluye grados RC-70, RC-250, RC-800 y RC-3000; los de fraguado medio con volatilidades cercanas al queroseno (MC-30, MC-70, MC-250, MC-800, and MC-3000). Los grados SC-70, SC-250, SC-800 y SC-30, para las de fraguado lento donde su diluyente son aceites de baja volatilidad.

2.3 Asfaltos Modificados

2.3.1 Definición de asfalto modificado

Los asfaltos modificados son productos concebidos para superar las propiedades del asfalto original, mejorando así la calidad del pavimento a largo plazo. Si bien los modificadores pueden afectar las propiedades, la mayoría de ellos intenta reducir la dependencia con la temperatura, el endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica (Cárdenas et al, (2009) (p. 127).

2.3.2 Características de los Asfaltos Modificados

Los asfaltos modificados han tenido un gran incremento en cuanto a su utilización en obras de infraestructura vial, al aplicar en las mezclas asfálticas características de resistencia a las deformaciones y proporcionando mayor vida útil al pavimento; transformándose de esta forma en decremento en los costos de mantenimiento.

Existen diversos factores que vuelven a los asfaltos modificados más o menos susceptibles a resistir deformaciones y esfuerzos; por lo que es importante conocer, su comportamiento para generar un control de calidad adecuado a las necesidades del asfalto y cumplir con los requisitos solicitados en los proyectos de infraestructura vial.

En realidad, el contenido de cada uno de los componentes, asfaltenos, maltenos, y resinas, por citar algunos, hace del asfalto un material susceptible a variaciones viscoelásticas, de esfuerzo y donde el factor más importante es la temperatura.



2.3.3 Clasificación de los Asfaltos Modificados

La **NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP)** en su reporte 459 (*Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design*) establece criterios para clasificar los asfaltos puntualizados de la siguiente manera:

- El mecanismo por el cual los modificadores alteran las propiedades del asfalto.
- Naturaleza y composición física del modificador
- Propiedad(es) del cemento asfáltico que se desea mejorar.

El reporte 459, clasifica dentro de las propiedades principales a mejorar en las mezclas asfálticas son: la deformación permanente, ruptura a la fatiga, ruptura a bajas temperaturas, susceptibilidad a la humedad y la oxidación por el envejecimiento.

- **Fillers.** Mejoran características a la deformación permanente. Carbón negro, minerales (limo hidratado, ceniza volante, cemento portland), baghouse fino.
- **Extensores.** Únicamente se encuentran clasificados el azufre (modificador de propiedades de deformación permanente, ruptura a la fatiga y a bajas temperaturas, ó revestimientos de madera (condiciona la susceptibilidad a la humedad).
- **Resina elastomérica.** Los estudios demostraron que mejorar principalmente resistencia a la deformación permanente (Polímero SEBS, Látex de policloropreno Caucho natural, Estireno isopreno (SIS), Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)).
- **Polímero plastómero.** Se encuentran entre los modificadores como: etileno vinil acetato (EVA), etileno propileno dieno (EPDM), Etileno acrilato (EA), Polisobutileno, Polietileno (baja y alta densidad) y polipropileno. Colocaron a los cementos asfálticos modificados entre los que optimizan las cualidades de deformación permanente.
- **Polvo de neumático.** Los procesos, tratamientos y los diversos tamaños con los que se trituran los materiales de neumático, colaboran a mejorar las características de deformación permanente, ruptura a la fatiga y a las bajas temperaturas.



- **Hidrocarburos.** Los asfaltenos (productos de resinas, ROSE, SDA, DEMEX), componentes aromáticos, naftenicos, aceites y asfaltos naturales, modifican los asfaltos de forma variada.
- **Antistrip.** Los elementos principales son las aminas y poliamidas; mejora características de susceptibilidad a la humedad en las mezclas asfálticas.
- **Fibras.** Fibra de vidrio, poliéster, celulosa natural y mineral, polipropileno, polipropileno, fibras de acero y refuerzo. Consideradas entre mejoradores parámetros de deformación permanente, temperatura, fatiga.
- **Antioxidantes.** Mejora las propiedades de los asfaltos al envejecimiento producto del rolado. Esta propiedad es acondicionada por limo hidratado, fenoles y amines.

2.3.4 Proceso de modificación del asfalto

La modificación de un asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en una pavimentación en vías. Maxil C. & Salinas H. (2006) Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climáticos o acciones impuestas por el tránsito.

Dentro de los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos, es que éstos sean más viscosos a temperaturas elevadas, reduciendo así las deformaciones permanentes; es decir, aumentar la rigidez de una de las capas del pavimento, mismo que tendrá importancia al elevar el módulo elástico de la mezcla asfáltica.

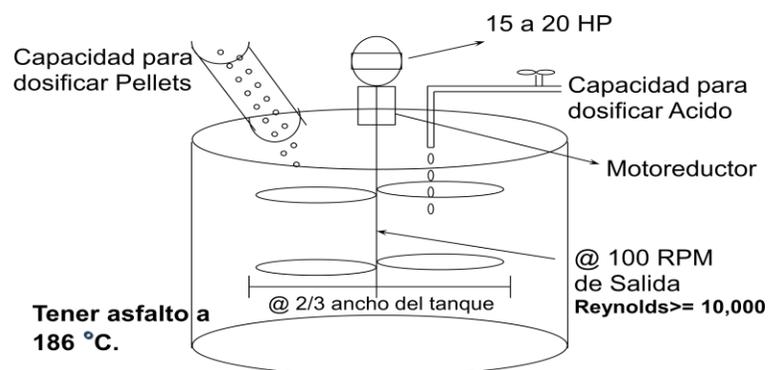


Figura 8 Requerimientos para Mezclar Elvaloy. Fuente: Dupont Packaging and Industrial Polymers (SA).



3. MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1 Definición

Son la combinación de agregados pétreos y un ligante, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste. Kraemer.C. Pardillo. J. Rocci. S. Romana. M. Blanco. V. del Val. M. (2004):

“de tal manera que cumpla con requisitos de calidad para cubrir con los requisitos tránsito esperado. Se fabrican en plantas de mezcla fijas o móviles, y que posteriormente se transportan a la obra y allí se extienden y se compactan, a temperatura adecuada para lograr la densificación de diseño” (p.339)

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales y en capas inferiores que conforman una estructura de pavimento. Las características de las mezclas dependerán de la intensidad del flujo vehicular o las cargas impuestas sobre este. La composición de asfalto y agregados pétreos es muy variada y dependerá de factores tales como tránsito, medio ambiente, estructura del subsuelo, condiciones del suelo y la economía.



Figura 9 Planta de elaboración de Mezcla Asfáltica discontinua. Fuente: propia



En la figura 7 se observa una planta de elaboración de mezcla diseñada de forma que los elementos principales son módulos fácilmente transportables sobre camión o semirremolque, para lo que tienen las dimensiones adecuadas.

3.2 Tipos de mezclas asfálticas

Existen diversos parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas, obedeciendo en las proporciones de agregados y cemento asfáltico. Las mezclas asfálticas pueden clasificarse de la siguiente forma práctica:

Tabla 2 Clasificación de mezclas asfálticas

TIPO DE MEZCLAS ASFALTICAS	Por fracciones de agregado pétreo empleado.	Masilla asfáltica. Polvo mineral más ligante
		Mortero asfáltico. Agregado fino más masilla
		Concreto asfáltico. Agregado pétreo más mortero
		Macadam Asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico
	Por temperatura de puesto en obra	Mezcla Asfáltica en Caliente HMA
		Mezclas Asfálticas Tibias WMA
		Mezclas Frías
	Por la proporción de Vacíos en la mezcla	Mezclas Cerradas o Densas
		Mezclas Semi-cerradas
		Mezclas Abiertas (Open Grade)
		Mezclas Porosas o Drenantes
	Por el tamaño máximo del agregado pétreo.	Mezcla Gruesa
		Mezcla Fina
	Por la Estructura del agregado pétreo	Mezcla con Esqueleto mineral
		Mezcla sin esqueleto mineral
	Por la Granulometría	Mezclas Continuas
Mezclas Discontinuas		

La diversidad de las mezclas asfálticas otorga diversas características estructurales y funcionales. El continuo crecimiento de las cargas vehiculares y las condiciones características de la zona en desarrollo, han sido la causa principal constituir una variedad de mezclas asfálticas.



3.2.1 Mezclas asfálticas de granulometría densa

Una mezcla de graduación densa es una mezcla bien graduada (distribución equilibrada de partículas de agregado de grueso a fino), cuando en la etapa de la construcción se utiliza este tipo de mezclas son relativamente impermeables y mejoran las calidades de la carpeta asfáltica si la aplicación es en caliente, es decir utilizar una mezcla HMA (Hot mix asphalt)

La mezcla asfáltica en caliente HMA de graduación densa consiste en la ligadura de agregados y asfalto producida en “caliente”.



Figura 10 Textura de una mezcla densa HMA. Fuente: propia

3.2.1.1 Características de las mezclas con granulometría densa

Las mezclas de graduación densa pueden considerar distintos niveles de tránsito, cumpliendo con requisito estructurales, fricción, nivelación y de reparación. De acuerdo con García et al (2001), las mezclas de granulometría densa pueden usarse de la siguiente forma:

- **Estructural.** Es el propósito principal de las mezclas y es ante todo una función del espesor de la capa. Sin embargo, los materiales seleccionados pueden mejorar el valor estructural de las mezclas.
- **Fricción.** Esto es una consideración importante para las carpetas de superficie. La fricción es una función de las propiedades del agregado y la mezcla.



Las cualidades de fricción en el pavimento juegan un papel importante dentro de la seguridad en carreteras. La superficie de rodamiento debe proporcionar un adecuado nivel de fricción en la interfaz neumático – pavimento para proveer seguridad de operación a los vehículos. [41]

- **Nivelación.** Se puede utilizar en capas delgadas o gruesas para rellenar depresiones de las carreteras.

La Secretaria de Comunicaciones y Transportes, específicamente en la normativa N-CSV-CAR-3-02-001/10 “*Renivelaciones Locales en Pavimentos Asfálticos*”, define a una renivelación como al *conjunto de actividades que se realizan sobre una carpeta asfáltica con la finalidad de eliminar las depresiones, roderas, deformaciones y corrugaciones, para que por medio su eliminación se restablezca las características geométricas de una vía terrestre* (p.1).

- **Bacheo.** La mezcla deberá reunir los mismos requerimientos de una mezcla nueva y con las reparaciones adecuadas antes de colocar la nueva mezcla.

Al conjunto de actividades que se realizan para reponer una porción de la carpeta asfáltica que presenta daños como oquedades por desprendimiento o desintegración inicial de los agregados, en zonas localizadas y relativamente pequeñas cuando la base de pavimento se encuentra en condiciones estables, sin exceso de agua y con tenga un área afectada menor a 100 metros cuadrados, por cada siete mil metros cuadrados de pavimento (p.1); es así como la normativa N-CSV-CAR-2-02-003/16 define al Bacheo superficial aislado.

La única variación con respecto al bacheo profundo aislado es cuando las capas de subyacentes del pavimento se encuentran en condiciones inestables o con exceso de agua. Lo anterior se ve mencionado en la normativa N-CSV-CAR-2-02-004/15.

3.2.2 Mezclas con granulometría abierta

Las mezclas de granulometría abierta, es una mezcla realizada con un alto contenido de porcentaje de vacíos y granulometría entre 12,5 mm (1/2 plg) y 6,3 (1/4 plg). La calidad de la mezcla asfáltica solicitada por la norma N-CMT-4-05-003/16 describe este tipo de mezclas como aquellas que no tienen una función estructural y que solamente cumple la



función de mejorar la fricción pavimento – neumático, desalojar el agua en la superficie de rodamiento y su uso debe limitarse a zonas donde no es posible el congelamiento y con precipitaciones anuales mayor a los 600 mm. De manera indirecta este tipo de mezcla asfáltica, reduce los niveles audibles generados en la vía terrestres.

4. MÉTODO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

4.1 Método SUPERPAVE

En 1987 el Strategic Highway Research Program (SHRP) fue establecido por el Congreso de los Estados Unidos, con un presupuesto de 150 millones de dólares en programas de investigación a fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de estas. Iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement) (Delgado H. et al. Diseño de mezclas asfálticas con la metodología Superpave (Nivel 1) parr.1)

Aunque existen diversos métodos para el diseño de mezclas asfálticas, la tecnología Superpave ha tenido mayor aplicación en diversas partes del mundo por incrementar las exigencias a los agregados y ligantes, así como en las mezclas y mejorar los equipos para el diseño. Como la naturaleza de los agregados utilizados, son tan diversos, estos deberán de cumplir con los requerimientos Superpave, de igual forma los asfaltos naturales y/o modificados, en su nivel correspondiente.

En México la Asociación Mexicana del Asfalto A.C., ha sugerido ante la Secretaría de Comunicaciones y Transportes el uso de la metodología Superpave ajustándola en el Protocolo AMAAC, para las condiciones requeridas en el país, dando continuidad a las exigencias de agregados, asfaltos, control de producción de la mezcla asfáltica y control de calidad que se debe de realizar durante el proceso constructivo.



4.1.1 Ensayos al material pétreo

4.1.1.1 Pruebas de consenso

Se describen como aquellas consideradas por los investigadores de SHRP críticas para alcanzar elevado performance de una mezcla HMA, mejor conocida como Mezcla en caliente. Estas propiedades deben satisfacer características del nivel de tránsito y de la posición en el espesor total que conforman a un pavimento. Las propiedades de consenso son la angularidad del agregado grueso (caras fracturadas), angularidad del agregado fino, partículas alargadas y lajeadas, así como el contenido de arcilla (equivalente de arena).

“...la angularidad de los agregados gruesos y finos, buscaban lograr una HMA con un alto ángulo de fricción interna y así, una alta resistencia al corte y por ende una alta resistencia al ahuellamiento o roderas” (Delgado. H. Garnica P. Villatoro. G. Rodríguez. B. (2006) p. 26).

Los parámetros de forma de la partícula (partículas alargadas y lajeadas) sirven para delimitar y controlar, de una manera, el proceso de trituración con la cual se llevan los agregados gruesos y en el caso de que estos procedan de una fuente natural, buscarán que estos contengan una forma que durante el proceso de construcción, transporte y principalmente de operación de la carpeta asfáltica los agregados no sufran fracturas considerables.

Delgado et al (2006), asevera en la publicación sobre la influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica:

“Limitando la cantidad de arcilla en el agregado, la unión entre el ligante y el agregado es fortalecida y mejorada” (p. 29)

El ensayo de equivalente de arena representa la relación existente entre las partículas de arcilla con respecto a la arena.

4.1.1.2 Pruebas de origen

Utilizadas frecuentemente para calificar las fuentes locales de agregados, para ello se emplean pruebas como Desgaste de los Ángeles, abrasión por Inmersión en Sulfatos (Intemperismo Acelerado) y cantidad de materiales deletéreos.



El ensaye de Desgaste de los Ángeles dimensiona la variación granulométrica de los agregados gruesos con respecto a una granulometría específica; definida por el desgaste que sufren los agregados al someterse a un proceso de abrasión provocada por esferas metálicas dentro de un cilindro giratorio. Esta prueba es mencionada por la norma ASTM C131.

La prueba de Intemperismo acelerado describe de forma cuantitativa la durabilidad que tienen los agregados al ser sometidos a un proceso de degradación y tal como su nombre lo describe de manera “acelerada”, pues se busca llevar una muestra a procesos de saturación y secado con una solución de sulfato de sodio o magnesio y que posteriormente servirá para evaluar el cambio que ocurre en los agregados al fracturarse o degradarse. La norma ASTM C88 describe el proceso de ejecución de la prueba.

La norma AASHTO T11, define el orden y aplicación para la evaluación de los materiales deletéreos.

4.1.1.3 Ensaye de azul de metileno

El ensaye de azul de metileno importante para determinar la posible reacción que tendrán las mezclas asfálticas a la formación de roderas. Se realiza los trabajos en materiales menores a 0,075 mm. Esta prueba se desarrolla dado que en el equivalente de arena no se mide la calidad de arcilla contenida, la cual podría repercutir en daño inducido por humedad. Este ensayo podría remplazar al equivalente de arena e índice de plasticidad en los finos, los cuales son usados precisamente para evitar el desprendimiento o reducirlo.

4.1.2 Ensayos a los ligantes

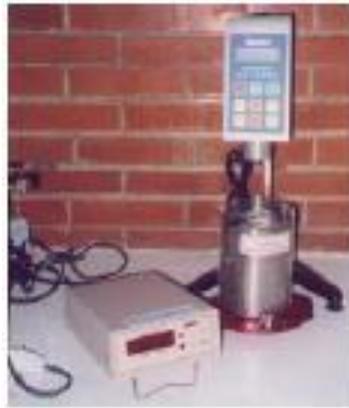
La Secretaría de Comunicaciones y Transportes en México ha optado por modificar o incorporar nuevos parámetros establecidos en normas anteriores, con base en estudios realizados por el Instituto Mexicano del Transporte, así como la experiencia observada en otros países y de acuerdo con estudios realizados por la SHRP existe equipos que describen eficazmente las propiedades de los asfaltos. Es necesario conocer las características del cemento asfáltico en sus propiedades originales para determinar su comportamiento antes del mezclado con los agregados.



El cemento asfáltico al ser llevado a temperaturas elevadas sufre envejecimiento, para simular y conocer estas nuevas características se cuenta con Equipo RTFO (Rolling thin film over). El procedimiento expone una película delgada de asfalto a calor y aire para aproximar el envejecimiento que sufre el asfalto durante la producción de mezcla asfáltica.

4.1.2.1 Viscosidad rotacional (VR)

La prueba realizada con viscosímetro rotacional se utiliza para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de mezclas asfálticas, de igual manera Superpave establece un criterio de viscosidad 3 Pa.s., como máximo, con una temperatura de 135°C para realizar el manejo y bombeo del asfalto normal en planta.



*Figura 11 Viscosímetro Rotacional Brookfield Instituto Mexicano del Transporte
Fuente: IMT*

El equipo de Viscosidad Brookfield determina de igual forma la deformación y su resistencia al corte de los cementos asfálticos, considerando variables como tiempo, temperatura, velocidad del ensaye.

El Instituto del Asfalto en su escrito **Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot- Mix Types (MS-2)** recomienda temperaturas de mezclado que cumplan con una viscosidad de $0,17 \pm 0,02$ Pa·s y $0,28 \pm 0,030$ Pa·s para temperaturas de compactación en asfaltos normales; sin embargo para algunos asfaltos modificados con polimeros los rangos de mezclado varían de 0,30 a 0,40 Pa·s y de 1,00 a 1,20 Pa·s y que de alguna manera se describe en el reporte 459 “Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design”.



4.1.2.2 Reómetro de corte dinámico (DSR)

El reómetro de corte dinámico evalúa la resistencia del asfalto a resistir deformaciones plásticas considerando como parámetro el Módulo Reológico ($G^*/\text{sen}\delta$).

Sandoval I. Cremades I. (2010) comentan que “*el parámetro $G^*/\text{sen}\delta$ involucra la resistencia total del asfalto ante la deformación y la aportación de la componente elástica al desempeño del asfalto en el pavimento*” (p.3); cuando menor es el ángulo de fase (δ) mayor es la capacidad del material de recuperar las deformaciones.



Figura 12 Reómetro de Corte Dinámico (DSR) Laboratorio Surfax Fuente: propia

4.2 Método de diseño MARSHALL

En México se ha utilizado en la mayoría de los casos para el diseño de mezclas asfálticas el Método Marshall por su facilidad para realizar tanto en laboratorio como en campo.

Garnica. P. Delgado. H. Gómez. J. (2004) “*El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas*” (p.7)



El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½”) y 102 mm (4”) de diámetro. Los cuales se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto agregado (ASTM D1559). Los parámetros por evaluar después del diseño Marshall es la cantidad de oquedades (vacíos) y la estabilidad – flujo.

El método Marshall se elaboran tres tipos de pruebas para conocer tanto sus propiedades volumétricas de las probetas compactas; es decir, se determina la gravedad específica bruta de las mezclas compactas (Gmb) de acuerdo con la norma ASTM D1188-07 (cuando el porcentaje de absorción es mayor al 2%) o la ASTM D2726-08 (absorción menor al 2%).

Después de que la gravedad específica bruta de la mezcla compacta (Gmb) se ha determinado se procede a la prueba de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba.

5. ENSAYOS A LAS MEZCLAS ASFALTICAS

El comportamiento estructural y funcional de un pavimento se puede conocer a partir de técnicas desarrolladas por varios investigadores, y es por ello por lo que se han tenido varios parámetros previsibles fatiga, figuración térmica o de deformación plástica.

El ensaye para determinar las características de la mezcla será importante cuya precisión deberá ser confiable y factible para poder dar un modelo lo más representativo posible, pero a su vez de fácil aplicación considerando la disponibilidad de tiempo, recursos económicos y equipamiento.

En la fase del conocimiento del pavimento se encuentra las pruebas que permitan inducir estados de tensión. Roque y Buttlar esquematizan esta consideración presentándose cuatro casos:

- 1.- Compresión triaxial en la superficie inmediata bajo la rueda del tránsito



- 2.- Tensión Longitudinal y transversal combinada con compresión vertical en la parte inferior de la carpeta asfáltica, bajo la rueda.
- 3.- Tensión Longitudinal o transversal en la superficie a una cierta distancia de la carga
- 4.- Compresión longitudinal o transversal en las capas inferiores de la capa asfáltica, a cierta distancia de la aplicación de la carga.

Para cada uno de los puntos anteriores existen ensayos que como lo cita Moreno J. (2005) “para cada uno de los estados tensionales y de compresión que se presentan y sin embargo, la experiencia determina que la zona más crítica de tensiones se produce en la fibra inferior de la capa bituminosa bajo la carga aplicada” (p.16)

La prueba de tensión indirecta reproduce el estado de tensiones crítica en las mezclas asfálticas, y dentro de la cual se han realizado adecuaciones para determinar el módulo de resiliencia, fisuración térmica o por fatiga, deformaciones permanentes y de esta forma poder predecir de forma indirecta la susceptibilidad a la humedad.

5.1 Tensión Indirecta

Garrote E. en el año 2006 hace mención que el ensayo de tensión, también nombrado de tracción indirecta es un método simple y representativo, donde se permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper.

Actualmente es un ensayo ampliamente utilizado para medir la resistencia a tracción de las mezclas bituminosas, además es un procedimiento muy simple y está especificado en la norma NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas”.

Garnica Paul. Flores. M. Gómez. J. Delgado. H. (2005). “La resistencia a la tensión es un buen indicador del potencial de agrietamiento” (p. 50).



El ensaye más ampliamente empleado para evaluar la resistencia a la tensión de la mezcla asfáltica es el de tensión indirecta y que forman parte en el nivel intermedio del diseño Superpave, de acuerdo con la norma ASTM D6931.

El método consiste en aplicar una carga con compresión diametral, en una probeta cilíndrica, a lo largo de dos generatrices opuestas, la cual puede ser sencilla o repetida, provoca un esfuerzo de tensión uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, provocando así un estado de falla diametral.

En su momento Tomas W. Kennedy y W. Ronald Hudson desarrollaron las tensiones teóricas que se producen en una probeta cilíndrica sometida a una carga diametral, tal y como sucede en los ensayos de tracción indirecta. La distribución teórica de tensiones a lo largo de los ejes horizontales y verticales para carga concentrada.

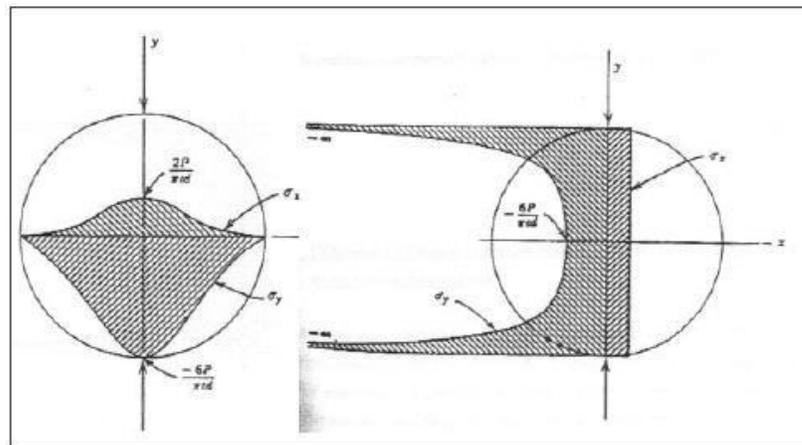


Figura 13 Distribución de tensiones teórica. Fuente: Moreno. J. (2005)

El ensaye se puede utilizar para probetas extraídas del pavimento o para probetas fabricadas en laboratorio. Thomas Kennedy de la Universidad de Austin, presentó las ventajas que se tienen al ejecutar dicha prueba dentro de las que se encuentra:

- La muestra y el equipo es el mismo que los utilizados para otros ensayos, por lo que lo hacen sencillo.
- La superficie de la probeta no representa influencia en la rotura de la probeta.
- Los resultados tienen coeficientes de variación bajos, respecto a otros métodos (dispersiones menores al 15%) de acuerdo con Tesoriere.



- Puede ejecutarse el ensaye bajo cargas dinámicas y/o estáticas.

La prueba de tensión indirecta está dada por:

$$St = \frac{2 \cdot P_{m\acute{a}x}}{\pi \cdot d \cdot t}$$

Donde:

St= Tensión Indirecta

Pmáx= Carga total aplicada (kN)

d= diámetro de la probeta (mm ±0.01 mm)

t= altura de la probeta (mm ±0.01 mm).

Mediante el ensaye de tensión indirecta se obtiene la deformación unitaria y el módulo de rigidez, ambos a tensión, que son necesarios para determinar el número de aplicación de carga que podrá resistir la mezcla antes de que se produzca la falla por fatiga y que Garnica et al (2005), hacen ver la importancia de ambos parámetros y su relación entre la magnitud tanto de la deformación y la resistencia a la tensión indirecta se encuentran ligadas a la compactación obtenida.

Las investigaciones se han encaminado a determinar las relaciones existentes entre el ligante asfáltico, contenido de cemento asfáltico, velocidades de carga, correlaciones con los ensayes a la compresión, energía de compactación, sensibilidad a la humedad, la cuales se encuentran relacionadas al parámetro de la temperatura; ya sea en el proceso de elaboración de las probetas o al someterse a la prueba.

5.2 Resistencia al desgaste Cántabro (UCL)

El ensayo cántabro de pérdida por desgaste, desarrollado para valorar la cohesión de las mezclas bituminosas, es suficientemente sensible y preciso para detectar variaciones en el comportamiento de estas mezclas cuando se modifican los porcentajes de materiales que las componen. Consiste en colocar la probeta de 57 mm de altura en la máquina de Los



Ángeles y aplicarle 300 revoluciones; el valor de desgaste es la diferencia en masa de las muestras.

$$\text{Desgaste (\%)} = \frac{M_i - M_f}{M_i}$$

Donde:

M_i= Masa de la probeta antes del ensaye

M_f= Masa de la probeta después del ensaye

“El ensaye Cántabro puede realizarse tanto en estado seco como en húmedo, simulando en laboratorio la acción abrasiva del tránsito y la influencia del agua, lo que permite el estudio y dosificación de estas mezclas” (Rebollo O. González. R. Botasso. G. (2000) (p.4).

Rebollo et al (2002) durante sus análisis muestra que es un análisis confiable para mezclas asfálticas drenantes y en donde el ensaye de las probetas en su etapa seca se utiliza para verificar el contenido de cemento asfáltico en una mezcla además de ser un ensaye rápido y fácil.

Garnica et al (2004), hace ver que conforme incrementa el porcentaje de cemento asfáltico el desgaste cántabro disminuye; así mismo, se puede obtener un menor desgaste en probetas elaboradas por el Método Marshall que con el Superpave.

6. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El procedimiento del experimento contempla el análisis de los agregados y del cemento asfáltico, para posteriormente determinar la susceptibilidad a la humedad, así como la resistencia al desgaste de la mezcla mediante el Ensayo Cántabro.

Se utilizó un material triturado tipo “calizo” proveniente del Banco “Taurus” ubicado en la Carretera Federal No. 140 del Estado de Veracruz a 685 m desviación izquierda.



Figura 14 Trituración y acopio de materiales (Banco “Taurus”) Fuente: propia

Tabla 3 Caracterización del agregado mineral

PRUEBA	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN	NORMATIVIDAD	
Densidad del Agregado	2.55	2.4	ASTM C127	N·CMT·4·04/03
Desgaste de los Ángeles	18.88%	30%	ASTM C131	
Partículas Alargadas y Lajeadas	26.35%	35%	M·MMP·4·04·005/08	
Equivalente de arena	67.39%	50%	ASTM D2419	
Intemperismo acelerado	1.60%	10%	AASHTO T 104	
Azul de metileno	10 ml/g	7- 12 Marginal pero aceptable	AASHTO TP 57	

El material analizado presentó características aceptables para el uso de mezclas asfálticas, con un margen considerable en el ensaye de Azul de Metileno.

6.1 Granulometría

Se utilizó la granulometría densa y centrada de acuerdo con las especificaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, dentro de la norma N·CMT·4·04/03 Características de los Materiales CMT, para cualquier número de ejes equivalentes (ΣL). Obteniéndose así un comportamiento regular de los agregados que conformaran la mezcla asfáltica.

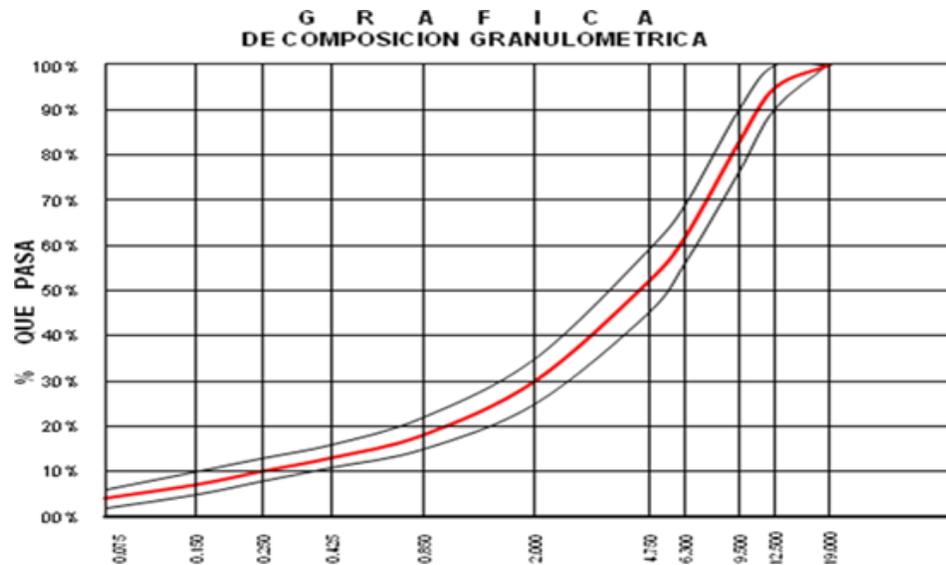


Figura 15 Curva granulométrica. Fuente propia

Los rangos granulométricos especificados en la N-CMT-4-04/03 son los siguientes:

Tabla 4 Rangos granulométricos

		Designación	% Que pasa	Proyecto
COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA	25.00	1"	100.0	-
	19.00	3/4"	100.0	100
	12.50	1/2"	95.0	90-100
	9.50	3/8"	83.0	76-90
	6.30	1/4"	62.5	56-69
	4.75	N°4	52.0	45-59
	2.00	N°10	30.0	25-35
	0.85	N°20	18.5	15-22
	0.43	N°40	13.5	11-16
	0.25	N°60	10.5	8-13
	0.15	N°100	7.5	5-10
	0.075	N°200	4.0	2-6

6.2 Modificantes utilizados en el asfalto

6.2.1 ELVAX

Las resinas de Elvax, etileno-acetato de vinilo (EVA) son una opción para la fabricación de mercancías industriales y para el consumidor. Se puede utilizar en tubos plásticos, aislantes de alambres, en la composición de pegamentos, en celdas solares y muchos usos dentro de la industria médica.



Las resinas de Elvax se pueden procesar por técnicas de proceso termoplásticas convencionales, incluyendo el moldeo a presión, moldeo estructural de la espuma, protuberancia de la hoja y de la forma, el moldeo por insuflación de aire comprimido y capa del alambre. Pueden también ser procesadas usando técnicas convencionales de la impregnación de caucho.

6.2.2 ELVALOY

Es un termopolímero elastomérico reactivo (RET), fabricado por DuPont, que se puede utilizar para modificar las características de la carpeta asfáltica. Tiene gran versatilidad ya que se puede utilizar con diferentes tipos de cementos asfálticos.

Diseñado para contrarrestar los principales mecanismos de falla en los asfaltos: ahuellamiento, agrietamiento por fatiga, agrietamiento por baja temperatura y recubrimiento con el agregado.

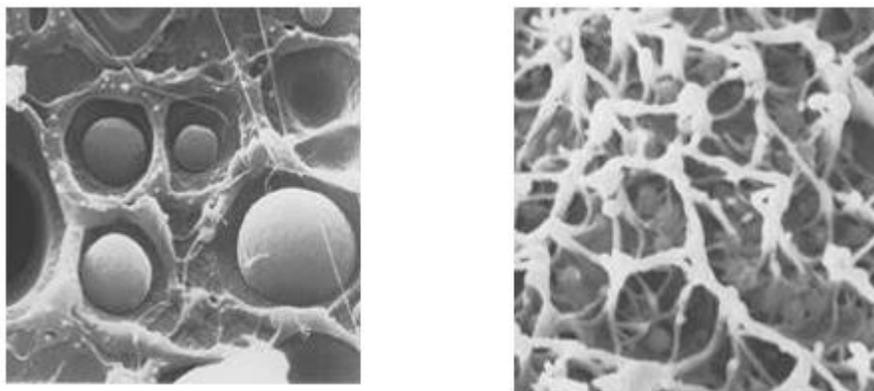


Figura 16 Izquierda otros tipos de modificadores – derecha micrografía de estructura de incorporación asfalto – polímero Elvaloy 4170

El método de incorporación de Elvaloy 4170 al asfalto se realiza lentamente con la finalidad de homogenizar el termopolímero en la muestra de asfalto, evitando la polimerización y posibles separaciones con el asfalto. Posteriormente se realiza un agitado con un serpentín durante un periodo de 2 horas, cuidando no haber formado grumos durante el proceso. Finalmente se adiciona un catalizador, que en su caso fue ácido poli fosfórico, dejándolo reaccionar por un periodo de 30 a 40 minutos, quedando por concluida la modificación de este.



Figura 17 Comparativa de deformación en mezclas asfálticas con Elvaloy RET(0%, 1.5% y 2%)

Los estudios realizados por la FHWA (Federal Highway Administration) en su publicación FHWA-RD-02-029 del año 2002, demostraron que Elvaloy RET, obtuvo gran resistencia al ahuellamiento en la rueda cargada de Hamburgo, y bajo daño inducido por la humedad. (sp)

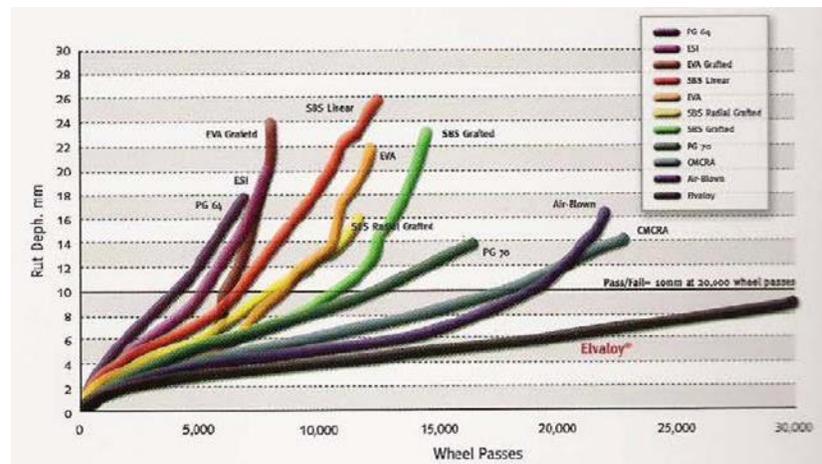


Figura 18 Resultados de ahuellamiento, realizados con rueda de Hamburgo.

El proveedor describe que es efectivo cuando es usado en porcentajes en cantidades entre 0,5% y rara vez sobrepasa 2,5%. La densidad del material es de $0,94 \text{ g/cm}^3$, el punto de reblandecimiento es de 72°C y la temperatura máxima de trabajo son los 280°C .

6.3 Análisis de los asfaltos

Se sometieron a los procesos de investigación un asfalto virgen proveniente de la Refinería de Salamanca, Gto; mismo que se ha sometido a un proceso de modificación con dos productos Elvaloy 4170 (termopolimero plastómero), utilizando ácido polifosfórico como catalizador, y Elvax 240 (resina elastomérica).



Figura 19 Pellet de los modificantes utilizados. Fuente: propia.

La metodología de ensaye para los cementos asfálticos se realizase basa en el Método Superpave, de acuerdo con el nivel 1 en dos etapas, la primera conformada por el análisis del asfalto en una vez modificado y una segunda etapa una vez que el cemento asfáltico se ha sometido a un comportamiento envejecimiento a través de un Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO).

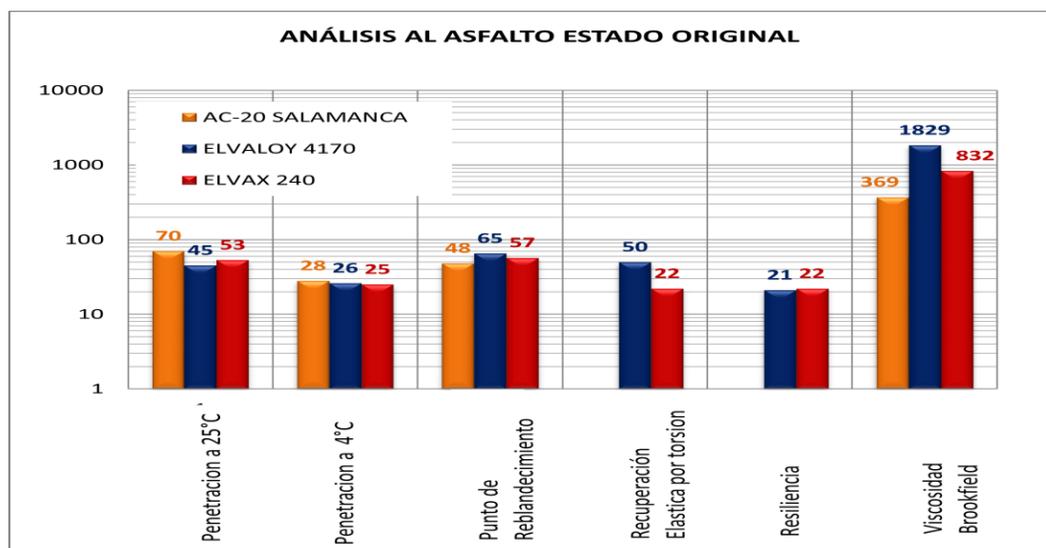


Figura 20 Análisis comparativo de los asfaltos utilizados



Los asfaltos modificados presentan mayor rigidez a la penetración y con mayores temperaturas para ser reblandecidos, que un asfalto virgen.

La figura número 20 muestra la comparativa obtenida en unidades distintas con respecto a la prueba realizada para cada tipo de asfalto. El cemento asfáltico mezclado con ELVALOY presenta menor penetración a los 25°C, mientras que a una temperatura de 4°C los tres tipos de cementos asfálticos tienen un comportamiento muy similar.

Para la prueba de reblandecimiento ya es apreciable el comportamiento y la susceptibilidad térmica que tienen los asfaltos, siendo el asfalto original el que menor cantidad de calor requiere para fluir.

En el ensaye de torsión se realizó únicamente a los asfaltos modificados tal y como se especifica en la normativa de la SCT; donde el cemento asfáltico con Elvaloy se recuperó un 32% más que el asfalto modificado con Elvax. En el ensaye de resiliencia se observó un comportamiento con una variación del 1% entre los resultados.

La viscosidad brookfield demuestra que el asfalto modificado obtuvo valores de viscosidad entre dos y cinco veces mayor que el asfalto original.

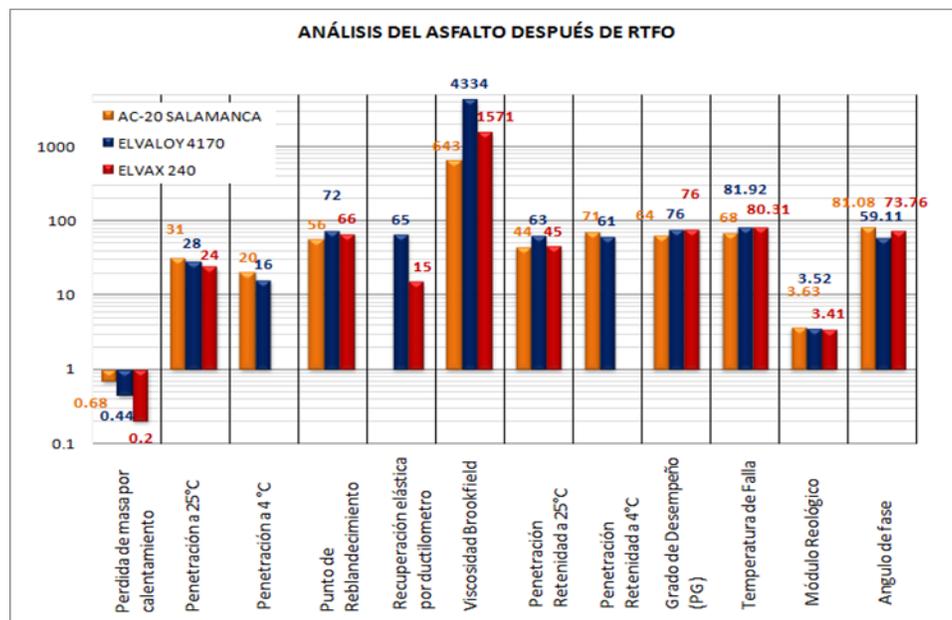


Figura 21 Análisis de los diferentes tipos asfaltos después de RTFO.



Una vez que el asfalto fue sometido a presión y calor mediante el ensaye de RTFO, se obsevo que el cemento asfáltico natural tiene mayor pérdida de masa con respecto a los modificados, siendo el de mejor comportamiento el asfalto modificado con Elvax.

El comportamiento de los asfaltos redujo sus valores en penetración a 25°C, con respecto a lo observado antes del ensaye de RTFO.

Todos los asfaltos mostraron un cambio en sus propiedades térmicas, de viscosidad una vez que estos fueron envejecidos.

Se observo que el asfalto AC-20, únicamente pudo clasificarse como un asfalto PG 64, no así para los asfaltos modificados que pudieron catalogarse como PG 76.

6.3.1 Comportamiento reológico y elástico del asfalto

Los asfaltos ensayados recibieron una velocidad al corte de 12 rpm que equivalen a una tener velocidades sobre la carpeta asfáltica de 85 a 95 km/hr, para la viscosidad brookfield.

Los asfaltos sometidos a la oxidación aumentan su viscosidad, y aquellos asfaltos modificados con termopolimero plastómerico presenta mayor viscosidad, que los modificados con resina elastoméricas.

La figura No. 21 muestra que el módulo reológico disminuye para asfaltos modificados con resina elastomérica. Los asfaltos modificados con termopolímero plastomerico, presentan mayor recuperación a las deformaciones que aquellos que contienen elastómeros, esto una vez que han alcanzado un grado PG (Performance Grade).

Tabla 5 Caracterización de los asfaltos después del ensaye RTFO

TIPO DE ASFALTO	VISCOSIDAD BROOKFIELD (cP)	MÓDULO REOLÓGICO (kPa)	PERFORMANCE GRADE (PG)	ANGULO DE FASE (δ) A PG (°)	RECUPERACION ELASTICA POR TORSION A 25°C	RECUPERACION ELASTICA POR DUCTILOMETRO 25°C
AC-20 Salamanca	643	3.630	64	81.08	-	-
AC-20 (Elvaloy 4170)	4334	3.524	76	59.11	50%	65%
AC-20 (Elvax 240)	1571	3.409	76	73.76	22%	15%



El asfalto modificado con termopolimero plastómero tiene un ángulo de fase de 73.76° a 76°C , 15° por encima del asfalto modificado con una resina elastomérica.

Dado que el ángulo de fase se encuentra en función de la temperatura y el tiempo de carga, es conveniente determinarlo a una temperatura máxima de diseño y con una frecuencia de 10 rad/s , mismo que se asemeja al efecto producido sobre el pavimento por un vehículo moviéndose entre 80 y 90 km/h .

6.4 Características de diseño en las mezclas asfálticas

Conociendo el comportamiento que rigen los distintos tipos de asfaltos, y las características del agregado, se realizó la compactación de la mezcla asfáltica con porcentajes de cemento asfáltico respecto al peso, tanto para probetas Superpave y Marshall.

Tabla 6 Contenidos iniciales de cemento asfáltico.

CEMENTO ASFALTICO	% C.A.
AC-20	5.0
AC-20 modificado I (Elvaloy 4170)	5.5
	6.0
AC-20 modificado II (Elvax 240)	6.5

Dentro de las probetas que fueron elaboradas con el compactador giratorio el criterio utilizado es de $N_{giros}=100$ y un ángulo de oscilación de 1.25° y la compactación realizada con martillo de impacto Marshall se utiliza 75 golpes por cara, este último para determinar el contenido de cemento asfáltico y evaluar su variación con respecto al método Superpave, en todos los casos se utilizó una temperatura de compactación de $145^\circ\text{C}\pm 5^\circ\text{C}$.



Figura 22 Equipos de compactación de mezclas asfálticas al derecho Compactador giratorio (Fuente: LASFALTO), lado izquierdo equipo de compactación Marshall (Fuente: IMT)

Se realizaron probetas cilíndricas de 10.16 cm (4 plg.) de diámetro, y 6.35 cm (2.5 pulgadas) aproximadamente, para la Metodología Superpave.



Figura 23 Probetas realizadas con Compactador Giratorio. Fuente: propia

La elaboración, compactación y elaboración de las probetas tiene como parámetro lo indicado por las especificaciones AASHTO TP4 (*Standard Method for preparing and determining the density of Hot Mix Asphalt (HMA) specimens by means of the SHRP Gyratory Compactor*) Deddens. T. Hinrichsen. J. McDaniel. R. (1999) (p. 36)



Figura 24 Proceso de mezclado de cemento asfáltico y agregados. Fuente: propia

Las probetas en el diseño de mezcla por medio del Método Marshall, se realizó de acuerdo con la norma ASTM D 6926 para su preparación y la norma ASTM D 6927 para evaluar su estabilidad y flujo.

Tanto la gravedad específica neta es determinada a partir de las normas ASTM D2726 y la norma ASTM D2041 para determinar la gravedad específica teórica máxima, mejor conocida en México como Densidad Rice.



Figura 25 Determinación de la Gravedad específica teórica máxima. Fuente: propia

La gravedad específica teórica máxima se utiliza para determinar la relación volumétrica de la mezcla suelta en función del porcentaje de agregado y asfalto únicamente, dado que durante la ejecución del ensaye se realiza un vacío para retirar la totalidad del aire que se encuentra en las probetas.



El protocolo AMAAC PA-MA 01/2013, define la gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta como la masa del agregado más asfalto, dividido por el volumen de ambos componentes, sin incluir el volumen de los vacíos de aire. Es una propiedad muy útil porque se emplea como referencia para calcular otras importantes propiedades como el contenido de vacíos de aire.

Ayala. Y, Delgado. H, Guzmán. D, Salazar. A. (2018) en la publicación técnica No. 516 del Instituto Mexicano del Transporte, menciona dos métodos de ensayo adicionales (método del picnómetro al aire y método del matraz) para determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla; sin embargo, se han detectado diferencias considerables entre los resultados de los tres métodos. Por lo anterior, se ha adoptado el método del picnómetro sumergido al ser el ensayo comúnmente utilizado en los laboratorios de México y el que presenta una mejor repetibilidad.

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

7.1 Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica SUPERPAVE

Después de haber determinados los ensayos de gravedad específica para la mezcla asfáltica suelta (Gmm) y compactada (Gmb) para las probetas elaboradas con la metodología Marshall y Superpave, se cuenta con información suficiente para cada tipo de cemento asfáltico.

Tabla 7 Parámetros volumétricos obtenidos Superpave

Tipo de asfalto	% Pb respecto al agregado	% Pb respecto a la mezcla	Gmb	Gmm	VACIOS	V.A.M	V.F.A	%Compactación
AC-20	5.0	4.76	2.205	2.400	8.12	17.65	53.96	92
	5.5	5.21	2.246	2.398	6.35	16.53	61.56	94
	6.0	5.66	2.275	2.387	4.71	15.85	70.30	95
	6.5	6.10	2.285	2.381	4.10	15.85	74.14	96
ELVALOY	5.0	4.76	2.207	2.385	7.45	17.56	57.58	93
	5.5	5.21	2.276	2.383	4.50	15.41	70.77	95
	6.0	5.66	2.279	2.377	4.14	15.70	73.65	96
	6.5	6.10	2.269	2.353	3.58	16.46	78.23	96
ELVAX	5.0	4.76	2.175	2.428	10.43	18.780	44.442	90
	5.5	5.21	2.245	2.403	6.58	16.55	60.27	93
	6.0	5.66	2.267	2.388	5.08	16.14	68.52	95
	6.5	6.10	2.270	2.370	4.22	16.41	74.29	96



La tabla 7 representa las propiedades más importantes de la mezcla asfáltica una vez que esta se compacta mediante el equipo de Compactador giratorio y donde los valores calculados se representan de la siguiente manera:

- **Gravedad específica bruta de la mezcla (Gmb).** Parámetro adimensional que representa la relación entre la masa de las probetas en estado seco y la masa de las muestras en condición superficialmente seca y sumergida.

$$Gmb = \frac{A}{B - C}$$

Gmb= Gravedad específica bruta de la mezcla a 25°C (adimensional)

A= Masa del espécimen seco en aire, (g)

B= Masa saturada superficialmente seca, (g)

C= Masa del espécimen sumergido en agua (g)

Los valores de las masas determinadas durante este proceso se deben realizar con una balanza con resolución de 0,1g.

- **Vacíos de aire (Vacíos).** De acuerdo con Ayala, Y., et al, los vacíos son el espacio que ocupa el aire en una mezcla asfáltica y su valor se debe considerar como un complemento al grado o nivel de compactación que tiene una mezcla.

“...un 4.5% de vacíos de aire, indica que se cuenta con un 95.5% de compactación. Es un dato fundamental en el diseño de mezclas asfálticas...”

$$Vacíos = \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} * 100$$

Vacíos= Porcentaje de vacíos de la mezcla, comúnmente abreviado como %V y %Va.

- **Vacíos del agregado mineral (VAM).** También designada con la abreviación VMA. La publicación técnica realizada por McGennis. R.B., Anderson. R.M., Kennedy. T.W., Solaimania., autorizada por la Federal Highway Administration (FHWA) en el año 1995, menciona que es el espacio intergranular ocupado por asfalto y aire en una mezcla compacta y que puede ser representando en un diagrama de componentes.



“...es la suma del volumen de aire y volumen de asfalto efectivo, expresado en un porcentaje del volumen total. El volumen de asfalto absorbido es usualmente no considerado por ser parte del VMA...”

$$VAM = 100 - \frac{Gmb * (100 - Pb)}{Gsb}$$

Pb= porcentaje de cemento asfáltico, respecto a la mezcla

Gsb= Gravedad específica neta de los agregados

$$Gsb = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

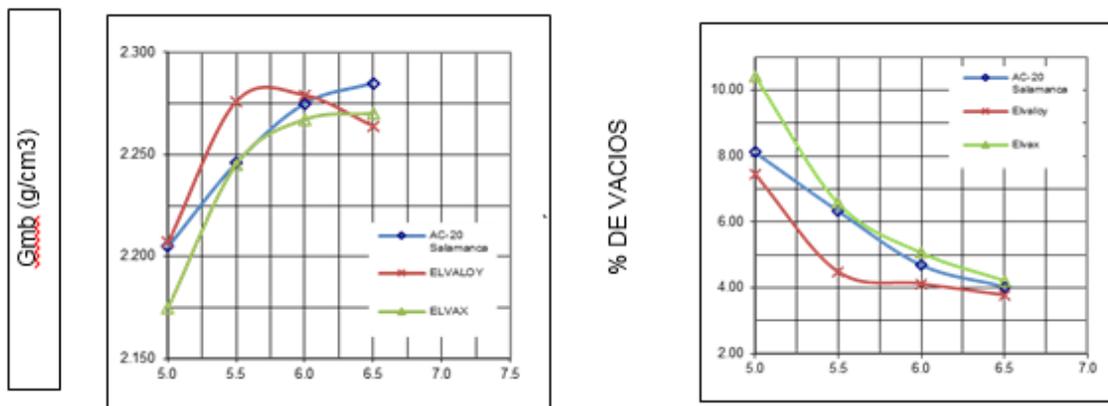
P₁, P₂, P_n= Porcentajes individuales por masa de los agregados

G₁, G₂, G_n= Gravedad específica neta individual de los agregados

- **Vacíos llenos de asfalto (VFA).** El porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, VFA, no incluyendo el asfalto absorbido, se determina usando [9]:

$$VFA = \frac{VAM - Va}{VAM} * 100$$

Las gráficas de la figura 26 representan los parámetros de gravedad específica de la mezcla compacta, los vacíos de aire existente, los vacíos del agregado mineral y los vacíos llenos de asfalto para cada de las mezclas realizadas con el compactador giratorio; así mismo la gravedad específica máxima teórica para cada contenido de cemento asfáltico.



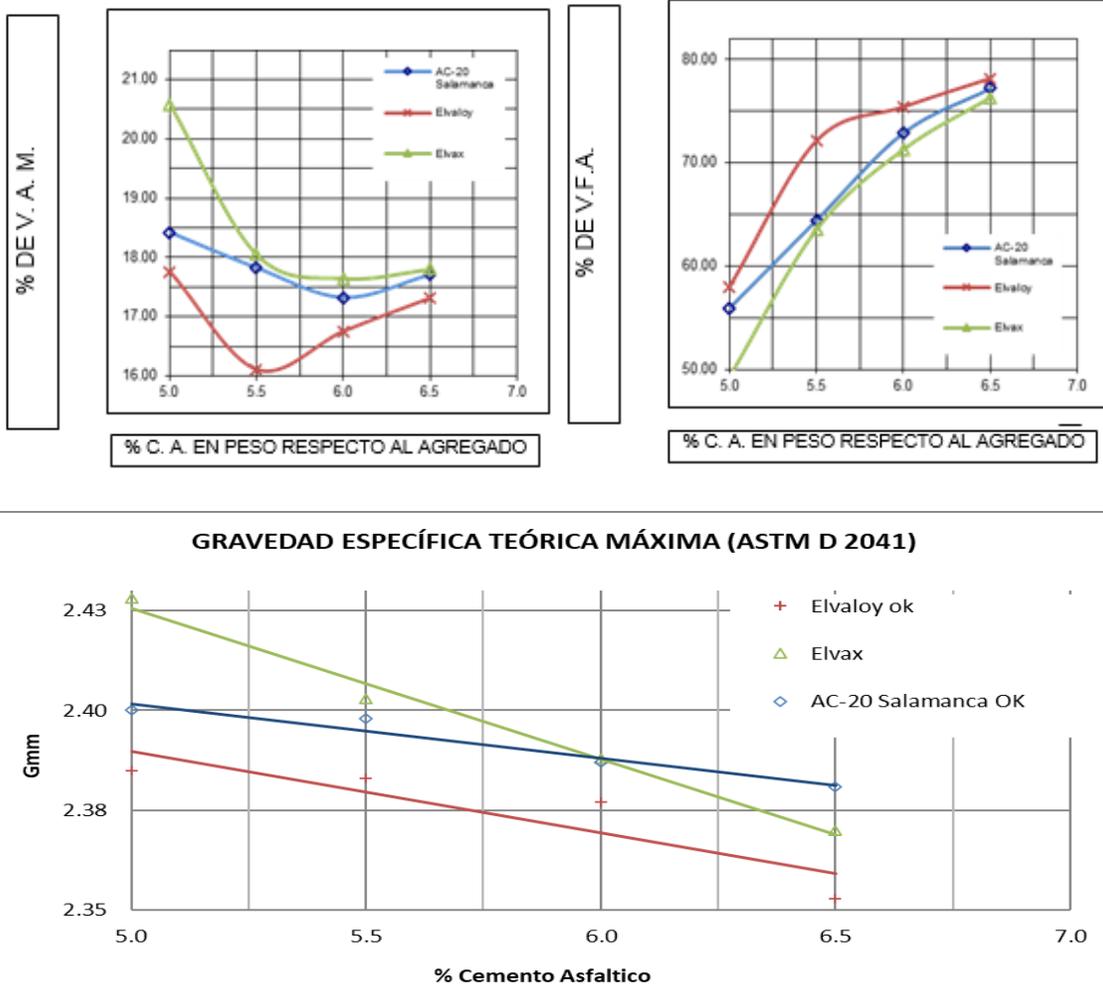


Figura 26 Parámetros Volumétricos - metodología Superpave

Una vez realizada la compactación de las mezclas asfálticas mediante compactador giratorio, se obtuvieron las gravedades de la mezcla compacta (G_{mb}), en donde se observó que estas cumplen con una condición de absorción menor al 2% en su interior; por lo tanto, no fue requerido estereato de sodio o incluir parafina en ellas, tal y como lo menciona la norma AASHTO

Las mezclas asfálticas producidas con termopolímeros elastoméricos presentaron porcentajes de vacíos ligeramente menor respecto al asfalto virgen, no así para la mezcla asfáltica modificada con resinas.

Adicionalmente se infiere que el porcentaje de compactación aumenta conforme el contenido de cemento asfáltico, observándose un 94,3% de compactación promedio para el



cemento asfáltico AC-20, 95% para las muestras compactadas con ELVALOY y 93,5% para las compactadas con ELVAX.

La variación más grande observada para un mismo valor de Gmb, considerando el mismo contenido de cemento asfáltico es de 31 g/cm³; los vacíos del agregado mineral se encontraron en un rango entre 15,41% hasta 18,78%.

El cemento asfáltico modificado con ELVALOY presentó menor cantidad de vacíos de aire, menor cantidad de vacíos en el agregado mineral y mayor cantidad de vacíos llenos de asfalto; siendo la variación más alta (9,2%) la mostrada para un contenido de 5,5% respecto al agregado.

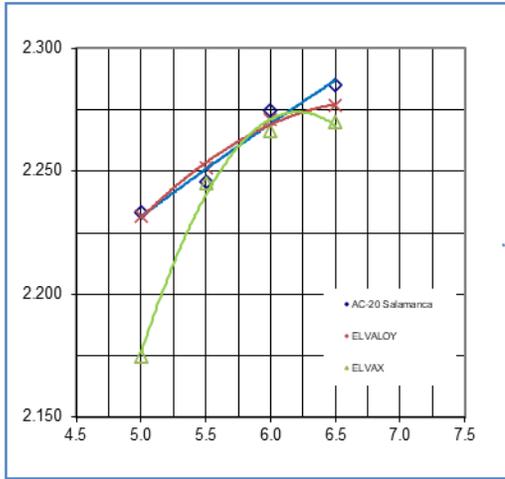
La gravedad máxima teórica (Gmm) decreció para contenidos mayores de cemento asfáltico en forma lineal para cualquier tipo de asfalto.

7.2 Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica MARSHALL

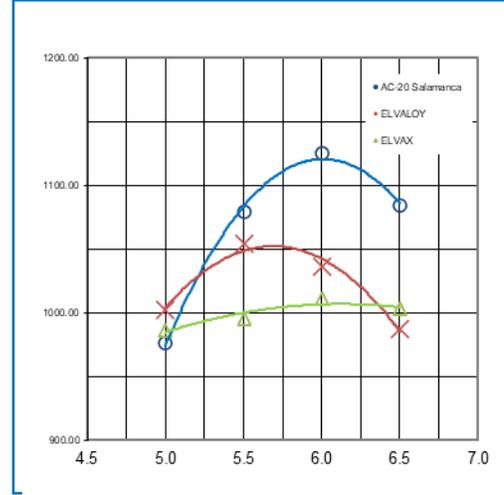
Garnica A. P., et al menciona que es un método diseñado por Bruce Marshall, mejorado por el cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, en donde en su principio se diseño para agregados con tamaño máximo de 1 pulgada (25 mm) y que posteriormente se modificó dicho método para utilizarse en mezclas asfálticas de hasta 1,5 pulgadas (38mm). Por medio de este método se estiman dos parámetros principales: estabilidad y flujo.

“La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 ° C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100”) que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.” [43]

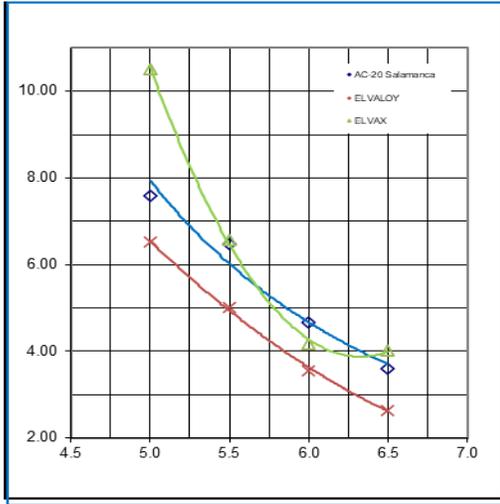
Gmb (g/cm³)



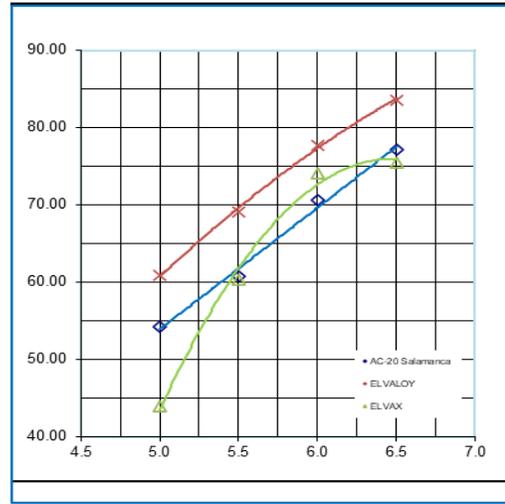
ESTABILIDAD (kg)



% DE VACIOS

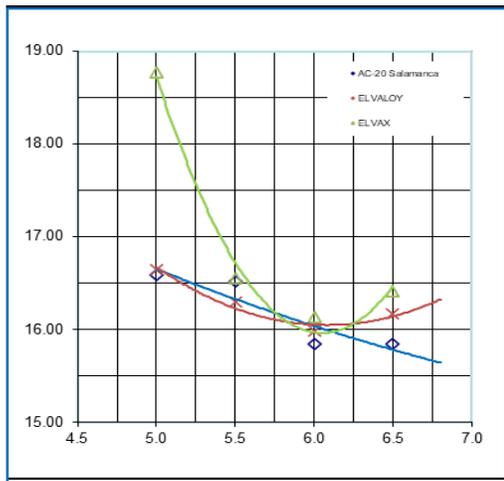


% DE V.F.A.



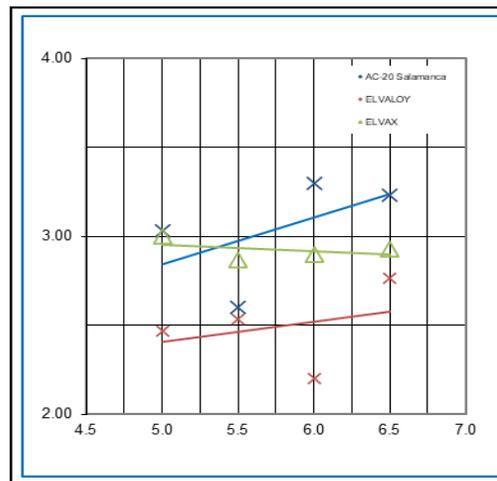
% C. A. EN PESO RESPECTO AL AGREGADO

% DE V. A. M.



% C. A. EN PESO RESPECTO AL AGREGADO

FLUJO (mm)



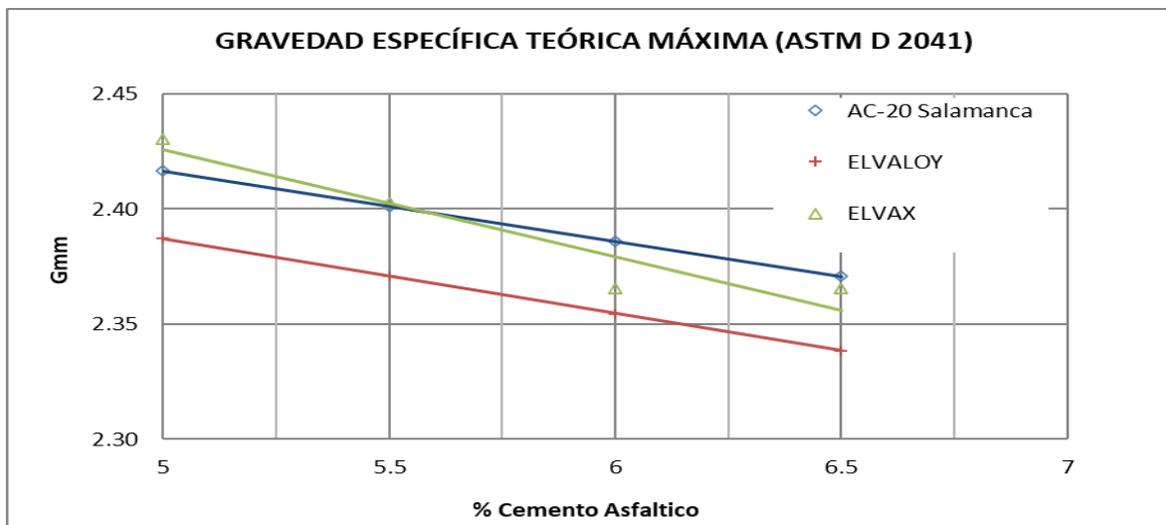


Figura 27 Parámetros Volumétricos del diseño Marshall

En la figura No. 27 se muestran los gráficos resumen del comportamiento de las mezclas asfálticas para distintos contenidos de cemento asfáltico con respecto al agregado y se incorporan los dos parámetros del diseño Marshall (estabilidad y flujo).

Los parámetros %Vacíos, % VAM y %VFA se calcularon de igual forma que lo revisado para las mezclas elaboradas con la metodología Superpave.

La gravedad específica bruta de la mezcla compacta no presentó variación considerable para las probetas elaboradas con cemento asfáltico AC-20 y ELVALOY, no así para las probetas elaboradas con ELVAX.

Los valores de estabilidad registrados fueron mayores para un cemento asfáltico normal que para el modificado con termopolímeros o resinas una vez que se fue sometido al ensaye después de haber estado sumergido en baño maría por 30 minutos a 60°C.

Los porcentajes de vacíos de aire fueron menores en mezclas asfálticas con ELVALOY que con ELVAX y AC-20; los vacíos del agregado mineral (VAM) fueron mayores para la mezcla elaborada con ELVAX teniendo la variación más alta de 2,19% para el contenido de 5,0% comparado con un asfalto no modificado.



Los vacíos ocupados con asfalto oscilaron entre 54,26% hasta 77,22% para un asfalto AC-20, entre 60,86% hasta 83,62% para el asfalto modificado con termopolímero y entre 44% hasta 75,44% para el modificado con resina.

Tabla 8 Parámetros volumétricos obtenidos Marshall

Tipo de asfalto	% Pb respecto al agregado	% Pb respecto a la mezcla	Gmb	Gmm	VACIOS	V.A.M	V.F.A	%Compactación
AC-20	5.0	4.76	2.233	2.417	7.59	16.59	54.26	92
	5.5	5.21	2.246	2.401	6.47	16.53	60.83	94
	6.0	5.66	2.275	2.386	4.66	15.85	70.59	95
	6.5	6.10	2.285	2.371	3.61	15.85	77.22	96
ELVALOY	5.0	4.76	2.232	2.387	6.52	16.65	60.86	93
	5.5	5.21	2.252	2.371	5.03	16.30	69.18	95
	6.0	5.66	2.271	2.355	3.55	15.98	77.79	96
	6.5	6.10	2.277	2.339	2.65	16.17	83.62	97
ELVAX	5.0	4.76	2.175	2.430	10.52	18.780	44.004	89
	5.5	5.21	2.245	2.403	6.57	16.55	60.33	93
	6.0	5.66	2.267	2.365	4.17	16.14	74.15	96
	6.5	6.10	2.270	2.365	4.03	16.41	75.44	96

La tabla 8 muestra los parámetros volumétricos obtenidos del ensaye Marshall y el grado de compactación alcanzado para cada una de las mezclas.

El compactador giratorio logra una densificación ligeramente menor en la mezcla asfáltica respecto a la lograda en la compactación Marshall, provocando un incremento en el porcentaje de vacíos y disminución en la densificación con esa cantidad de giros.

Las mezclas asfálticas que utilizan un termopolímero elastomérico reactivo reducen el contenido de cemento asfáltico, respecto a los asfaltos vírgenes y los modificados con resinas.

Mc Gennis et al mencionan que el contenido óptimo de cemento asfáltico debe ser aquel donde el porcentaje de vacíos sea igual a 4%, si consideramos dicho criterio obtenemos la siguiente tabulación:

Tabla 9 Contenidos de cemento asfáltico

Tipo de asfalto	Superpave	Marshall
AC-20 Salamanca	6,5	6,3
ELVALOY	6,1	5,8
ELVAX	6,5	6,2

8. CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

8.1 Resistencia a la tensión indirecta

La experimentación de ensaye a través de tensión indirecta se realizó ejecutando la metodología de la normativa indicada con algunas variaciones:

- Probetas sin acondicionar. Consiste en realizar la prueba de ejecución tal como se indica en la normativa AASHTO T 166
- Probetas acondicionadas. Se somete la prueba a un proceso de saturación entre el 70 y 80%, para posteriormente someterla a congelación por un periodo de 16 horas a -18°C . Se introducen a baño maria a 24 horas a 60°C y se finaliza con su acondicionamiento durante 0,5 horas a 25°C ; para su subsecuente ensaye.

Las variaciones anteriores únicamente se realizaron para probetas compactadas con compactador giratorio, con la finalidad de observar el comportamiento de estas al ser ensayadas a la tensión indirecta (TSR).



Figura 28 Equipo e instalación de probeta para ensaye de Tensión indirecta. Fuente: propia



De los resultados obtenidos de la mezcla asfáltica se observa que la mezcla asfáltica con cemento AC-20 disminuyó la carga de resistencia conforme la cantidad de cemento asfáltico aumentaba para las probetas no acondicionadas, no así, para aquellas que fueron acondicionadas.

En el caso de mezclas asfálticas sin acondicionar y elaboradas con Elvaloy se comportaron de manera casi lineal hasta un contenido de cemento asfáltico de alrededor del 6% con respecto al agregado y para el caso de muestras acondicionadas se muestra un ascenso en la resistencia conforme aumenta la cantidad de cemento asfáltico.

En el caso de mezclas asfálticas elaboradas con Elvax, muestran un comportamiento parabólico con cargas de alrededor del 5,1 kilonewtons, pero con distintos contenidos de cemento asfáltico.

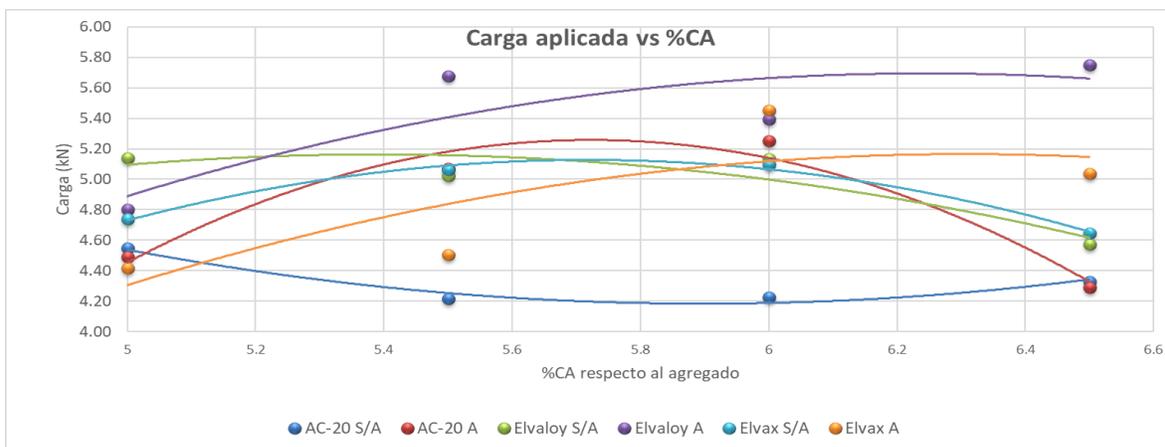


Figura 29 Comportamiento de las mezclas asfálticas respecto a la carga

Durante el proceso de ejecución de la prueba de Tensión Indirecta fue posible medir la deformación por medio de un LVT (micrómetro digital). En el gráfico mostrado en la figura 30 se observa que las mezclas asfálticas tienen una tendencia muy marcada, dado que existe una separación de resultados tanto para muestras acondicionadas y no acondicionadas y que son menores a 3.0 mm de deformación.

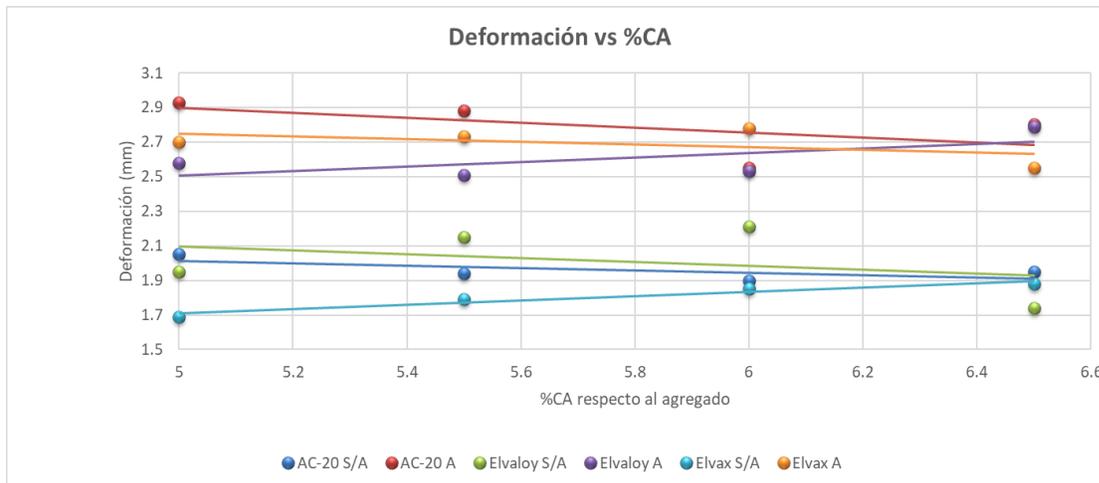


Figura 30 Comparativa de tensión indirecta vs deformación

El 64% de los valores analizados cumplen con parámetros de deformación permitida (de 2 a 3,5mm) en caso de considerarse como el flujo del Ensaye Marshall.

De igual manera se realizó una comparativa del esfuerzo actuante en la mezcla asfáltica y la deformación recibida donde los resultados muestran correlaciones lineales mayores el 11,9%, obteniendo dicho valor para la muestra de Elvaloy sin acondicionar y que se puede observar en la figura número 30.

Siguiendo con el mismo gráfico las mezclas una vez que fueron acondicionadas por un periodo de 30 minutos presentaron mayor resistencia a la tensión indirecta, pero además mayor deformación excepto para la mezcla elaborada con Elvax, pues presenta menor resistencia a la tensión indirecta para los porcentajes de 5,0 y 5,5%.

La mezcla asfáltica elaborada con AC-20 y con asfalto Elvaloy, presentan en sus curvas concavidades hacia arriba en la etapa de muestras no acondicionadas y de forma inversa una vez que fueron acondicionadas. Para el caso de Elvax, ambas curvas presentan concavidades hacia arriba.

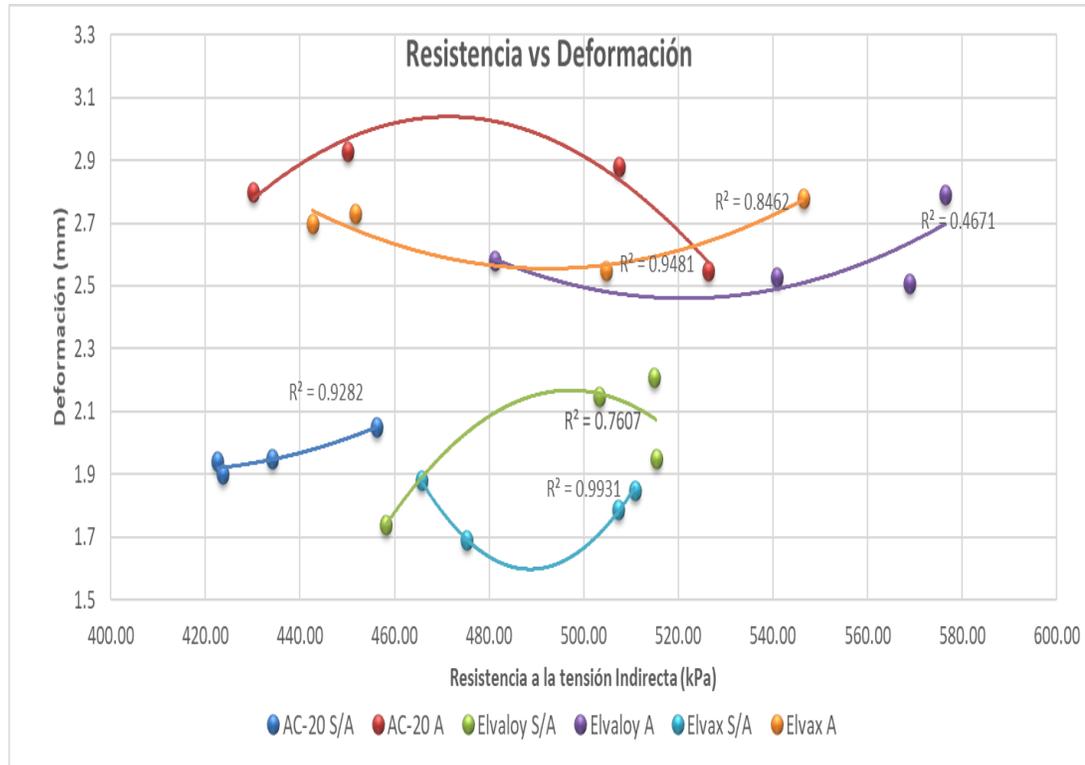


Figura 31 Relación entre resistencia a la tensión y deformación

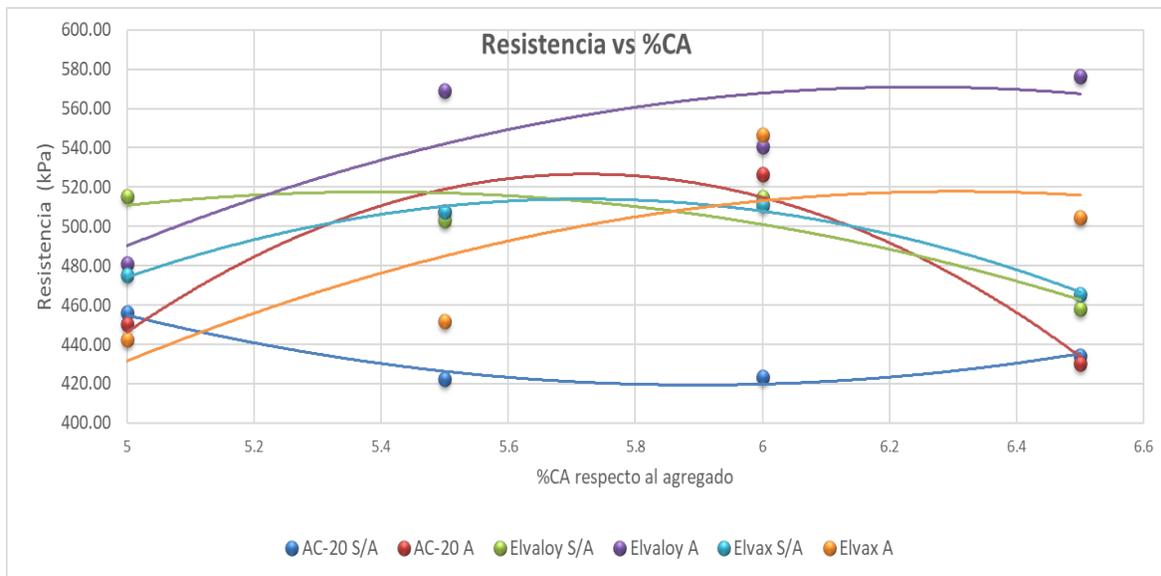


Figura 32 Relación entre resistencia a la tensión y contenido de cemento asfáltico

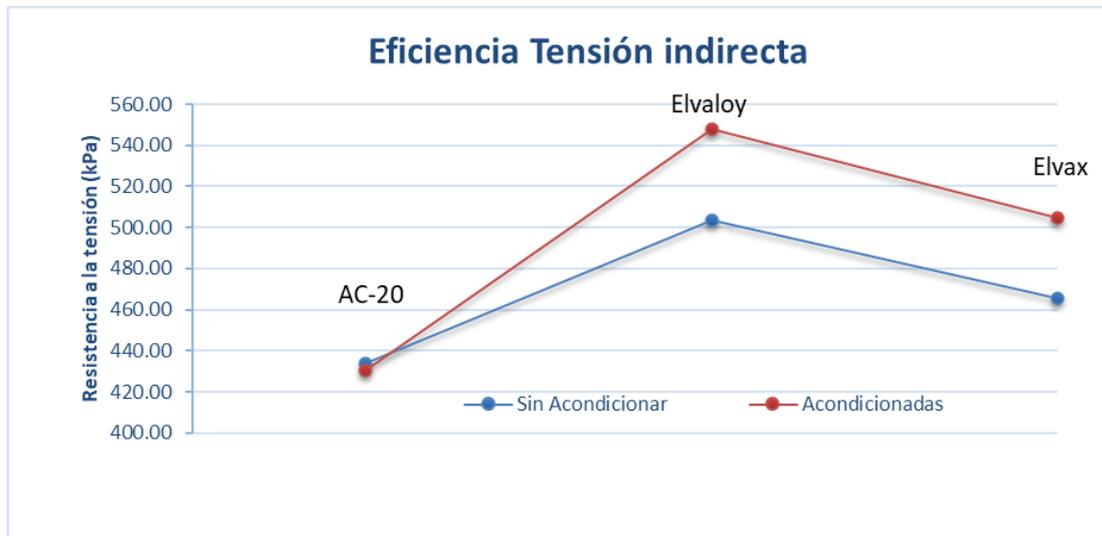


Figura 33 Eficiencia de las mezclas asfálticas a la Tensión Indirecta.

Considerando los porcentajes de cemento asfáltico óptimos de acuerdo con la metodología Superpave (6,5% AC-20, 6,1% Elvaloy, 6,5% Elvax) se obtiene el gráfico de la figura 32, en donde se observa la variación y la eficiencia de las mezclas asfálticas una vez que estas han sido acondicionadas.

La mezcla asfáltica con AC-20 normal demuestra una relación de 100,9% de las muestras sin acondicionar con respecto a las acondicionadas; la mezcla realizadas con Elvaloy tendría una razón 91,8% y 92,3% para la mezcla con Elvax.

8.2 Ensayo al desgaste Cántabro

El ensayo al Desgaste Cántabro es un indicador confiable para determinar la cohesión de una mezcla bituminosa, aun cuando ésta es de granulometría densa.



Figura 34 Probetas al Ensaye al Desgastes Cántabro

La mezcla asfáltica con diversos contenidos de cemento asfáltico, no se ve influenciada por la temperatura de 25°C o 60°C, manteniendo buena cohesión y adhesividad en la relación agregados – asfalto.

Considerando las recomendaciones de pérdida por inmersión en estado seco (< 25%) y en estado de inmersión (<35%), cumple con este requerimiento para asfaltos desde el 5% de cemento asfáltico.

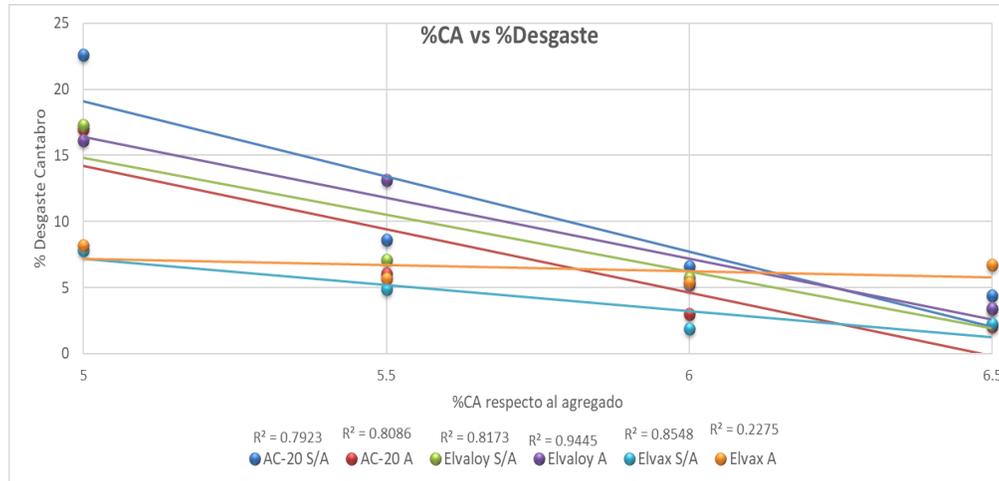


Figura 35 Resistencia al Desgastes Cántabro

La figura 35 corresponde a los desgastes cántabro de las muestras, en donde se observa una disminución de la resistencia una vez que las muestras fueron sometidas al acondicionamiento para aquellas muestras que contienen un agente modificador; es decir, el porcentaje de desgaste cántabro fue mayor una vez que las probetas fueron sometidas al ciclo de congelación y deshielo.

De manera inversa, los ensayos realizados a la mezcla asfáltica con AC-20 normal, tuvieron mayor desgaste para las probetas no acondicionadas que las acondicionadas.

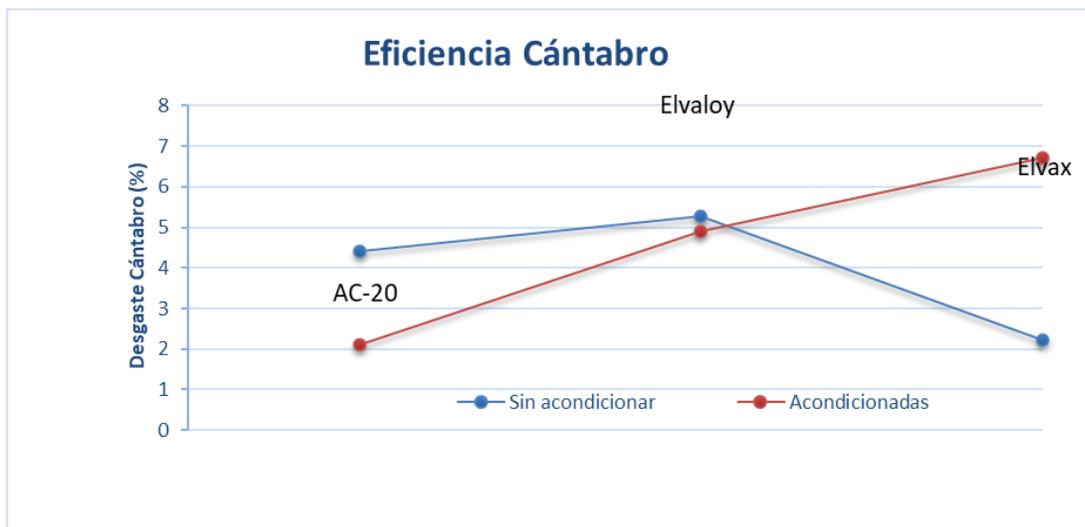


Figura 36 Eficiencia de las mezclas al desgaste Cántabro (UCL)



La caracterización de las mezclas asfálticas con la metodología UCL es rápida, y representando una desviación menor en resultados, entre los diversos cementos asfálticos utilizados.

En la figura siguiente, se encontró que el 33% de los resultados comparados entre el porcentaje de desgaste cántabro y la resistencia a la tensión tienen un desgaste mayor al 10%

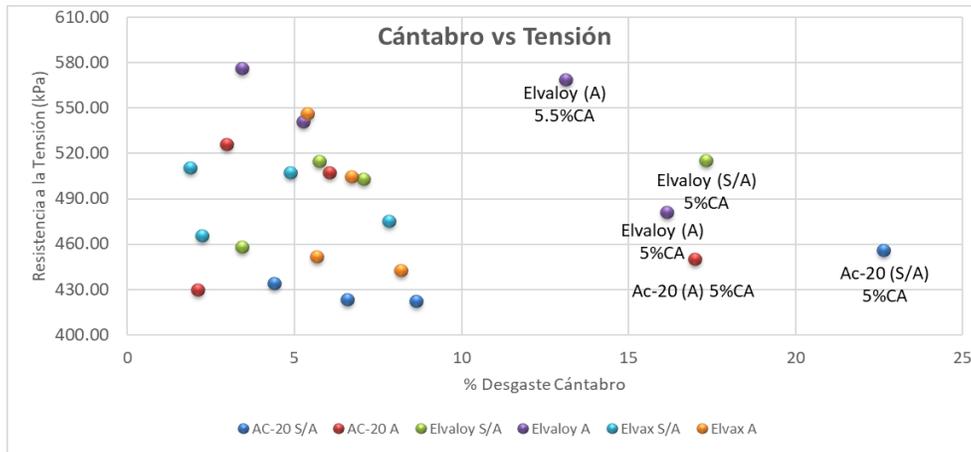


Figura 37 Relación tensión indirecta vs desgaste cántabro

Los asfaltos con 5% de cemento asfáltico con respecto al agregado presentaron mayor desgaste en relación con el total de las muestras.

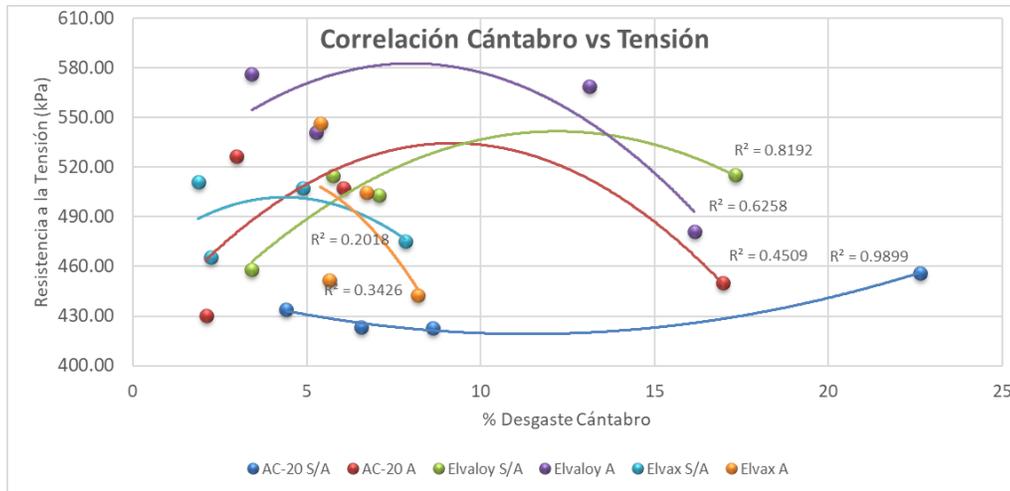


Figura 38 Gráfico de correlación de ensayes



La figura 38 representa la correlación existente entre los ensayos cántabro y de resistencia a la tensión indirecta para el conjunto de ensayos realizados, donde se implementa un ajuste de correlación polinómica. En la cual se infiere que la resistencia a la tensión indirecta tiende a tener máxima para un punto mínimo de desgaste cántabro.

8.3 Conclusiones

- El uso adecuado de agregados, cementos asfálticos para la elaboración de mezclas asfálticas dependerá en mucho de la disposición de estos, siempre influenciados por su naturaleza geológica, tratamiento y proceso de trituración e indudablemente de la selección de estos.
- Los agregados utilizados cumplieron con los parámetros hasta el momento existentes para la elaboración de mezclas asfálticas, teniendo así una composición granular densa.
- Es necesaria la capacitación continua a los ingenieros y encargados de la rama de las vías terrestres las distintas normativas existentes, principalmente con respecto a los rangos granulométricos, dado que se presentan variaciones en su composición granular.
- Los cementos asfálticos original tienen una naturaleza cambiante y que se encuentra en función de su ubicación, proceso de extracción, componentes naturales cuya importancia radica en su composición molecular, durabilidad, resistencia a la carga y deformación que le puede proporcionar a una mezcla asfáltica.
- Los cementos asfálticos modificados con polímeros proporcionan mejores características que los no modificados, mismos que verán reflejados en los costos de mantenimiento de una vialidad.



- Durante la producción de mezcla asfáltica, el constructor deberá dar importancia a cada uno de los elementos que la conforman, así como considerar los requerimientos de ajuste durante su control en obra.
- Las mezclas asfálticas elaboradas con termopolímeros ofrecen resistencias al desgaste y la tensión de manera eficiente, al recibir cargas debidas al tránsito vehicular, con un tiempo de acondicionamiento en la mezcla.
- Las mezclas asfálticas cuyo ligante se encuentra en estado virgen obtienen menores resistencias en parámetros de Tensión Indirecta y Desgaste, respecto aquellas que contienen modificantes y que el producto final siempre estará ligado al buen manejo, colocación, tendido y terminado final de la mezcla asfáltica.
- Las mezclas asfálticas donde el ligante es una resina presenta resultados de tensión indirecta y desgaste menores en comparación con los termopolímeros y asfaltos vírgenes, sin embargo, el consumo de cemento asfáltico es mayor en 0.4%.
- Asumiendo buenas bases, métodos de construcción, agregados adecuados y un uso correcto en incorporación de Elvaloy 4170 puede otorgar una vida útil del 200% respecto a una carpeta sin aditivo.
- La capacidad estructural del asfalto modificado, mejoró un 30% como al Ensaye al Desgaste Cántabro.



REFERENCIAS

- [1] N-CMT-4-05-001/06 (2006) Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Calidad de Materiales Asfálticos. Recuperado el 15 de enero de 2019. <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-001-06.pdf>
- [2] Avellán Cruz Martha Dina. (2007) Tesis: *Asfaltos modificados con polímeros*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. Recuperado el 15 de enero de 2019. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2705_C.pdf
- [3] Asphalt Institute (2001) Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente. Serie de Manuales No. 22 (MS-22) Recuperado el 15 de enero de 2019. <https://vdocuments.mx/download/ms-22-principios-de-construccion-de-pavimentos-de-mezcla-asfalticas>
- [4] Araiza. J. (2002). Tesis: *Manejo de planta de concreto asfáltico y construcción de carpeta* Recuperado el 15 de enero de 2019. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/11811/capitulo2.pdf>
- [5] Maxil C. Salinas H. Tesis: *Ventajas y Desventajas del Uso de Polímeros en el Asfalto*. Universidad de las Américas Puebla. (2006) Recuperado el 06 de enero de 2019. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/maxil_c_r/
- [6] McGennis. R.B., Anderson. R.M., Kennedy. T.W., Solaimania. M., (1995). Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis. Publicación No. FHWA-SA-95-003. Recuperado el 11 de abril de 2020. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/013177.pdf>
- [7] Zeng. M. Zhai. H. Khatri M. (2001) NCHRP REPORT 459. Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design. Recuperado el 06 de enero de 2019. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_459-a.pdf
- [8] Garnica. P., Delgado. H., Sandoval. C. (2005). Análisis comparativo de los Métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas. Instituto Mexicano del



Transporte. Publicación Técnica No. 271. Recuperado el 11 de abril de 2020
<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt271.pdf>

[9] Garrote. E (2006) Tesina: *Efecto de la temperatura en la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas*. Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado el 27 de agosto de 2018. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3324>

[10] Dupont Packaging and Industrial Polymers (SA). Terpolímero Elastomérico Reactivo de Etileno (TERE) Revisado el 15 de marzo de 2016.
http://artemisa.unicauca.edu.co/~sicolpav/PonenciasPDF/G_Terpolimero_Felipe.PDF

[11] Garnica. P. Delgado. H. Gómez. J. (2004). Análisis de la influencia de método de compactación en el comportamiento mecánico de mezclas asfáltica. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 255 Recuperado el 06 de octubre de 2019.
<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt255.pdf>

[12] Kraemer. C. Pardillo. J. Rocci. S. Romana. M. Blanco. V. del Val. M. (2004) “Ingeniería de Carreteras” Vol. 2. McGraw Hill Interamericana de España S.A. España.

[13] Rebollo O. González. R. Botasso. G (2000) Determinación del porcentaje de ligante óptimo, en mezclas asfálticas abiertas. Recuperado el 16 de junio de 2020.
<https://www.yumpu.com/es/document/read/52259819/determinacion-del-porcentaje-de-ligante-optimo-en-lemac>

[14] Stuart. K. Mogawer. W. (2002) Understanding the Performance of Modified Asphalt Binders in Mixtures: Evaluation of Moisture Sensitivity. Recuperado el 16 de junio de 2020.
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/asphalt/pavepubs/02029/index.cfm#fig1>

[15] Sandoval I. Cremades I. (2010) Revista Asfáltica: Caracterización del asfalto mediante creep repetido multi-esfuerzo en reómetro de corte dinámico. Recuperado el 18 de julio de 2019. <https://vdocuments.mx/caract-asfaltos-creep-repetido-aec.html>

[16] Deddens. T. Hinrichsen. J. McDaniel. R. (1999). Hot Mix Asphalt (HMA) Technician training Manual. FHWA Multi-Regional Asphalt Training and Certification Group.



Recuperado el 18 de marzo de 2019.

<https://www.mass.gov/files/documents/2016/07/qx/asphalt-hot-mix-training-manual.pdf>

[17] NLT-182/99 (1999). Punto de fragilidad Fraass de los materiales. Centro de Estudios de Experimentación de Obras Públicas Recuperado el 10 de enero de 2019. <http://normativa.itafec.com/ensayos/ES.12.02.082.LT.pdf>

[18] Cárdenas. J & Fonseca. E. (2009). Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. Revista Escuela de Ingeniería de Antioquía, Medellín (Colombia). Recuperado el 10 de enero de 2019. <https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/200/1/REI00117.pdf>

[19] García. J, Hansen. K. (2001). HMA Pavements mix type Selection guide. Serie 128 National Asphalt Pavement Association (NAPA) and the Federal Highway Administration (FHWA). Recuperado el 03 de enero de 2020. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/asphalt/HMA.pdf>

[20] Delgado H, Almilla., Gómez López J. A., Garnica Anguas Paul. IMT. Diseño de mezclas asfálticas con la metodología Superpave (Nivel 1). Recuperado el 05 de mayo de 2020.

https://www.academia.edu/5320269/Dise%C3%B1o_de_mezclas_asf%C3%A1lticas_con_la_metodolog%C3%ADa_Superpave_Nivel_1_Superpave_hot_mix_asphalt_design_Level_1_

[21] Garnica Paul. Flores. M. Gómez. J. Delgado. H. (2005). Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 267. Recuperado el 18 de octubre de 2018. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt267.pdf>

[22] Garnica. P. Delgado. H. Gómez. J. (2004). Análisis de la influencia de método de compactación en el comportamiento mecánico de mezclas asfáltica. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 255 Recuperado el 17 de marzo de 2019. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt255.pdf>



[23] M-MMP-4-05-010/02 (2002) Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Pruebas en el Residuo de la Película Delgada de Cementos Asfálticos. Recuperado el 15 de enero de 2019. <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-05-010-02.pdf>

[24] Ayala. Y, Delgado. H, Guzmán. D, Salazar. A. (2018) Manual de Ensayos para Laboratorio Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) - Parte 1 Para el cálculo de volumetría y ensayos de desempeño. Publicación técnica No. 516 Instituto Mexicano del Transporte. Recuperado el 06 de julio de 2020. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt516.pdf>

[25] Garnica. P., Delgado. H., Gómez. J., Alonso. S., Alarcón. H. (2004). Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 246. Recuperado el 11 de abril de 2020. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt246.pdf>

[26] West. R. Watson. D. Turner. P. (2010) *NCHRP Report 648. Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt*. Recuperado el 10 de enero de 2019. <https://www.nap.edu/download/14367>

[27] ASTM D1559 (2004) American Society for Testing and Materials. *Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus*

[28] MMP-4-05-005/02. (2002). Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos. Recuperado el 15 de enero de 2019. <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-05-005-02.pdf>

[29] Bejarano. J. & Salgado M. (2018). Tesis: *Análisis de las características físicas de un cemento asfáltico CA 60-70 modificado con policloruro de vinilo (PVC) pulverizado*. Recuperado el 10 de enero de 2019. <https://repositorio.unibague.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12313/738/1/Trabajo%20de%20grado.%20pdf>

[30] Ramos. B. & Muñiz. C. (2013). Monografía: *Propuesta de diseño de mezcla asfáltica en frío de graduación densa como alternativa para el mantenimiento de pavimentos flexibles*. Recuperado el 10 de enero de 2019. <http://repositorio.uca.edu.ni/518/1/UCANI3500.PDF>



- [31] Mercado R. Fuentes. P. (2016). Asphalt emulsions formulation: State-of-the-art and dependency of formulation on emulsions properties. Elsevier Ltd. Recuperado el 06 de marzo de 2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816310674>
- [32] Gierhar. D. Johnson. D. (2018) NCHRP Synthesis 516. Tack Coat Specifications, Materials, and Construction Practices. The National Academies of Sciences Engineering Medicine. Recuperado el 06 de junio de 2020. <https://www.nap.edu/download/25122>
- [33] N-CSV-CAR-3-02-001/10 (2010). Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Conservación. Renivelaciones Locales en Pavimentos Asfálticos. Recuperado el 15 de enero de 2019. <https://normas.imt.mx/normativa/N-CSV-CAR-3-02-001-10.pdf>
- [34] N-CSV-CAR-2-02-003/16 (2016) Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Conservación. Bacheo Superficial Aislado. Recuperado el 15 de enero de 2019. <https://normas.imt.mx/normativa/N-CSV-CAR-2-02-003-16.pdf>
- [35] N-CMT-4-05-003/16 (2016). Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Calidad de la mezcla asfáltica para carreteras. Recuperado el 15 de enero de 2019. <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-003-16.pdf>
- [36] Delgado. H. Garnica P. Villatoro. G. Rodríguez. B. (2006). Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Publicación técnica No. 299. Recuperado el 05 de mayo de 2020 <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt299.pdf>
- [37] Moreno. J. (2005) Tesina: *Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas*. Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado el 10 de agosto de 2018. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3252>
- [38] ASTM D6931 (2017) American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures*



[39] Dupont (2015). DuPont™ Elvaloy® 4170. Elvaloy® RET resins Product Data Sheet. Recuperado el 16 de marzo de 2019. <http://www.cheminno.co.th/wp-content/uploads/2018/file/Dupont/ELVALOY//TDS-Elvaloy-4170.pdf>

[39] ASTM C131 American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*

[40] ASTM C88 American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*

[41] AASHTO T11 American Association of State Highway and Transportation Officials. *Standard Method of Test for Materials Finer Than 75-micro m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*

[42] ASTM D1188 American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples*

[43] ASTM D2726 American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*

[43] ASTM C127 American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*

[44] ASTM C131 American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*

[45] MMP-4-04-005/08. (2008). Secretaría de Comunicaciones y Transportes. MMP-4-04-005/08. Recuperado el 15 de enero de 2019. <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-04-005-08.pdf>

[46] ASTM D2419 American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*



[47] AASHTO T104 American Association of State Highway and Transportation Officials. *Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*

[47] AASHTO TP57 American Association of State Highway and Transportation Officials. *Standard Method of Test for The Qualitative Detection of Harmful Clays of the Smectite Group in Aggregates Using Methylene Blue*

[48] ASTM D6926 American Society for Testing and Materials. *Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*

[48] ASTM D6927 American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*

[49] ASTM D2041 American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures*

[50] [45] N-CMT-4-04/03 (2003). Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Recuperado el 15 de enero de 2019. <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-04-03.pdf>

[51] N-CSV-CAR-2-02-004/15 (2015) Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Bacheo Profundo Aislado. Recuperado el 15 de enero de 2019. <https://normas.imt.mx/normativa/N-CSV-CAR-2-02-004-15.pdf>



ANEXO FOTOGRAFICO



AGREGADOS PÉTREOS



Figura 39 Proceso de excavación de material para trituración



Figura 40 Almacén de Material “Banco Taurus”



Figura 42 Proceso de trituración de material



Figura 41 Muestreo de material triturado

CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS



Figura 43 Secado de material pétreo



Figura 44 Proceso de cuarteo del material



Figura 45 Densidad de absorción de agregados



Figura 46 Prueba de Azul de Metileno

CARACTERIZACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFALTICOS



Figura 47 Punto de reblandecimiento



Figura 48 Ensaye de penetración



*Figura 49 Prueba de resiliencia en
asfaltos modificados*



*Figura 50 Ensaye de viscosidad rotacional
(VR)*



Figura 51 Prueba de ductilidad del asfalto.



Figura 52 Ensayo de recuperación elástica por torsión.



Figura 53 Corte para ejecución de ensayo reológico (DSR)



Figura 54 Ensayo reológico del asfalto (DSR)

ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFALTICAS



Figura 55 Separación de los agregados por tamaños para cumplir con granulometría



Figura 56 Vista general de los agregados



Figura 57 Calentamiento de materiales en horno



Figura 58 Mezclado de agregados y cemento asfáltico

ELABORACIÓN Y ENSAYE DE MEZCLAS ASFALTICAS



Figura 59 Proceso de colocación de la mezcla en el compactador giratorio



Figura 60 Proceso de amasado realizado por el compactador giratorio



Figura 61 Probeta terminada en el compactador giratorio



Figura 62 Vista general de probetas elaboradas con compactador giratorio.



Figura 63 Mezcla elaborada para proceso de curado



Figura 64 Determinación de la gravedad teórica máxima (Gmm)



Figura 65 Colocación de probeta en picnómetro para proceso de saturación



Figura 66 Vista general del proceso de saturación.



Figura 67 Proceso de ensaye de tensión indirecta.



Figura 68 Vista general del ensaye de tensión indirecta.



Figura 69 Probetas antes y después del ensaye Cántabro.



Figura 70 Extracción de probetas, finalizado en ensaye Cántabro.



*Figura 71 Probetas antes del ensaye
Cántabro*



*Figura 72 Probetas después del ensaye
Cántabro*



*Figura 73 Probetas con cemento asfáltico
AC-20*



*Figura 74 Probetas con cemento asfáltico
modificado "ELVALOY"*