

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y VOLUMÉTRICO DURANTE LA
COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO
MARSHALL**

POR:

ING. ELOY BARRERA ROSAS

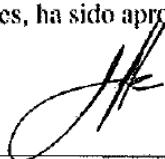
**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA EN VÍAS TERRESTRES**

CHIHUAHUA, CHIH.

DICIEMBRE DE 2020



Comportamiento mecánico y volumétrico durante la compactación de las mezclas asfálticas diseñadas mediante el método Marshall. Tesis presentada por Ing. Eloy Barrera Rosas como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Vías Terrestres, ha sido aprobada y aceptada 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



M.I. José Antonio Portillo Ocegüera
Director de Tesis

26 de Noviembre de 2020

Fecha

Comité:

M.I. José Antonio Portillo Ocegüera
Dra. Daphne Espejel García.
Dr. Alejandro Villalobos Aragón.
Dr. Antonio Campa Rodríguez.

● Derechos Reservados

Eloy Barrera Rosas
Azucena No. 43
Col. Huisquilco
Zapotlanejo, Jal
Noviembre 2020.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

19 de noviembre de 2020

Ing. Eloy Barrera Rosas
Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestría en Vías Terrestres, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director. **M. I. José Antonio Portillo Ocegüera** para que lo desarrolle como tesis con el título **"COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y VOLUMÉTRICO DURANTE LA COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL."**

ÍNDICE

Tabla de contenido

Dedicatoria

Agradecimientos

Capítulo 1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

1.2 Justificación

1.3 Alcances y objetivos

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Pavimentos

2.2 Mezclas asfálticas

Capítulo 3. Metodología

3.1. Descripción del procedimiento

3.2 Marco normativo.

3.3 Consideraciones generales

3.4 Muestreo de materiales pétreos y asfálticos.

3.5 Selección y muestreo de material asfáltico.

3.6 Caracterización de los materiales pétreos y productos asfálticos.

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 4. Discusión de resultados

- 4.1. Peso volumétrico.
- 4.2. Estabilidad
- 4.3. Flujo
- 4.4. Vacíos en la mezcla asfáltica
- 4.5. Vacíos ocupados por el asfalto (VFA)
- 4.6. Vacíos de agregado mineral (V.A.M)

Referencias bibliográficas

Glosario

Curriculum vitae

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

ATENTAMENTE

"Naturam subleclt allis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACION
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx

DEDICATORIA

A todas las personas que con su trabajo, esfuerzo y dedicación hacen posible que las vías de comunicación sean cada vez más cómodas, confortables y seguras.

AGRADECIMIENTOS

A jehová por permitirme el regalo de la vida y acercarme a él

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Planteamiento del Problema	10
1.2 Justificación	11
1.3 Alcances y Objetivos	12
1.3.1 Alcances.....	12
1.3.2 Objetivo General.....	12
1.3.3 Objetivos Particulares.....	12
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Pavimentos	14
2.1.1 Definición y función de los pavimentos	14
2.1.2 Principales características funcionales de los pavimentos.....	14
2.1.3 Clasificación de los pavimentos	15
2.2 Mezclas asfálticas	17
2.2.1 Asfalto.....	17
2.2.1 Definición de Mezclas Asfálticas	18
2.2.3 Clasificación de las Mezclas Asfálticas.....	19
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	21
3.1. Descripción del Procedimiento.....	21
3.2 Marco Normativo.....	21
3.3 Consideraciones Generales.....	22
3.4 Muestreo de materiales pétreos y asfálticos.	22
3.5 Selección y muestreo de material asfáltico.....	22
3.6 Caracterización de los materiales pétreos y productos asfálticos.	23
CAPÍTULO IV. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	43
4.1. Peso Volumétrico.....	56
4.2. Estabilidad	58
4.3. Flujo	60
4.4. Vacíos en la mezcla asfáltica	62
4.5. Vacíos ocupados por el asfalto (VFA).....	65
4.6. Vacíos de agregado mineral (V.A.M).....	67
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
GLOSARIO	73
CURRICULUM VITAE.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los materiales asfálticos (SCT, 2016).	17
Tabla 2. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL). (SCT, 2008a).	24
Tabla 3. Diseño de proporcionamiento de materiales pétreos para la mezcla número 1.	26
Tabla 4. Diseño de proporcionamiento de materiales pétreos para la mezcla número 2.	28
Tabla 5. Características de los materiales pétreos	30
Tabla 6. Resultados obtenidos a partir de la aplicación de la prueba de densidad relativa	30
Tabla 7. Resultados de la prueba de desgaste Los Ángeles	31
Tabla 8. Resultados de la prueba de partículas alargadas y lajeadas	31
Tabla 9. Resultados de la prueba equivalente de arena	31
Tabla 10. Requisitos de calidad y VAM para mezclas asfálticas de granulometría densa (SCT, 2008d).	34
Tabla 11. Áreas superficiales de partículas para diferentes fracciones del material pétreo.	35
Tabla 12. Índices asfálticos para diversos tipos pétreo.	35
Tabla 13. Determinación del contenido mínimo de aproximado de asfalto para una mezcla asfáltica	36
Tabla 14. Comportamiento mecánico y volumétrico durante la compactación de las mezclas asfálticas mediante el método Marshall.	39
Tabla 15. Análisis de los doce especímenes muestreados	41
Tabla 16. Resultados de los especímenes analizados para 45 y 75 golpes	44
Tabla 17. Resultados de los especímenes analizados para 60 y 90 golpes	45
Tabla 18. Resultados de los especímenes analizados para 105 y 45 golpes	46
Tabla 19. Resultados de los especímenes analizados para 60, 75 y 90 golpes	47
Tabla 20. Resultados de los especímenes analizados para 105, 45 y 60 golpes	48
Tabla 21. Resultados de los especímenes analizados para 75, 90 y 105 golpes	49
Tabla 22. Resultados de los especímenes analizados para 45, 60 y 75 golpes	50
Tabla 23. Resultados de los especímenes analizados para 90 y 105 golpes	51
Tabla 24. Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall	68

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Gráfica de composición granulométrica para arena material A.	24
Gráfica 2. Gráfica de composición granulométrica para grava material B.	25
Gráfica 3. Gráfica de composición granulométrica para la mezcla número 1.....	27
Gráfica 4. Gráfica de composición granulométrica para la mezcla número 2.....	28
Gráfica 5. Carta de viscosidad del material asfáltico	33
Gráfica 6. Variaciones de las características de la mezcla asfáltica	40
Gráfica 7. Análisis de variaciones de temperatura para los especímenes analizados.....	53
Gráfica 8. Análisis de variaciones de número de golpes para los especímenes analizados	55
Gráfica 9. Comportamiento del peso volumétrico.....	57
Gráfica 10. Tendencia respecto a la temperatura de compactación.....	58
Gráfica 11. Estabilidad contra líneas de tendencia para el número de golpes.....	59
Gráfica 12. Estabilidad contra líneas de tendencia de temperatura de compactación	60
Gráfica 13. Comportamiento del flujo contra las líneas de tendencia de número de golpes.....	61
Gráfica 14. Comportamiento del flujo contra las líneas de tendencia de temperatura de compactación ..	62
Gráfica 15. Comportamiento de VMC contra las líneas de tendencia de número de golpes	63
Gráfica 16. Comportamiento del VMC contra las líneas de tendencia de temperatura de compactación ..	64
Gráfica 17. Comportamiento del VFA contra las líneas de tendencia de número de golpes	66
Gráfica 18. Comportamiento de VFA contra las líneas de tendencia de temperatura de compactación ...	67
Gráfica 19. Comportamiento de VAM contra las líneas de tendencia de número de golpes	68
Gráfica 20. Comportamiento de VAM contra las líneas de tendencia de temperatura de compactación ..	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Transmisión de cargas en pavimento flexible. (Becker, 2012).....	15
Figura 2. Transmisión de cargas en pavimento rígido. (Becker, 2012).....	16
Figura 3. Estructuración común de los pavimentos. (SCT, 2013).....	17
Figura 4. Procedimiento de muestreo en el banco “Tonalá” propiedad de la empresa Grupo García Ascencio. (Elaboración propia, 2019)	22
Figura 5. Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos Grado PG. (SCT, 2008b)	23
Figura 6. Separación de tamaños de la grava	29
Figura 7. Separación de tamaños de la arena.....	29
Figura 8. Características de calidad de la mezcla asfáltica.....	32
Figura 9. Elaboración de mezcla asfáltica con un contenido de asfalto del 4.3% respecto al agregado ...	36
Figura 10. Elaboración de mezcla asfáltica con un contenido de asfalto del 5.8% respecto al agregado ..	37
Figura 11. Determinación de pesos volumétricos de los especímenes Marshall.....	37
Figura 12. Ensayo para determinar la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica.....	38
Figura 13. Elaboración de los especímenes	42

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

Durante la compactación de carpetas asfálticas en campo es posible observar que tanto la temperatura como la energía de compactación aplicada dependerán de algunos factores como lo son: el equipo de compactación con el que se cuente y el espesor de la capa por compactar. La mayoría de los equipos que se utilizan para desarrollar el trabajo de compactado lo hacen mediante la aplicación de una carga que genera un efecto de acomodo y amasado sobre la mezcla. Estos equipos cuentan con una gran diversidad respecto a sus dimensiones y pesos, lo que imposibilita determinar la energía de compactación que aplicarán en cada pasada sobre la mezcla asfáltica.

Cuando el método Marshall es realizado en laboratorio el proceso de compactación es por medio de impactos, utilizando un pisón de compactación con una pesa deslizante y estableciendo 50 o 75 golpes (SCT, 2008), dependiendo de las especificaciones de proyecto para el tipo de tránsito considerado.

Es importante considerar que la temperatura de compactación se encuentra en función de la curva Viscosidad-Temperatura del cemento asfáltico utilizado, así como la energía de compactación depende directamente del número de ejes equivalentes de diseño (ΣL). Estos parámetros permanecen con valores fijos durante la elaboración de especímenes por el método Marshall. No obstante, al momento de realizar el procedimiento en campo existen ocasiones en que los rangos de temperatura al inicio y durante el proceso de compactación pueden ser distintos a los indicados en esta curva.

Reproducir en campo el procedimiento de compactación empleado en el método Marshall no es posible (Hislop, 2000) (Garnica, Delgado & Sandoval, 2005), (Lay, 2009), (Leandro, Vasconcelos, & Bariani, 2017), (Tapkin, 2013), debido a las diferencias planteadas en los párrafos anteriores.

Es debido a estas diferencias y considerando que los rangos de temperatura pueden llegar a ser distintos a los indicados en la curva Viscosidad-Temperatura durante el proceso de compactación, se vuelve importante evaluar el comportamiento mecánico y volumétrico de las mezclas asfálticas compactadas en ciertos rangos de temperatura y energía de compactación.

De esta manera, se observa factible realizar las variaciones a estos parámetros para establecer rangos en los cuales se obtengan valores satisfactorios, lo que produce una alternativa óptima en el proceso de compactación fuera de laboratorio, correlacionando el trabajo dentro de este, susceptible a reproducirse en campo.

1.2 Justificación

El método Marshall de diseño de mezclas asfálticas en caliente (ASTM, 1989) permite determinar el contenido de cemento asfáltico óptimo que se deberá de adicionar a una determinada cantidad de agregados pétreos para obtener una mezcla asfáltica; la cual deberá de cumplir con ciertas características para su aceptación (densidad, vacíos, flujo y estabilidad). En este método, la energía de compactación aplicada es por medio de números de golpes. Los cuales pueden ser de 50 o 75 golpes por cara, dependiendo del número de ejes equivalentes ΣL de diseño del pavimento (SCT, 2008).

Para la obtención de las características como Peso Volumétrico Compacto, vacíos, estabilidad y flujo, los especímenes Marshall se elaboran dentro de un reducido rango de temperatura (temperatura de compactación) obtenidos en la carta de viscosidad de cemento asfáltico empleado y una energía de compactación fija (no. de golpes). Las variaciones en los resultados de las características están en función del contenido de asfalto incorporado. Dado que el método Marshall considera como única variable independiente el contenido de asfalto incorporado a la mezcla de agregados pétreos, el cual incide en el comportamiento de las características de la mezcla asfáltica, se considera apropiado registrar y evaluar la evolución de las características de una mezcla asfáltica con un contenido de asfalto óptimo fijo. Lo anterior en función de la variación tanto de la temperatura como de la energía de compactación aplicada durante su compactación. Esto permitirá conocer los rangos de temperatura y de compactación aplicada dentro de los cuales se obtengan valores satisfactorios.

Existen diversos factores que inciden durante el proceso de compactación de una mezcla asfáltica (Zárate, 2007), como son entre otros: las condiciones climáticas, la mezcla asfáltica, los equipos de tendido y compactado, el espesor de la capa y las temperaturas de tendido e inicio de compactación.

Considerando particularmente los equipos de compactación, el espesor de la capa y la temperatura de inicio de la compactación es común observar en campo que, para una mezcla asfáltica y espesor determinado, un equipo de compactación más pesado iniciará la compactación a una temperatura menor que si se iniciara con un equipo de menor peso; y a su vez un equipo de menor peso tendría que realizar más pasadas que uno de mayor peso. He aquí la importancia de conocer el comportamiento de las características de una mezcla asfáltica en función de la energía y temperatura de compactación lo cual será fundamental para determinar el número de pasadas de un equipo de compactación seleccionado.

1.3 Alcances y Objetivos

1.3.1 Alcances

Como parte de los alcances de este trabajo se tiene desarrollar una adecuación a los rangos de temperatura y energía de compactación establecidos para llevar a cabo el método Marshall, evaluando las propiedades mecánicas y volumétricas de especímenes diseñados con una mezcla asfáltica previamente diseñada iniciando con una energía de compactación de 40 golpes con incrementos de 15 hasta llegar a los 105 golpes y, respecto a temperatura, se iniciaría a partir de 90°C con incrementos de 15°C culminando en 150°C.

1.3.2 Objetivo General

Conocer el comportamiento mecánico y volumétrico durante la compactación de especímenes de mezcla asfáltica en caliente diseñados por el método Marshall, estableciendo rangos óptimos de energía de compactación y temperatura que permitan eficientizar las compactaciones en campo, garantizando el buen comportamiento de la mezcla asfáltica respetando las normas de calidad vigentes.

1.3.3 Objetivos Particulares

- a) Evaluar y registrar las variaciones que presenta una mezcla diseñada por el método Marshall cuando se analizan diferentes rangos de energía de compactación y temperatura a los establecidos para la realización del método.
- b) Establecer las bases para establecer una correlación entre los rangos evaluados y las compactaciones realizadas en campo.

- c) Comparar los resultados de densidad, porcentaje de vacíos, porcentaje de vacíos del agregado mineral (V.A.M.), porcentaje de vacíos llenados por asfalto (V.A.F.), estabilidad y flujo con los límites establecidos por las normas de calidad vigentes para el método Marshall.
- d) Encontrar la combinación óptima entre energía de compactación y temperatura que permita obtener valores satisfactorios al diseñar una mezcla asfáltica por el método Marshall.
- e) Garantizar el buen comportamiento de la mezcla asfáltica diseñada.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Pavimentos

2.1.1 Definición y función de los pavimentos

Pavimento del latín *pavimentum*, que se define como superficie artificial. Estructura de una vía de comunicación terrestre, formada por una o más capas de materiales naturales o elaborados, colocados sobre el terreno acondicionado, que tiene como función el permitir el tránsito de vehículos (Olivera, 2011). Los pavimentos tienen como funciones principales (Crespo, 2012):

- Generar una estructura estable, resistente a los diversos factores climatológicos.
- Hacer posible el tránsito de vehículos con la mayor seguridad, comodidad y eficiencia, en el periodo de tiempo llamado periodo de diseño o ciclo de vida.
- Resistir las cargas del tránsito previsto, distribuyendo las presiones ejercidas por las cargas de forma gradual hasta el terreno de desplante. (Villeda)

2.1.2 Principales características funcionales de los pavimentos

Los pavimentos tienen que cumplir con las siguientes características esenciales para poder llevar a cabo correctamente con sus funciones, principalmente en la capa superficial (Crespo, 2012):

- Textura de rodaje adecuada, con los materiales adecuados de calidad, se considera la disminución del desplazamiento o derrapamiento de los vehículos que circulan. Esto proporcionará seguridad al usuario.
- Regularidad en la superficie de rodamiento, influyendo en la comodidad de transición generando un nivel de servicio alto.
- El adecuado sistema de drenaje, evitar el acumulamiento de cuerpos de agua en la superficie, mediante capas permeables y/o pendientes adecuadas.
- Propiedades de reflexión luminosa, que son importantes para la conducción diurna y nocturna.

2.1.3 Clasificación de los pavimentos

Los pavimentos se clasifican en tres grandes grupos (Zárate, 2007): pavimentos flexibles, pavimentos rígidos y pavimentos compuestos.

a) Pavimentos Flexibles: Los pavimentos flexibles son aquellos en los que la última capa estructural está constituida por una mezcla asfáltica (carpeta) en frío o en caliente (Zárate, 2007). Presentan un comportamiento flexible; es decir que, en condiciones normales, en presencia de una carga presenta una deformación y al retirarse dicha carga se recuperan. Estructuralmente absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los verticales. Generalmente son utilizadas mezclas asfálticas para su construcción, por lo cual son llamados también pavimentos asfálticos. En la figura 1 se puede observar el comportamiento que tienen los pavimentos flexibles. (Villeda)

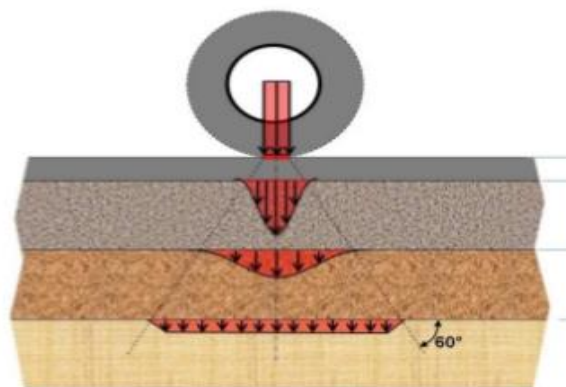


Figura 1. Transmisión de cargas en pavimento flexible (Becker, 2012).

Los pavimentos flexibles se caracterizan por una capa estructural de concreto asfáltico. Para lograr que este satisfaga los requerimientos de dureza-flexibilidad es necesario un diseño que establezca la dosificación óptima de materiales pétreos y de cemento asfáltico (SCT, , 2004). En México, los métodos de mayor difusión son los siguientes:

- Determinación de la proporción óptima aproximada de material asfáltico por el procedimiento de absorción de queroseno.
- Determinación de la proporción óptima de asfalto mediante las pruebas de compresión axial y diametral.

- Método de extrusión para mezclas con cemento asfáltico, mediante la utilización del equipo Hubbard Field.
- Método Marshall para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.
- Método Hveem para la revisión y proyecto de mezclas asfálticas.
- Método de abrasión en húmedo para morteros asfálticos.

Para el caso de este trabajo de investigación se tomó el método Marshall para diseño de mezclas asfálticas en caliente mediante el cual se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico requerido para una mezcla de materiales pétreos de T.M.A. de ½”.

b) Pavimentos rígidos: Los pavimentos rígidos son aquellos que cuya capa superior de tipo estructural está constituida por una losa de concreto hidráulico simple o reforzado; disminuyendo la transmisión de esfuerzos verticales hacia las capas inferiores, su comportamiento estructural no ofrece deformaciones (Bonilla V. *et al* 2007). En la figura 2 se puede observar el comportamiento de una carpeta de pavimento rígido.

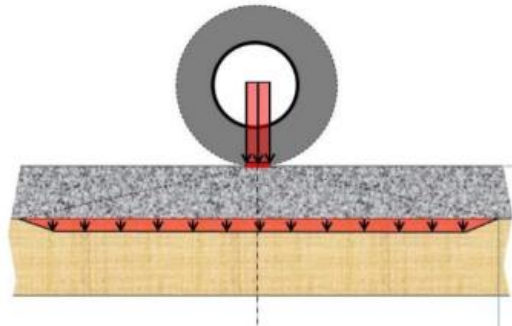


Figura 2. Transmisión de cargas en pavimento rígido (Becker, 2012).

c) Pavimentos compuestos: Aquellos pavimentos que están formados por una capa de mezcla asfáltica y por una de concreto hidráulico (Zárate, 2007). El uso del concreto hidráulico como capa inferior brinda una base fuerte, mientras que la mezcla asfáltica en la parte superior provee una superficie de rodadura. En la Figura 3 se expresa esquemáticamente la estructura típica de los pavimentos.

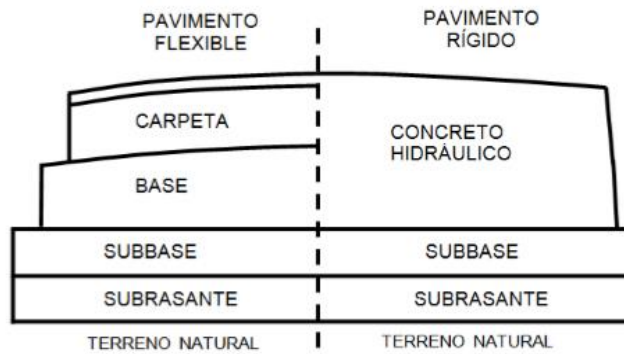


Figura 3. Estructuración común de los pavimentos (SCT, Catálogo de secciones estructurales de pavimento para las carreteras de la República Mexicana, 2013).

2.2 Mezclas asfálticas

2.2.1 Asfalto

La palabra asfalto proviene de los antiguos griegos, de la palabra *asphaltos*, que significa “seguro” (Tinoco & Alarcón, 2011). En la actualidad, el asfalto se obtiene como un subproducto del petróleo. Su mayor protagonismo reside en la utilización que ha tenido para la construcción de carreteras en todo el mundo. La capacidad que tiene el asfalto para permitir la cohesión entre los agregados permite que sea empleado para la elaboración de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones, uniendo los materiales pétreos utilizados o ligando diferentes capas del pavimento, siendo útil también para la estabilización de bases o subbases. Primordialmente los materiales asfálticos se han clasificado en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, todo dependiendo de la vía a la que será aplicado. En la Tabla 1 se puede observar dicha clasificación. (Porfirio, 2012)

Tabla 1. Clasificación de los materiales asfálticos según su uso.

Material asfáltico	Vehículo para su aplicación	Usos más comunes
Cemento asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados.
Emulsión asfáltica	Agua	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones.
Asfalto rebajado	Solventes	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas y para la impregnación de subbases y bases hidráulicas.

Tabla 1. Clasificación de los materiales asfálticos (SCT, 2008).

Un pavimento asfáltico presenta propiedades ideales para la construcción de vías, cumpliendo las siguientes funciones (Olivera, 2011):

- a) Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo resistente a la precipitación.
- b) Proporciona una gran unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos.

2.2.1 Definición de Mezclas Asfálticas

Se entiende como cualquier combinación de agregados minerales como un ligante asfáltico (SCT, 2008). Las proporciones de dichos agregados determinan las propiedades físicas y funcionales de las mezclas. La modificación de ligantes se ha generalizado para carreteras, buscando la optimización de la mecánica y durabilidad de la mezcla.

Las mezclas asfálticas empleadas como una capa de rodadura o de estructura del pavimento es la que debe proporcionar una superficie de rodadura segura, confortable y estética. Como todas las exigencias deseables para una superficie de rodadura no pueden optimizarse simultáneamente hay que equilibrar las propiedades contrapuestas para llegar a las soluciones más satisfactorias. Las mezclas asfálticas tienen algunas propiedades que contribuyen a la buena calidad del pavimento las principales propiedades son: la estabilidad, la durabilidad y la impermeabilidad (Rodríguez., 2001).

a) Estabilidad: La estabilidad de una mezcla es la capacidad de resistir desplazamiento y/o deformación al ser sometidas a las cargas de tránsito o controlada en laboratorio (Garnica, Flores, López, & Delgado, 2005). Se debe tomar en cuenta que los pavimentos asfálticos son del tipo flexibles y por lo tanto la estabilidad debe de ser lo mayor posible sin llegar a ser tan elevada; que presente un comportamiento rígido; lo cual provocaría una baja durabilidad.

La estabilidad de una mezcla asfáltica depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de los agregados se relaciona con la forma, tamaño y textura superficial. Mientras que la cohesión resulta como consecuencia de la capacidad ligante del asfalto; requiriéndose en algunos casos la adición de aditivos para mejorar la capacidad ligante (Bach, 2019).

b) Durabilidad: La durabilidad de una capa de mezcla asfáltica se define como la capacidad para resistir efectos provocados por el clima, el tránsito o la combinación de ambos, como son: la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización

y oxidación), y la separación de las películas asfalto (Rolando, 2002). La durabilidad de una mezcla asfáltica se puede garantizar cuidando tres aspectos importantes. Adicionando la mayor cantidad de asfalto posible, usando una graduación densa de agregados resistente a la separación y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad. Al adicionar mayor cantidad de asfalto; se debe prestar atención en la cantidad de vacíos para que no se alcancen valores menores a los mínimos requeridos (Asphalt Institute, 2001).

c) Impermeabilidad: La impermeabilidad de una capa de mezcla asfáltica se define como la resistencia al paso del aire y agua a su interior, o a través de él (Garnica et al., 2005). Esta característica esta intrínsecamente relacionada con la cantidad de vacíos; sin embargo, es de mayor importancia la naturaleza de los vacíos que la cantidad misma de estos; ya que la impermeabilidad está determinada por el tamaño de los vacíos sin importar si están o no conectados entre y por el acceso a la superficie del pavimento.

2.2.3 Clasificación de las Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas se logran clasificar según su procedimiento de mezclado dividiéndolas en los grupos enlistados a continuación. El ámbito en el que se desarrolla este trabajo se encuentra en el grupo de mezclas asfálticas en caliente.

1. Mezclas Asfálticas en Caliente: Este tipo de mezcla es elaborada en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, son realizadas en una planta mezcladora móvil o estacionaria, provista del equipo necesario para lograr el calentamiento adecuado de los componentes de la mezcla (SCT, 2002). Las mezclas asfálticas en caliente se clasifican a su vez en:

a. Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa: Es un mezcla uniforme y homogénea elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con un tamaño nominal que satisfaga los parámetros de calidad establecidos en la norma N-CMT-4-05-003/02. Su utilización es en la construcción de nuevas carpetas asfálticas de pavimentos en los que se necesita una alta resistencia estructural, o en renivelaciones y refuerzos de pavimentos ya existentes (SCT, 2008).

b. Mezclas Asfálticas de Granulometría abierta: Es una mezcla en caliente, uniforme, homogénea con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, dichas mezclas son usadas como capas de rodadura, no

cuentan con una función estructural y su finalidad principal es satisfacer los requerimientos de calidad de rodamiento del tránsito (SCT, 2008).

2. Mezclas Asfálticas en Frío: Mezclas elaboradas en frío, se crean en una planta mezcladora, utilizando emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados y materiales pétreos. Este tipo de mezclas se dividen en los siguientes grupos

a. Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa: Es la mezcla uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica y materiales pétreos, con un tamaño nominal que satisfaga los requisitos establecidos de la Norma N-CMT-4-05-003/08. Su función es en casos en que la intensidad del tránsito no requiera una alta resistencia estructural, como en la construcción de pavimentos nuevos, en carpetas para el refuerzo de pavimentos ya existentes, así como también para la reparación de baches.

b. Mortero Asfáltico: Mezcla uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica, agua y arena con un tamaño máximo de 2.36 milímetros, establecido en la Norma N-CMT-4-04. Normalmente se coloca sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, como una capa de rodadura. (SCT, 2002)

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. Descripción del Procedimiento

La investigación se desarrolló conforme a los puntos siguientes:

- a. Marco normativo y consideraciones generales.
- b. Selección y muestreo de los materiales pétreos y asfálticos.
- c. Determinación de las características de los materiales y verificación del cumplimiento conforme lo dictado en las Normas N-CMT-4-04/08 (SCT, 2002); Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, N-CMT-4-05-004/08 (SCT, 2008b); Calidad de Materiales Asfálticos Grado PG.
- d. Establecimiento de las características de la mezcla asfáltica.
- e. Determinación del Contenido de Cemento Asfáltico mediante el Método Marshall.
- f. Implementación de las variantes de temperatura y Número de golpes para la elaboración de los especímenes Marshall.
- g. Ensaye de los especímenes Marshall y determinación de las características de las mezclas.
- h. Presentación de resultados.
- i. Discusión de los resultados.
- j. Conclusión y Recomendaciones.

3.2 Marco Normativo.

Para la caracterización de los materiales empleados, los requisitos de sus características y de calidad de los mismos, así como el procedimiento para la determinación del contenido de cemento para una mezcla asfáltica en caliente mediante el método Marshall; fue necesario apegarse a lo descrito en la Normativa para la Infraestructura del Transporte vigente al año 2014. Particularmente a los Libros: CMT. Características de los Materiales; Parte 4. Materiales para Pavimentos; Títulos 04. Materiales Pétreos para mezclas asfálticas, 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas; Capítulos 003. Calidad de mezclas Asfáltica para Carreteras y 004. Calidad de Materiales Asfálticos Grado PG y Libro MMP. Métodos de Muestreos y Pruebas de Materiales; Títulos 04. Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas y 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas.

3.3 Consideraciones Generales

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron materiales de la región de la zona metropolitana de la Cd. de Guadalajara; realizándose las pruebas en una mezcla asfáltica de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL), con tamaño nominal del material pétreo de 12.5 mm (1/2”).

3.4 Muestreo de materiales pétreos y asfálticos.

Los materiales pétreos empleados son de origen basáltico, totalmente triturados; clasificándose como gravas (GP) y arenas totalmente trituradas (SW-SM). Esta grava cuenta con un tamaño nominal de 12.5 mm (1/2”) y la arena con uno de 6.3 mm (1/4”) a finos, ambos del Banco “Tonalá” (figura 4) propiedad de la empresa Grupo García Ascencio.



Figura 4. Procedimiento de muestreo en el banco “Tonalá” propiedad de la empresa Grupo García Ascencio. (Elaboración propia, 2019)

3.5 Selección y muestreo de material asfáltico.

Para la selección del cemento asfáltico se apoyó en las regiones geográficas indicadas en la Norma N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d), en donde se identifica tal como se aprecia en la figura 5, que la zona conurbada de la Cd. de Guadalajara está dentro de la Zona 1; por

lo que se recomienda la utilización de cemento asfáltico PG 64-22, tal y como se muestra en la figura 5.

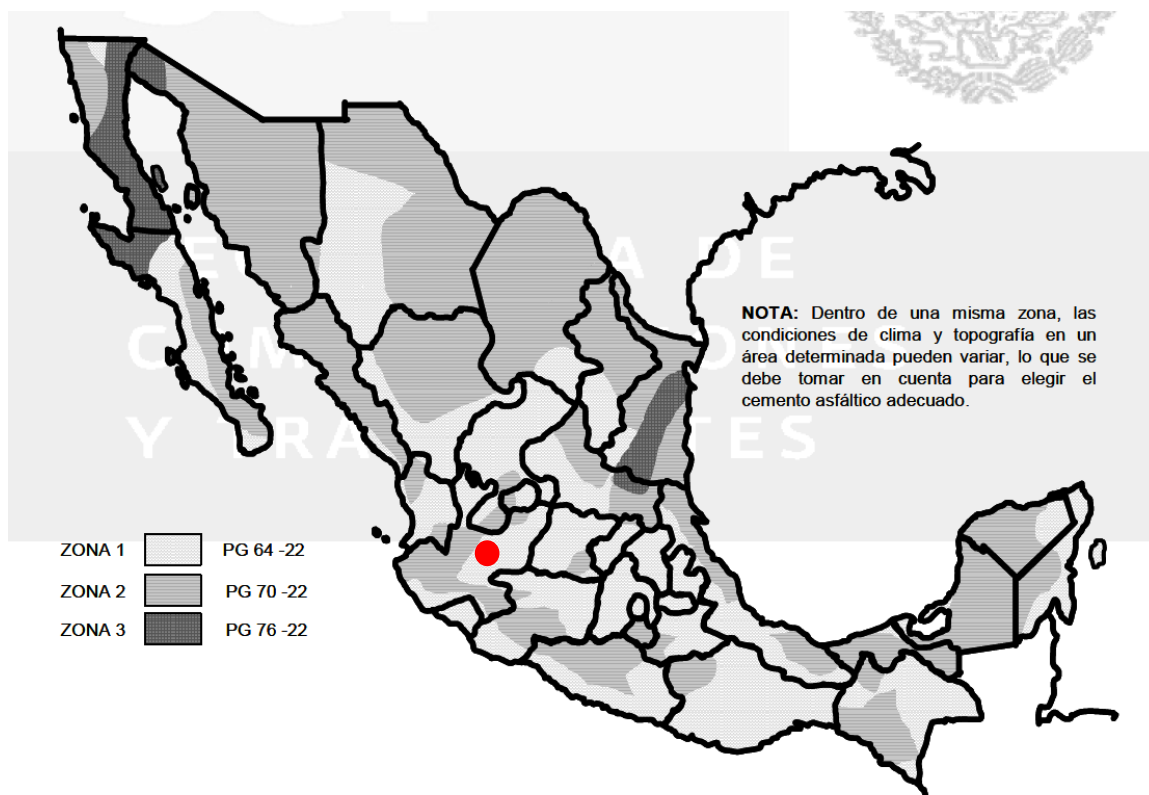


Figura 5. Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos Grado PG. (SCT, 2008b)

Para los fines de esta investigación no se consideraron los ajustes del Grado PG debido a la intensidad del tránsito y la velocidad de operación esperada.

3.6 Caracterización de los materiales pétreos y productos asfálticos.

3.6.1 Caracterización de los materiales pétreos

De acuerdo con la Norma N-CMT-4-04/08 (SCT, 2002); Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas; los materiales pétreos deben de cumplir con los siguientes requisitos:

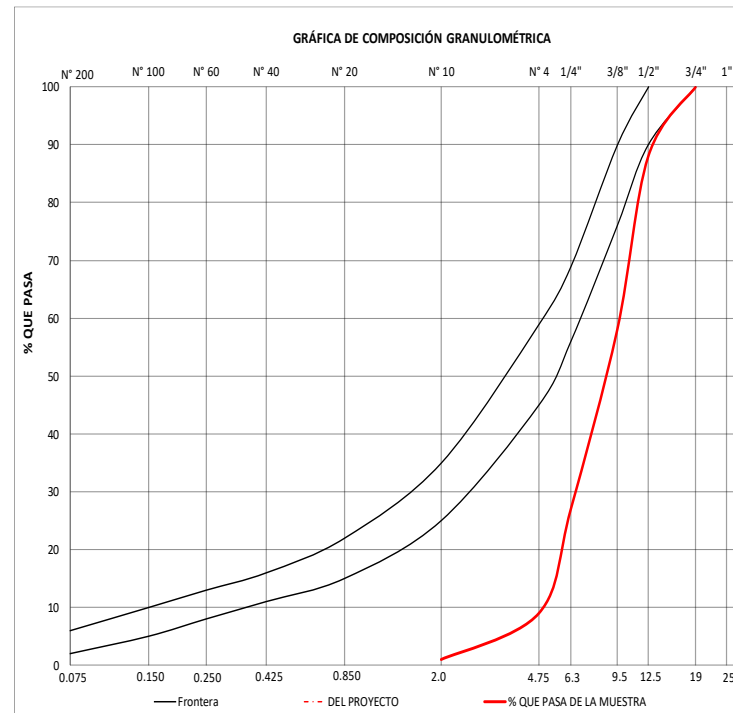
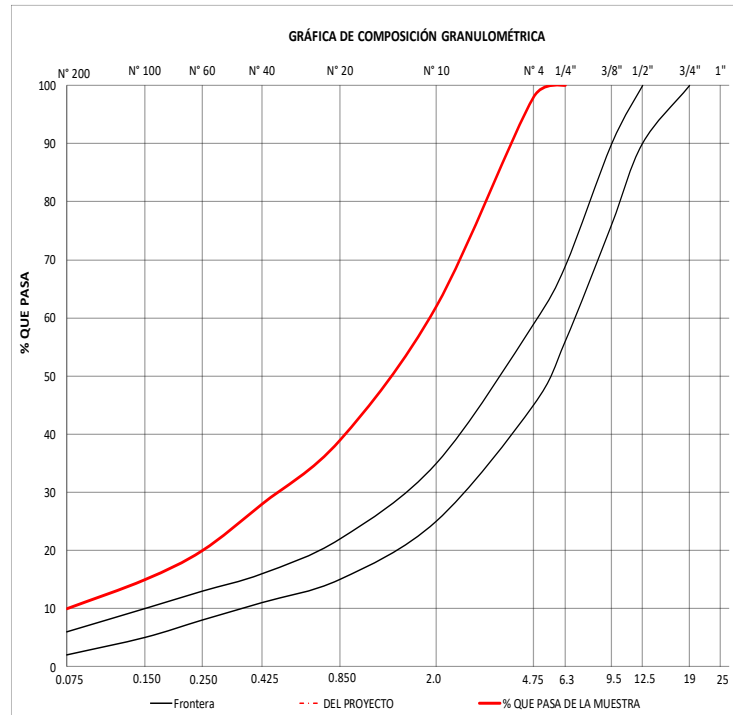
Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL):

Tabla 2. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL). (SCT, 2002)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 ($\frac{3}{8}$)	12,5 ($\frac{1}{2}$)	19 ($\frac{3}{4}$)	25 (1)	37,5 ($1\frac{1}{2}$)
Porcentaje que pasa						
50	2"	---	---	---	---	100
37,5	1½"	---	---	---	100	90 - 100
25	1"	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	¾"	---	100	90 - 100	79 - 90	62 - 79
12,5	½"	100	90 - 100	72 - 90	58 - 71	46 - 60
9,5	⅜"	90 - 100	76 - 90	60 - 76	47 - 60	39 - 50
6,3	¼"	70 - 81	56 - 69	44 - 57	36 - 46	30 - 39
4,75	Nº4	56 - 69	45 - 59	37 - 48	30 - 39	25 - 34
2	Nº10	28 - 42	25 - 35	20 - 29	17 - 24	13 - 21
0,85	Nº20	18 - 27	15 - 22	12 - 19	9 - 16	6 - 13
0,425	Nº40	13 - 20	11 - 16	8 - 14	5 - 11	3 - 9
0,25	Nº60	10 - 15	8 - 13	6 - 11	4 - 9	2 - 7
0,15	Nº100	6 - 12	5 - 10	4 - 8	2 - 7	1 - 5
0,075	Nº200	2 - 7	2 - 6	2 - 5	1 - 4	0 - 3

La columna resaltada en color verde de la tabla 2, corresponde a la granulometría de los pétreos de tamaño nominal de 12.5 mm (1/2").

Se determinó la composición por tamaños (granulometría) de ambos agregados pétreos (arena y la grava) basándose en la Norma M-MMP-4-04-002/02 (SCT, 2002a). Y con estos resultados se calculó el proporcionamiento de la mezcla de dichos materiales para lograr que su curva granulométrica se situara dentro de la zona granulométrica designada para un tamaño nominal de 12.5 mm (1/2").



Gráfica 2. Gráfica de composición granulométrica para grava material B. (Elaboración propia, 2019)

Para el proporcionamiento, fue necesario apoyarse en el método de ecuaciones lineales; bajo las siguientes consideraciones:

- La primera que la mezcla sería con dos materiales y la segunda, considerando que el 50% de la mezcla de materiales pasa la malla N° 4. De aquí se derivan las siguientes ecuaciones lineales:

1. $X_A + X_B = 1.00$ (que significa que suma de los dos materiales es igual al 100% de la mezcla de pétreos).
2. $0.98X_A + 0.09X_B = 0.50$ (que significa que la suma de los porcentajes que pasa la malla N° 4 de cada material es igual al 50% de la mezcla de pétreos).

En donde:

X_A , X_B , son las porciones de cada material; Arena y Grava respectivamente. Despejando X_A de (1), se obtiene que:

$X_A = 1.00 - X_B$. Sustituyendo en (2), tenemos que:

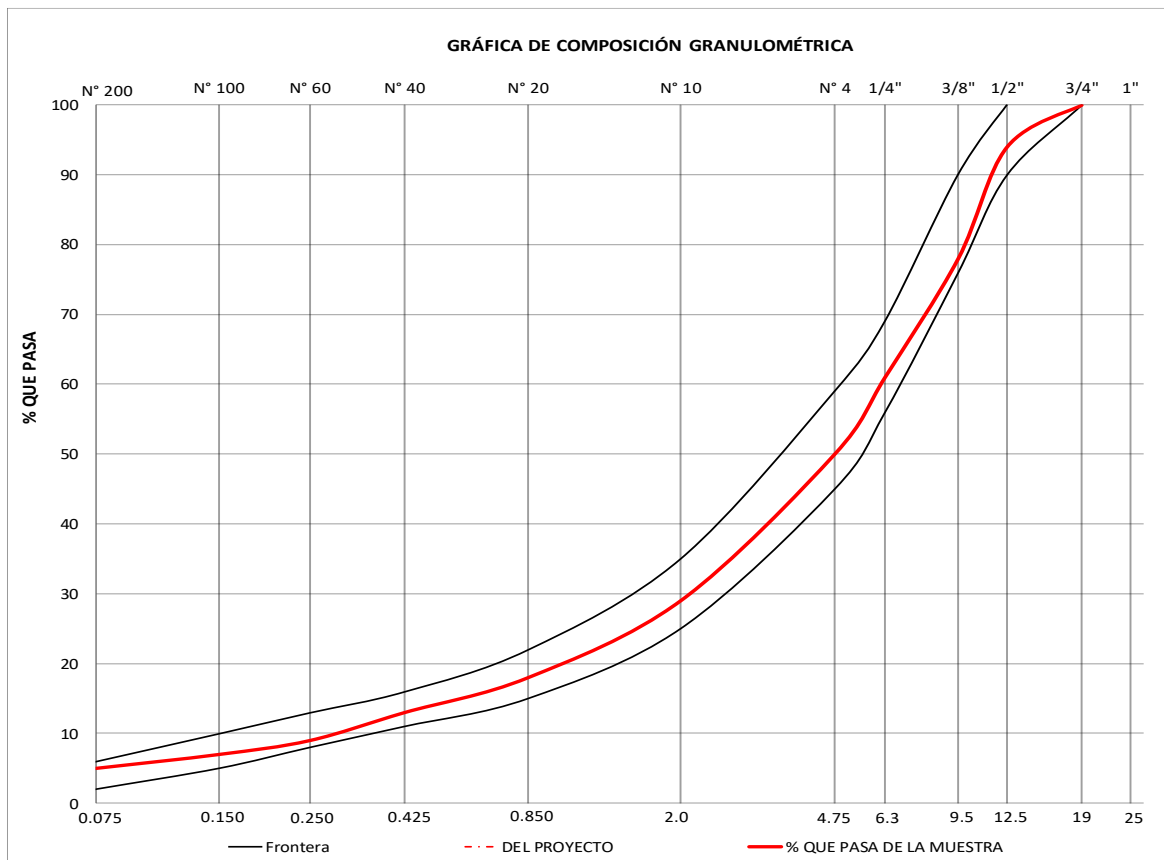
$X_B = 0.54\%$. Por lo tanto, la proporción de Arena es de 46% y 54% de Grava. La composición granulométrica de esta mezcla se muestra en la tabla y gráfica siguiente:

Tabla 3. Diseño de proporcionamiento de materiales pétreos para la mezcla número 1.

DISEÑO DE PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE MATERIALES PÉTREOS

	Descripción	Proporcion propuesta
Material A	Arena de 6.3 mm (1/4") a finos	46.00%
Material B	Grava de 12.5 mm (1/2")	54.00%
Material C		
Total		100.00%

Mallas	% que pasan			% retenidos			proporción			% que pasa
	Material A	Material B	Material C	Material A	Material B	Material C	A	B	C	
							0.46	0.54	0	
37.5	100	100								100
25 1"	100	100		0	0	0	0	0	0	100
19 3/4"	100	100		0	0	0	0	0	0	100
12.5 1/2"	100	88		0	12	0	0	6.48	0	94
9.5 3/8"	100	58		0	30	0	0	16.2	0	78
6.3 1/4"	100	27		0	31	0	0	16.74	0	61
4.75 N° 4	98	9		2	18	0	0.92	9.72	0	50
2 N° 10	62	1		36	8	0	16.56	4.32	0	29
0.85 N° 20	39	0		23	1	0	10.58	0.54	0	18
0.425 N° 40	28	0		11	0	0	5.06	0	0	13
0.25 N° 60	20			8	0	0	3.68	0		9
0.15 N° 100	15			5	0	0	2.3	0		7
0.075 N° 200	10			5	0	0	2.3	0		5
				10	0	0				



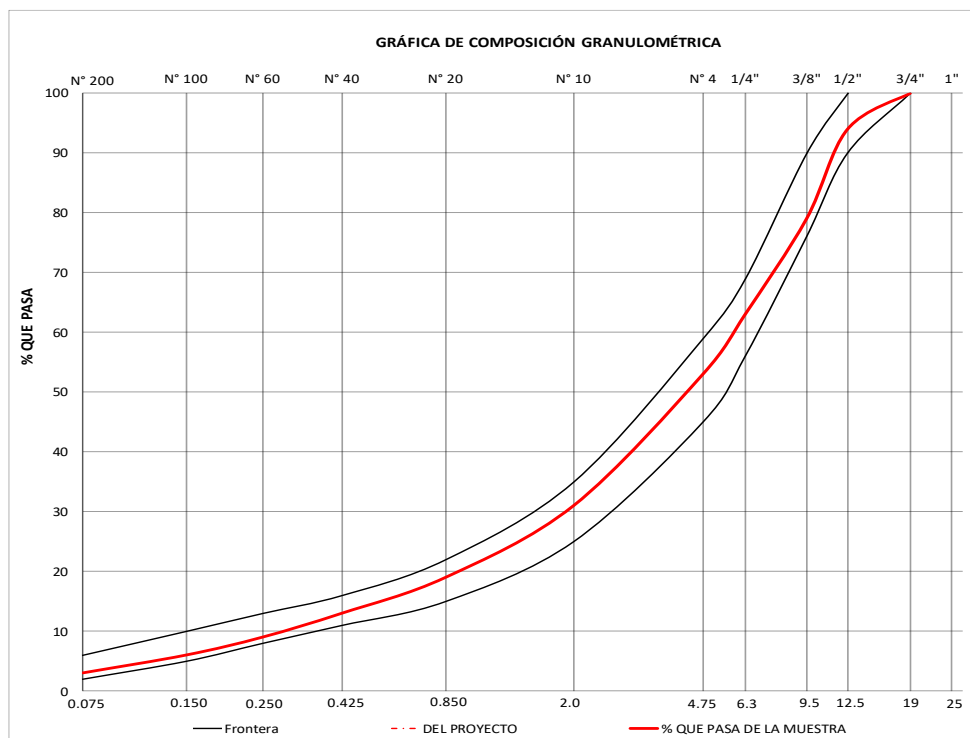
Gráfica 3. Gráfica de composición granulométrica para la mezcla número 1. (Elaboración propia, 2019)

Se observó en la curva granulométrica que el 5% del material pasa la malla No 200; requiriéndose reducir este porcentaje; para tal efecto, se realizó una mezcla con el 50% de cada material donde se produjo lo siguiente:

Tabla 4. Diseño de proporcionamiento de materiales pétreos para la mezcla número 2.

DISEÑO DE PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE MATERIALES PÉTREOS											
Descripción		Proporcion propuesta									
Material A	Arena de 6.3 mm (1/4") a finos	50.00%									
Material B	Grava de 12.5 mm (1/2")	50.00%									
Material C											
Total		100.00%									

Mallas	% que pasan			% retenidos			proporción			Suma	% que pasa de la mezcla
	Material A	Material B	Material C	Material A	Material B	Material C	A	B	C		
37.5	100	100					0.5	0.5	0		100
25 1"	100	100		0	0	0	0	0	0	0	100
19 3/4"	100	100		0	0	0	0	0	0	0	100
12.5 1/2"	100	88		0	12	0	0	6	0	6	94
9.5 3/8"	100	58		0	30	0	0	15	0	15	79
6.3 1/4"	100	27		0	31	0	0	15.5	0	16	63
4.75 N° 4	98	9		2	18	0	1	9	0	10	53
2 N° 10	62	1		36	8	0	18	4	0	22	31
0.85 N° 20	39	0		23	1	0	11.5	0.5	0	12	19
0.425 N° 40	28	0		11	0	0	5.5	0	0	6	13
0.25 N° 60	20			8	0	0	4	0		4	9
0.15 N° 100	15			5	0	0	2.5	0		3	6
0.075 N° 200	10			5	0	0	2.5	0		3	3
				10	0	0					



Gráfica 4. Gráfica de composición granulométrica para la mezcla número 2. (Elaboración propia, 2019)

Se observa que en esta mezcla solo el 3% del material pasa la malla No 200; lo cual permite una reducción del contenido de asfalto óptimo.



Figura 6. Separación de tamaños de la grava



Figura 7. Separación de tamaños de la arena

Además, los materiales pétreos deberán de contar con las siguientes características:

Tabla 5. Características de los materiales pétreos (SCT, 2002)

Características	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de Los Ángeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, %, máximo	25

Densidad relativa de los materiales pétreos

Esta prueba permite determinar la densidad relativa de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas con el fin de conocer la masa de sólidos por unidad de volumen de dichos sólidos sin vacíos en cada una de sus fracciones, ya sea arena con finos o gravas, respecto a la densidad del agua (SCT, 2002b).

Para ambos materiales se realizó la prueba descrita en la Norma M-MMP-4-04-003/02 (SCT, 2002b); la densidad relativa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Obteniéndose los resultados siguientes:

Tabla 6. Resultados obtenidos a partir de la aplicación de la prueba de densidad relativa (SCT, 2002b)

Densidad relativa	Resultado	Característica requerida	Valoración
Material retenido en la malla 3/8" (9.5 mm)	2.68	2.40, mínimo	Cumple
Material de pasa la malla No 4 (4.75 mm)	2.67	2.40, mínimo	Cumple

Desgaste de Los Ángeles

Mediante esta prueba de abrasión, se determina la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empelados en mezclas asfálticas (SCT, 2002c). Se realizó la prueba conforme al procedimiento descrito en la Norma M-MMP-4-04-006/02 (SCT, 2002c). Desgaste mediante la prueba de Los Ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas.

La composición de la muestra resultó del tipo B; utilizándose 2,500 g de material con tamaño entre 3/4" y 1/2" y 2,500 g con tamaño entre 1/2" y 3/8" y 11 esferas para la ejecución del ensaye. El resultado de la prueba fue el siguiente:

Tabla 7. Resultados de la prueba de desgaste Los Ángeles

Desgaste de Los Ángeles	Resultado	Característica requerida¹	Valoración
Composición de la muestra de prueba Tipo B	11.8%	30%, máximo	Cumple

Partículas alargadas y lajeadas

Con esta prueba se determina el contenido de partículas de formas alargadas y lajeadas presente en los materiales pétreos (gravas) empleados en mezclas asfálticas (SCT, 2008c).

La prueba se realizó con el material retenido en la malla No 4 (4.75 mm) de muestras obtenidas de la mezcla de materiales (50% de arena y 50% de grava); conforme al procedimiento indicado en la Norma M-MMP-4-04-005/08 (SCT, 2008c). El resultado de la prueba fue el siguiente:

Tabla 8. Resultados de la prueba de partículas alargadas y lajeadas

Partículas alargadas y lajeadas	Resultado	Característica requerida²	Valoración
Retenido en la malla No 4 (4.75 mm) de la mezcla de materiales (50% de arena y 50%) de grava)	32.5%	35%, máximo	Cumple

Equivalente de arena

Mediante esta prueba se determina el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. Que consiste en separar la fracción del material que pasa la malla No 4 (4.75 mm) la arena de la arcilla. La prueba se realizó en la fracción de la mezcla de materiales que pasa la malla No 4 (4.75 mm); conforme al procedimientos descrito en el Norma M-MMP-4-04-004/02 (SCT, 2002d). El resultado de la prueba fue el siguiente:

Tabla 9. Resultados de la prueba equivalente de arena

Equivalente de arena	Resultado	Característica requerida³	Valoración
En el material que pasa la malla No 4 (4.75 mm) de la mezcla de materiales (50% de arena y 50%) de grava)	64.7%	50%, mínimo	Cumple

¹ Norma N-CMT-4-04/08

² Norma N-CMT-4-04/08

³ Norma N-CMT-4-04/08

3.6.2 Caracterización de los materiales asfálticos grado PG

El material asfáltico utilizado para la mezcla asfáltica empleada es de grado PG 64-22, el cual fue extraído de la misma planta de asfaltos “Tonalá”, propiedad de la empresa Asfaltos Guadalajara. La calidad del cemento asfáltico Grado PG 64-22, fue proporcionada por dicha empresa. En las figuras siguientes, se ilustra las características calidad y la carta de viscosidad del material asfáltico.



FOLIO: GT-SC-030891415

INFORME DE PRUEBAS DE CEMENTOS ASFALTICOS

OBRA:	ENSAYES NO: 6
FECHA DE RECIBO:	
No. DE LOTE: 063	FECHA DE INFORME:

REFINERIA DE DONDE PROCEDE EL CEMENTO :	SALAMANCA GUANAJUATO
TIPO DE CEMENTO INDICADO EN LA REMISION :	EKBE PG 64 - 22
DEPOSITOS MUESTREADOS :	AUTOTANQUE
CEMENTO PARA UTILIZARSE EN :	MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

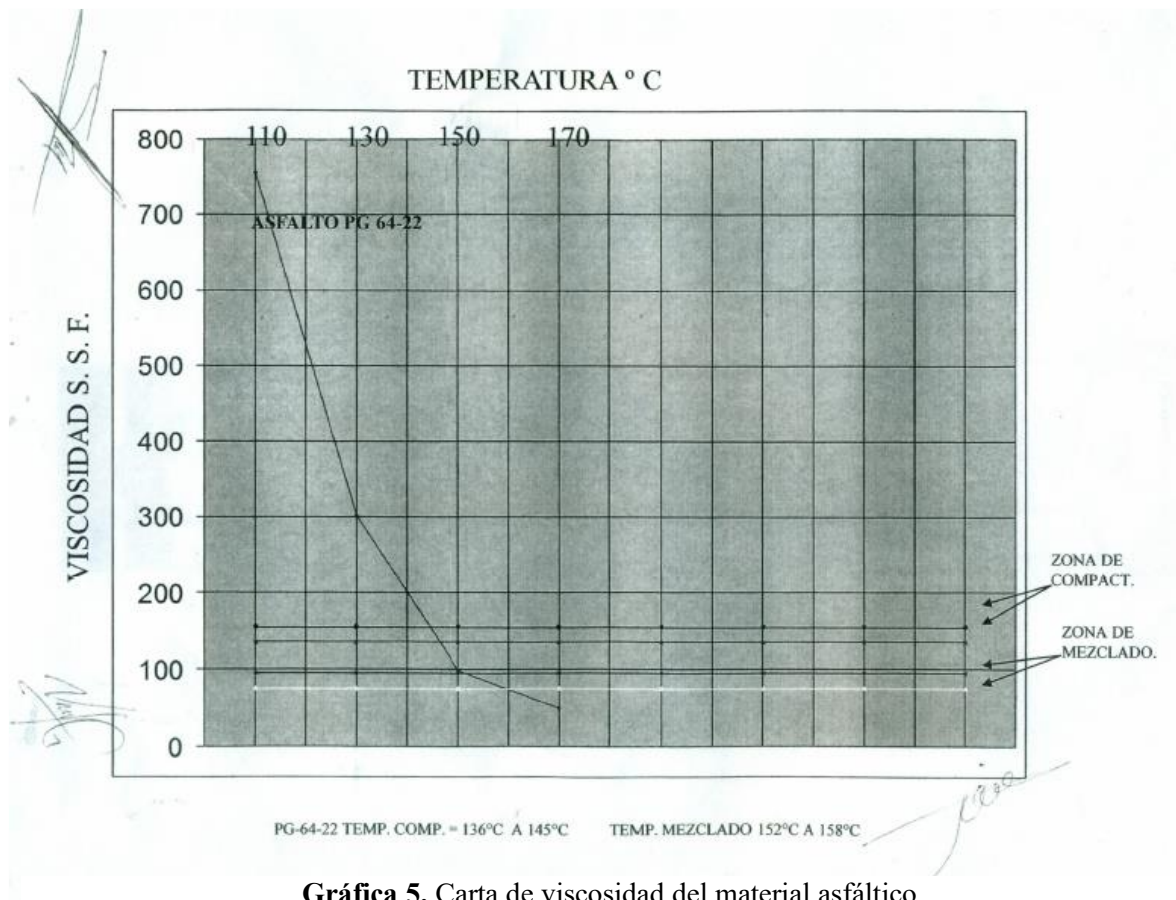
PRUEBAS	ENSAYES	ESPECIFICACIONES	
	No.	MIN.	MAX.
VISCOSIDAD DINAMICA A 60°C; Pa s (p(1))	2338 g / cm.s	200+40(2000+400)	-
VISCOSIDAD CENEMATICA A 135°C mm2/S; MIN (1 mm2/S= 1 CENTISTOKE)	-	300	-
VISCOSIDAD SAYBOLT-FUROL A 135°C ; SEG MIN	249	120	-
PENETRACION A 25°C; 100 g.s ; 10-1 mm. MIN.	65	60	-
PUNTO DE INFLAMACION CLEVELAND; °C; MIN	326	232	-
SOLUBILIDAD; % MIN.	99.96	99	-
PUNTO DE REMBLANDECIMIENTO; °C	50.25	48	56

PRUEBAS EN EL RESIDUO DE LA PELICULA DELGADA

PERDIDA POR CALENTAMIENTO; %, MAX.	0.116	-	0.5
VISCOSIDAD DINAMICA A 60°C; Pa s (p(1)) MAX.	-	-	800(8000)
DUCTILIDAD A 25 °C Y 5 CM / MIN; CM. MIN.	100	50	-
PENETRACION RETENIDA A 25°C ; % MIN.	-	54	-

OBSERVACIONES * VALORES CERTIFICADOS DE CALIDAD DE PEMEX ASFALTO EKBE- 64-22		ESPECIFICACIONES	
		MIN.	MAX.
* MODULO DE CORTE DINAMICO (ASFALTO ORIGINAL)	1.33	1.0 K Pa	-
* MODULO DE CORTE DINAMICO (ASFALTO DESPUES DE RTFO)	4.26	2.2 K Pa	-
* MODULO DE CORTE DINAMICO (ASFALTO DESPUES DE PAV)	3306	-	5000 Pa
* PENDIENTE DE DEFORMACION (M)	0.315	0.3	-
* RIGIDEZ A LA DEFORMACION (S)	1.20	-	300 M Pa
* GRAVEDAD ESPECIFICA POR PICNOMETRO A 25° C	1.037	-	-

 TGO. IGNACIO RIESTRA CERVANTES.	 TEC. REMIGIO ENCISO DIAZ.	 ING. VICENTE GODINEZ GONZALEZ.
--	--	---



Gráfica 5. Carta de viscosidad del material asfáltico

Conforme a la Norma N-CMT-4-05-004/08 (SCT, 2008b); Calidad de materiales asfálticos Grado PG, se observa que las características obtenidas satisfacen los requisitos de calidad para el cemento asfáltico Grado PG 64-22. En la carta de viscosidad se observa que los rangos de temperatura para el mezclado y compactación de la mezcla asfáltica son de 152°C – 158°C y 136°C – 145°C, respectivamente.

3.6.3 Determinación del contenido óptimo mediante el Método Marshall.

De conformidad con la Norma N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d), para una mezcla de pétreos de tamaño nominal de 12.5 mm (1/2") mediante la cual se pretenda diseñar una mezcla asfáltica de granulometría densa, para un tránsito esperado entre 1 y 10 millones de ejes equivalentes (ΣL); dicha mezcla deberá de cumplir con los requisitos (SCT, 2008d):

Tabla 10. Requisitos de calidad y VAM para mezclas asfálticas de granulometría densa (SCT, 2008d)

TABLA 1.- Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall

Características	Número de ejes equivalentes de diseño ΣL ^[1]	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$10^6 < \Sigma L \leq 10^7$ ^[2]
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lb _f), mínimo	5 340 (1 200)	8 000 (1 800)
Flujo; mm (10 ⁻² in)	2 - 4 (8 - 16)	2 - 3,5 (8 - 14)
Vacios en la mezcla asfáltica (VMC); %	3 - 5	3 - 5
Vacios ocupados por el asfalto (VFA); %	65 - 78	65 - 75

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Para tránsitos mayores de 10^7 ejes equivalentes de 8,2 t, se requiere un diseño especial de la mezcla.

TABLA 2.- Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall

Tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla ^[1]		Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC) de diseño %		
		3	4	5
mm	Designación	Vacíos en el agregado mineral (VAM) %, mínimo		
9,5	¾"	14	15	16
12,5	½"	13	14	15
19	¾"	12	13	14
25	1"	11	12	13
37,5	1½"	10	11	12

[1] El tamaño nominal corresponde al indicado en la Cláusula D. de la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, para el tipo y granulometría del material pétreo utilizado en la mezcla.

Para los Vacíos de agregado mineral (VAM) se consideró el 4% de vacíos en la mezcla asfáltica de diseño; y por lo tanto los Vacíos de Agregado Mineral (VAM) serán como mínimo del 14%.

Para calcular el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica compacta fue necesario determinar la densidad relativa aparente por inmersión en cemento asfáltico de materiales pétreos para mezclas asfálticas; de conformidad al procedimiento descrito en la Norma M-MMP-4-04-015/15; la cual resultó con un valor de 2.71.

Con estas consideraciones y tomando en cuenta las características del material, se procedió a elaborar el Diseño Marshall conforme a lo indicado en las Normas para muestreo para muestreo y pruebas de los materiales, equipos y sistemas. (SCT, 1991). Se inició determinando el contenido mínimo aproximado de asfalto con la siguiente expresión:

$$P_{RA} = \sum FKI$$

Donde:

P_{RA} es la proporción de residuo asfáltico en peso que corresponde a la mezcla preliminar y que es equivalente a la suma del requerido por cada fracción del agregado en las que se considera dividido éste para su estudio, en por ciento.

F es la proporción, expresada en por ciento, en peso, de cada una de las fracciones en que se divide el material pétreo para su estudio, determinada de acuerdo con las mallas que se indican en la Tabla 11.

K es la constante de área superficial de las partículas de material pétreo estimada para cada una de las fracciones, de acuerdo con lo indicado en la Tabla 11, en metros cuadrados por kilogramos.

I es el índice asfáltico de la fracción considerada, el cual se selecciona de la Tabla 12, de acuerdo con las características del material, en kilogramos de cemento asfáltico por metro cuadrado de área superficial de partículas.

Tabla 11. Áreas superficiales de partículas para diferentes fracciones del material pétreo.

MATERIAL		Área superficial de partículas, K, en m ² /kg.
Pasa malla Núm.	Retiene en malla Núm.	
37.500	19.000	0.27
19.000	4.750	0.41
4.750	0.425	2.05
0.425	0.075	15.38
0.075	—	53.30

Tabla 12. Índices asfálticos para diversos tipos pétreo

Materiales pétreos de partículas	Índices asfálticos en kg/m ²		
	Absorción 0.0 a 2.5%	Absorción 2.6 a 5.0%	Absorción Mayor de 5.0%
Redondeadas	0.0055	0.0065	0.0075
Sub-angulosas	0.0065	0.0075	0.0085
Angulosas	0.0075	0.0085	0.0100

Aplicando la formula mediante el uso de las Tablas 11 y 12, se obtiene la tabla 13:

Tabla 13. Determinación del contenido mínimo de aproximado de asfalto para una mezcla asfáltica

Material		Material ensayado F	Área superficial de partículas, K, en m ² /kg	Índice asfáticos en kg/m ² para un material pétreo de partículas angulosas y absorción entre 0.0 a 2.5%	Residuo asfáltico en peso en por ciento (%)
Pasa malla Núm.	Retiene malla Núm.				
37.500	19.000	0.000	0.27	0.0075	0.00
19.000	4.750	0.470	0.41	0.0075	0.14
4.750	0.425	0.400	2.05	0.0075	0.62
0.425	0.075	0.100	15.38	0.0075	1.15
0.075		0.030	53.3	0.0075	1.20

Σ Sumas	3.11
---------	------

Incremento 50% (aproximado)	4.67
-----------------------------	------

En virtud que para esta mezcla ya se ha determinado anteriormente el contenido óptimo de cemento asfáltico mediante el método Marshall, se procedió a iniciar con un contenido de asfalto de 4.8% respecto al agregado.

Se elaboraron 15 especímenes compactados a 75 golpes por cara a una temperatura de la mezcla de 145°C; 3 especímenes para cada contenido en por ciento de asfalto respecto al agregado de 4.8, 5.3, 5.8, 6.3 y 6.8; posteriormente se ensayaron y se determinaron sus características.



Figura 10. Elaboración de mezcla asfáltica con un contenido de asfalto del 5.8% respecto al agregado



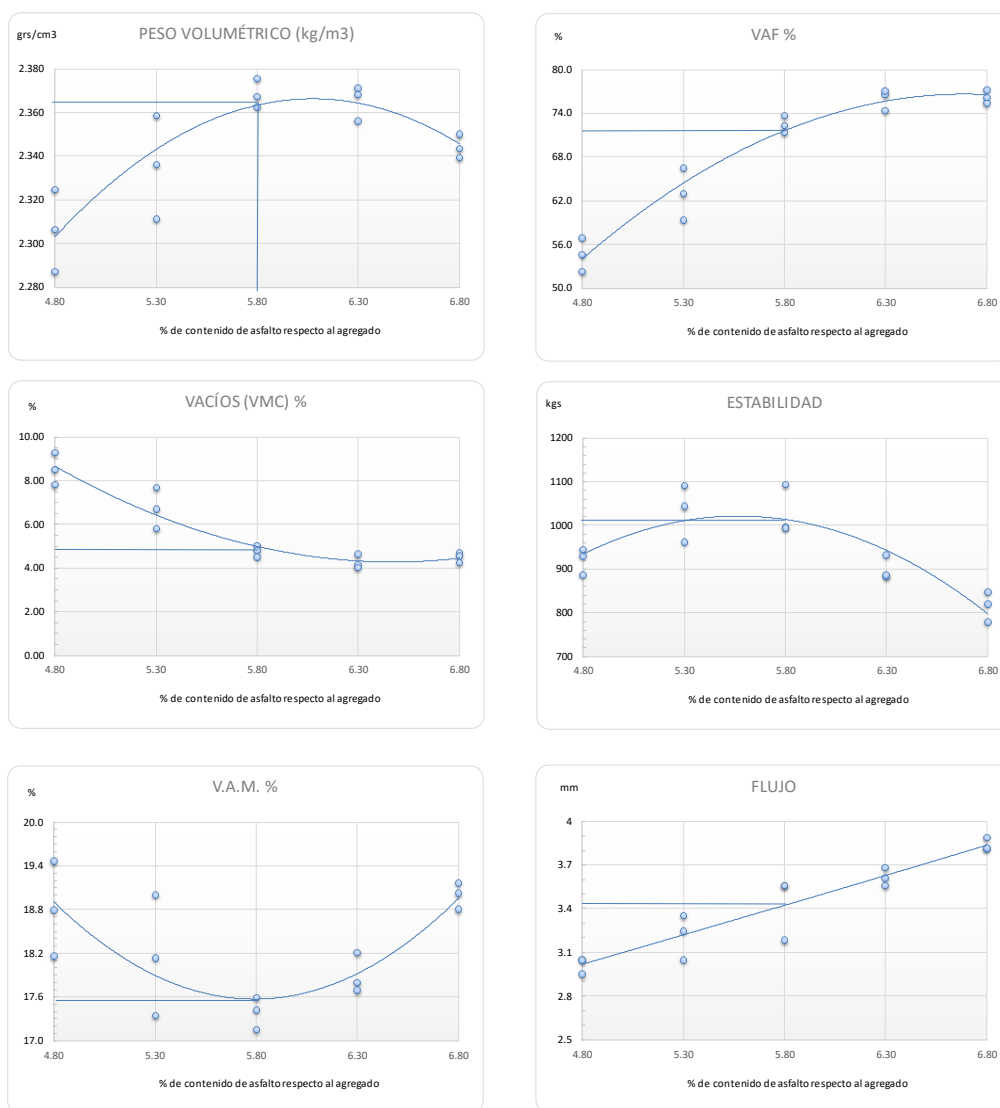
Figura 12. Ensayo para determinar la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica

En el Anexo Tabla Marshall convencional se detallan los resultados con mayor claridad.

Tabla 14. Comportamiento mecánico y volumétrico durante la compactación de las mezclas asfálticas mediante el método Marshall

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA MAESTRÍA EN VÍAS TERRESTRES										COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y VOLUMÉTRICO DURANTE LA COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL															
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	PROBETA No.	% DEC.A.	% DEC.A.	P E S O (grs)				VOLUMEN (cm ³)			PESO	DENSIDAD	VOLUMENES % TOTAL			% VACIOS		ESTABILIDAD (kg)					FLUJO EN 0.01"	FLUJO EN mm	OBSERVACIONES
		EN PESO	EN PESO	ESPECIMEN	ESPECIMEN	ESPECIMEN		ESPECIMEN			VOLUMETRICO	TEORICA	CEMENTO	MATERIAL		MATERIAL	LLENADOS	LECTURA	ALTURA	ESTABILIDAD	FACTOR DE	ESTABILIDAD			
		RESPECTO AL	RESPECTO A	CON PARAFINA	SIN PARAFINA	CON PARAFINA	PARAFINA	CON	PARAFINA	ESPECIMEN	ESPECIMEN	MAXIMA	ASFALTICO	PETREO	VACIOS	PETREO	POR EL	MICRO-	ESPECIMEN	(kg)	CORRECCION	CORREGIDA			
		AGREGADO	LA MEZCLA	EN AIRE	EN AIRE	EN AGUA	PARAFINA	PARAFINA		(grs/ cm ³)					V.A.M.	C.A.	METRO	(cm)	POR ALTURA						
		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	p	q	s	t	u	v	w	y	z	
							c - d	c - e	f/ Dp	g - h	1000 d/ i	*	$\frac{b}{100}$	$\frac{j}{1000}$ D.C.A.	$\frac{100-b}{100}$ D.C.L.	100 - l - m	100 - m	l/ p		s x r	**		u x v		
145	1	4.80	4.58	1276.0	1239.0	695.5	34.5	580.5	38.76	5417	2.287		10.17	80.53	9.30	19.5	52.2	280	6.45	923	0.960	886		295.00	
145	2	4.80	4.58	1265.0	1228.0	6910	37.0	574.0	4157	532.4	2.306		10.26	8121	8.53	18.8	54.6	285	6.37	939	0.990	930		305.00	
145	3	4.80	4.58	1280.0	1242.0	703.0	38.0	577.0	42.7	534.3	2.325		10.34	8185	7.82	18.2	56.9	284	6.34	936	1.010	945		305.00	
145	1	5.30	5.03	1272.6	1235.7	696.5	36.9	576.1	4146	534.6	2.311		11.29	80.99	7.71	19.0	59.4	295	6.41	972	0.990	963		325.00	
145	2	5.30	5.03	12711	1234.4	7015	36.7	569.6	4124	528.4	2.336		11.42	8187	6.71	18.1	63.0	320	6.37	1055	0.990	1044		335.00	
145	3	5.30	5.03	1270.0	1235.7	707.6	34.3	562.4	38.5	523.9	2.359		11.53	82.66	5.81	17.3	66.5	328	6.30	1081	1.010	1092		305.00	
145	1	5.80	5.48	1268.0	1235.4	708.5	32.6	559.5	36.63	522.9	2.363		12.58	82.41	5.02	17.6	715	315	6.48	1038	0.960	997		356.00	
145	2	5.80	5.48	1270.2	1232.0	706.9	38.2	563.3	42.92	520.4	2.368		12.60	82.57	4.83	17.4	72.3	305	6.39	1005	0.990	995		356.00	
145	3	5.80	5.48	1274.4	1235.7	710.7	38.7	563.7	43.5	520.2	2.375		12.64	82.85	4.51	17.2	73.7	335	6.42	1104	0.990	1093		318.00	
145	1	6.30	5.93	1270.3	1233.0	707.7	37.3	562.6	4191	520.7	2.368		13.63	82.20	4.17	17.8	76.6	265	6.29	873	1.010	882		356.00	
145	2	6.30	5.93	1277.0	1237.6	710.8	39.4	566.2	44.27	5219	2.371		13.64	82.31	4.04	17.7	77.1	301	6.55	992	0.940	933		368.00	
145	3	6.30	5.93	1274.7	1233.3	704.7	41.4	570.0	46.5	523.5	2.356		13.56	8178	4.66	18.2	74.4	280	6.49	923	0.960	886		361.00	
145	1	6.80	6.37	1266.7	1233.3	702.0	33.4	564.7	37.53	527.2	2.339		14.46	80.83	4.71	19.2	75.4	259	6.50	854	0.960	820		381.00	
145	2	6.80	6.37	1273.4	1244.6	710.0	28.8	563.4	32.36	5310	2.344		14.49	80.98	4.54	19.0	76.2	255	6.27	840	1.010	849		382.00	
145	3	6.80	6.37	1269.0	1236.0	706.0	33.0	563.0	37.1	525.9	2.350		14.53	81.20	4.27	18.8	77.3	239	6.41	788	0.990	780		389.00	

Los resultados obtenidos de las características de la mezcla asfáltica de los especímenes elaborados con los contenidos de 4.8, 5.3, 5.7, 6.3 y 6.8 en por ciento respecto al agregado, se graficaron y mediante estas gráficas se observa que en el contenido de 5.8% de cemento asfáltico, las características de la mezcla asfáltica cumplen con los requisitos indicados en la Norma N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d). En las gráficas siguientes se muestran las variaciones de las características de la mezcla asfáltica respecto al contenido de asfalto.



CARACTERÍSTICAS	DATOS OBTENIDOS
CONT. OPT DE C.A.A (%)	5.8
PESO ESP. (grs/cm3)	2.365
VACÍOS VMC (%)	4.8
V.A.M. (%)	17.5
V.F.A. (%)	72
ESTABILIDAD (kg)	1018
FLUJO (mm)	3.45

3.6.4 Elaboración de especímenes Marshall variando la temperatura y el número de golpes por cara empleando el equipo descrito en el Método Marshall.

Una vez determinado el contenido de asfalto, se prosiguió a elaborar los especímenes con dicho contenido, pero variando la temperatura de compactación y el número de golpes. Los incrementos en la temperatura son de 15 °C iniciando en 90°C hasta llegar a los 150°C; es decir 90, 105, 120, 135 y 150 °C. Y los números de golpes a partir de 45 por cara, con incrementos de 15 golpes; quedando en 45, 60, 75, 90 y 105. Para cada combinación de número de golpes y temperatura, se realizaron 12 especímenes; los cuales se detallan en la tabla siguiente:

Tabla 15. Análisis de los doce especímenes muestreados

No de Golpes	Temperatura de Compactación	No de Especímenes	No de Golpes	Temperatura de Compactación	No de Especímenes
45	90 °C	12	90	90 °C	12
	105 °C	12		105 °C	12
	120 °C	12		120 °C	12
	135 °C	12		135 °C	12
	150 °C	12		150 °C	12
60	90 °C	12	105	90 °C	12
	105 °C	12		105 °C	12
	120 °C	12		120 °C	12
	135 °C	12		135 °C	12
	150 °C	12		150 °C	12
75	90 °C	12			
	105 °C	12			
	120 °C	12			
	135 °C	12			
	150 °C	12			
Suma Total =		300	180		
				120	

Reporte fotográfico durante la elaboración y ensaye de los especímenes.



Figura 13. Elaboración de los especímenes.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de los cálculos y ensayos a los especímenes se enlistan en las tablas siguientes (16 a 23). Para la representación gráfica de los resultados, se construyeron 2 grupos de líneas de tendencia del tipo polinómica del segundo grado.

El primer grupo consiste en una línea para cada Temperatura, y registra el comportamiento de las características de los especímenes al variarse los Números Golpes en que se compactaron; denominándose “Gráfica de Temperatura”.

El segundo grupo estableciéndose líneas para cada Número de Golpe en los que se compactaron los especímenes, por lo que se registró el comportamiento de sus características al variarse la Temperatura de Compactación; denominándose “Gráfica de Número de Golpes”.

En las gráficas siguientes se detallan las líneas de tendencia “de Temperatura” (90,105,120, 135 y 150°C) en donde se aprecia el comportamiento de las características de los especímenes ensayados al variar el Número de Golpes a los que se compactaron.

Las áreas sombreadas en verde indican la zona de aceptación de las características requerida en la Norma N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d).

En las gráficas siguientes se detallan las líneas de tendencia “de Número de Golpes” (45, 60, 75, 90 y 105 golpes), en donde se aprecia el comportamiento de las características de los especímenes ensayados al variar la Temperatura a la que se compactaron.

Tabla 16. Resultados de los especímenes analizados para 45 y 75 golpes.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA MAESTRÍA EN VÍAS TERRESTRES					COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y VOLUMÉTRICO DURANTE LA COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL																				
NÚMERO DE GOLPES	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	PROBETA No.	% DECA. EN PESO RESPECTO AL AGREGADO	% DECA. EN PESO RESPECTO A LA MEZCLA	P E S O (grs)				VOLUMEN (cm ³)			PESO VOLUMETRIC (grs / cm ³)	VOLUMENES % TOTAL			% VACIOS		ESTABILIDAD (kg)					FLUJO EN 0.01"	FLUJO EN mm	OBSERVACIONES
			ESPECIMEN CON PARAFINA EN AIRE	ESPECIMEN SIN PARAFINA EN AIRE	ESPECIMEN CON PARAFINA EN AGUA	PARAFINA	ESPECIMEN CON PARAFINA	PARAFINA	ESPECIMEN SIN PARAFINA	CEMENTO ASFALTICO	MATERIAL PETREO		VACIOS	MATERIAL PETREO V.A.M.	LLENADOS POR EL C.A.	LECTURA MICRO METRO	ALTURA ESPECIMEN (cm)	ESTABILIDAD (kg)	FACTOR DE CORRECCION POR ALTURA	ESTABILIDAD CORREGIDA					
			a	b	c	d	e	f	g	h	i		j	l	m	n	p	q	s	t	u	v			
							c - d	c - e	f/Dp	g - h	1000 d / i	$\frac{b}{100}$	$\frac{j}{1000}$ D.C.A.	$\frac{100-b}{100}$ D.C.I.	100 - l - m	100 - m	l / p		s x r	* *		u x v			
45	90	1	5.81	5.49	10715	1037.0	570.7	34.5	500.8	38.76	462.0	2.244	1197	78.27	9.76	217	55.1	50	5.90	494	1130	559		250.00	
45	90	2	5.81	5.49	1075.0	1042.0	573.0	33.0	502.0	37.08	464.9	2.241	1195	78.36	9.89	218	54.7	50	6.01	494	1100	544		250.00	
45	90	3	5.81	5.49	1070.7	1039.1	572.2	31.6	498.5	35.5	463.0	2.244	1196	78.27	9.77	217	55.1	50	5.95	428	1100	471		260.00	
45	105	1	5.82	5.50	1086.0	1052.0	582.3	34.0	503.7	38.20	465.5	2.260	1207	78.81	9.13	212	56.9	50	6.00	593	1100	653		230.00	
45	105	2	5.82	5.50	1098.2	1068.0	588.6	30.2	509.6	33.93	475.7	2.245	1199	78.29	9.72	217	55.2	50	6.10	593	1070	635		240.00	
45	105	3	5.82	5.50	1087.0	1052.0	580.0	35.0	507.0	39.3	467.7	2.249	1201	78.44	9.55	216	55.7	50	6.05	560	1070	600		270.00	
45	120	1	5.82	5.50	1079.2	1048.4	585.5	30.8	493.7	34.61	459.1	2.284	1219	79.63	8.17	204	59.9	50	6.10	593	1070	635		260.00	
45	120	2	5.82	5.50	1084.8	1049.7	590.0	35.1	494.8	39.44	455.4	2.305	1231	80.38	7.31	19.6	62.8	50	5.85	560	1130	633		260.00	
45	120	3	5.82	5.50	1079.1	1045.1	592.5	34.0	486.6	38.2	448.4	2.331	1245	81.28	6.28	19.7	66.5	200	5.85	659	1130	745		260.00	
45	135	1	5.80	5.48	1081.0	1046.0	588.0	35.0	493.0	39.33	453.7	2.306	1227	80.41	7.31	19.6	62.7	50	5.90	527	1130	596		260.00	
45	135	2	5.80	5.48	1090.1	1056.0	599.1	34.1	491.0	38.31	452.7	2.333	1242	81.36	6.22	19.6	66.6	50	5.90	527	1130	596		260.00	
45	135	3	5.80	5.48	1078.8	1044.3	590.0	34.5	488.8	38.8	450.0	2.320	1235	80.93	6.72	19.1	64.8	50	5.85	560	1130	633		280.00	
45	150	1	5.83	5.51	1099.3	1066.5	602.0	32.8	497.3	36.85	460.4	2.316	1239	80.76	6.85	19.2	64.4	220	5.90	725	1130	819		273.00	
45	150	2	5.83	5.51	1107.0	1072.8	603.0	34.2	504.0	38.43	465.6	2.304	1232	80.34	7.33	19.7	62.7	230	5.95	758	1100	834		294.00	
45	150	3	5.83	5.51	1103.3	1072.0	605.5	31.3	497.8	35.2	462.6	2.317	1239	80.79	6.81	19.2	64.5	210	5.90	692	1130	782		284.00	
75	90	1	5.80	5.48	1100.2	1061.8	592.2	38.4	508.0	43.35	464.9	2.284	1216	79.67	8.19	20.3	59.8	50	6.10	527	1070	564		310.00	
75	90	2	5.80	5.48	1102.0	1059.0	580.0	43.0	522.0	48.31	473.7	2.236	1190	77.97	10.13	22.0	54.0	50	6.35	527	0.990	522		240.00	
75	90	3	5.80	5.48	1096.0	1057.0	578.0	39.0	518.0	43.8	474.2	2.229	1186	77.75	10.39	22.3	53.3	50	6.30	494	1010	499		220.00	
75	105	1	5.80	5.48	1062.7	1025.5	578.0	37.2	484.7	41.80	442.9	2.315	1232	80.76	6.92	19.2	64.0	50	5.90	560	1130	633		250.00	
75	105	2	5.80	5.48	1086.6	1052.1	603.0	34.5	483.6	38.76	444.8	2.365	1259	82.49	4.92	17.5	71.9	220	5.90	725	1130	819		270.00	
75	105	3	5.80	5.48	1112.4	1073.0	608.4	39.4	504.0	44.3	459.7	2.334	1242	81.40	6.17	19.6	66.8	210	6.15	692	1040	720		290.00	
75	120	1	5.81	5.49	1134.4	1099.3	629.0	35.1	505.4	39.44	466.0	2.359	1258	82.28	5.15	17.7	71.0	250	6.15	824	1040	857		260.00	
75	120	2	5.81	5.49	1125.0	1090.0	622.5	35.0	502.5	39.33	463.2	2.353	1255	82.07	5.38	17.9	70.0	220	6.05	725	1070	776		310.00	
75	120	3	5.81	5.49	1135.0	1097.0	623.5	38.0	511.5	42.7	468.8	2.340	1247	81.61	5.92	19.4	67.8	240	6.20	791	1040	823		290.00	
75	135	1	5.81	5.49	1130.0	1081.0	618.5	49.0	511.5	55.06	456.4	2.368	1263	82.59	4.78	17.4	72.5	270	6.05	890	1070	952		280.00	
75	135	2	5.81	5.49	1108.1	1078.1	625.0	30.0	483.1	33.71	449.4	2.399	1279	83.66	3.55	16.3	78.3	300	6.05	989	1070	1058		270.00	
75	135	3	5.81	5.49	1133.0	1096.0	634.0	37.0	499.0	41.6	457.4	2.396	1277	83.56	3.67	16.4	77.7	300	6.05	989	1070	1058		310.00	
75	150	1	5.79	5.47	1128.1	1089.0	617.0	39.1	511.1	43.93	467.2	2.331	1239	81.31	6.30	19.7	66.3	280	6.20	923	1040	960		273.00	
75	150	2	5.79	5.47	1124.0	1082.5	611.4	41.5	512.6	46.63	466.0	2.323	1234	81.03	6.62	19.0	65.1	270	6.25	890	1010	899		273.00	
75	150	3	5.79	5.47	1117.4	1084.0	619.0	33.4	498.4	37.5	460.9	2.352	1250	82.04	5.46	19.0	69.6	290	6.10	956	1070	1023		273.00	

Tabla 17. Resultados de los especímenes analizados para 60 y 90 golpes.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA MAESTRÍA EN VÍAS TERRESTRES										COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y VOLUMÉTRICO DURANTE LA COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL																			
NÚMERO DE GOLPES	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	PROBETA No.	% DECA. EN PESO RESPECTO AL AGREGADO	% DECA. EN PESO RESPECTO A LA MEZCLA	P E S O (g r s)				V O L U M E N (c m ³)			PESO VOLUMETRICO ESPECIMEN (g r s / c m ³)	VOLUMENES % TOTAL			% VACIOS		ESTABILIDAD (k g)						FLUJO EN 0.01"	FLUJO EN mm	OBSERVACIONES			
			ESPECIMEN CON PARAFINA EN AIRE	ESPECIMEN SIN PARAFINA EN AIRE	ESPECIMEN CON PARAFINA EN AGUA	PARAFINA	ESPECIMEN CON PARAFINA	PARAFINA	ESPECIMEN	CEMENTO ASFALTICO	MATERIAL PETREO		VACIOS	MATERIAL PETREO V.A.M.	LLENADOS POREL C.A.	LECTURA MICROMETRO	ALTURA ESPECIMEN (cm)	ESTABILIDAD (kg)	FACTOR DE CORRECCION POR ALTURA	ESTABILIDAD CORREGIDA									
			c	d	e	f	g	h	i	j	k		l	m	n	p	q	r	s	t	u	v	w				x	y	z
			c - d	c - e	f / Dp	g - h	1000 d / i	b / 100 D.C.A.	j / 1000 D.C.I.	100 - l - m	100 - n		l / p	s x r	* *	u x v													
60	90	1	5.80	5.48	1083.0	1040.5	561.0	42.5	522.0	47.75	474.2	2.194	1168	76.52	1180	23.5	49.7	170	6.20	560	1040	583		210.00					
60	90	2	5.80	5.48	1086.0	1045.0	561.0	41.0	525.0	46.07	478.9	2.182	1161	76.10	12.29	23.9	48.6	170	6.30	560	1010	566		200.00					
60	90	3	5.80	5.48	1067.8	1028.1	550.6	39.7	517.2	44.6	472.6	2.175	1158	75.87	12.55	24.1	48.0	150	6.20	494	1040	514		200.00					
60	105	1	5.81	5.49	1081.9	1044.0	566.0	37.9	515.9	42.58	473.3	2.206	1176	76.92	11.32	23.1	51.0	160	6.10	527	1070	564		230.00					
60	105	2	5.81	5.49	1082.1	1047.0	563.0	35.1	519.1	39.44	479.7	2.183	1164	76.12	12.24	23.9	48.7	170	6.25	560	1010	566		240.00					
60	105	3	5.81	5.49	1081.0	1046.5	567.0	34.5	514.0	38.8	475.2	2.202	1174	76.80	11.47	23.2	50.6	180	6.10	593	1070	635		240.00					
60	120	1	5.78	5.46	1094.0	1062.5	595.0	31.5	499.0	35.39	463.6	2.292	1216	79.95	7.89	20.1	60.6	190	6.10	626	1070	670		230.00					
60	120	2	5.78	5.46	1084.0	1054.0	593.5	30.0	490.5	33.71	456.8	2.307	1224	80.49	7.27	19.5	62.7	200	6.20	659	1040	686		250.00					
60	120	3	5.78	5.46	1090.0	1057.0	584.0	33.0	506.0	37.1	468.9	2.254	1196	78.63	9.41	21.4	56.0	190	6.10	626	1070	670		310.00					
60	135	1	5.82	5.50	1157.0	1133.5	640.0	23.5	517.0	26.40	490.6	2.310	1234	80.57	7.10	19.4	63.5	230	6.45	758	0.960	728		250.00					
60	135	2	5.82	5.50	1168.0	1134.8	646.5	33.2	521.5	37.30	484.2	2.344	1251	81.73	5.76	18.3	68.5	260	6.35	857	0.990	848		250.00					
60	135	3	5.82	5.50	1175.5	1132.0	643.1	43.5	532.4	48.9	483.5	2.341	1250	81.64	5.86	18.4	68.1	240	6.50	791	0.960	759		240.00					
60	150	1	5.78	5.46	1206.5	1175.7	670.5	30.8	536.0	34.61	501.4	2.345	1244	81.80	5.76	18.2	68.3	250	6.20	824	1040	857		273.00					
60	150	2	5.78	5.46	1204.5	1175.5	669.5	29.0	535.0	32.61	502.4	2.340	1241	81.62	5.97	18.4	67.5	230	6.30	758	1010	766		263.00					
60	150	3	5.78	5.46	1203.3	1177.3	672.5	26.0	530.8	29.2	501.6	2.347	1245	81.88	5.67	18.1	68.7	260	6.25	857	1010	866		263.00					
90	90	1	5.78	5.46	1165.2	1130.4	635.1	34.8	530.1	39.10	491.0	2.302	1221	80.31	7.47	19.7	62.0	250	6.15	824	1040	857		330.00					
90	90	2	5.78	5.46	1186.0	1129.1	632.0	56.9	554.0	63.93	490.1	2.304	1222	80.37	7.41	19.6	62.3	230	6.25	758	1010	766		270.00					
90	90	3	5.78	5.46	1165.3	1120.4	625.6	44.9	539.7	50.4	489.3	2.290	1215	79.89	7.97	20.1	60.4	210	6.10	692	1070	741		350.00					
90	105	1	5.84	5.52	1176.6	1140.2	650.0	36.4	526.6	40.90	485.7	2.348	1258	81.85	5.58	18.2	69.3	270	6.20	890	1040	926		320.00					
90	105	2	5.84	5.52	1152.2	1118.0	636.6	34.2	515.6	38.43	477.2	2.343	1255	81.69	5.76	18.3	68.5	270	6.10	890	1070	952		330.00					
90	105	3	5.84	5.52	1150.9	1117.5	637.0	33.4	513.9	37.5	476.4	2.346	1257	81.79	5.65	18.2	69.0	260	6.10	857	1070	917		300.00					
90	120	1	5.80	5.48	1110.1	1070.0	612.9	40.1	497.2	45.06	452.1	2.367	1260	82.54	4.87	17.5	72.1	310	6.00	1022	1100	1124		310.00					
90	120	2	5.80	5.48	1120.2	1087.5	630.0	32.7	490.2	36.74	453.5	2.398	1276	83.64	3.59	16.4	78.0	290	5.80	956	1160	1109		330.00					
90	120	3	5.80	5.48	1142.2	1108.0	636.2	34.2	506.0	38.4	467.6	2.370	1261	82.65	4.74	17.4	72.7	260	5.90	857	1130	968		350.00					
90	135	1	5.77	5.46	1267.0	1237.0	718.6	30.0	548.4	33.71	514.7	2.403	1273	83.85	3.42	16.2	78.8	340	6.30	1121	1010	1132		350.00					
90	135	2	5.77	5.46	1274.5	1243.5	719.8	31.0	554.7	34.83	519.9	2.392	1267	83.45	3.88	16.6	76.5	360	6.35	1187	0.990	1175		310.00					
90	135	3	5.77	5.46	1276.5	1246.4	720.8	30.1	555.7	33.8	521.9	2.388	1265	83.32	4.03	16.7	75.8	360	6.20	1187	1040	1234		320.00					
90	150	1	5.78	5.46	1204.8	1166.1	667.6	38.7	537.2	43.48	493.7	2.362	1253	82.39	5.08	17.6	71.2	330	6.40	1088	0.990	1077		341.00					
90	150	2	5.78	5.46	1132.8	1144.0	660.0	112	472.8	12.58	485.4	2.357	1250	82.22	5.28	17.8	70.3	360	6.20	1187	1040	1234		347.00					
90	150	3	5.78	5.46	1182.0	1143.0	655.3	39.0	526.7	43.8	482.9	2.367	1256	82.57	4.87	17.4	72.1	340	6.25	1121	1010	1132		347.00					

Tabla 18. Resultados de los especímenes analizados para 105 y 45 golpes.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA MAESTRÍA EN VÍAS TERRESTRES										COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y VOLUMÉTRICO DURANTE LA COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL																			
NÚMERO DE GOLPES	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	PROBETA No.	% DEC.A.	% DEC.A.	P E S O (grs)				VOLUMEN (cm³)			PESO VOLUMETRIC (grs/ cm³)	VOLUMENES % TOTAL			% VACIOS		ESTABILIDAD (kg)						FLUJO EN 0.01"	FLUJO EN mm	OBSERVACIONES			
			EN PESO RESPECTO AL AGREGADO	EN PESO RESPECTO A LA MEZCLA	ESPECIMEN CON PARAFINA EN AIRE	ESPECIMEN SIN PARAFINA EN AIRE	ESPECIMEN CON PARAFINA EN AGUA	PARAFINA	CON PARAFINA	PARAFINA	CEMENTO ASFALTICO		MATERIAL PETREO	VACIOS	MATERIAL PETREO V.A.M.	LLENADOS POREL C.A.	LECTURA MICRO METRO	ALTURA ESPECIMEN (cm)	ESTABILIDAD (kg)	FACTOR DE CORRECCION POR ALTURA	ESTABILIDAD CORREGIDA								
			a	b	c	d	e	f	g	h	i		j	l	m	n	p	q	s	t	u	v	w				y	z	
								c - d	c - e	f/Dp	g - h		1000 d / i	$\frac{b}{100}$	$\frac{j}{1000}$ D.C.A.	$\frac{100-h}{100}$ D.C.I.	100 - l - m	100 - m	l / p			s x r	* *					u x v	
105	90	1	5.78	5.46	1155.0	1125.5	635.7	29.5	519.3	33.35	486.2	2.315	12.28	80.76	6.96	19.2	63.8	250	6.30	824	1010	832		270.00					
105	90	2	5.78	5.46	1150.0	1120.0	622.0	30.0	528.0	33.71	494.3	2.266	12.02	79.04	8.94	210	57.4	210	6.40	692	0.990	685		290.00					
105	90	3	5.78	5.46	1156.2	1126.0	631.8	30.2	524.4	33.9	490.5	2.296	12.18	80.09	7.74	19.9	61.2	230	6.45	758	0.960	728		290.00					
105	105	1	5.79	5.47	1163.7	1130.0	644.7	33.7	519.0	37.90	481.1	2.349	12.48	81.92	5.60	18.1	69.0	360	6.35	1187	0.990	1175		310.00					
105	105	2	5.79	5.47	1171.6	1140.0	642.5	31.6	529.1	35.51	493.6	2.310	12.27	80.56	7.17	19.4	63.1	240	6.50	791	0.960	759		310.00					
105	105	3	5.79	5.47	1170.0	1137.4	642.0	32.6	528.0	36.6	491.4	2.315	12.30	80.74	6.96	19.3	63.9	240	6.40	791	0.990	783		340.00					
105	120	1	5.82	5.50	1187.2	1154.6	656.3	32.6	530.9	36.63	494.3	2.336	12.47	81.46	6.07	18.5	67.3	260	6.50	857	0.960	823		260.00					
105	120	2	5.82	5.50	1179.9	1142.7	660.0	37.2	519.9	41.80	478.1	2.390	12.76	83.34	3.89	16.7	76.6	320	6.20	1055	1040	1097		320.00					
105	120	3	5.82	5.50	1174.5	1140.0	653.8	34.5	520.7	38.8	481.9	2.365	12.63	82.49	4.88	17.5	72.1	290	6.25	956	1010	965		370.00					
105	135	1	5.80	5.48	1191.0	1155.4	669.5	35.6	521.5	40.00	481.5	2.400	12.77	83.69	3.54	16.3	78.3	300	6.35	989	0.990	979		370.00					
105	135	2	5.80	5.48	1191.0	1154.0	664.5	37.0	526.5	41.57	484.9	2.380	12.67	83.00	4.33	17.0	74.5	320	6.40	1055	0.990	1044		330.00					
105	135	3	5.80	5.48	1177.5	1145.3	660.0	32.2	517.5	36.2	481.3	2.379	12.66	82.99	4.34	17.0	74.5	310	6.25	1022	1010	1032		410.00					
105	150	1	5.80	5.48	1230.7	1189.2	678.5	41.5	552.2	46.63	505.6	2.352	12.52	82.04	5.44	18.0	69.7	280	6.70	923	0.910	840		365.00					
105	150	2	5.80	5.48	1211.0	1170.0	663.0	41.0	548.0	46.07	501.9	2.331	12.41	81.30	6.29	18.7	66.3	290	6.70	956	0.910	870		357.00					
105	150	3	5.80	5.48	1213.0	1170.0	666.0	43.0	547.0	48.3	498.7	2.346	12.49	81.83	5.68	18.2	68.7	320	6.60	1055	0.940	991		360.00					
45	90	1	5.81	5.49	1164.4	1130.7	568.0	33.7	596.4	37.87	558.5	2.024	10.79	70.60	18.61	29.4	36.7	160	5.90	527	1.130	596		260.00					
45	90	2	5.81	5.49	1073.7	1040.3	574.0	33.4	499.7	37.53	462.2	2.251	12.00	78.50	9.50	21.5	55.8	140	6.00	461	1.100	508		230.00					
45	90	3	5.81	5.49	1071.0	1032.0	565.0	39.0	506.0	43.8	462.2	2.233	11.90	77.87	10.23	22.1	53.8	150	6.10	494	1.070	529		230.00					
45	105	1	5.82	5.50	1073.5	1042.0	577.7	31.5	495.8	35.39	460.4	2.263	12.08	78.92	8.99	21.1	57.3	160	5.95	527	1.100	580		260.00					
45	105	2	5.82	5.50	1077.0	1039.7	576.4	37.3	500.6	41.91	458.7	2.267	12.10	79.04	8.86	21.0	57.7	160	6.05	527	1.070	564		250.00					
45	105	3	5.82	5.50	1076.0	1039.7	575.0	36.3	501.0	40.8	460.2	2.259	12.06	78.78	9.16	21.2	56.8	160	6.05	527	1.070	564		260.00					
45	120	1	5.79	5.47	1089.8	1045.5	583.3	44.3	506.5	49.78	456.7	2.289	12.16	79.85	7.99	20.2	60.4	190	5.80	626	1.160	726		350.00					
45	120	2	5.79	5.47	1086.3	1049.5	583.3	36.8	503.0	41.35	461.7	2.273	12.08	79.30	8.62	20.7	58.3	230	6.00	758	1.100	834		290.00					
45	120	3	5.79	5.47	1089.7	1054.3	590.0	35.4	499.7	39.8	459.9	2.292	12.18	79.96	7.86	20.0	60.8	240	6.00	791	1.100	870		260.00					
45	135	1	5.79	5.47	1100.7	1063.0	598.6	37.7	502.1	42.36	459.7	2.312	12.29	80.65	7.06	19.3	63.5	240	6.00	791	1.100	870		270.00					
45	135	2	5.79	5.47	1080.3	1045.6	586.7	34.7	493.6	38.99	454.6	2.300	12.22	80.23	7.55	19.8	61.8	240	6.00	791	1.100	870		250.00					
45	135	3	5.79	5.47	1085.6	1053.5	593.0	32.1	492.6	36.1	456.5	2.308	12.26	80.49	7.25	19.5	62.9	290	6.05	956	1.070	1023		250.00					
45	150	1	5.77	5.46	1077.0	1042.0	587.0	35.0	490.0	39.33	450.7	2.312	12.25	80.66	7.09	19.3	63.3	220	5.90	725	1.130	819		263.00					
45	150	2	5.77	5.46	1087.0	1052.2	590.0	34.8	497.0	39.10	457.9	2.298	12.17	80.17	7.66	19.8	61.4	250	6.05	824	1.070	882		263.00					
45	150	3	5.77	5.46	1086.6	1051.7	584.8	34.9	501.8	39.2	462.6	2.274	12.04	79.32	8.64	20.7	58.2	260	5.95	857	1.100	943		284.00					

Tabla 19. Resultados de los especímenes analizados para 60, 75 y 90 golpes.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA MAESTRÍA EN VÍAS TERRESTRES										COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y VOLUMÉTRICO DURANTE LA COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL																			
NÚMERO DE GOLPES	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	PROBETA No.	% DECA. RESPECTO AL AGREGADO	% DECA. RESPECTO A LA MEZCLA	P E S O (g r s)				VOLUMEN (c m ³)				PESO VOLUMETRIC (g r s / c m ³)	VOLUMENES % TOTAL		% VACIOS		ESTABILIDAD (k g)						FLUJO EN 0.075"	FLUJO EN mm	OBSERVACIONES			
			EN PESO	EN PESO	ESPECIMEN CONPARAFINA	ESPECIMEN SINPARAFINA	ESPECIMEN CONPARAFINA	ESPECIMEN PARAFINA	CONPARAFINA	PARAFINA	ESPECIMEN	CEMENTO ASFALTICO		MATERIAL PETREO	VACIOS	MATERIAL PETREO	POREL C.A.	METRO (cm)	LECTURA ALTURA	ESTABILIDAD (kg)	FACTOR DE CORRECCION POR ALTURA	ESTABILIDAD CORREGIDA							
			EN PESO	EN PESO	EN PESO	EN PESO	EN PESO	EN PESO	EN PESO	EN PESO	EN PESO	EN PESO		EN PESO	EN PESO	EN PESO	EN PESO	EN PESO	EN PESO	EN PESO	EN PESO	EN PESO							
			a	b	c	d	e	f	g	h	i	j		k	l	m	n	o	p	q	r	s	t				u	v	w
60	90	1	5.82	5.50	150.0	118.4	620.0	316	530.0	35.51	494.5	2.262	12.08	78.87	9.06	211	57.1	170	6.45	560	0.960	538			230.00				
60	90	2	5.82	5.50	156.3	121.3	620.0	35.0	536.3	39.33	497.0	2.256	12.05	78.68	9.27	213	56.5	160	6.45	527	0.960	506			260.00				
60	90	3	5.82	5.50	151.3	118.7	621.5	32.6	529.8	36.6	493.2	2.268	12.11	79.10	8.79	20.9	58.0	150	6.55	494	0.940	465			250.00				
60	105	1	5.80	5.48	160.0	127.3	636.2	32.7	523.8	36.74	487.1	2.315	12.32	80.72	6.96	19.3	63.9	180	6.40	593	0.990	587			250.00				
60	105	2	5.80	5.48	167.8	135.0	639.2	32.8	528.6	36.85	491.7	2.308	12.28	80.50	7.21	19.5	63.0	180	6.40	593	0.990	587			280.00				
60	105	3	5.80	5.48	161.5	126.8	632.7	34.7	528.8	39.0	489.8	2.300	12.24	80.23	7.52	19.8	61.9	190	6.35	626	0.990	620			280.00				
60	120	1	5.81	5.49	164.8	132.5	648.0	32.3	546.8	36.29	510.5	2.277	12.14	79.41	8.45	20.6	59.0	230	6.65	758	0.910	690			210.00				
60	120	2	5.81	5.49	160.0	131.5	640.0	38.5	540.0	43.26	496.7	2.298	12.25	80.14	7.61	19.9	61.7	232	6.55	765	0.940	719			280.00				
60	120	3	5.81	5.49	167.0	132.0	622.0	35.0	550.0	39.3	475.7	2.317	12.35	80.79	6.86	19.2	64.3	231	6.30	761	1.010	769			260.00				
60	135	1	5.79	5.47	167.0	132.0	640.0	35.0	517.0	39.33	477.7	2.349	12.48	81.93	5.59	18.1	69.1	250	6.20	824	1.040	857			280.00				
60	135	2	5.79	5.47	168.0	134.8	646.5	33.2	521.5	37.30	484.2	2.344	12.45	81.75	5.80	18.3	68.2	250	6.35	824	0.990	816			320.00				
60	135	3	5.79	5.47	175.5	132.0	643.1	43.5	532.4	48.9	483.5	2.341	12.44	81.66	5.90	18.3	67.8	270	6.30	890	1.010	899			280.00				
60	150	1	5.76	5.45	1203.3	117.5	670.2	29.8	533.1	33.48	499.6	2.349	12.42	81.95	5.63	18.0	68.8	270	6.35	890	0.990	881			347.00				
60	150	2	5.76	5.45	1199.6	116.2	669.7	23.4	529.9	26.29	503.6	2.336	12.35	81.49	6.16	18.5	66.7	260	6.30	857	1.010	866			368.00				
60	150	3	5.76	5.45	1216.0	117.8	670.8	40.2	545.2	45.2	500.0	2.351	12.43	82.04	5.52	18.0	69.2	270	6.60	890	0.940	837			378.00				
75	90	1	5.75	5.44	135.9	110.7	622.3	34.2	513.6	38.43	475.2	2.319	12.24	80.90	6.86	19.1	64.1	185	6.40	610	0.990	604			264.00				
75	90	2	5.75	5.44	133.2	110.2	620.8	32.0	512.4	35.96	476.4	2.311	12.20	80.65	7.15	19.4	63.1	186	6.32	613	1.010	619			267.00				
75	90	3	5.75	5.44	134.2	110.0	621.3	31.2	512.9	35.1	477.8	2.308	12.19	80.55	7.27	19.5	62.6	190	6.31	626	1.010	633			270.00				
75	105	1	5.82	5.50	135.5	110.8	626.6	31.7	508.9	35.62	473.3	2.332	12.45	81.33	6.22	18.7	66.7	210	6.32	692	1.010	699			268.00				
75	105	2	5.82	5.50	133.8	110.8	626.3	33.0	507.5	37.08	470.4	2.340	12.50	81.60	5.91	18.4	67.9	215	6.31	709	1.010	716			270.00				
75	105	3	5.82	5.50	133.2	110.7	624.7	31.5	508.5	35.4	473.1	2.329	12.43	81.20	6.36	18.8	66.1	215	6.36	709	0.990	702			271.00				
75	120	1	5.81	5.49	165.8	124.4	643.0	31.4	512.8	35.28	477.5	2.355	12.55	82.12	5.33	17.9	70.2	235	6.28	775	1.010	782			299.00				
75	120	2	5.81	5.49	166.6	122.9	643.7	33.7	512.9	37.87	475.0	2.364	12.60	82.44	4.96	17.6	71.7	230	6.30	758	1.010	766			293.00				
75	120	3	5.81	5.49	167.3	122.8	644.6	34.5	512.7	38.8	473.9	2.369	12.63	82.62	4.75	17.4	72.7	235	6.29	775	1.010	782			297.00				
75	135	1	5.83	5.51	167.7	121.0	646.6	36.7	511.1	41.24	469.9	2.386	12.76	83.19	4.05	16.8	75.9	290	6.23	956	1.040	994			308.00				
75	135	2	5.83	5.51	165.0	124.0	647.3	31.0	507.7	34.83	472.9	2.377	12.71	82.88	4.41	17.1	74.3	285	6.27	939	1.010	949			308.00				
75	135	3	5.83	5.51	167.1	122.8	646.9	34.3	510.2	38.5	471.7	2.381	12.73	83.00	4.26	17.0	74.9	285	6.25	939	1.010	949			301.00				
75	150	1	5.86	5.54	161.9	127.8	648.8	34.1	513.1	38.31	474.8	2.375	12.77	82.80	4.43	17.2	74.2	280	6.31	923	1.010	932			322.00				
75	150	2	5.86	5.54	162.4	127.2	645.6	35.2	516.8	39.55	477.2	2.362	12.69	82.33	4.98	17.7	71.8	283	6.33	933	1.010	942			329.00				
75	150	3	5.86	5.54	161.9	130.0	648.7	31.9	513.2	35.8	477.4	2.367	12.72	82.52	4.76	17.5	72.8	280	6.39	923	0.990	914			322.00				
90	90	1	5.84	5.52	135.3	117.8	648.3	37.5	537.0	42.13	494.9	2.319	12.43	80.86	6.71	19.1	64.9	212	6.26	699	1.010	706			282.00				
90	90	2	5.84	5.52	136.2	117.8	649.8	38.4	536.4	43.15	493.3	2.327	12.47	81.13	6.41	18.9	66.1	212	6.26	699	1.010	706			279.00				
90	90	3	5.84	5.52	137.1	118.7	648.5	38.4	538.6	43.1	495.5	2.318	12.42	80.83	6.75	19.2	64.8	215	6.23	712	1.040	740			277.00				
90	105	1	5.76	5.45	178.3	118.3	656.2	30.0	522.1	33.71	488.4	2.351	12.43	82.03	5.53	18.0	69.2	236	6.28	778	1.010	786			301.00				
90	105	2	5.76	5.45	178.8	117.6	657.6	31.2	521.2	35.06	486.1	2.361	12.48	82.36	5.15	17.6	70.8	234	6.26	771	1.010	779			299.00				
90	105	3	5.76	5.45	179.9	119.5	656.8	30.4	523.1	34.2	488.9	2.351	12.43	82.03	5.54	18.0	69.2	238	6.27	784	1.010	792			302.00				
90	120	1	5.83	5.51	169.2	128.1	649.1	31.1	510.1	34.94	475.2	2.374	12.70	82.78	4.52	17.2	73.7	285	6.14	939	1.070	1005			312.00				
90	120	2	5.83	5.51	161.6	130.0	647.3	31.6	514.3	35.51	478.8	2.360	12.62	82.29	5.09	17.7	71.3	283	6.18	933	1.040	970			312.00				
90	120	3	5.83	5.51	160.2	127.9	650.9	32.3	509.3	36.3	473.0	2.385	12.75	83.14	4.10	16.9	75.7	287	6.15	946	1.040	984			310.00				
90	135	1	5.85	5.53	1276.6	1245.7	720.8	30.9	555.8	34.72	521.1	2.391	12.83	83.34	3.83	16.7	77.0	325	6.34	1071	1.010	1082			335.00				
90	135	2	5.85	5.53	1273.7	1244.3	719.6	29.4	554.1	33.03	521.1	2.388	12.81	83.25	3.94	16.8	76.5	322	6.31	1061	1.010	1072			330.00				
90	135	3	5.85	5.53	1276.8	1246.7	718.1	30.1	558.7	33.8	524.9	2.375	12.74	82.80	4.45	17.2	74.1	325	6.33	1071	1.010	1082			333.00				
90	150	1	5.80	5.48	182.4	159.0	667.3	23.4	515.1	26.29	488.8	2.371	12.62	82.70	4.68	17.3	72.9	322	6.35	1061	0.990	1051			340.00				
90	150	2	5.80	5.48	184.0	158.7	667.3	25.3	516.7	28.43	488.3	2.373	12.63	82.77	4.60	17.2	73.3												

Tabla 20. Resultados de los especímenes analizados para 105, 45 y 60 golpes.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA MAESTRÍA EN VÍAS TERRESTRES				COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y VOLUMÉTRICO DURANTE LA COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL																											
NÚMERO DE GOLPES	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN(°C)	PROBETA No.	% DECA. RESPECTUAL	% DECA. RESPECTUAL	P E S O (g r s)				VOLUMEN (c m ³)				PESO VOLUMETRIC (g r s / c m ³)	VOLUMENES % TOTAL			% VACIOS		ESTABILIDAD (k g)						FLUJO EN 0.01"	FLUJO EN mm	OBSERVACIONES				
					CON PARAFINA	SIN PARAFINA	CON PARAFINA	PARAFINA	CON PARAFINA	PARAFINA	ESPECIMEN	ESPECIMEN		CEMENTO ASFALTICO	MATERIAL PETREO	VACIOS	MATERIAL PETREO	PORCEL	MICRO	ESPECIMEN (cm)	ESTABILIDAD (kg)	FACTOR DE CORRECCION	ESTABILIDAD CORREGIDA								
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	l	m	n	p	q	r	s	t	u	v	w	y	z									
					c - d	c - e	f/Dp	g - h	100 d/i	$\frac{b}{100}$	$\frac{j-1000}{D.C.A}$	$\frac{100-b}{100}$	$\frac{j-1000}{D.C.T}$	100 - l - m	100 - m	l/p		s x r	*	*	u x v										
105	90	1	5.86	5.54	1168.8	1138.1	653.0	30.7	515.8	34.49	481.3	2.365	12.71	82.42	4.87	17.6	72.3	2.15	6.34	709	1010	716									
105	90	2	5.86	5.54	1168.7	1140.6	649.9	28.1	518.8	3157	487.2	2.341	12.58	8160	5.82	18.4	68.4	2.18	6.35	719	0.990	711									
105	90	3	5.86	5.54	1169.5	1141.7	650.8	27.8	518.7	312	487.5	2.342	12.59	8164	5.77	18.4	68.6	2.18	6.38	719	0.990	711									
105	105	1	5.75	5.44	11718	1145.6	657.0	26.2	514.8	29.44	485.4	2.360	12.46	82.36	5.18	17.6	70.6	2.16	6.41	778	0.990	770									
105	105	2	5.75	5.44	1168.7	1146.8	654.1	21.9	514.6	24.61	490.0	2.340	12.36	8167	5.98	18.3	67.4	2.14	6.46	771	0.960	740									
105	105	3	5.75	5.44	11711	1145.7	654.7	25.4	516.4	28.5	487.9	2.348	12.40	8195	5.66	18.1	68.7	2.18	6.49	784	0.960	753									
105	120	1	5.84	5.52	1182.9	1150.7	665.9	32.2	517.0	36.18	480.8	2.393	12.82	83.44	3.74	16.6	77.4	2.80	6.40	923	0.990	914									
105	120	2	5.84	5.52	11810	11512	663.4	29.8	517.6	33.48	484.1	2.378	12.74	82.91	4.36	17.1	74.5	2.78	6.40	916	0.990	907									
105	120	3	5.84	5.52	1183.4	1152.7	663.5	30.7	519.9	34.5	485.4	2.375	12.72	82.79	4.49	17.2	73.9	2.83	6.41	933	0.990	923									
105	135	1	5.82	5.50	1188.4	1152.4	668.2	36.0	520.2	40.45	479.8	2.402	12.83	83.76	3.41	16.2	79.0	3.08	6.39	1015	0.990	1005									
105	135	2	5.82	5.50	1184.4	11516	670.9	32.8	519.5	36.85	476.6	2.418	12.90	84.25	2.85	15.8	81.9	3.05	6.45	1005	0.960	965									
105	135	3	5.82	5.50	1187.9	1153.3	664.2	34.6	523.7	38.9	484.8	2.379	12.70	82.95	4.35	17.0	74.5	3.08	6.42	1015	0.990	1005									
105	150	1	5.80	5.48	1182.8	1158.1	667.2	24.7	515.6	27.75	487.8	2.374	12.63	82.80	4.57	17.2	73.4	3.22	6.36	1061	0.990	1051									
105	150	2	5.80	5.48	1182.5	1159.7	665.7	22.8	518.8	25.62	491.2	2.361	12.57	82.35	5.09	17.7	71.2	3.20	6.35	1055	0.990	1044									
105	150	3	5.80	5.48	1186.8	1160.8	664.8	26.0	522.0	29.2	492.8	2.356	12.54	82.36	5.31	17.8	70.3	3.18	6.36	1048	0.990	1038									
45	90	1	5.83	5.51	1197.0	1169.2	669.5	27.8	527.5	31.24	496.3	2.356	12.60	82.35	5.25	17.9	70.6	1.80	6.35	593	0.990	587									
45	90	2	5.83	5.51	11919	1168.5	672.5	23.4	519.4	26.31	493.1	2.370	12.67	82.63	4.70	17.4	73.0	2.10	6.20	692	1040	720									
45	90	3	5.83	5.51	1207.8	1169.0	673.9	38.8	533.9	43.6	490.3	2.384	12.75	83.13	4.12	16.9	75.6	2.20	6.20	725	1040	754									
45	105	1	5.79	5.47	1197.0	1169.2	669.5	27.8	527.5	31.24	496.3	2.356	12.52	82.18	5.30	17.8	70.3	2.00	6.40	659	0.990	653									
45	105	2	5.79	5.47	11919	1168.5	672.5	23.4	519.4	26.31	493.1	2.370	12.59	82.66	4.75	17.3	72.6	1.80	6.30	626	1010	633									
45	105	3	5.79	5.47	1207.8	1169.0	673.9	38.8	533.9	43.6	490.3	2.384	12.67	83.16	4.17	16.8	75.2	2.30	6.25	758	1010	766									
45	120	1	5.78	5.46	1197.0	1169.2	669.5	27.8	527.5	31.24	496.3	2.356	12.50	82.19	5.31	17.8	70.2	1.80	6.35	593	0.990	587									
45	120	2	5.78	5.46	11919	1168.5	672.5	23.4	519.4	26.31	493.1	2.370	12.57	82.67	4.76	17.3	72.5	2.00	6.30	659	1010	666									
45	120	3	5.78	5.46	1207.8	1169.0	673.9	38.8	533.9	43.6	490.3	2.384	12.65	83.17	4.18	16.8	75.2	2.20	6.25	725	1010	732									
45	135	1	5.80	5.48	11910	1163.2	669.5	27.8	521.5	31.24	490.3	2.373	12.63	82.75	4.62	17.2	73.2	2.65	6.25	873	1010	882									
45	135	2	5.80	5.48	1185.9	1162.5	672.5	23.4	513.4	26.31	487.1	2.387	12.70	83.24	4.06	16.8	75.8	2.67	6.20	880	1040	915									
45	135	3	5.80	5.48	12018	1163.0	673.9	38.8	527.9	43.6	484.3	2.401	12.78	83.75	3.46	16.2	78.7	2.59	6.30	854	1010	862									
45	150	1	5.79	5.47	1197.0	1169.2	669.5	27.8	527.5	31.24	496.3	2.356	12.52	82.18	5.30	17.8	70.3	2.50	6.25	824	1010	832									
45	150	2	5.79	5.47	11919	1168.5	672.5	23.4	519.4	26.31	493.1	2.370	12.59	82.66	4.75	17.3	72.6	2.60	6.30	857	1010	866									
45	150	3	5.79	5.47	1207.8	1169.0	673.9	38.8	533.9	43.6	490.3	2.384	12.67	83.16	4.17	16.8	75.2	2.90	6.40	956	0.990	946									
60	90	1	5.78	5.46	1190.0	1162.2	669.5	27.8	520.5	31.24	489.3	2.375	12.60	82.86	4.53	17.1	73.5	2.10	6.45	692	0.960	664									
60	90	2	5.78	5.46	1184.9	11615	672.5	23.4	512.4	26.31	486.1	2.389	12.68	83.35	3.97	16.6	76.2	2.10	6.45	692	0.960	664									
60	90	3	5.78	5.46	1200.8	1162.0	673.9	38.8	526.9	43.6	483.3	2.404	12.75	83.87	3.37	16.1	79.1	2.10	6.45	692	0.960	664									
60	105	1	5.79	5.47	1190.0	1162.2	669.5	27.8	520.5	31.24	489.3	2.375	12.62	82.86	4.52	17.1	73.6	1.80	6.40	626	0.990	620									
60	105	2	5.79	5.47	1184.9	11615	672.5	23.4	512.4	26.31	486.1	2.389	12.70	83.35	3.96	16.7	76.2	1.80	6.35	593	0.990	587									
60	105	3	5.79	5.47	1200.8	1162.0	673.9	38.8	526.9	43.6	483.3	2.404	12.78	83.86	3.36	16.1	79.2	1.70	6.15	560	1040	583									
60	120	1	5.84	5.52	1190.0	1162.2	669.5	27.8	520.5	31.24	489.3	2.375	12.73	82.82	4.46	17.2	74.1	2.20	6.35	725	0.990	718									
60	120	2	5.84	5.52	1184.9	11615	672.5	23.4	512.4	26.31	486.1	2.389	12.80	83.31	3.89	16.7	76.7	2.60	6.25	857	1010	866									
60	120	3	5.84	5.52	1200.8	1162.0	673.9	38.8	526.9	43.6	483.3	2.404	12.88	83.82	3.30	16.2	79.6	2.40	6.35	791	0.990	783									
60	135	1	5.77	5.46	1187.0	1159.2	669.5	27.8	517.5	31.24	486.3	2.384	12.63	83.17	4.21	16.8	75.0	2.90	6.30	956	1010	965									
60	135	2	5.77	5.46	11819	1158.5	672.5	23.4	509.4	26.31	483.1	2.398	12.70	83.66	3.64	16.3	77.7	3.20	6.30	1055	1010	1065									
60	135	3	5.77	5.46	1197.8	1159.0	673.9	38.8	523.9	43.6	480.3	2.413	12.78	84.19	3.03	15.8	80.8	3.10	6.30	1022	1010	1032									
60	150	1	5.81	5.49	1212.5	1182.5	675.8	30.0	536.7	33.71	503.0	2.351	12.53	81.99	5.08	16.0	69.6	2.60	6.45	857	0.960	823									
60	150	2	5.81	5.49	1206.6	1179.6	673.6	27.0	533.0	30.36	502.7	2.347	12.51	81.84	5.65	16.2	68.9	2.50	6.20	824	1040	857									
60	150	3	5.81	5.49	1205.8	1176.5	675.4	29.3	530.4	32.9	497.5	2.365	12.61	82.47	4.92	17.1	71.9	2.55	6.30	840	1010	849									

Tabla 21. Resultados de los especímenes analizados para 75, 90 y 105 golpes.

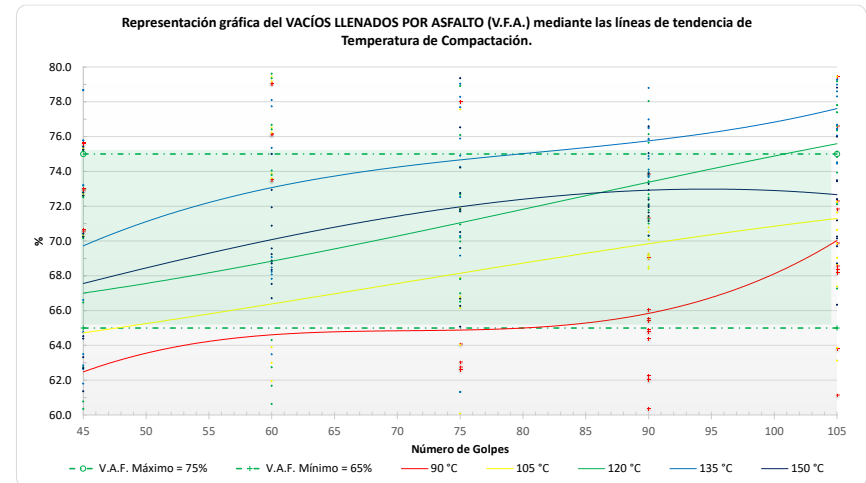
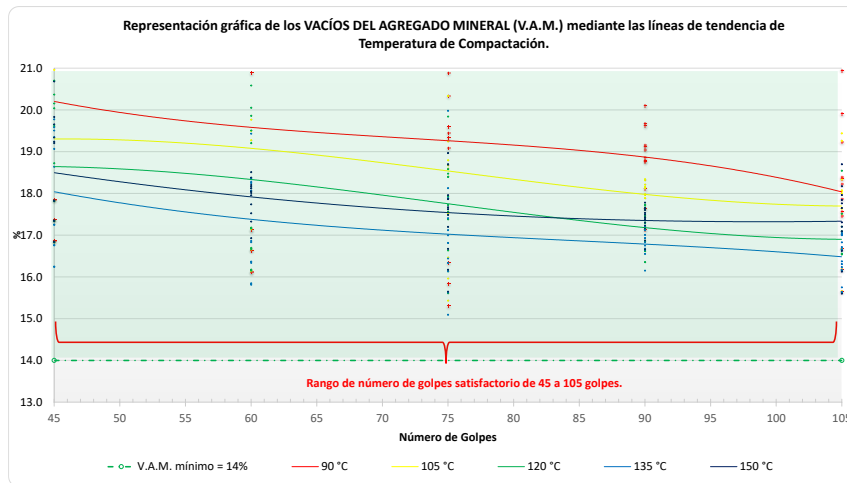
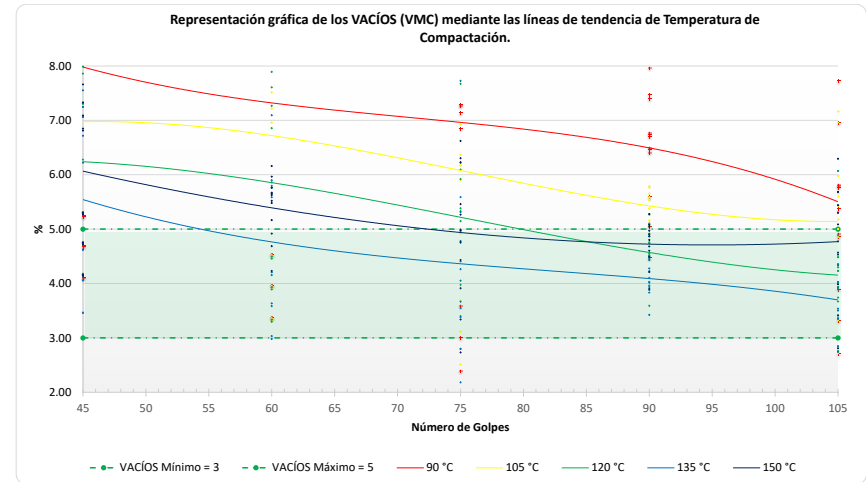
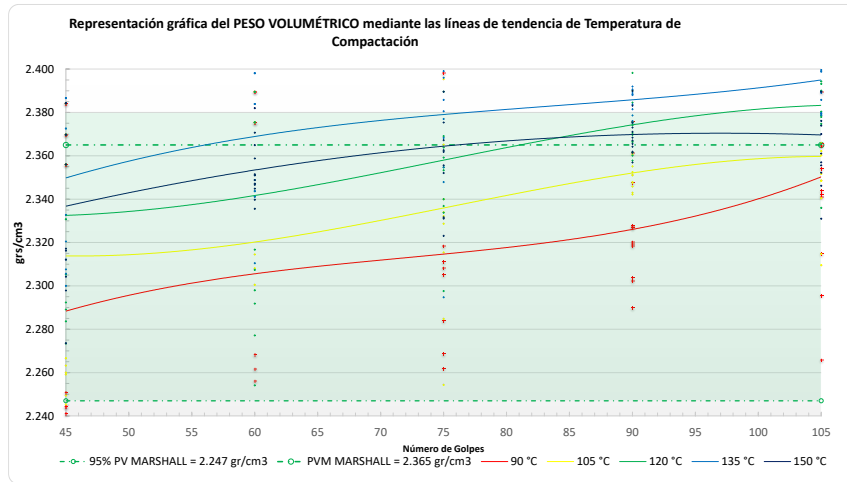
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA MAESTRÍA EN VÍAS TERRESTRES										COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y VOLUMÉTRICO DURANTE LA COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL																				
NÚMERO DE GOLPES	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	PROBETA No.	% DECA.	% DECA.	P E S O (grs)				VOLUMEN (cm ³)				PESO VOLUMÉTRICO (grs/cm ³)	VOLUMENES % TOTAL			% VACIOS		ESTABILIDAD (kg)						FLUJO EN 0.01"	FLUJO EN mm	OBSERVACIONES			
			EN PESO RESPECTO AL AGREGADO	EN PESO RESPECTO A LA MEZCLA	ESPECIMEN CON PARAFINA EN AIRE	ESPECIMEN SIN PARAFINA EN AIRE	ESPECIMEN CON PARAFINA EN AGUA	PARAFINA	ESPECIMEN CON PARAFINA	PARAFINA	ESPECIMEN CON PARAFINA	PARAFINA		ESPECIMEN CON PARAFINA	ESPECIMEN SIN PARAFINA	ESPECIMEN CON PARAFINA	ESPECIMEN SIN PARAFINA	CEMENTO ASFALTICO	MATERIAL PETREO	VACIOS	MATERIAL PETREO	LLENADOS POR EL METRO	LECTURA MICRO	ALTURA ESPECIMEN (cm)				ESTABILIDAD (kg)	FACTOR DE CORRECCION POR ALTURA	ESTABILIDAD CORREGIDA
			a	b	c	d	e	f	g	h	i	j		l	m	n	p	q	r	s	t	u	v	w				x	y	z
								c - d	c - e	f/Dp	g - h	1000 d / i		$\frac{b}{100} \cdot \frac{j}{1000}$ D.C.A.	$\frac{100-b}{100} \cdot \frac{2j}{1000}$ D.C.I.	100 - l - m	100 - m	l / p			s x r	**		u x v						
75	90	1	5.80	5.48	1182.0	1154.2	669.5	27.8	512.5	3124	4813	2.398	12.76	83.65	3.59	15.4	78.0	170	6.70	560	0.910	510			230.00					
75	90	2	5.80	5.48	1176.9	1153.5	672.5	23.4	504.4	26.31	478.1	2.413	12.84	84.15	3.01	15.9	81.0	180	6.60	593	0.940	558			230.00					
75	90	3	5.80	5.48	1182.8	1154.0	673.9	38.8	518.9	43.6	475.3	2.428	12.92	84.68	2.40	15.3	84.3	170	6.60	560	0.940	527			230.00					
75	105	1	5.81	5.49	1183.0	1155.2	669.5	27.8	513.5	3124	482.3	2.395	12.77	83.54	3.69	15.5	77.6	220	6.50	725	0.960	696			270.00					
75	105	2	5.81	5.49	1177.9	1154.5	672.5	23.4	505.4	26.31	479.1	2.410	12.85	84.04	3.12	15.0	80.5	230	6.35	758	0.990	750			260.00					
75	105	3	5.81	5.49	1183.8	1155.0	673.9	38.8	519.9	43.6	476.3	2.425	12.93	84.57	2.51	15.4	83.8	230	6.50	758	0.960	728			290.00					
75	120	1	5.77	5.46	1185.0	1157.2	669.5	27.8	515.5	3124	484.3	2.390	12.66	83.37	3.98	15.6	76.1	230	6.40	758	0.990	750			290.00					
75	120	2	5.77	5.46	1179.9	1156.5	672.5	23.4	507.4	26.31	481.1	2.404	12.73	83.87	3.40	15.1	78.9	170	6.35	560	0.990	555			310.00					
75	120	3	5.77	5.46	1185.8	1157.0	673.9	38.8	521.9	43.6	478.3	2.419	12.81	84.39	2.80	15.6	82.1	180	6.35	626	0.990	620			290.00					
75	135	1	5.78	5.46	1180.0	1152.2	669.5	27.8	510.5	3124	479.3	2.404	12.75	83.86	3.38	15.1	79.0	270	6.40	890	0.990	881			260.00					
75	135	2	5.78	5.46	1174.9	1151.5	672.5	23.4	502.4	26.31	476.1	2.419	12.83	84.37	2.80	15.6	82.1	280	6.35	923	0.990	914			300.00					
75	135	3	5.78	5.46	1180.8	1152.0	673.9	38.8	516.9	43.6	473.3	2.434	12.91	84.91	2.31	15.1	85.5	280	6.35	923	0.990	914			350.00					
75	150	1	5.82	5.50	1185.0	1157.2	669.5	27.8	515.5	3124	484.3	2.390	12.76	83.33	3.91	15.7	76.5	260	6.40	857	0.990	848			315.00					
75	150	2	5.82	5.50	1179.9	1156.5	672.5	23.4	507.4	26.31	481.1	2.404	12.84	83.83	3.34	15.2	79.4	290	6.50	956	0.960	918			305.00					
75	150	3	5.82	5.50	1185.8	1157.0	673.9	38.8	521.9	43.6	478.3	2.419	12.92	84.35	2.73	15.6	82.5	280	6.45	923	0.960	886			357.00					
90	90	1	5.81	5.49	1200.0	1172.2	669.5	27.8	530.5	3124	499.3	2.348	12.52	81.88	5.60	15.1	69.1	200	6.30	659	1.010	666			230.00					
90	90	2	5.81	5.49	1194.9	1171.5	672.5	23.4	522.4	26.31	496.1	2.361	12.59	82.35	5.06	17.6	71.3	210	6.40	692	0.990	685			270.00					
90	90	3	5.81	5.49	1210.8	1172.0	673.9	38.8	536.9	43.6	493.3	2.376	12.67	82.85	4.48	17.1	73.9	180	6.30	626	1.010	633			230.00					
90	105	1	5.82	5.50	1200.0	1172.2	669.5	27.8	530.5	3124	499.3	2.348	12.54	81.87	5.59	15.1	69.2	200	6.40	659	0.990	653			260.00					
90	105	2	5.82	5.50	1194.9	1171.5	672.5	23.4	522.4	26.31	496.1	2.361	12.61	82.35	5.04	17.7	71.4	210	6.45	692	0.960	664			260.00					
90	105	3	5.82	5.50	1210.8	1172.0	673.9	38.8	536.9	43.6	493.3	2.376	12.69	82.85	4.47	17.2	74.0	180	6.30	626	1.010	633			340.00					
90	120	1	5.77	5.46	1185.0	1157.2	669.5	27.8	525.5	3124	494.3	2.361	12.51	82.39	5.11	17.6	71.0	260	6.50	857	0.960	823			310.00					
90	120	2	5.77	5.46	1189.9	1156.5	672.5	23.4	517.4	26.31	491.1	2.375	12.58	82.87	4.55	17.1	73.4	300	6.35	989	0.990	979			290.00					
90	120	3	5.77	5.46	1205.8	1157.0	673.9	38.8	531.9	43.6	488.3	2.390	12.66	83.38	3.96	15.6	76.1	280	6.40	923	0.990	914			290.00					
90	150	1	5.82	5.50	1185.0	1157.2	669.5	27.8	525.5	3124	494.3	2.361	12.61	82.35	5.04	17.7	71.4	320	6.50	1055	0.960	1013			343.00					
90	150	2	5.82	5.50	1189.9	1156.5	672.5	23.4	517.4	26.31	491.1	2.375	12.68	82.83	4.49	17.2	73.9	290	6.50	956	0.960	918			338.00					
90	150	3	5.82	5.50	1205.8	1157.0	673.9	38.8	531.9	43.6	488.3	2.390	12.76	83.34	3.90	15.7	76.6	280	6.35	923	0.990	914			339.00					
90	135	1	5.79	5.47	1277.5	1247.5	718.7	30.0	558.8	33.71	525.1	2.376	12.62	82.87	4.51	17.1	73.7	310	6.30	1022	1.010	1032			390.00					
90	135	2	5.79	5.47	1275.5	1246.5	719.5	29.0	556.0	32.58	523.4	2.381	12.65	83.07	4.28	16.9	74.7	310	6.40	1022	0.990	1012			300.00					
90	135	3	5.79	5.47	1276.4	1245.5	717.5	30.9	558.9	34.7	524.2	2.376	12.63	82.88	4.49	17.1	73.7	270	6.25	890	1.010	899			330.00					
105	90	1	5.83	5.51	1185.0	1157.2	669.5	27.8	515.5	3124	484.3	2.390	12.78	83.32	3.90	15.7	76.6	230	6.35	758	0.990	750			260.00					
105	90	2	5.83	5.51	1179.9	1156.5	672.5	23.4	507.4	26.31	481.1	2.404	12.86	83.82	3.32	15.2	79.5	210	6.30	692	1.010	699			280.00					
105	90	3	5.83	5.51	1185.8	1157.0	673.9	38.8	521.9	43.6	478.3	2.419	12.94	84.34	2.72	15.7	82.6	180	6.40	626	0.990	620			270.00					
105	105	1	5.83	5.51	1185.0	1157.2	669.5	27.8	515.5	3124	484.3	2.390	12.78	83.32	3.90	15.7	76.6	210	6.40	692	0.990	685			300.00					
105	105	2	5.83	5.51	1179.9	1156.5	672.5	23.4	507.4	26.31	481.1	2.404	12.86	83.82	3.32	15.2	79.5	180	6.45	626	0.960	601			300.00					
105	105	3	5.83	5.51	1185.8	1157.0	673.9	38.8	521.9	43.6	478.3	2.419	12.94	84.34	2.72	15.7	82.6	170	6.50	560	0.960	538			270.00					
105	120	1	5.80	5.48	1185.0	1157.2	669.5	27.8	515.5	3124	484.3	2.390	12.72	83.34	3.94	15.7	76.4	230	6.30	758	1.010	766			350.00					
105	120	2	5.80	5.48	1179.9	1156.5	672.5	23.4	507.4	26.31	481.1	2.404	12.79	83.84	3.36	15.2	79.2	260	6.35	857	0.990	848			360.00					
105	120	3	5.80	5.48	1185.8	1157.0	673.9	38.8	521.9	43.6	478.3	2.419	12.87	84.37	2.76	15.6	82.4	300	6.50	989	0.960	949			360.00					
105	135	1	5.81	5.49	1185.0	1157.2	669.5	27.8	515.5	3124	484.3	2.390	12.74	83.34	3.93	15.7	76.4	250	6.40	824	0.990	816			320.00					
105	135	2	5.81	5.49	1179.9	1156.5	672.5	23.4	507.4	26.31	481.1	2.404	12.82	83.83	3.35	15.2	79.3	340	6.50	1021	0.960	1076			280.00					
105	135	3	5.81	5.49	1185.8	1157.0	673.9	38.8	521.9	43.6	478.3	2.419	12.90	84.36	2.75	15.6	82.4	340	6.50	1021	0.960	1076			300.00					
105	150	1	5.76	5.45	1185.0	1157.2	669.5	27.8	515.5	3124	484.3	2.390	12.64	83.37	3.99	15.6	76.0	320	6.50	1055	0.960	1013			363.00					
105	150	2	5.76																											

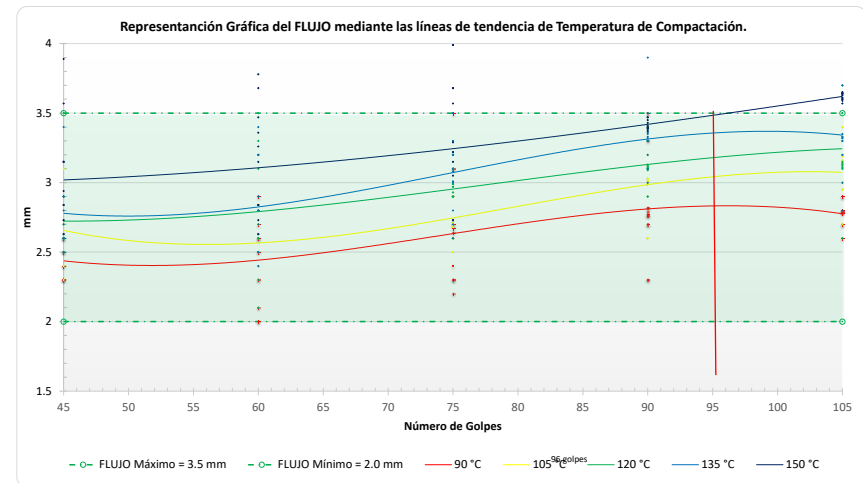
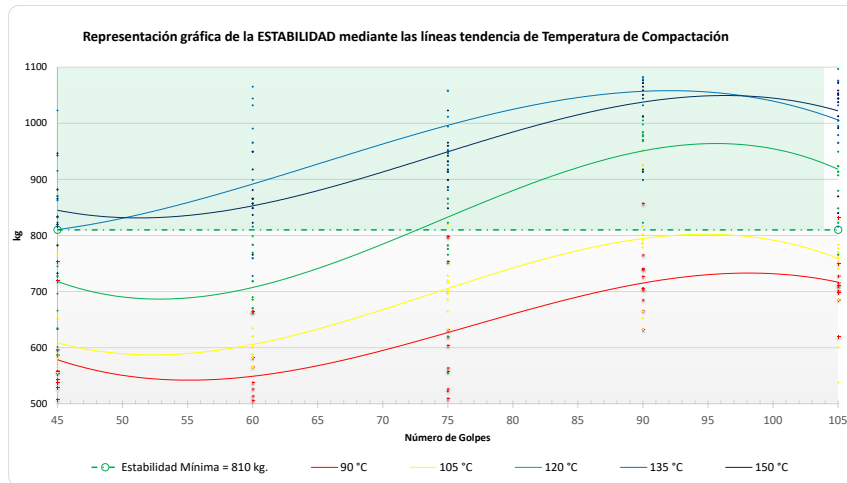
Tabla 22. Resultados de los especímenes analizados para 45, 60 y 75 golpes.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA MAESTRÍA EN VÍAS TERRESTRES					COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y VOLUMÉTRICO DURANTE LA COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL																						
NÚMERO DE GOLPES	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	PROBETA No.	% DECA. EN PESO RESPECTO AL AGREGADO	% DECA. EN PESO RESPECTO A LA MEZCLA	P E S O (grs)				VOLUMEN (cm³)			PESO VOLUMETRICO (grs / cm³)	VOLUMENES % TOTAL			% VACIOS		ESTABILIDAD (kg)						FLUJO EN 0.01"	FLUJO EN mm	OBSERVACIONES	
			ESPECIMEN CON PARAFINA	ESPECIMEN SIN PARAFINA	ESPECIMEN CON PARAFINA	ESPECIMEN PARAFINA	ESPECIMEN CON PARAFINA	ESPECIMEN SIN PARAFINA	ESPECIMEN SIN PARAFINA	CEMENTO ASFALTICO	MATERIAL PETREO		VACIOS	MATERIAL PETREO	LLENADOS POR EL MICRO	LECTURA ESPECIMEN (kg)	ESTABILIDAD (kg)	FACTOR DE CORRECCION	ESTABILIDAD CORREGIDA								
			EN AIRE	EN AIRE	EN AGUJA		CON PARAFINA																				
			a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z
								c - d	e - f	f/Dp	g - h	1000 d / i	b / 100	1 / 1000 D.C.A.	100-b / 100 D.C.L.	100 - i - m	100 - m	l / p			s x r	**		u x v			
45	90	1	5.84	5.52	1197.0	1199.2	669.5	27.8	527.5	3124	496.3	2.356	12.62	82.14	5.24	17.9	70.7	180	6.55	593	0.940	558				230.00	
45	90	2	5.84	5.52	1191.9	1198.5	672.5	23.4	519.4	26.31	493.1	2.370	12.69	82.62	4.69	17.4	73.0	170	6.50	560	0.960	538				240.00	
45	90	3	5.84	5.52	1207.8	1199.0	673.9	38.8	533.9	43.6	490.3	2.384	12.77	83.12	4.10	16.9	75.7	170	6.40	560	0.990	555				260.00	
45	105	1	5.80	5.48	1197.0	1199.2	669.5	27.8	527.5	3124	496.3	2.356	12.54	82.17	5.29	17.8	70.3	170	6.35	560	0.990	555				250.00	
45	105	2	5.80	5.48	1191.9	1198.5	672.5	23.4	519.4	26.31	493.1	2.370	12.61	82.65	4.74	17.3	72.7	180	6.35	593	0.990	587				270.00	
45	105	3	5.80	5.48	1207.8	1199.0	673.9	38.8	533.9	43.6	490.3	2.384	12.69	83.16	4.15	16.8	75.3	160	6.40	527	0.990	522				260.00	
45	120	1	5.79	5.47	1197.0	1199.2	669.5	27.8	527.5	3124	496.3	2.356	12.52	82.18	5.30	17.8	70.3	180	6.45	626	0.960	601				260.00	
45	120	2	5.79	5.47	1191.9	1198.5	672.5	23.4	519.4	26.31	493.1	2.370	12.59	82.66	4.75	17.3	72.6	220	6.45	725	0.960	696				260.00	
45	120	3	5.79	5.47	1207.8	1199.0	673.9	38.8	533.9	43.6	490.3	2.384	12.67	83.16	4.17	16.8	75.2	240	6.40	791	0.990	783				250.00	
45	135	1	5.80	5.48	1191.0	1193.2	669.5	27.8	521.5	3124	490.3	2.373	12.63	82.75	4.62	17.2	73.2	250	6.40	824	0.990	816				290.00	
45	135	2	5.80	5.48	1185.9	1192.5	672.5	23.4	513.4	26.31	487.1	2.387	12.70	83.24	4.06	16.8	75.8	230	6.50	758	0.960	728				260.00	
45	135	3	5.80	5.48	1201.8	1193.0	673.9	38.8	527.9	43.6	484.3	2.401	12.78	83.75	3.46	16.2	78.7	260	6.25	857	1.010	866				340.00	
45	150	1	5.81	5.49	1197.0	1199.2	669.5	27.8	527.5	3124	496.3	2.356	12.56	82.16	5.28	17.8	70.4	240	6.20	791	1.040	823				389.00	
45	150	2	5.81	5.49	1191.9	1198.5	672.5	23.4	519.4	26.31	493.1	2.370	12.63	82.64	4.72	17.4	72.8	220	6.30	725	1.010	732				357.00	
45	150	3	5.81	5.49	1207.8	1199.0	673.9	38.8	533.9	43.6	490.3	2.384	12.71	83.15	4.14	16.9	75.4	250	6.35	824	0.990	816				273.00	
60	90	1	5.78	5.46	1190.0	1192.2	669.5	27.8	520.5	3124	489.3	2.375	12.60	82.86	4.53	17.1	73.5	170	6.55	560	0.940	527				290.00	
60	90	2	5.78	5.46	1184.9	1191.5	672.5	23.4	512.4	26.31	486.1	2.389	12.68	83.35	3.97	16.6	76.2	160	6.55	527	0.940	496				260.00	
60	90	3	5.78	5.46	1200.8	1192.0	673.9	38.8	526.9	43.6	483.3	2.404	12.75	83.87	3.37	16.1	79.1	160	6.35	494	0.990	489				270.00	
60	105	1	5.82	5.50	1190.0	1192.2	669.5	27.8	520.5	3124	489.3	2.375	12.68	82.83	4.48	17.2	73.9	210	6.35	692	0.990	685				270.00	
60	105	2	5.82	5.50	1184.9	1191.5	672.5	23.4	512.4	26.31	486.1	2.389	12.76	83.32	3.92	16.7	76.5	180	6.50	626	0.960	601				250.00	
60	105	3	5.82	5.50	1200.8	1192.0	673.9	38.8	526.9	43.6	483.3	2.404	12.84	83.84	3.32	16.2	79.4	180	6.50	626	0.960	601				250.00	
60	120	1	5.81	5.49	1190.0	1192.2	669.5	27.8	520.5	312	489.3	2.375	12.66	82.84	4.50	17.2	73.8	240	6.30	791	1.010	799				320.00	
60	120	2	5.81	5.49	1184.9	1191.5	672.5	23.4	512.4	26.3	486.1	2.389	12.74	83.33	3.93	16.7	76.4	240	6.45	791	0.960	759				330.00	
60	120	3	5.81	5.49	1200.8	1192.0	673.9	38.8	526.9	43.6	483.3	2.404	12.82	83.85	3.34	16.2	79.4	240	6.40	791	0.990	783				350.00	
60	135	1	5.81	5.49	1197.0	1199.2	669.5	27.8	517.5	312	486.3	2.384	12.71	83.14	4.15	16.9	75.4	289	6.15	953	1.040	991				340.00	
60	135	2	5.81	5.49	1191.9	1198.5	672.5	23.4	509.4	26.3	483.1	2.398	12.78	83.63	3.58	16.4	78.1	290	6.30	956	1.010	965				290.00	
60	135	3	5.81	5.49	1197.8	1199.0	673.9	38.8	523.9	43.6	480.3	2.413	12.86	84.15	2.98	15.8	812	320	6.35	1055	0.990	1044				320.00	
60	150	1	5.81	5.49	1207.4	1174.5	672.5	32.9	534.9	37.0	497.9	2.359	12.57	82.26	5.17	17.7	70.9	290	6.50	956	0.960	918				326.00	
60	150	2	5.81	5.49	1209.0	1199.3	673.5	39.7	535.5	44.6	490.9	2.382	12.70	83.07	4.23	16.9	75.0	300	6.45	989	0.960	949				315.00	
60	150	3	5.81	5.49	1211.0	1172.0	672.8	39.0	538.2	43.8	494.4	2.371	12.64	82.67	4.69	17.3	72.9	300	6.45	989	0.960	949				336.00	
75	90	1	5.82	5.50	1122.0	1089.4	605.2	32.6	518.8	36.6	490.2	2.269	12.11	79.11	8.77	20.9	58.0	240	6.25	791	1.010	799				350.00	
75	90	2	5.82	5.50	1118.0	1084.0	600.6	34.0	517.4	38.2	479.2	2.262	12.08	78.88	9.04	21.1	57.2	240	6.30	791	1.010	799				270.00	
75	90	3	5.82	5.50	1124.5	1093.0	615.0	31.5	509.5	35.4	474.1	2.305	12.31	80.39	7.30	19.6	62.8	220	6.20	725	1.040	754				310.00	
75	105	1	5.83	5.51	1132.3	1098.8	602.5	33.5	529.8	37.6	492.2	2.233	11.94	77.85	10.21	22.2	53.9	210	6.50	692	0.960	664				260.00	
75	105	2	5.83	5.51	1131.4	1100.5	608.5	30.9	522.9	34.7	488.2	2.254	12.06	78.60	9.34	21.4	56.3	220	6.50	725	0.960	696				260.00	
75	105	3	5.83	5.51	1136.0	1103.5	615.5	32.5	519.5	36.5	483.0	2.285	12.22	79.66	8.12	20.3	60.1	210	6.35	692	0.990	685				290.00	
75	120	1	5.77	5.46	1146.3	1114.5	625.5	31.8	520.8	35.7	485.1	2.298	12.17	80.15	7.67	19.8	61.3	260	6.30	857	1.010	866				320.00	
75	120	2	5.77	5.46	1157.3	1125.5	639.3	31.8	518.0	35.7	482.3	2.334	12.36	81.42	6.22	18.6	66.5	260	6.30	857	1.010	866				290.00	
75	120	3	5.77	5.46	1156.0	1118.6	635.3	37.4	520.7	42.0	478.7	2.337	12.38	81.53	6.10	18.5	67.0	280	6.35	923	0.990	914				310.00	
75	135	1	5.82	5.50	1151.0	1120.8	639.7	30.2	511.3	33.9	477.4	2.348	12.54	81.87	5.59	18.1	69.2	270	6.20	890	1.040	926				330.00	
75	135	2	5.82	5.50	1160.0	1129.7	646.2	30.3	513.8	34.0	479.8	2.355	12.57	82.11	5.31	17.9	70.3	290	6.35	956	0.990	946				320.00	
75	135	3	5.82	5.50	1171.5	1111.0	640.0	30.5	531.5	34.3	497.2	2.295	12.25	80.02	7.73	20.0	61.3	310	6.35	1022	0.990	1012				320.00	
75	150	1	5.83	5.51	1176.0	1142.4	654.7	3																			

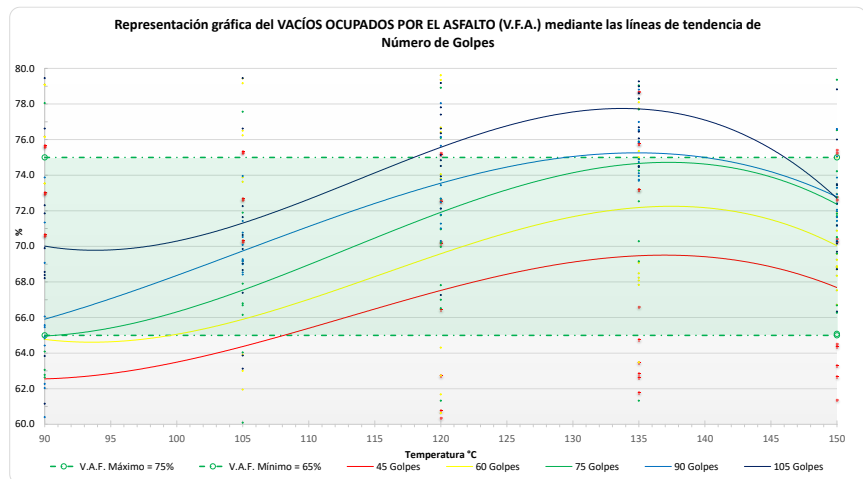
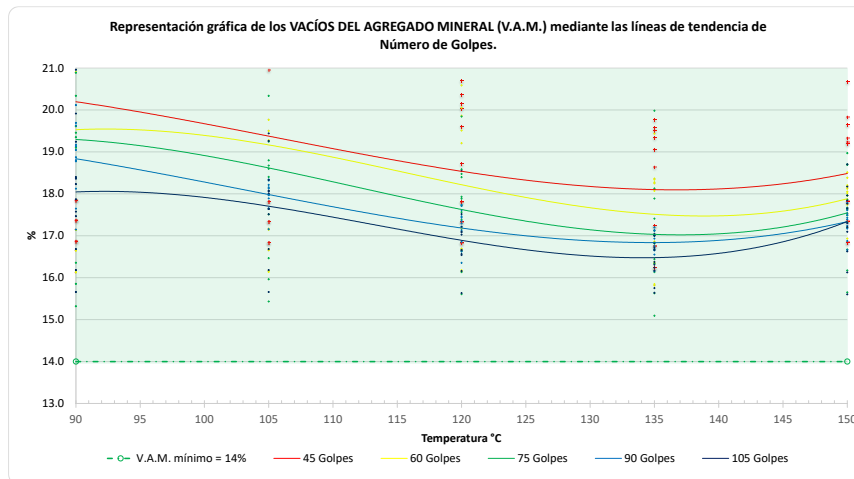
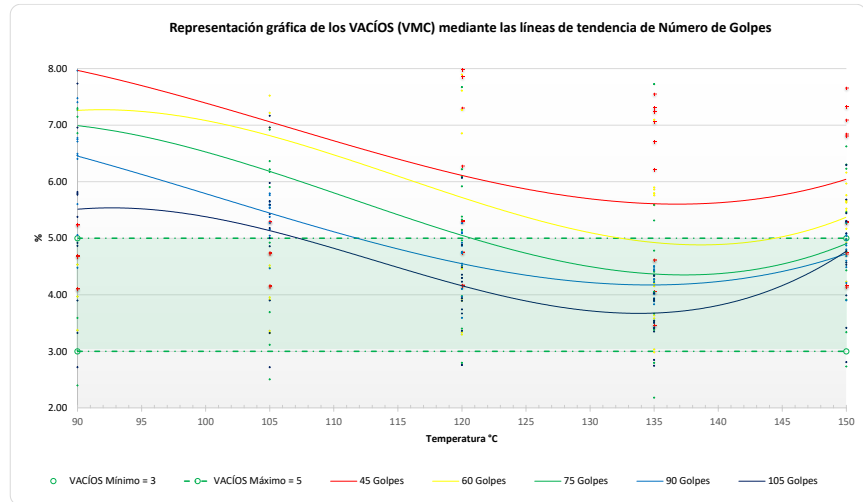
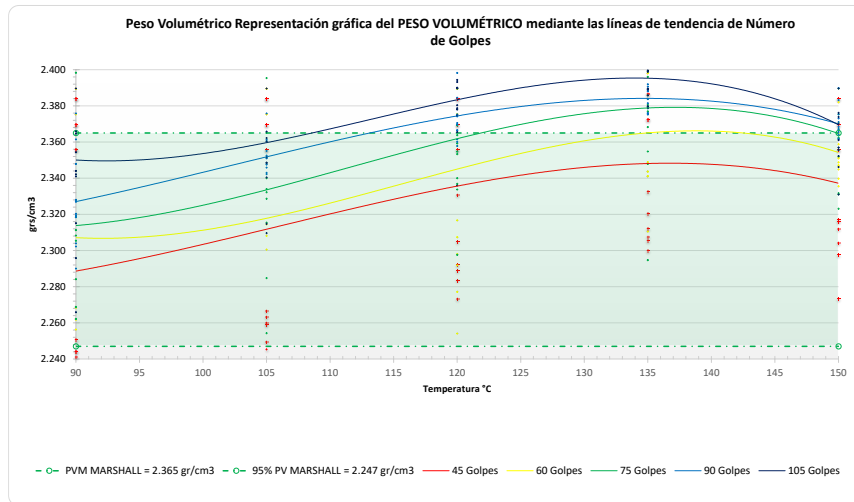
Tabla 23. Resultados de los especímenes analizados para 90 y 105 golpes.

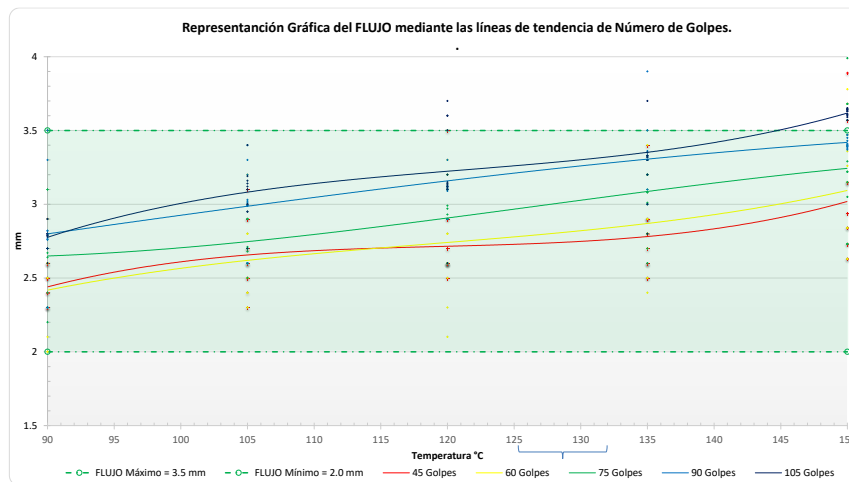
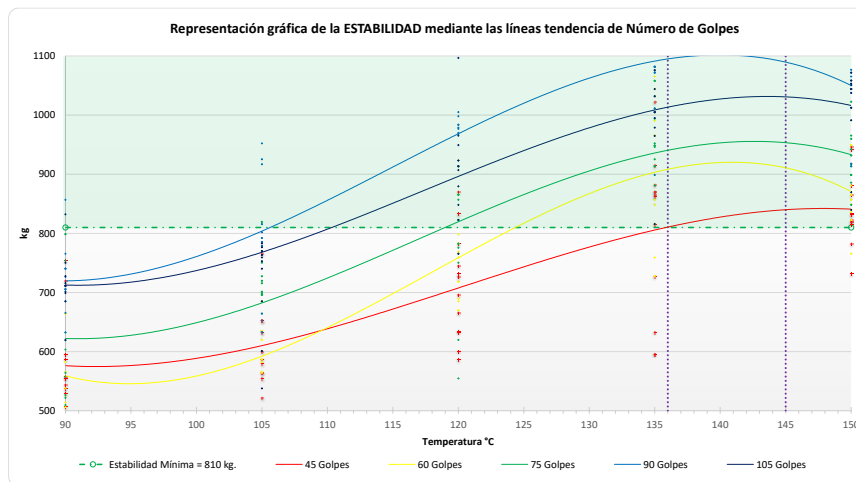
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA MAESTRÍA EN VÍAS TERRESTRES										COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y VOLUMÉTRICO DURANTE LA COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL																		
NÚMERO DE GOLPES	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	PROBETA No.	% DECA. EN PESO	% DECA. EN PESO	P E S O (grs)				VOLUMEN (cm ³)			PESO VOLUMETRICO	VOLUMENES % TOTAL			% VACIOS		ESTABILIDAD (kg)						FLUJO EN 0.01"	FLUJO EN mm	OBSERVACIONES		
			RESPECTO AL AGREGADO	RESPECTO A LA MEZCLA	CON PARAFINA EN AIRE	SIN PARAFINA EN AIRE	CON PARAFINA EN AGUA	PARAFINA	CON PARAFINA	PARAFINA	ESPECIMEN		CEMENTO ASFALTICO	MATERIAL PETREO	VACIOS	MATERIAL PETREO	POREL	MICRO-ESPECIMEN	ALTURA (cm)	ESTABILIDAD (kg)	FACTOR DE CORRECCION	ESTABILIDAD CORREGIDA						
			a	b	c	d	e	f	g	h	i		j	l	m	n	p	q	s	t	u	v	w				y	z
								c - d	c - e	f/Dp	g - h	1000 d / i	$\frac{b}{100}$	$\frac{j-1000}{D.C.A.}$	$\frac{100-h}{100}$	$\frac{j-1000}{D.C.L.}$	100 - l - m	100 - m	l / p			s x r	**	u x v				
90	90	1	5.76	5.45	1189.3	1149.4	649.1	39.9	540.2	44.83	495.4	2.320	12.27	80.96	6.77	19.0	64.4	212	6.23	699	1040	727		276.00				
90	90	2	5.76	5.45	1187.0	1148.0	649.9	39.0	537.1	43.82	493.3	2.327	12.31	81.20	6.49	18.8	65.5	212	6.27	699	1010	706		276.00				
90	90	3	5.76	5.45	1188.1	1149.7	651.1	38.4	537.0	43.1	493.9	2.328	12.31	81.23	6.46	18.8	65.6	216	6.24	712	1040	740		282.00				
90	105	1	5.84	5.52	1179.8	1149.1	654.7	30.7	525.1	34.49	490.6	2.342	12.55	81.66	5.79	18.3	68.4	236	6.27	778	1010	786		303.00				
90	105	2	5.84	5.52	1181.4	1147.1	655.8	34.3	525.6	38.54	487.1	2.355	12.62	82.11	5.27	17.9	70.5	234	6.24	771	1040	802		299.00				
90	105	3	5.84	5.52	1179.2	1149.5	657.2	29.7	522.0	33.4	488.6	2.352	12.60	82.02	5.38	18.0	70.1	238	6.24	784	1040	816		299.00				
90	120	1	5.76	5.45	1158.0	1127.1	647.0	30.9	511.0	34.72	476.3	2.366	12.51	82.57	4.92	17.4	71.8	285	6.16	939	1040	977		313.00				
90	120	2	5.76	5.45	1158.9	1129.9	647.1	29.0	511.8	32.58	479.2	2.358	12.47	82.27	5.27	17.7	70.3	283	6.13	933	1070	998		309.00				
90	120	3	5.76	5.45	1159.6	1126.8	647.4	32.8	512.2	36.9	475.3	2.370	12.53	82.71	4.76	17.3	72.5	287	6.16	946	1040	984		311.00				
90	135	1	5.76	5.45	1272.3	1246.8	720.6	25.5	551.7	28.65	523.0	2.384	12.60	83.17	4.23	16.8	74.9	325	6.30	1071	1010	1082		330.00				
90	135	2	5.76	5.45	1277.0	1245.8	718.2	31.2	558.8	35.06	523.7	2.379	12.58	82.99	4.43	17.0	74.0	322	6.33	1061	1010	1072		336.00				
90	135	3	5.76	5.45	1276.2	1246.0	720.7	30.2	555.5	33.9	521.6	2.389	12.63	83.35	4.02	16.6	75.9	325	6.32	1071	1010	1082		332.00				
90	150	1	5.79	5.47	1184.1	1159.9	666.3	24.2	517.8	27.39	490.6	2.364	12.56	82.47	4.97	17.5	71.6	322	6.33	1061	1010	1072		340.00				
90	150	2	5.79	5.47	1185.4	1157.0	668.0	28.4	517.4	31.91	485.5	2.383	12.66	83.13	4.21	16.9	75.0	320	6.39	1055	0.990	1044		345.00				
90	150	3	5.79	5.47	1182.2	1160.6	667.9	21.6	514.3	24.3	490.0	2.368	12.59	82.61	4.80	17.4	72.4	318	6.34	1048	1010	1059		340.00				
105	90	1	5.78	5.46	1169.3	1139.8	649.9	29.5	519.4	33.35	486.3	2.344	12.44	81.77	5.80	18.2	68.2	216	6.40	709	0.990	702		279.00				
105	90	2	5.78	5.46	1170.0	1138.3	650.9	31.7	519.1	35.62	483.5	2.354	12.49	82.13	5.38	17.9	69.9	218	6.40	719	0.990	711		280.00				
105	90	3	5.78	5.46	1171.7	1138.1	652.9	33.6	518.8	37.8	481.0	2.366	12.55	82.53	4.92	17.5	71.8	218	6.36	719	0.990	711		279.00				
105	105	1	5.83	5.51	1171.3	1145.5	655.2	25.8	516.1	28.99	487.1	2.352	12.58	82.00	5.43	18.0	69.9	236	6.38	778	0.990	770		319.00				
105	105	2	5.83	5.51	1169.4	1146.9	658.6	22.5	510.8	25.28	485.5	2.362	12.63	82.36	5.00	17.6	71.6	234	6.39	771	0.990	764		314.00				
105	105	3	5.83	5.51	1168.3	1146.8	659.4	21.5	508.9	24.2	484.7	2.366	12.65	82.49	4.86	17.5	72.3	238	6.38	784	0.990	777		316.00				
105	120	1	5.86	5.54	1185.1	1149.7	662.0	35.4	523.1	39.78	483.3	2.379	12.78	82.92	4.30	17.1	74.8	280	6.42	923	0.990	914		312.00				
105	120	2	5.86	5.54	1180.0	1148.9	662.4	31.1	517.6	34.94	482.7	2.380	12.79	82.97	4.23	17.0	75.1	278	6.45	916	0.960	880		314.00				
105	120	3	5.86	5.54	1181.7	1150.3	666.0	31.4	515.7	35.3	480.4	2.394	12.87	83.46	3.67	16.5	77.8	283	6.44	933	0.990	923		310.00				
105	135	1	5.85	5.53	1187.5	1155.9	667.5	31.6	520.0	35.51	484.5	2.386	12.80	83.17	4.03	16.8	76.1	308	6.38	1015	0.990	1005		335.00				
105	135	2	5.85	5.53	1188.8	1154.2	666.8	34.6	522.0	38.88	483.1	2.389	12.82	83.28	3.90	16.7	76.7	305	6.42	1005	0.990	995		333.00				
105	135	3	5.85	5.53	1185.5	1153.1	668.4	32.4	517.1	36.4	480.7	2.399	12.87	83.63	3.50	16.4	78.6	308	6.40	1015	0.990	1005		332.00				
105	150	1	5.76	5.45	1185.2	1158.3	667.5	26.9	517.7	30.22	487.5	2.376	12.56	82.90	4.53	17.1	73.5	322	6.33	1061	1010	1072		359.00				
105	150	2	5.76	5.45	1183.3	1160.2	665.1	23.1	518.2	25.96	492.2	2.357	12.46	82.24	5.30	17.8	70.2	320	6.39	1055	0.990	1044		361.00				
105	150	3	5.76	5.45	1183.3	1159.6	667.4	23.7	515.9	26.6	489.3	2.370	12.53	82.69	4.78	17.3	72.4	318	6.33	1048	1010	1059		365.00				





Gráfica 7. *Análisis de variaciones de temperatura para los especímenes analizados*





Gráfica 8. Análisis de variaciones de número de golpes para los especímenes analizados.

Las áreas sombreadas en verde, indican la zona de aceptación de las características requerida en la Norma N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d). Es evidente que la temperatura y el número de golpes a los que se elaboraron los especímenes son fundamentales para el comportamiento de sus características.

Para realizar una valoración y discusión del comportamiento de las características de la mezcla asfáltica, será necesario apoyarse en las gráficas de las líneas de tendencia “de Temperatura” y “Número de Golpes” para cada característica en particular, los rangos de temperatura obtenidos de la Carta de Viscosidad del Cemento Asfáltico empleado y de los Requisitos de Calidad para Mezclas Asfálticas de granulometría densa diseñadas mediante el método Marshall indicados en la Norma N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d).

4.1. Peso Volumétrico.

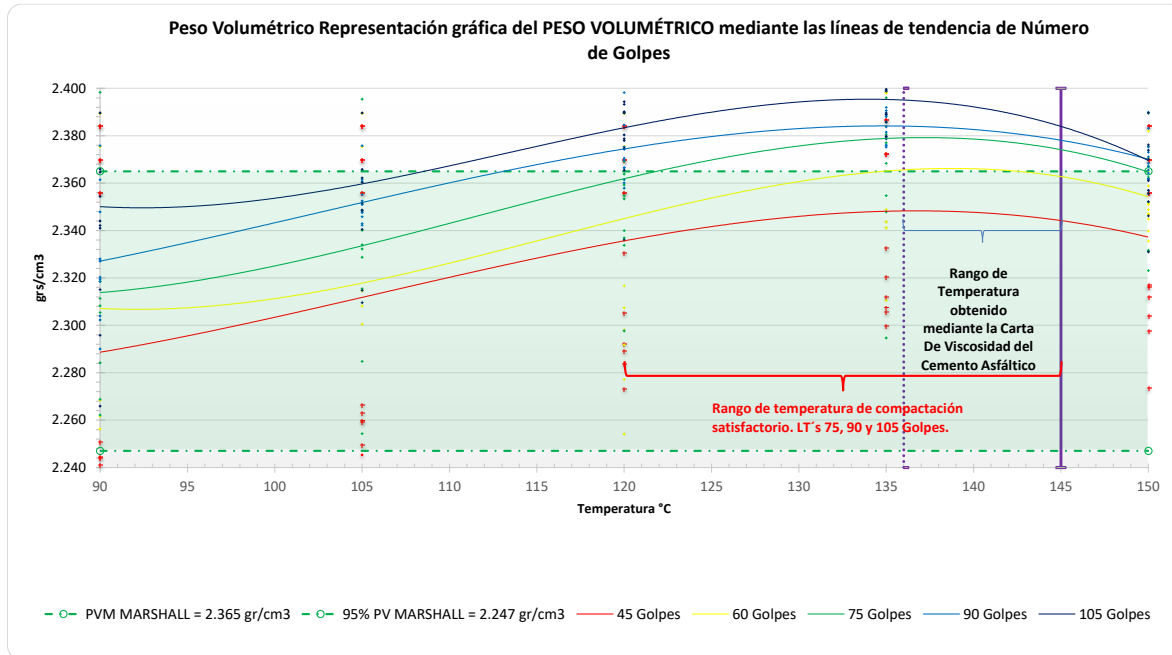
En las gráficas de las líneas de tendencia de “Número de Golpes”, se observó que el Peso Volumétrico se incrementaba a medida en que se incrementaban los Números de Golpes empleados en la compactación de los especímenes iniciando de 45 hasta 105 golpes en intervalos de 15 golpes por cara. Al incrementar la temperatura de compactación, el Peso Volumétrico también se incrementó hasta alcanzar los máximos valores a los 135 °C, para posteriormente descender ligeramente a medida en que la temperatura de compactación alcanzaba los 150 °C. El máximo valor del Peso Volumétrico lo obtuvo la línea de tendencia de 105 Golpes a los 135 °C aproximadamente.

Para esta característica las Normas N-CRT y N-CMT no establecen un parámetro de aceptación, sin embargo, es de uso común que los proyectos indiquen un 95% de compactación con respecto al PV_{Marshall} obtenido.

Dentro del rango de temperatura de compactación obtenido mediante la Curva de Viscosidad de Cemento Asfáltico empleado, se observó que en éste las líneas de tendencia alcanzaron los máximos valores del Peso volumétrico. Las líneas de tendencia de 75, 90 y 105 Golpes obtuvieron valores de Peso Volumétrico mayores al PV_{Marshall} de diseño.

Se observó que a partir de los 122 °C y hasta los 145 °C las líneas de tendencia de los 75, 90 y 105 golpes obtuvieron el Peso Volumétrico Marshall, considerándose éste como un intervalo de temperatura satisfactorio para su compactación.

En la gráfica siguiente, se muestran el comportamiento del Peso Volumétrico, expresado mediante las líneas de tendencia de Número de Golpes y los rangos de temperatura de compactación obtenidos y observados.



Gráfica 9. Comportamiento del peso volumétrico.

En las gráficas de las líneas de tendencia de “Temperatura de Compactación”, se observó que el Peso Volumétrico se incrementó a medida que las líneas de tendencia incrementaban la Temperatura de compactación. Los Pesos Volumétricos de todas las líneas de tendencia de “Temperatura de Compactación” registraron pequeños incrementos en el Peso Volumétrico al incrementar los Números de Golpes de 45 hasta los 105 con intervalos de 15 golpes por cara. Se notó que la línea de tendencia de 120 °C obtuvo mayores valores de Peso Volumétrico que la línea de 150 °C a partir de los 85 golpes.

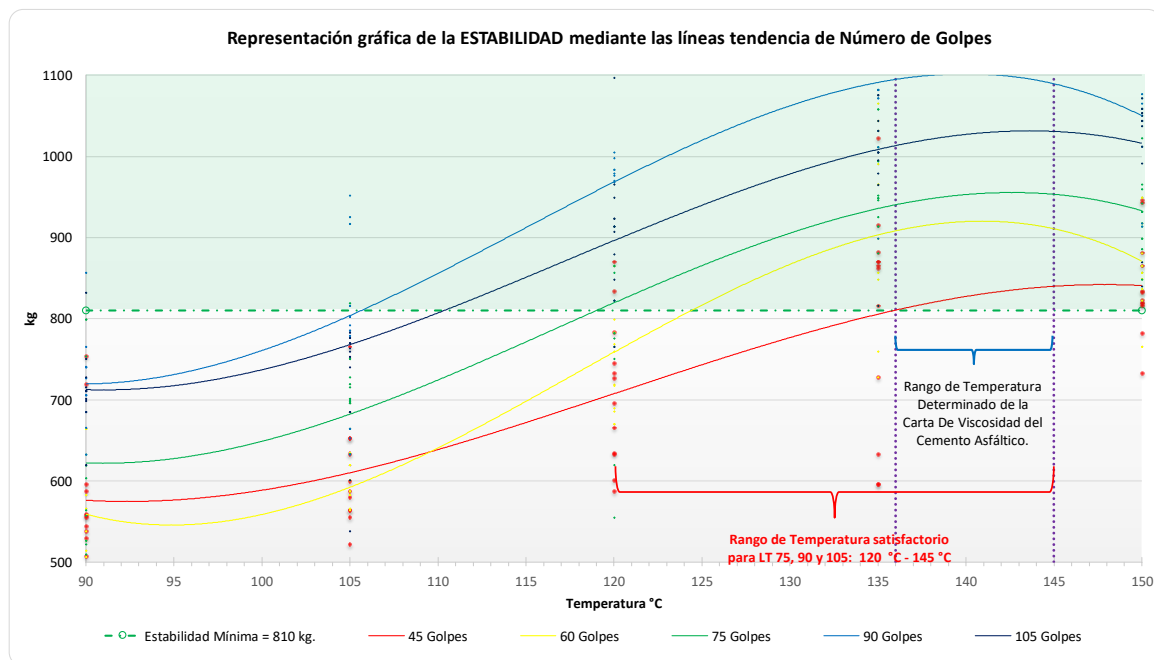
La línea de 135 °C obtuvo los mayores Pesos Volumétricos que las demás líneas de tendencia, observándose que a partir de los 56 golpes por cara alcanzó el Peso Volumétrico Marshall de diseño.

Las líneas de tendencia de los 150 °C y 120 °C alcanzaron el PV_{Marshall} a partir de los 75 y 82 golpes, respectivamente, las líneas de tendencia de 90 y 105 °C no alcanzaron el Peso Volumétrico_{Marshall} de diseño. Se observa que, para las líneas de tendencia de 120, 135 y 150

Dentro del rango de temperatura de compactación obtenido mediante la Curva de Viscosidad del Cemento Asfáltico empleado, se observa que precisamente en este intervalo se obtuvieron los máximos valores de estabilidad de todas las líneas de tendencia y además que estas cumplen con la estabilidad mínima requerida en la Norma.

Se puede establecer que el rango de temperatura satisfactorio que cumple con la Norma para las líneas de tendencia de 75, 90 105 golpes es de 120°C hasta 145°C.

En la gráfica siguiente, se muestran los intervalos de temperatura de compactación obtenidos mediante la Carta de Viscosidad y los valores satisfactorios observados para los especímenes compactados a 75 golpes por cara o más.



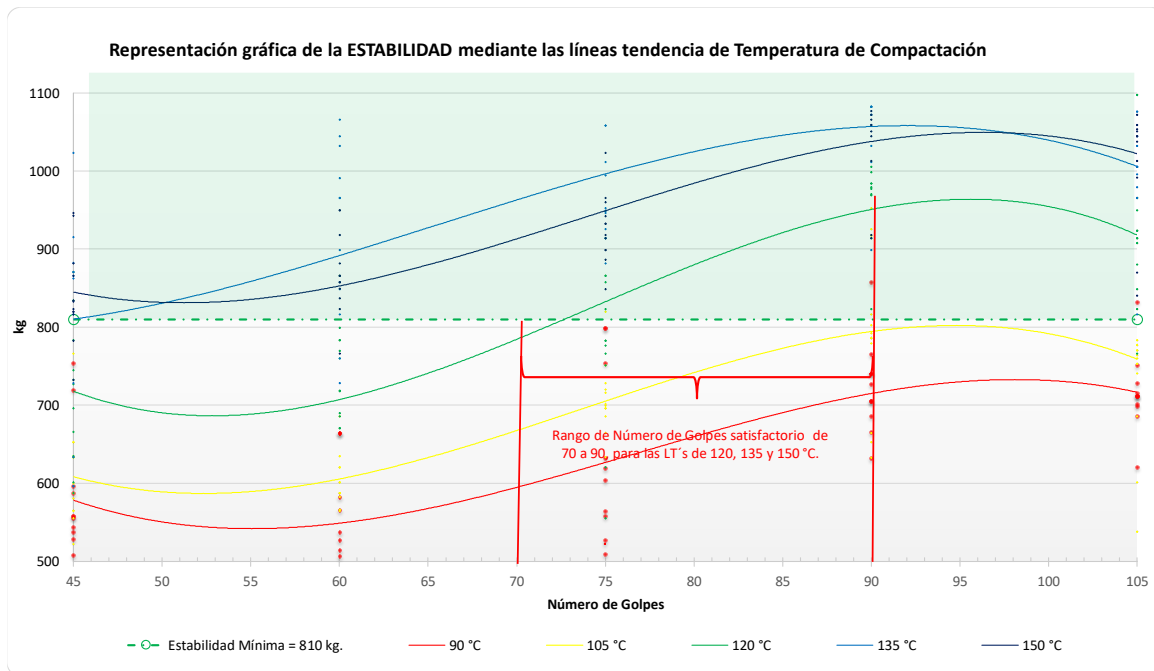
Gráfica 11. Estabilidad contra líneas de tendencia para el número de golpes.

En la gráfica de líneas de tendencia de “Temperatura de Compactación” se observó que a medida que las líneas de tendencia incrementaban su temperatura, también aumentaba la estabilidad. Las líneas presentan una trayectoria de tercer grado con un mínimo aproximadamente a los 54 golpes, y un máximo entre los 90 y 97.

La línea de tendencia de los 135°C presentó el máximo valor de la Estabilidad a los 90 golpes.

Se observa que las líneas de tendencia de los 135°C y 150°C obtuvieron su estabilidad deseada a cualquier número de golpes de compactación por cara. La línea de tendencia de los 120°C alcanzó la estabilidad de 810 kg a partir de los 73 golpes por cara y las líneas de 90°C y 105°C no alcanzaron la estabilidad mínima requerida en la Norma citada.

En la gráfica siguiente se ilustran las observaciones.



Gráfica 12. Estabilidad contra líneas de tendencia de temperatura de compactación.

4.3. Flujo

En comportamiento del flujo observado en la gráfica de las líneas de tendencia de “Números de golpes”, fue el siguiente:

El flujo incrementaba sus valores a medida de las líneas de tendencia aumentaban los número de golpes.

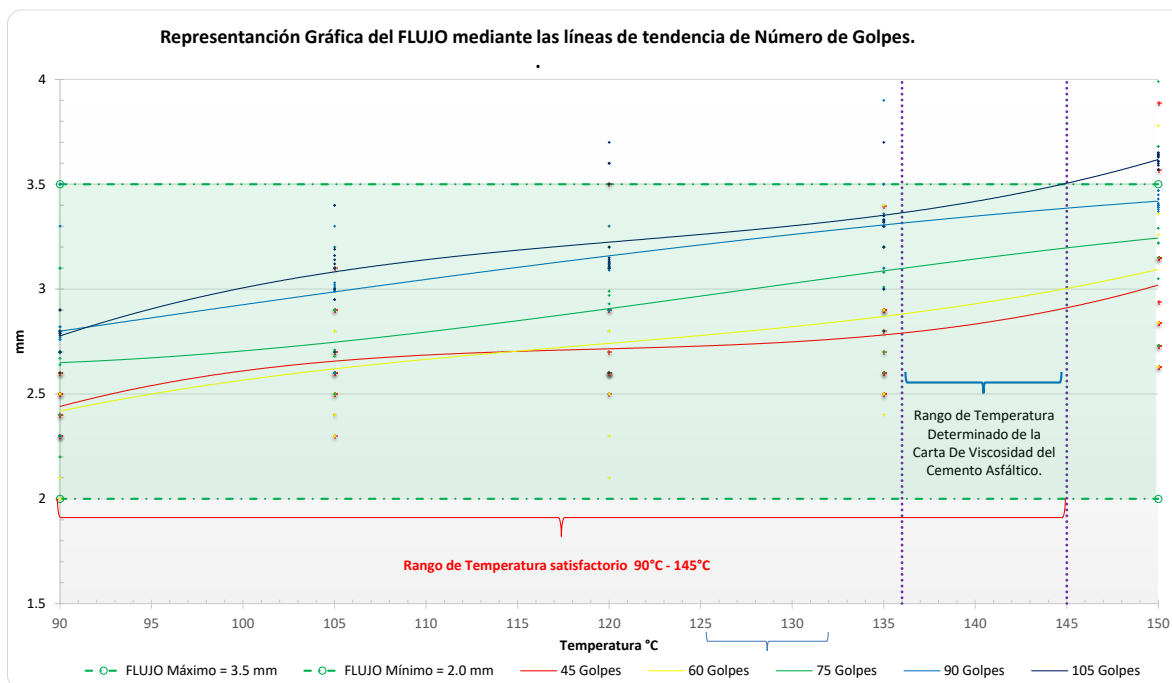
Los valores del flujo de cada línea de tendencia aumentaron a medida en que se incrementaban la temperatura de compactación.

Los máximos valores de flujo se obtuvieron a los 150 °C de temperatura de compactación, la línea de tendencia de los 105 golpes alcanzó los máximos valores del flujo.

En la Norma N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d), subinciso D1.1.1.1, tabla 1 indica que las mezclas asfálticas diseñadas por el método Marshall para un número de ejes equivalentes entre un millón y diez millones, el flujo debe de estar comprendido entre 2.0 y 3.5 mm (8-14) (10⁻² in)., observándose que todas las líneas de tendencia de números de golpes cumplen con este requisito cuando se compactan entre los 90 °C y 150 °C a excepción de la línea de tendencia de los 105 golpes que a partir de los 145 °C de temperatura de compactación excede el valor de 3.5 milímetros.

El comportamiento del flujo dentro del rango de temperatura de compactación determinado mediante la Curva de Viscosidad del cemento asfáltico empleado es satisfactorio, observándose que para todas las líneas de tendencias de número de golpes los valores del flujo se encuentran dentro de los parámetros indicados en la Norma.

En la gráfica siguiente se ilustra el comportamiento del flujo representado por las líneas de tendencia de número de golpes.



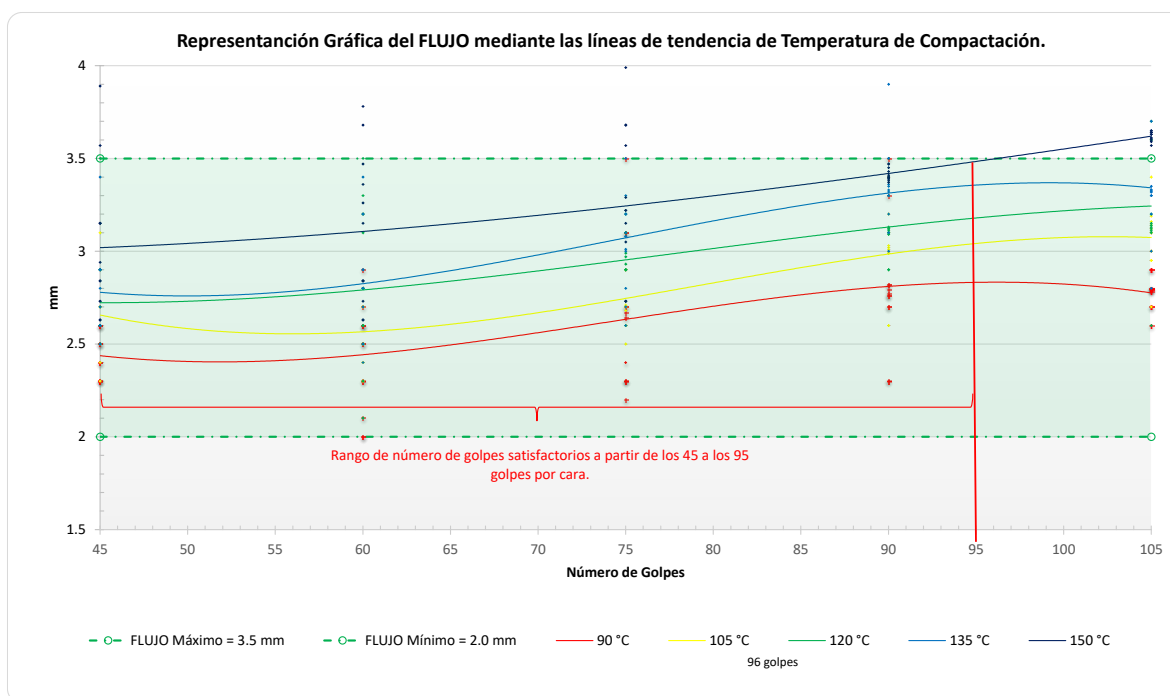
Gráfica 13. Comportamiento del flujo contra las líneas de tendencia de número de golpes.

En la gráfica de líneas de tendencia de temperatura se observa que a medida en que se incrementaba la temperatura de compactación, las líneas de tendencia obtuvieron mayores

valores de flujo. Al incrementar los números de golpes en la compactación; las líneas de tendencia registraron un ligero incremento en el flujo; hasta alcanzar los máximos valores a los 96 golpes aproximadamente. La línea de tendencia de los 135°C presentó el mejor desempeño en los valores de flujo.

La Norma SCT N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d) establece que para una mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa diseñada mediante el Método Marshall los valores del flujo deben estar comprendido entre 2.0 y 3.5 mm (8-14) (10⁻² in). Al evaluar los resultados obtenidos, se observa que todas las líneas de tendencia cumplen esta condición, a excepción de la línea de tendencia de 150°C que excede el valor máximo a partir de los 96 golpes por cara en la compactación de los especímenes.

En la siguiente gráfica se ilustra el comportamiento descrito:



Gráfica 14. Comportamiento del flujo contra las líneas de tendencia de temperatura de compactación

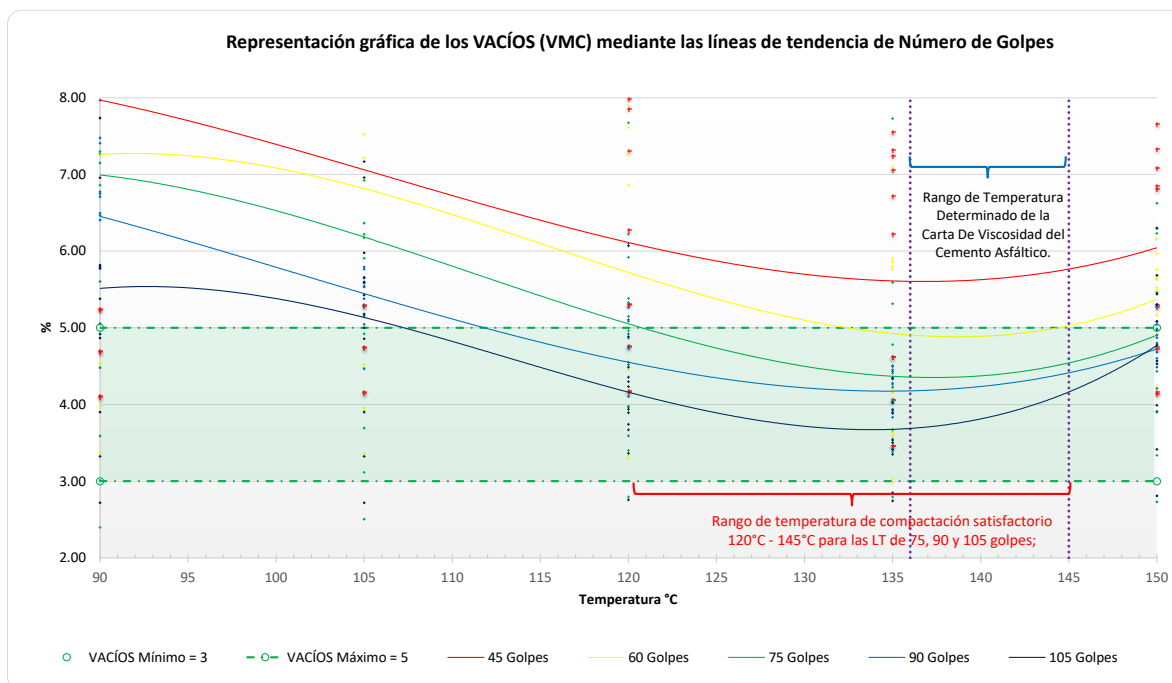
4.4. Vacíos en la mezcla asfáltica

El comportamiento de los vacíos de la mezcla asfáltica ensayada fue el siguiente. En la línea de tendencia de números de golpes se observó que a medida en que se incrementaban

los golpes de las líneas, se reducía los valores de vacíos. Al incrementar la temperatura de compactación, se redujeron los valores de vacíos, hasta alcanzar los mínimos valores a la temperatura de 135°C, para posteriormente registrar un aumento a medida que la temperatura se incrementaba hasta llegar a los 150 °C. la línea de tendencia de los 105 golpes presentó los mínimos valores de vacíos a los 135°C.

La Norma N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d) establece que para una mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa diseñada mediante el Método Marshall los valores de los vacíos deben estar comprendido entre 3.0 y 5.0 %. Al evaluar los resultados obtenidos, se observa que las líneas de tendencia para 75, 90 y 105 golpes cumplen esta condición cuando son compactadas a partir de los 120°C y hasta llegar los 150°C, la línea de tendencia de los 60 golpes cumplió con la Norma cuando se compactó entre los 135°C y 145°C, la línea de tendencia de los 45 golpes no cumplió con la Norma a ninguna temperatura de compactación.

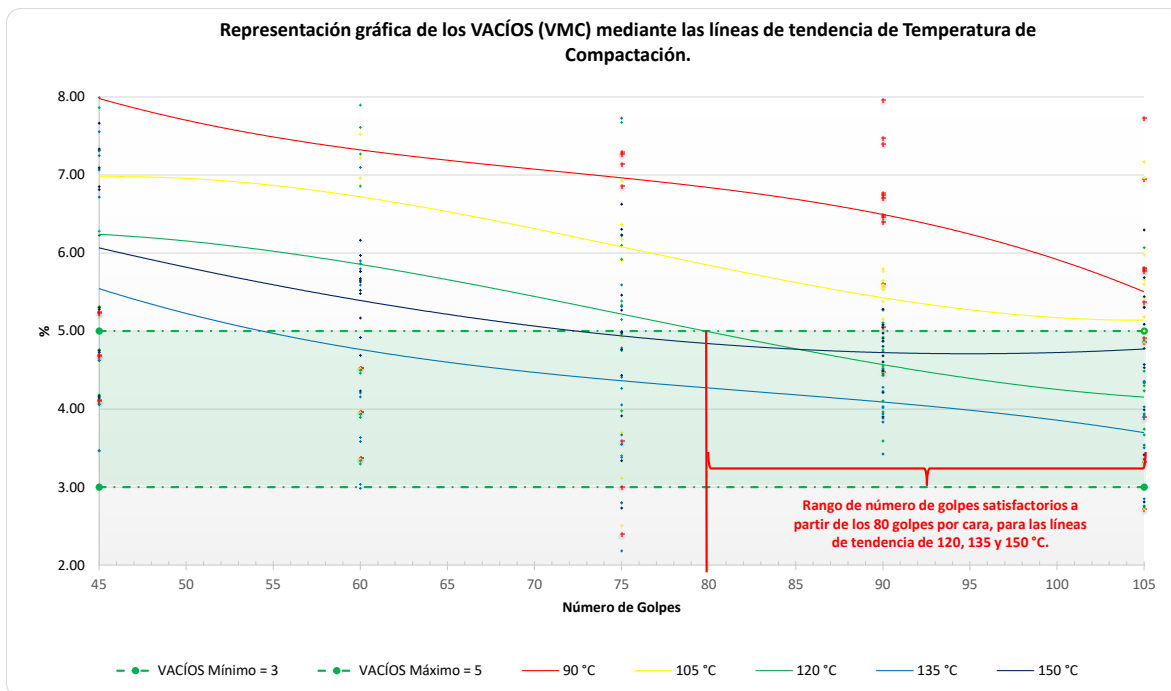
El comportamiento de los valores de vacíos dentro del rango de temperatura de compactación determinado mediante la Carta de Viscosidad es satisfactorio en todas las líneas de tendencia a excepción de la compactada a los 45 golpes. En la gráfica siguiente se detallan el comportamiento observado en las líneas de tendencia de número de golpes.



Gráfica 15. Comportamiento de VMC contra las líneas de tendencia de número de golpes

En las líneas de tendencia de temperatura se observa que, al incrementar la temperatura de compactación entre sí, se reducían los valores de los porcentajes de vacíos. Al aumentar los números de golpes de compactación las líneas de tendencia redujeron los valores del porcentaje de vacíos. Se observa que todas las líneas de tendencia obtuvieron los mínimos valores de porcentaje de vacíos cuando se compactaron a 105 golpes por cara.

La Norma SCT N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d) establece que para una mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa diseñada mediante el Método Marshall los valores de los vacíos deben estar comprendido entre 3.0 y 5.0 %. Al evaluar los resultados obtenidos, se observa que las líneas de tendencia de 120 °C, 135 °C y 150 °C cumplen esta condición cuando son compactadas a partir de 80 golpes por cara y hasta llegar los 105 golpes. Se observó que las líneas de tendencia de los 90 y 105 °C no cumplieron con la Norma a ningún número de golpes. En la gráfica siguiente se ilustran las observaciones descritas:



Gráfica 16. Comportamiento del VMC contra las líneas de tendencia de temperatura de compactación

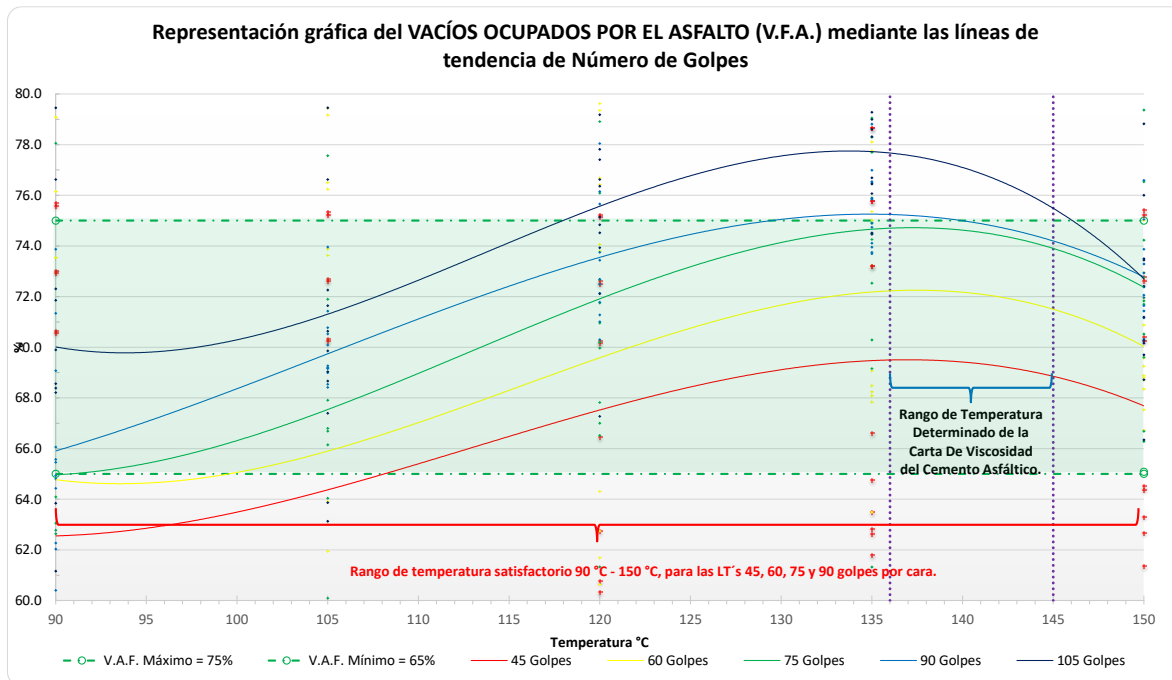
4.5. Vacíos ocupados por el asfalto (VFA)

El comportamiento de esta característica en los especímenes ensayados fue el siguiente. En las líneas de tendencia de número de golpes se observó que a medida en que se incrementaba los números de golpes de las líneas de tendencia los valores de los porcentajes de VFA se incrementaban. Al incrementar la temperatura de compactación las líneas de tendencia registraron un incremento de los porcentajes de VFA, hasta alcanzar sus máximos valores a los 135 °C aproximadamente para posteriormente, descender a medida en que se acercaba a los 150 °C. la línea de tendencia de 105 golpes registró los máximos valores de porcentajes de (VFA) a los 135 °C.

En la Norma N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d), subinciso D1.1.1.1, tabla 1 indica que las mezclas asfálticas diseñadas por el método Marshall para un número de ejes equivalentes entre un millón y diez millones, el porcentaje de VFA debe de estar comprendido entre 65 y 75, observándose que todas las líneas de tendencia de números de golpes cumplen con este requisito cuando se compactan entre los 90 °C y 150 °C a excepción de la línea de tendencia de los 105 golpes que a partir de los 117 °C de temperatura de compactación excede el valor de 75.0%.

Dentro del rango de temperatura de compactación determinado mediante la carta de viscosidad del cemento asfáltico empleado, las líneas de tendencias de número de golpes presentaron los valores máximos de VFA cercanos a la temperatura 136 °C, para posteriormente descender a razón en que se incrementaba la temperatura hasta llegar a los 145 °C.

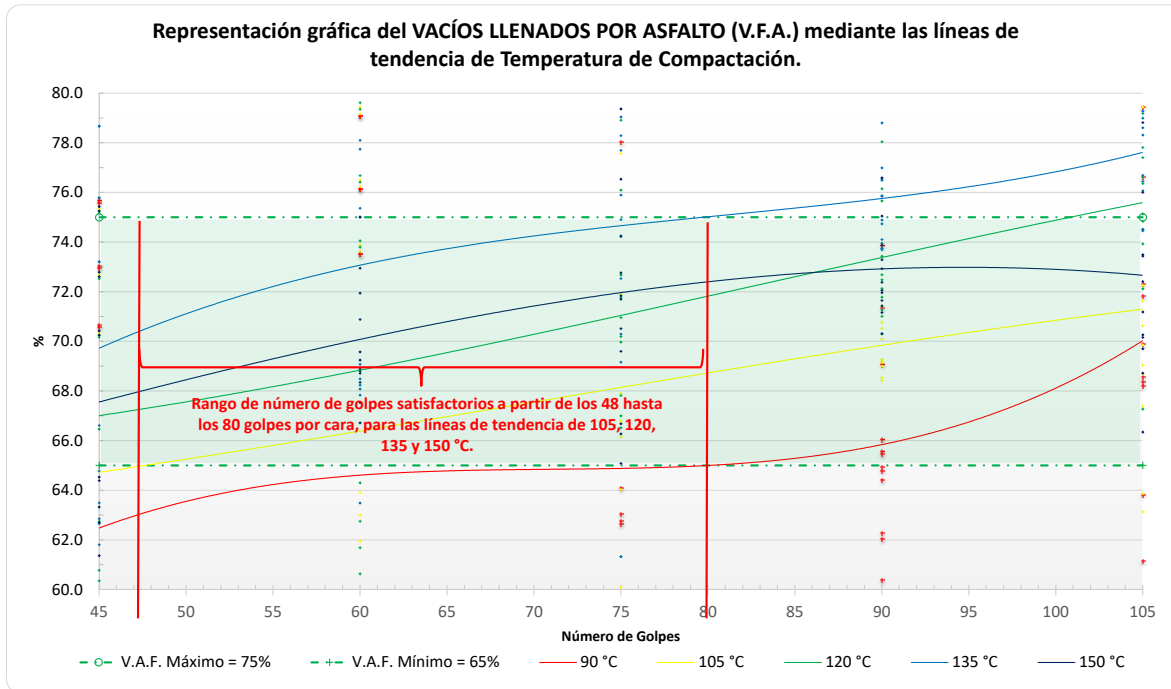
En la gráfica siguiente se muestran el comportamiento observado:



Gráfica 17. Comportamiento del VFA contra las líneas de tendencia de número de golpes

En las líneas de tendencia de temperatura, se observó que a medida en que se incrementaba la temperatura de las líneas de tendencia, también se incrementan los porcentajes de VFA. Al incrementar el número de golpes, los valores de VFA presentaron pequeños incrementos a excepción de la línea de tendencia de los 150 °C que alcanzó su máximo valor a los 86 golpes para posteriormente descender al incrementar el número de golpes. La línea de tendencia de 135 °C obtuvo los máximos valores de VFA en comparación con las demás líneas de tendencia a cualquier número de golpes. Se observó que entre los 48 y 80 golpes los valores de las líneas de tendencia de 105, 120, 135 y 150 °C obtuvieron valores satisfactorios de conformidad con la Norma N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d), subinciso D1.1.1.1, tabla 1, en donde se indica que las mezclas asfálticas diseñadas por el método Marshall para un número de ejes equivalentes entre un millón y diez millones, el porcentaje de VFA debe de estar comprendido entre 65 y 75. La línea de tendencia obtuvo valores de VFA mayores al 65% a partir de los 80 golpes.

En la gráfica siguiente se ilustran las observaciones.



Gráfica 18. Comportamiento de VFA contra las líneas de tendencia de temperatura de compactación.

4.6. Vacíos de agregado mineral (V.A.M)

Para el diseño de la mezcla se estableció que el tamaño nominal del material pétreo sería de 12.5 mm (1/2") y con 4% de vacíos en la mezcla (VAM) por lo tanto, el porcentaje mínimo de Vacíos de Agregado Mineral es de 14%. Los vacíos del agregado mineral presentaron el siguiente comportamiento:

En las líneas de tendencia de numero de golpes se observó que a medida en que se incrementaban el número de golpes de las líneas, los valores de VAM se reducían, al variar la temperatura los valores de VAM de las líneas de tendencias descendieron hasta alcanzar su mínimo valor al aproximarse a los 135 °C, para posteriormente ascender a medida en que se incrementaba la temperatura de compactación hasta llegar a los 150 °C. La línea de tendencia de los 105 golpes presentó valores de VAM inferiores a las demás líneas de tendencia. En la Norma SCT N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d), subinciso D1.1.1.1, tabla 2 indica que, para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall y, de tamaño nominal del material pétreo los vacíos en el agregado mineral (VAM) deben de ser como mínimo del 14%.

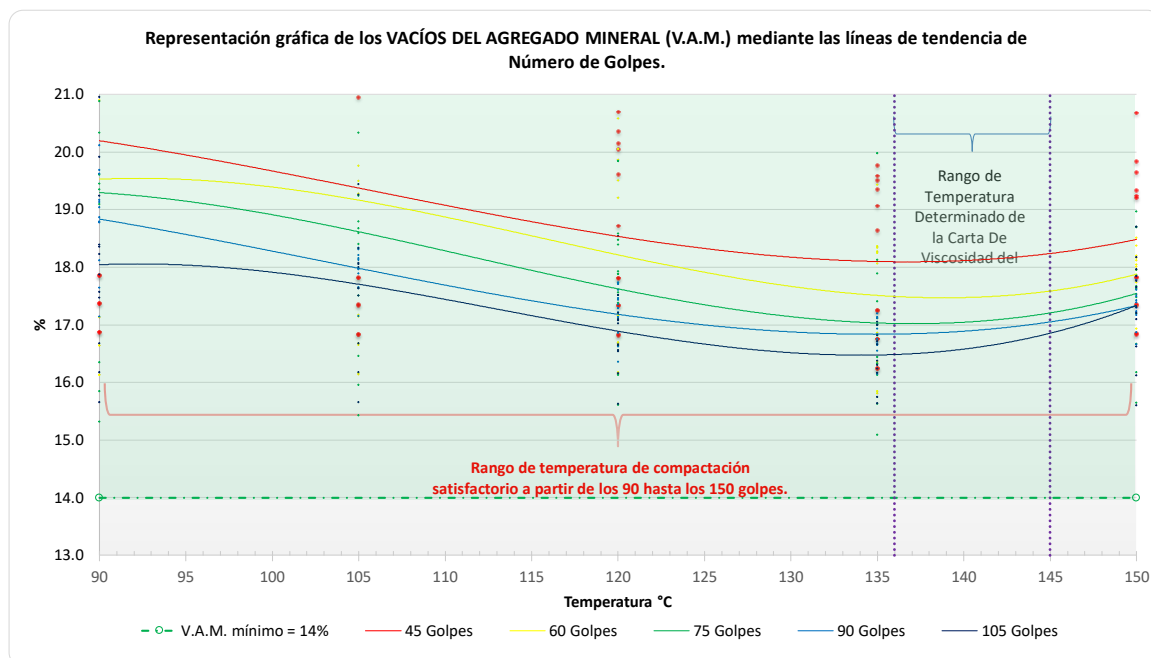
Tabla 24. Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall.

Tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla ^[1]		Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC) de diseño %		
		3	4	5
mm	Designación	Vacíos en el agregado mineral (VAM) %, mínimo		
9,5	¾"	14	15	16
12,5	½"	13	14	15
19	¾"	12	13	14
25	1"	11	12	13
37,5	1½"	10	11	12

[1] El tamaño nominal corresponde al indicado en la Cláusula D. de la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, para el tipo y granulometría del material pétreo utilizado en la mezcla.

Se observó que todas las líneas de tendencia cumplieron con esta característica indicada en esta Norma. Dentro del rango de temperatura de compactación determinado mediante la carta de viscosidad del cemento asfáltico empleado se observó que todas líneas de tendencia presentaron los mínimos valores de VAM.

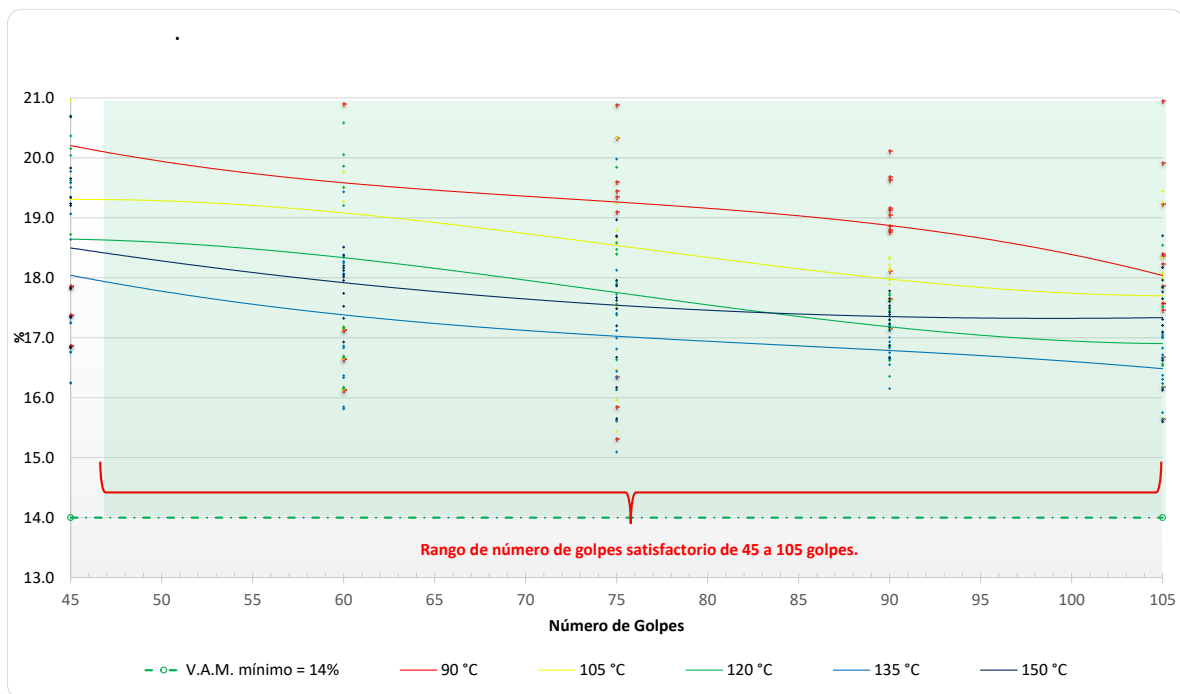
En la gráfica siguiente se muestra el comportamiento descrito de las líneas de tendencia de número de golpes:



Gráfica 19. Comportamiento de VAM contra las líneas de tendencia de número de golpes.

En las línea de tendencia de temperatura se observó que a medida en que se incrementaba la temperatura de las líneas de tendencias se reducían los valores de VAM, al incrementar los números de golpes en la compactación los valores de VAM decrecieron de manera lineal, todas las líneas de tendencia presentaron valores de VAM mínimos a los 105 golpes, la línea de tendencia de 135 °C presentó los mínimos valores de VAM, al verificar el cumplimiento de la Norma SCT N-CMT-4-05-003/08 (SCT, 2008d), subinciso D1.1.1.1, tabla 2; verificamos que los valores obtenidos de todas las líneas de tendencia fueron superiores al 14%, por lo cual se cumple con esta característica.

En la gráfica siguiente se muestra el comportamiento descrito de las líneas de tendencia de temperatura:



Gráfica 20. Comportamiento de VAM contra las líneas de tendencia de temperatura de compactación.



CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La temperatura de compactación en las mezclas asfálticas es una condición fundamental para una adecuada compactación. Observándose que a mayor temperatura es menor el número de golpes requeridos para obtener un Peso Volumétrico (PV) determinado, y consecuentemente, a menor temperatura de compactación será necesario aplicar un mayor número de golpes.

Se observó que las características de Peso Volumétrico (PV), Vacíos del agregado mineral (V.A.M.) y flujo presentaron valores aceptables en todas las combinaciones de temperatura y número de golpes.

Los mejores resultados de las seis características (PV, Estabilidad, flujo, VMC, VFA y VAM), se obtuvieron cuando se compactaron a 135°C y con 90 golpes por cara.

La Estabilidad, Vacíos (VMC), Vacíos ocupados por el asfalto (V.F.A.) presentaron valores satisfactorios al compactarse a una temperatura mayor a los 120°C y a partir de 75 golpes por cara.

Dentro del rango de temperatura de compactación determinado por la carta de viscosidad del cemento asfáltico empleado, todos los valores obtenidos de las seis características resultaron satisfactorios al compactarse a los 60, 75 y 90 golpes por cara.

Con los resultados obtenidos, se determinó que la mezcla asfáltica ensayada presentó resultados favorables cuando se compactaron entre los 120 y 135°C y con 75 y 90 golpes por cara.

Para los especímenes compactados dentro del rango de temperatura de compactación de la carta de viscosidad del cemento asfáltico empleado, se observó que a partir de los 60 hasta los 90 golpes por cara se obtuvieron valores satisfactorios.

Puede ser posible reproducir la prueba en las distintas granulometrías para las mezclas asfálticas densas en caliente y comparar entre sí los resultados obtenidos.

Es preferible realizar la compactación de la mezcla asfáltica dentro del rango de temperaturas de compactación en función del cemento asfáltico empleado. Además de que en los tramos de prueba se establezcan correlaciones entre los resultados obtenidos en campo con los de laboratorio, y determinar así, el equipo de menor peso o número de pasadas necesarias durante la compactación, obteniendo así, la máxima eficiencia en las características de la mezcla asfáltica.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asphalt Institute. (2001). *Principios de construcción de pavimento de mezcla asfáltica en caliente* (Vol. 22). Asphalt Institute.
- ASTM. (1989). ASTM D 1559. Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. *ASTM D 1559. Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus*. Estados Unidos.
- Bach, E. (2019). Estabilización de mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt utilizando fibras de basalto como sustituto de las fibras de celulosa. Lima, Perú: UNIVERSIDAD RICARDO PALMA.
- Becker, E. (30 de Julio de 2012). *Slidershare*. Obtenido de Slidershare: <https://es.slideshare.net/EdgardoBecker/e-becker-presentacin-sobre-pavimentos-y-pisos-industriales>
- Bonilla Ureña Víctor Manuel, Q. R. (s.f.). ISSN 0188-7297. *Análisis del comportamiento estructural de un pavimento de concreto estructuralmente reforzado continuo (PCERC)*. Sanfandila, Qro.
- Crespo, V. C. (2012). *Vías de Comunicación*. México: Editorial Limusa.
- Garnica, P. A., Delgado, H. A., & Sandoval, C. S. (2005). Publicación Técnica No. 271. Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas. *Instituto Mexicano del Transporte*, 62.
- Garnica, P. A., Flores, M. F., López, J. F., & Delgado, H. (2005). Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas. *Publicación Técnica No. 267, Instituto Mexicano del Transporte*, 119.
- Hislop, W. P. (2000). *Influence of aggregate type and gradation on critical voids in the mineral aggregate in asphalt paving mixtures*. Estados Unidos.
- Lay, M. G. (2009). *Handbook of Road Technology*. Estados Unidos: Spon Press.
- Leandro, R. P., Vasconcelos, K. L., & Bariani, L. B. (2017). Evaluation of the laboratory compaction method on the air voids and the mechanical behavior of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 156, 424-434.
- Olivera, F. O. (2011). *Estructuración de Vías Terrestres*. México: Grupo Editorial Patria.
- Porfirio, S. R. (Junio de 2012). *Universidad Autonoma de Bja California*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/102577998/CIMENTACIONES-Distribucion-de-Presiones-y-Capacidad-de-Carga>
- Rodríguez., A. P. (2001). Mezclas asfálticas. En *Apuntes sobre Mezclas Asfálticas en la construcción*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rolando, F. E. (2002). *“Estudio comparativo entre mezclas asfálticas con diluido. RC-250 y emulsión”*. Perú: Repositorio institucional PIRHUA.
- SCT. (1991). Libro 6, Normas para muestreo y pruebas de los materiales, equipos y sistemas. En SCT, *Libro 6, Normas para muestreo y pruebas de los materiales, equipos y sistema* (Vol. II, pág. 200). México, México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- SCT. (2002). Normativa para la Infraestructura del Transporte. *N CMT 4.05.003/02. Materiales para pavimentos 04. Materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México, México: SCT.



- SCT. (2002a). Normativa para la Infraestructura del Transporte. *M MMP 4 04 002/02 4. Materiales para pavimentos 04. Materiales pétreos para mezclas asfálticas 002. Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México: SCT.
- SCT. (2002b). Normativa para la Infraestructura del Transporte. *M MMP 4 04 003/02 4 Materiales para pavimentos 04 Materiales Pétreos para mezclas asfálticas 003 Densidad Relativa para Materiales Pétreos para mezclas asfálticas*. México: SCT.
- SCT. (2002c). Normativa para la Infraestructura del Transporte. *M MMP 4 04 006/02 4. Materiales para pavimentos 04 Materiales Pétreos para mezclas asfálticas 006 Desgaste mediante la prueba de los Ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México: SCT.
- SCT. (2002d). Normativa para la Infraestructura del Transporte. *M MMP 4 04 004/02 4. Materiales para pavimentos 04 Materiales Pétreos para mezclas asfálticas 004 Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México: SCT.
- SCT. (2004). . *CTM. Características de lo materiales. 02 Materiales para subbases y bases, 003 Materiales para Bases Tratadas*.
- SCT. (2008). Normativa para la Infraestructura del Transporte. *N-CMT-4-05-003/08. Materiales para pavimentos. 05. Materiales asfálticos, aditivos y mezclas*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- SCT. (2008b). Normativa para la Infraestructura del Transporte. *N CMT 4 05 004/08. Materiales para pavimentos 05. Materiales pétreos para mezclas asfálticas 004. Calidad de Materiales Asfálticos Grado PG*. México, México: SCT.
- SCT. (2008c). Normativa para la Infraestructura del Transporte. *M MMP 4 04 002/02 4. Materiales para pavimentos 04. Materiales pétreos para mezclas asfálticas 005 Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. México, México: SCT.
- SCT. (2008d). Normativa para la Infraestructura del Transporte. *N CMT 4 05 003/08. Materiales para pavimentos 05. Materiales pétreos para mezclas asfálticas 003. Calidad de mezclas asfálticas para Carreteras*. México: SCT.
- SCT. (2008e). Normativa para la Infraestructura del Transporte. *N-CMT-4-05-003-08 4 Materiales para pavimentos 05 Materiales asfálticos, aditivos y mezclas 003 Calidad de mezclas asfálticas para carreteras*. México: SCT.
- SCT. (2013). *Catálogo de secciones estructurales de pavimento para las carreteras de la República Mexicana*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (SCT).
- SCT. (2014). Normativa para la Infraestructura del Transporte. México: SCT.
- Tapkin, S. (2013). Optimal polypropylene fiber amount determination by using gyratory compaction, static creep and Marshall stability and flow analyses. *Construction and Building Materials, Vol. 44*, 399-410.
- Tinoco, Z. M., & Alarcón, J. A. (2011). Estado del arte de las Mezclas Asfálticas en México. *Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC)*, 20.
- Villeda, S. (s.f.). *Academia.edu*. Obtenido de https://www.academia.edu/25005678/Estudio_de_par%C3%A1metros_adicionales_de_resistencia_en_mezclas_asf%C3%A1lticas_com%C3%BAnmente_empleadas_en_M%C3%A9xico
- Zárate, M. A. (2007). *Diseño de pavimentos flexibles*. México: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.



GLOSARIO

ΣL = Número de ejes equivalentes de diseño

T.M.A.= Tamaño máximo de agregado

V.A.F.= Porcentaje de vacíos llenados por asfalto

V.A.M.= Porcentaje de vacíos del agregado mineral



CURRICULUM VITAE

Eloy Barrera Rosas, nació en Isla, Veracruz el día 8 de octubre de 1975. En el año 1994, ingresó a la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Veracruzana, donde obtuvo el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, mediante la presentación del Examen General de Egreso de la Licenciatura en Ingeniería Civil (EGEL) alcanzando el Testimonio de Alto Rendimiento Académico otorgado por el CENEVAL.

En su vida profesional se ha dedicado en la prestación de servicios profesionales de ingeniería en las Vías Terrestres, desempeñando puesto de supervisor de obra, superintendente de supervisión, coordinador de supervisión y analista de precios unitarios.

Cuenta con los diplomados en: “gestión ambiental durante la construcción de carreteras”, impartido por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, Delegación Jalisco y, “Asociaciones Público Privadas”, impartido por la Universidad Anáhuac, México Sur.

Durante el periodo del año 2012 al 2015, realizó los estudios de la Maestría en Vías Terrestres de la Universidad de Chihuahua – AMIVTAC Jalisco en la ciudad de Guadalajara, Jal.

Domicilio Permanente: Azucena No. 43, Col Huisquilco
 Zapotlanejo, Jalisco, 45430

Esta tesis/disertación fue mecanografiada por Eloy Barrera Rosas.