



**Universidad Michoacana de San Nicolás  
Hidalgo**

---

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

**Facultad de Ingeniería Civil**

**Tesis**

**Análisis comparativo de pavimentos utilizando mezclas densas y  
mezclas de granulometría discontinua tipo SMA con asfaltos  
convencionales y asfaltos modificados con caucho activado y  
reaccionado, empleando pruebas de desempeño y el programa Pav  
Analyzer**

**Para obtener el título de maestro en Ingeniería**

**Presenta: Ing. Luis Fernando Trejo Arámbula**

**Asesor: Dr. Jorge Alarcón Ibarra**

**Co-Asesor: Dr. Carlos Chávez Negrete**



**Morelia, Michoacán.**

**Agosto de 2023**

# Agradecimientos

Mediante estas páginas, quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron a hacer realidad este logro. En primer lugar, a mis padres, Juan Trejo y Norma Arambula. Como les he mencionado en varias ocasiones, yo hice lo más sencillo, asistir a la escuela, a ustedes les correspondió enfrentar el desafío más difícil: renunciar a muchas cosas para darme la oportunidad de estudiar. Son el ejemplo vivo de la perseverancia y este logro es más suyo que mío. No hay palabras suficientes para expresar cuánto les agradezco por todo lo que han hecho por mí.

A Troni, Mariela y Diana, les agradezco por sus consejos constantes y por el afecto que me han brindado desde que éramos pequeños.

A Adriana, gracias por brindarme tu apoyo incondicional, por infundirme ánimo y por estar siempre dispuesta a escucharme. Tu presencia ha sido invaluable en mi camino.

A mi tía Estela y a mi abuelita Teresa, les agradezco por su amor infinito y por cuidarme como si fuera su propio hijo durante mi tiempo en el IPN.

A mi Tío Pequis, gracias por tus consejos y por ser un modelo a seguir. A mi tía Fabiola, a Héctor y a Nailea, les agradezco por el cariño y apoyo que me brindaron durante mi estancia en Morelia.

A mis asesores, el doctor Jorge Alarcón y el doctor Carlos Chávez, les agradezco por sus valiosas enseñanzas, por su tiempo y por transmitirme su pasión por la ingeniería. Espero algún día poder ser como ustedes.

A PEPSA, agradezco por proporcionar las instalaciones necesarias para llevar a cabo las pruebas de laboratorio. Un agradecimiento especial al ingeniero Dantón, al ingeniero Nicolás, al ingeniero Francisco y a Edgar. Me llevo sus enseñanzas y lo más valioso que es su amistad.

A mi compañero Edgar, te agradezco por tu apoyo en la ejecución de las pruebas y por tu amistad.

A Grupo Xicuco, en especial a don Adrián, al ingeniero Erick y al licenciado Adrián, les agradezco por creer en mí desde el primer momento que llegué a la empresa. Gracias por brindarme oportunidades de crecimiento y por su apoyo incondicional.

A CONACYT, por otorgarme la beca que hizo posible la realización de esta maestría.

Cada uno de ustedes ha sido una parte fundamental en este viaje. Mi gratitud es eterna con cada uno de ustedes.

# Contenido

<b>1 Resumen .....</b>	<b>14</b>
<b>2 Introducción.....</b>	<b>17</b>
2.1 Antecedentes .....	18
2.2 Descripción del problema.....	21
2.3 Justificación .....	23
2.4 Objetivos .....	24
2.4.1 Objetivo general.....	25
2.4.2 Objetivos particulares .....	25
2.5 Hipótesis .....	26
2.6 Propuesta de solución.....	27
<b>3 Marco teórico.....</b>	<b>29</b>
3.1 Introducción .....	29
3.2 Agregados pétreos.....	30
3.3 Agregados gruesos y pruebas de calidad .....	30
3.3.1 Densidad relativa del material pétreo seco y absorción.....	31
3.3.2 Desgaste de los Ángeles .....	31
3.3.3 Desgaste microdeval .....	32
3.3.4 Intemperismo acelerado .....	33
3.3.5 Porcentaje de partículas largas y lajeadas .....	34
3.3.6 Diferencias en la prueba forma de la partícula entre la normativa SICT y ASTM.....	35
3.3.7 Partículas trituradas .....	36
3.4 Agregados finos y pruebas de calidad .....	36

3.4.1 Densidad relativa y absorción.....	37
3.4.2 Angularidad.....	39
3.4.3 Equivalente de arena.....	40
3.4.4 Azul de metileno.....	42
3.5 Propuesta granulométrica.....	43
3.6 Volumetría de Mezclas asfálticas.....	46
3.7 Asfaltos.....	51
3.7.1 Composición del asfalto.....	52
3.7.2 Obtención del asfalto en refinería.....	52
3.8 Propiedades de los asfaltos y pruebas de calidad.....	54
3.8.1 Clasificación de asfaltos por grado PG.....	54
3.8.2 Selección del grado PG según la N-CMT-4-05-004/08.....	55
3.8.3 Selección del grado PG según la N-CMT-4-05-004/08.....	57
3.8.4 Pruebas de calidad en los cementos asfálticos.....	57
3.8.5 Punto de inflamación Cleveland.....	57
3.8.6 Viscosidad rotacional.....	58
3.8.7 Punto de reblandecimiento.....	59
3.8.8 Módulo reológico de corte dinámico.....	60
3.8.9 Envejecimiento del asfalto a corto plazo.....	62
3.8.10 Envejecimiento del asfalto a largo plazo.....	63
3.8.11 Creep repetido multiesfuerzo.....	64
3.8.12 Recuperación elástica por torsión.....	65
3.8.13 Separación anillo esfera.....	65
3.9 Asfaltos modificados.....	67
3.10 Modificación de asfaltos a partir de hule molido de llanta.....	67

3.11 Pruebas de desempeño .....	67
3.11.1 Resistencia al daño por humedad TSR .....	67
3.11.2 Rueda de Hamburgo.....	69
3.11.3 Módulo dinámico.....	70
3.11.4 Fatiga en mezclas asfálticas .....	71
3.11.5 Ensayo de tracción indirecta para la obtención de la ley de fatiga .....	74
3.12 Problemas ecológicos que provocan los neumáticos.....	74
3.13 Modificación de asfalto con caucho .....	75
3.13.1 Vía seca para incorporación del caucho al asfalto.....	75
3.13.2 Vía húmeda para la incorporación del caucho a la mezcla asfáltica ....	75
3.14 RARX .....	75
3.15 Estudios acerca del RARX.....	77
3.15 Mezclas asfálticas .....	82
3.16 Daños en pavimentos .....	83
3.16.1 Rehabilitación superficial .....	84
3.16.2 Rehabilitación estructural.....	84
3.16.3 Reflexión de fisuras .....	85
3.17 Ruido generado por pavimentos .....	85
3.18 Ciclo de vida.....	86
3.19 Huella de carbono .....	86
3.20 Módulo dinámico de la mezcla asfáltica.....	87
3.21 Módulo de resiliencia .....	95
3.22 Correlaciones de CBR para encontrar el módulo resiliente .....	97
3.23 Métodos de diseño de pavimentos flexibles de la UNAM .....	98
3.24 Eje equivalente.....	100

3. 25 Caracterización del tránsito.....	100
3.26 Espectros de carga .....	103
3.27 Modelos de deterioro fatiga y deformación permanente .....	107
3.27.1 Fatiga.....	107
3.27.2 Deformación permanente .....	109
3.27.3 Correlaciones a las leyes de fatiga .....	109
3.27.4 Correlaciones para leyes de deformación permanente.....	110
3.28 Hipótesis de Miner .....	110
3.29 Metodología empírico mecanicista.....	112
3. 30 Análisis esfuerzo-deformación de un pavimento.....	113
3.30.1 Teoría de Boussinesq.....	114
3.30.1 Teoría de Burmister .....	116
<b>4 Metodología .....</b>	<b>126</b>
4.1 Plan experimental .....	126
4.1.1 Revisión bibliográfica.....	128
4.1.2 Elección de los agregados.....	128
4.1.3 Pruebas de calidad en los agregados pétreos y análisis (caracterización) .....	130
4.1.4 Pruebas de calidad en el cemento asfáltico y análisis .....	130
4.1.5 Diseño de mezclas asfálticas y análisis .....	131
4.1.6 Ensayos de desempeño .....	131
<b>5 Pruebas de calidad en asfaltos .....</b>	<b>131</b>
5.1 Ejes equivalentes de proyecto .....	131
5.2 Determinación de grado PG.....	133
<b>6 Pruebas de calidad en agregados pétreos.....</b>	<b>142</b>

<b>7 Diseño de mezclas asfálticas .....</b>	<b>145</b>
7.1 Propuesta granulométrica para mezcla SMA con asfalto PG 64-22 modificado con RARX .....	146
7.2 Propuesta granulométrica para mezcla SMA con asfalto PG 64-22 y PG 76- 22 modificado con polímero .....	147
7.3 Fibra celulosa.....	149
7.4 Prueba de escurrimiento .....	150
7.5 Diseño de mezcla SMA.....	151
7.6 Propuesta granulométrica para mezcla densa con asfalto PG 64-22 modificado con RARX.....	157
7.7 Propuesta granulométrica para mezcla densa con asfalto PG 64-22 y PG 76- 22 modificado con polímero .....	158
7.8 Diseño de mezcla densa .....	159
<b>8 Ensayes de desempeño.....</b>	<b>164</b>
8.1 Resistencia al daño inducido por humedad TSR .....	164
8.2 Susceptibilidad a la deformación permanente .....	165
<b>9 Desarrollo del programa de análisis de pavimentos Pav Analyzer .....</b>	<b>167</b>
9.1 Descripción general del programa .....	167
9.2 Ventana de inicio.....	171
9.3 Análisis de tránsito .....	171
9.4 Análisis de pavimentos .....	180
9.5 Módulo dinámico .....	185
9.6 Grado PG.....	186
<b>10 Conclusiones.....</b>	<b>188</b>
<b>11 Bibliografía.....</b>	<b>190</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 máquina de desgaste de los Ángeles.....	32
Figura 2 máquina de desgaste microdeval .....	33
Figura 3 prueba de intemperismo acelerado.....	34
Figura 4 calibrador ASTM para prueba de forma de la partícula.....	35
Figura 5 Realización de prueba de gravedad específica y absorción del agregado fino .....	38
Figura 6 Condición SSS agregado fino .....	38
Figura 7 Prueba angularidad del fino .....	39
Figura 8 Calibración del cilindro .....	40
Figura 9 Realización de la prueba equivalente de arena .....	41
Figura 10 Probeta de equivalente de arena .....	41
Figura 11 Equipo de azul de metileno .....	42
Figura 12 Halo de cumplimiento de prueba azul de metileno.....	43
Figura 13 Gravedades específicas del agregado pétreo.....	47
Figura 14 Diagrama de fases de la mezcla asfáltica .....	48
Figura 15 Niveles de diseño para mezclas asfálticas por protocolo AMAAC .....	49
Figura 16 Mezcla asfáltica.....	50
Figura 17 Refinación del petróleo.....	53
Figura 18 Copa Cleveland.....	58
Figura 19 Viscosímetro rotacional .....	59
Figura 20 Equipo de punto de reblandecimiento .....	60
Figura 21 Funcionamiento del reómetro de corte dinámico .....	62
Figura 22 Horno RTFO.....	63
Figura 23 Horno PAV .....	64
Figura 24 Equipo de recuperación elástica por torsión .....	65
Figura 25 Tubos de aluminio .....	66
Figura 26 Realización de prueba separación anillo esfera.....	66
Figura 27 Prueba de TSR .....	68

Figura 28 Rueda cargada de Hamburgo .....	70
Figura 29 Fatiga a cuatro puntos.....	73
Figura 30 Prueba de fatiga por el ensayo de tracción indirecta.....	74
Figura 31 Fabricación de mezcla con RARX.....	76
Figura 32 Carpeta asfáltica y losa de concreto .....	80
Figura 33 Carpeta asfáltica de gran espesor y carpeta asfáltica con asfalto modificado.....	80
Figura 34 Carpeta asfáltica con RARX.....	81
Figura 35 Tipos de mezclas asfálticas .....	83
Figura 36 Prueba de módulo dinámico.....	88
Figura 37 Falla por fatiga de la mezcla asfáltica .....	108
Figura 38 Falla por deformación permanente de la mezcla asfáltica .....	108
Figura 39 Metodología de diseño empírico-mecanicista .....	113
Figura 40 Esfuerzos de tensión y compresión en el pavimento .....	114
Figura 41 Esfuerzos en un medio elástico, causado por una carga puntual .....	115
Figura 42 Sistema de capas para la distribución de esfuerzos de Burmister .....	117
Figura 43 Plan experimental.....	127
Figura 44 Banco “Las Víboras” .....	129
Figura 45 Muestreo de agregado .....	129
Figura 46 Estación climatológica Pátzcuaro.....	133
Figura 47 Prueba de escurrimiento .....	151
Figura 48 Pastilla de mezcla asfáltica para diseño.....	154
Figura 49 Portada de programa .....	171
Figura 50 Ventana cálculo de ejes equivalentes .....	173
Figura 51 Error debido a no ingresar todos los datos.....	174
Figura 52 Mensaje de error debido a que la sumatoria del TDPA es diferente a 100 .....	175
Figura 53 Cálculo de ejes equivalentes.....	176
Figura 54 Error debido al ingreso de una letra o un caracter .....	177
Figura 55 Sección de ayuda para el cálculo de ejes equivalentes .....	177
Figura 56 Ventana de selección de capas del pavimento a analizar.....	180

Figura 57 Análisis de un pavimento de cuatro capas .....	182
Figura 58 Resultados del análisis del pavimento .....	183
Figura 59 Modificación de la ley de fatiga y deformación permanente.....	184
Figura 60 Resultado de cambiar la ley de fatiga y deformación permanente .....	184
Figura 61 Ventana de ayuda .....	185
Figura 62 Ventana para la elección del cálculo del módulo dinámico .....	186
Figura 63 Cálculo del grado PG .....	187

## Índice de Tablas

Tabla 1 Requisitos de granulometría para los diferentes tamaños nominales en la normativa ASTM en mezcla asfáltica densa.....	45
Tabla 2 Requisitos de granulometría para los diferentes tamaños nominales en la normativa SICT en mezcla asfáltica densa .....	46
Tabla 3 Ajuste de grado PG por la normativa de la SICT del año 2008 .....	56
Tabla 4 Nivel de ajuste por la normativa de la SICT del año 2018.....	57
Tabla 5 Modelos de ecuaciones para predicción del módulo dinámico.....	91
Tabla 6 Valores de los parámetros de ajuste de las ecuaciones de correlación ...	92
Tabla 7 Correlaciones de módulo resiliente .....	98
Tabla 8 Cálculo de ejes equivalentes.....	103
Tabla 9 TDPA del año 2011 al año 2021 .....	132
Tabla 10 Composición vehicular .....	133
Tabla 11 Características del TDPA .....	133
Tabla 12 Ajuste por intensidad de tránsito .....	135
Tabla 13 Certificado de calidad del asfalto PG 64-22 .....	139
Tabla 14 Certificado de calidad del asfalto PG 76-22 .....	141
Tabla 15 Calidad de los agregados pétreos.....	143
Tabla 16 Granulometrías de los materiales.....	145
Tabla 17 Granulometría de la mezcla SMA con RARX.....	146
Tabla 18 Granulometría de las mezclas SMA que no llevan RARX.....	148
Tabla 19 Fibra celulosa utilizada en la mezcla SMA .....	149
Tabla 20 Resultados de prueba de escurrimiento en mezcla SMA con asfalto PG 64-22 .....	150
Tabla 21 Resultados de prueba de escurrimiento en mezcla SMA con asfalto PG 76-22 .....	150
Tabla 22 Número de giros según el tránsito esperado.....	152
Tabla 23 Requisitos de calidad para mezclas SMA .....	153

Tabla 24 Propiedades volumétricas a diferentes contenidos de asfalto para la mezcla SMA con RARX .....	153
Tabla 25 Propiedades volumétricas al contenido de asfalto óptimo para la mezcla SMA con RARX.....	153
Tabla 26 Propiedades volumétricas de las diferentes combinaciones con el mismo contenido de asfalto .....	157
Tabla 27 Granulometría de la mezcla densa con RARX.....	158
Tabla 28 Granulometría de las mezclas densas sin RARX.....	158
Tabla 29 Parámetros volumétricos para una mezcla asfáltica densa según el nivel de transito.....	160
Tabla 30 Propiedades volumétricas a diferentes contenidos de asfalto para la mezcla densa con RARX .....	160
Tabla 31 Propiedades volumétricas de las diferentes combinaciones con el mismo contenido de asfalto .....	163
Tabla 32 Resultados de TSR para las diferentes mezclas asfálticas.....	164
Tabla 33 Resultado de la rueda cargada de Hamburgo para las diferentes mezclas .....	166
Tabla 34 Características del tránsito .....	172
Tabla 35 Composición del TDPA .....	173
Tabla 36 Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino.....	178
Tabla 37 Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino.....	179
Tabla 38 Características de las capas del pavimento .....	181

## Índice de Gráficas

Gráfica 1 Representación de la granulometría con la normativa ASTM.....	44
Gráfica 2 Representación de la granulometría con la normativa de la SICT.....	45
Gráfica 3 Módulos .....	61
Gráfica 4 Ángulo de fase.....	61
Gráfica 5 Esfuerzo y deformación sinusoidal .....	89
Gráfica 6 Deformaciones en la prueba de módulo resiliente.....	96
Gráfica 7 Espectro de carga para un eje sencillo.....	104
Gráfica 8 Espectro de carga para un eje sencillo dual .....	105
Gráfica 9 Espectro de carga para un eje tandem.....	105
Gráfica 10 Espectro de carga para un eje tridem.....	106
Gráfica 11 Representación de espectros de carga en gráfico de barras.....	106
Gráfica 16 Curva temperatura-viscosidad del asfalto PG 64-22.....	140
Gráfica 17 Curva temperatura-viscosidad del asfalto PG 76-22.....	141
Gráfica 12 Granulometría de la mezcla SMA con RARX .....	147
Gráfica 13 Granulometría de las mezclas SMA que no llevan RARX .....	148
Gráfica 18 Contenido de asfalto y vacíos de aire.....	154
Gráfica 19 Contenido de asfalto y vacíos en el agregado mineral .....	155
Gráfica 20 Contenido de asfalto y vacíos llenos por el asfalto .....	155
Gráfica 21 Contenido de asfalto y gravedad específica bruta de la mezcla compacta.....	156
Gráfica 22 Contenido de asfalto y gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta .....	156
Gráfica 14 Granulometría de la mezcla densa con RARX .....	158
Gráfica 15 Granulometría de las mezclas densas sin RARX .....	159
Gráfica 23 Contenido de asfalto y vacíos de aire.....	161
Gráfica 24 Contenido de asfalto y vacíos en el agregado mineral .....	161
Gráfica 25 Contenido de asfalto y vacíos llenos por el asfalto .....	162

Gráfica 26 Contenido de asfalto y gravedad específica bruta de la mezcla compacta.....	162
Gráfica 27 Contenido de asfalto y gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta .....	163
Gráfica 28 Resultados de TSR.....	165
Gráfica 29 Resultado de la rueda cargada de Hamburgo para las diferentes mezclas .....	166
Gráfica 30 Distribución de esfuerzos verticales en un sistema de dos capas .....	168
Gráfica 31 Distribución de esfuerzos verticales en un sistema de dos capas .....	168
Gráfica 32 Distribución de esfuerzos verticales en un sistema de tres capas.....	169
Gráfica 33 Distribución de esfuerzos verticales en un sistema de cuatro capas.	169

## 1 Resumen

Existen tramos de prueba de mezclas asfálticas con asfalto modificado con caucho activado y reaccionado (RARX) en México, pero no existen estudios amplios que comprueben la factibilidad de uso. Para hacer viable la inversión en este tipo de mezclas se debe de sustentar que el aumento en el costo de la mezcla se verá reflejado en una vida útil más prolongada, para corroborar que las mezclas con RARX tendrán una vida útil mayor se tienen que hacer estudios de laboratorio que comprueben el aumento en el desempeño.

En este estudio se realizaron pruebas de desempeño a mezclas asfálticas densas, la cual es la más utilizada en México por su aporte estructural y a mezclas SMA. Para la realización del análisis se evaluó el desempeño mediante la prueba de resistencia al daño inducido por humedad y rueda cargada de Hamburgo, utilizando asfalto PG 64-22, asfalto PG 64-22 modificado con RARX y asfalto modificado con polímero PG 76-22.

Para poder implementar una nueva tecnología también se debe de analizar toda la estructura del pavimento. Por lo cual, se desarrolló un programa de análisis de pavimentos basado en la teoría de Burmister.

La teoría de Burmister permite calcular la distribución de esfuerzos y deformaciones en un medio estratificado, con gran exactitud. El programa desarrollado en esta investigación recibe el nombre de "Pav Analyzer" el cual permite calcular los ejes equivalentes a cualquier profundidad, utilizando el método de la UNAM. Además, proporciona un análisis completo del pavimento, incluye esfuerzos verticales, radiales, tangenciales y cortantes a la profundidad a la que se haya determinado calcular fatiga y deformación permanente. Este programa, además brinda la posibilidad de cambiar la ley de fatiga y de deformación permanente. Igualmente

ofrece herramientas para poder obtener el módulo dinámico a través de correlaciones y obtener el grado PG.

**Palabras clave:** RARX, Esfuerzo, Deformación, Fatiga, Deformación permanente.

## **Abstract**

There are test sections of asphalt mixtures with activated and reacted rubber-modified asphalt (RARX) in Mexico, but there are no extensive studies that prove the feasibility of use. To make the investment in this type of mixture viable, it must be substantiated that the increase in the cost of the mixture will be reflected in a longer lifespan. To confirm that RARX mixtures will have a longer lifespan, laboratory studies need to be conducted to prove the performance increase.

In this study, performance tests were conducted on dense asphalt mixtures, which are the most used in Mexico due to their structural contribution, as well as on Stone Mastic Asphalt (SMA) mixtures. To carry out the analysis, performance was evaluated using the Hamburg Wheel-Tracking Test and the Moisture Induced Sensitivity Test. Asphalt binders PG 64-22, RARX-modified PG 64-22, and polymer-modified PG 76-22 were used.

For the successful implementation of a new technology, it is necessary to analyze the entire pavement structure. Therefore, a pavement analysis program was developed based on the Burmister theory.

The Burmister theory enables accurate calculation of stress and strain distribution in a stratified medium. The program developed in this research is called "Pav Analyzer," which calculates equivalent axes at any depth using the UNAM method. It also provides a comprehensive pavement analysis, including vertical, radial, tangential, and shear stresses at the depth where fatigue and permanent deformation are calculated. This program also offers the ability to change the fatigue and permanent deformation laws. It also provides tools to obtain the dynamic modulus through correlations and to obtain the PG grade.

### 2 Introducción

Para mejorar la respuesta esfuerzo-deformación de los pavimentos flexibles se utilizan diferentes soluciones, como lo son bases negras, bases con asfalto espumado y mezclas asfálticas con asfaltos modificados. Los asfaltos se modifican con polímeros, pero de igual manera se pueden modificar con caucho. La modificación de asfaltos con caucho es poco utilizada en México, dado que en un principio se incorporaba directamente al asfalto. Al ser almacenado y no recirculado, al pasar el tiempo, el caucho se separaba del asfalto debido a su mayor densidad.

Para incorporar el caucho al asfalto, se puede hacer por la vía húmeda, que consiste que, bajo condiciones de presión y temperatura, se agrega el caucho sin que haya separación. La desventaja de este proceso es que los equipos son muy costosos.

Para incorporar el caucho en Europa, se ha utilizado el RARX, que es un producto en el cual el 60% es caucho y se puede incorporar directamente a la mezcla asfáltica a partir del tambor mezclador. Se agrega como un pétreo más y ofrece facilidades sobre su uso, como lo son que no requiere un porcentaje mínimo de producción de mezcla asfáltica para su utilización, se puede producir desde un camión hasta una producción a gran escala y su almacenamiento no requiere la quema de combustibles como para un asfalto modificado que para su almacenamiento requiere gas lp.

El RARX es un producto a base de caucho. El caucho es obtenido a partir de neumáticos fuera de uso (NFU). Por lo cual se da un destino final a los neumáticos, de esta manera se evita que contaminen o que crezca fauna nociva dentro de ellos.

En los estudios que se han realizado en Europa, el RARX aumenta la durabilidad con respecto a una mezcla sin RARX. Por lo que para poder utilizar el RARX en México, se necesitan utilizar agregados y asfaltos mexicanos que cumplan con los requisitos de calidad que se encuentran dentro de las normas que son utilizadas en

México, como lo son la normativa de la SICT (Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transporte) y la normativa ASTM (American Society for Testing and Materials) y comparen mediante pruebas de desempeño la durabilidad de las mezclas que utilizan RARX contra las que no utilizan.

Para determinar qué tipo de mezcla presenta un mejor desempeño y, por ende, una mayor vida útil, se deben de realizar pruebas de laboratorio. Estas pruebas son la resistencia a la tensión indirecta, rueda cargada de Hamburgo, módulo dinámico y fatiga. Sin embargo, para evaluar que estructura de pavimento es la mejor para una vialidad, es necesario evaluar en su totalidad el pavimento, es decir, analizar todas las capas que conforman el pavimento. Este análisis se debe de realizar con una teoría que brinde gran nivel de confiabilidad para el análisis de pavimentos. De esta manera, se podrá seleccionar la estructura de pavimento que mejor se adapte a la vialidad, garantizando de esta manera la vida útil prevista, evitando incurrir en un sobre diseño o en un subdiseño. El problema de un subdiseño es que la vialidad fallará antes de la vida útil prevista, mientras que en un sobre diseño se aumentan los costos innecesariamente.

## **2.1 Antecedentes**

Las vialidades son esenciales para el desplazamiento de personas y mercancías. Por lo tanto, contar con una red de carreteras en buen estado es fundamental para lograr crecimiento económico y mejorar la calidad de vida de la población. Esto permite el acceso a la población a un mayor número de empleos, menor tiempo de traslado y mayor seguridad al transitar.

A nivel global, se enfrenta problemas debido a la contaminación especialmente el calentamiento global. De acuerdo con los compromisos de México ante el cambio climático, se encuentran el incentivar la separación de residuos para facilitar su aprovechamiento y combatir el cambio climático (Cambio Climático México, 2020).

La huella ecológica que necesita cada persona es de 2.7 hectáreas, pero el planeta solo es capaz de otorgar 1.8 hectáreas (WWF,2012). La huella ecológica nos indica cuantas hectáreas de tierra y mar se necesitan para cubrir las necesidades de cada ser humano. Se puede notar que se tiene un déficit. Para reducir el impacto ambiental, se deben de buscar soluciones prácticas que reduzcan la contaminación. Entre estas alternativas se encuentra el reutilizar los objetos que han llegado al final de su vida útil para la cual fueron diseñados.

En este sentido, todas las áreas de la ingeniería deben contribuir a reducir la contaminación. En las vías terrestres, se han adoptado prácticas como la utilización de mezclas tibias. Estas mezclas se producen a temperaturas inferiores a las que se produciría una mezcla caliente, por lo cual, se consume menos combustible. Otra alternativa es el pavimento asfáltico recuperado (RAP por sus siglas en inglés). Al llegar al final de su vida útil, la carpeta asfáltica es retirada de la vialidad mediante una fresadora y es llevada a una trituradora donde se le dará tratamiento para posteriormente trasladar a una planta de mezclas asfálticas donde se reincorporará a una mezcla nueva.

Es importante mencionar que estas soluciones no solo deben de ser ecológicas, sino que deben de aportar mayores características de desempeño a las mezclas asfálticas.

La inversión pública y privada que se le da al mantenimiento de carreteras en México no es suficiente. Esto queda evidenciado en las malas condiciones que se encuentran los caminos. La inversión pública que se le ha dado a comunicaciones y transportes alcanzó su máximo en el año 2014, donde se invirtió el 0.5% del PIB (17.5 billones de pesos PIB 2014), desde ese año, ha venido a la baja el presupuesto otorgado en términos porcentuales con respecto al PIB. Tan solo en el año 2019 se invirtió el 0.2% del PIB (24.2 billones de pesos PIB 2019) (Proyectos México, 2020).

México necesita invertir cada año 996,451 millones de pesos o el equivalente al 5% del Producto Interno Bruto (PIB) en el sector de infraestructura para reanimar la

economía. Pero para lograrlo es fundamental la participación del sector privado y público, además, de brindar certidumbre a los inversionistas (Fernandez, 2020)

Si aunado al poco presupuesto que se le da a la rehabilitación se le añade que las soluciones dadas no alcanzan su vida útil, se tiene un problema aún más grave. En efecto, la inversión que se le hace a una vialidad tiene proyectada una vida útil si esta vida útil se reduce el costo será mayor.

Para aumentar la vida útil de las mezclas asfálticas se han modificado los asfaltos. Esto mediante un polímero o hule molido de neumático que es incorporado al asfalto convencional, aumentando su vida útil, esto queda representado en cuanto a parámetros de diseño como lo son fatiga, energía de fractura y módulo dinámico.

Cada vez es más atractivo para los inversores privados y los gobiernos utilizar mezclas asfálticas con asfalto modificado, y aunque este tipo de mezclas aumentan los costos, de igual manera aumenta la vida útil de la vialidad. Lo que al inicio resulta más costoso, al dividirlo entre la vida útil resulta más económico que una mezcla con asfalto convencional.

En el ámbito gubernamental, resulta interesante adoptar tecnologías que sean amables con el medio ambiente, como lo es en la CDMX que utilizan mezclas tibias. Estas mezclas se logran agregando un aditivo directamente al asfalto y esto da como consecuencia que se puedan bajar las temperaturas de mezclado y compactación. Al reducir las temperaturas de mezclado, se ahorra combustible, lo que representa menos emisiones al medio ambiente.

Todos los estudios sobre la viabilidad sobre alguna mezcla asfáltica tienen que ser respaldados por un análisis del pavimento en su conjunto.

Para el análisis de pavimentos en México, se cuenta con el programa desarrollado por el instituto de ingeniería de la UNAM, que es el DISPAV. En este programa, se analiza el tránsito a través de ejes equivalentes. Con base en los resultados obtenidos en el análisis de tránsito y las características de los materiales, se determinan los espesores del pavimento.

Otro programa desarrollado en México es el UMICH PAV, desarrollado por el M. en I. Carlos Coria. En el cual, mediante un análisis mecanicista multicapa con la teoría de Odemark, transforma un medio estratificado en un espesor equivalente de una sola capa, lo cual permite aplicar las ecuaciones de Boussinesq y mediante correlaciones de fatiga y deformación permanente, se obtiene la respuesta del pavimento, determinando así los ejes equivalentes que el pavimento soportará.

## **2.2 Descripción del problema**

Los cementos asfálticos modificados han tenido un gran auge debido a sus propiedades tales como la resistencia a la fatiga. La normativa de la SICT nos permite utilizar hule molido de llanta para la modificación de asfaltos desde el 2006, pero esta opción se dejó de usar en México debido a que el hule, al ser un material de mayor densidad que el asfalto, provocaba una separación de fases (Biro y Fazekas, 2012). Esto provocaba que se taparan tuberías de tanques de asfalto o petrolizadoras. Aunque el uso del hule es una opción ecológica, presenta dificultades de almacenamiento y se considera poco práctico.

Actualmente, en México la mayoría de los asfaltos modificados se producen a partir de polímeros, debido a que al estar almacenados no se separan del asfalto con la misma facilidad que el caucho.

En México, ya hay carpetas asfálticas modificadas con RARX, pero aún la modificación de asfaltos con RARX no se ha utilizado demasiado debido a la falta de un análisis de factibilidad económica y desempeño bajo las diferentes condiciones que existen en México. Por ende, no es atractivo aún para una inversión pública o privada debido a que, en primer lugar, el costo es mayor a comparación de una mezcla con asfalto convencional. Aunque el aumento en la vida útil puede sustentar la inversión, no existen estudios que comprueben que tanto aumenta la vida útil, por lo cual esa incertidumbre el gobierno y los inversionistas privados

prefieren no arriesgarse. Otro parámetro importante es que al utilizar RARX se reduce la contaminación

México es un país que tiene una gran variedad de materiales pétreos y condiciones climáticas, por lo cual el diseño de la hipótesis debe de regionalizar los elementos. El RARX al ser un producto español la mayoría de sus estudios son con materiales europeos. Para la implementación del RARX, se debe de comprobar su eficiencia con los agregados que existen en México. Se deben de considerar agregados que sean representativos del país, que deben de estar dentro de las especificaciones establecidas en la normativa SICT y ASTM. Existen muchos bancos de materiales, pero son pocos los que cumplen con la normativa SICT y ASTM por lo que la adecuada elección del agregado representa un problema.

Para poder implementar una nueva tecnología en México, es necesario realizar un análisis exhaustivo, el cual se respalde los beneficios económicos y ecológicos. Para poder realizar este análisis en México, existen diversos programas como lo es el programa DISPAV desarrollado por la Facultad de Ingeniería de la UNAM y el programa UMICH PAV desarrollado por el M. en I. Carlos Coria de la Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.

El software desarrollado por la UNAM presenta la desventaja de restringir cambios en la Ley de fatiga y en deformación permanente, lo cual supone que todas las mezclas asfálticas se comportarán de la misma manera. Sin embargo, para las tecnologías actuales en modificación de asfaltos, es incorrecto, dado que dependiendo de las características del pétreo y del ligante asfáltico el comportamiento variará.

El programa UMICH PAV es un software que añade la funcionalidad de variar las leyes de fatiga y deformación permanente. A pesar de ello, para obtener los esfuerzos y deformaciones del pavimento, lo hace a través de la teoría de Odemark, en la cual se basa en obtener un espesor equivalente donde se pueda aplicar la teoría de Boussinesq. No obstante, para ofrecer mayor exactitud se debe aplicar la

ecuación multicapa, como lo hace el programa KENLAYER desarrollado por el Dr. Huang.

La implementación de una nueva tecnología requiere la disponibilidad de un programa que realice un análisis integral, permitiendo al usuario realizar modificaciones en la ley de fatiga y deformación permanente. Esto resulta fundamental para realizar una comparativa entre el uso del RARX y los asfaltos convencionales. Sin embargo, actualmente no se cuenta con una solución adecuada, que brinde la precisión necesaria al momento de elegir la mejor opción para una vialidad, considerando un aspecto crítico como la vida útil que impactará directamente en el costo y la reducción del impacto ambiental. Esta falta de una herramienta apropiada limita la capacidad de optimizar y maximizar los beneficios de la nueva tecnología en el diseño de pavimentos, obstaculizando así la toma de decisiones informadas y eficientes en la industria.

## **2.3 Justificación**

En México se desechan 50 llantas cada minuto y solo se recicla el 10% (La jornada, 2019). El 90% restante no tiene un final certero y terminan contaminando ríos o contribuyendo a la reproducción de fauna nociva. Los neumáticos son utilizados como combustible en procesos industriales, pero el problema de utilizarlo de esta manera es que producen gases tóxicos nocivos para la salud.

Por lo tanto, es necesario un sistema de recolección y reciclaje de neumáticos. En Europa ya se han hecho realizado varias vialidades con este producto, inclusive ya existe una nota técnica para su uso (Nota técnica NT 02/2020), pero no existen pruebas de laboratorio que adapten este producto a la normativa SICT.

Actualmente el RARX que se ha aplicado en la construcción de vialidades en México, proviene de España. Aún no se fabrica en México, dado que la demanda de este producto aún es baja. Sin embargo, si el aumento del ciclo de vida de las

carpetas asfálticas en las cuales se ha utilizado el RARX se respaldará mediante pruebas de laboratorio, se abrirá la posibilidad para producirlo en México y solucionar los problemas que tenemos en el país con respecto al uso final que se les da a los neumáticos. Además, de dar una mayor vida útil a las vialidades de pavimentos flexibles mexicanas.

Para proporcionar una comparativa adecuada a los inversionistas públicos y privados, se tienen que someter las diferentes propuestas de solución en cuanto a mezclas asfálticas a un análisis exhaustivo. Este análisis determinará que mezcla ofrece la mejor relación costo-beneficio, tanto en el aspecto económico como ecológico.

Actualmente existen programas para el análisis de pavimentos, pero a pesar de ello en México se necesita un programa el cual esté desarrollado con una teoría de gran exactitud como la teoría de Burmister, mediante el cual se pueda obtener una comparativa adecuada del desempeño de las diferentes mezclas asfálticas y propuestas estructurales de un pavimento, en el que se puedan variar las leyes de fatiga y deformación permanente y que además cuente con una interfaz fácil de interpretar. Además de dotar al diseñador de diferentes herramientas como la determinación del grado PG, el análisis de tránsito y la obtención de módulos mediante correlaciones.

Es de gran importancia destacar que, para poder solventar una nueva tecnología en México, todos los análisis que se hagan deberán de tener un programa que brinde un análisis exacto y confiable para las diferentes vialidades donde se implementará el uso del RARX.

## **2.4 Objetivos**

### **2.4.1 Objetivo general**

Evaluar y comparar el comportamiento de mezclas asfálticas densas y SMA con diferentes asfaltos (PG 64-22 modificado con RARX, asfalto PG 64-22 y asfalto modificado con polímero PG 76-22) mediante pruebas de desempeño, que permitirán determinar cuál de estas mezclas proporciona el mejor rendimiento en términos de resistencia al daño inducido por humedad y deformación permanente.

Crear un programa de análisis de pavimentos con la teoría de Burmister (1943) que permita obtener la distribución de esfuerzos y deformaciones de pavimentos. El programa deberá de ser capaz de hacer análisis empírico mecanicista sencillos utilizando leyes de fatiga y deformación permanente definidas por el usuario, lo cual permita estimar la vida útil del pavimento. Además, deberá brindar herramientas, como el cálculo del grado PG, analizar el tránsito para obtener los ejes equivalentes y obtener el módulo dinámico de la mezcla asfáltica a través de correlaciones. De esta manera servir de sustento para analizar las diferentes vialidades donde se vaya a ocupar el RARX.

### **2.4.2 Objetivos particulares**

- Encontrar agregados pétreos los cuales cumplan con los requisitos de calidad normativa de la ASTM y SICT que mediante combinación entre ellos se cumplan los requisitos granulométricos para una mezcla densa de tamaño nominal de  $\frac{3}{4}$ " y una mezcla SMA de tamaño nominal  $\frac{3}{8}$ ".
- Realizar el diseño volumétrico de las mezclas asfálticas densa y SMA con asfalto modificado con caucho activado y reaccionado, para obtener el contenido de asfalto óptimo.
- Agregar el contenido de asfalto óptimo de las mezclas con RARX a las mezclas que no lo contienen y evaluar sus parámetros volumétricos.
- Realizar pruebas de desempeño (resistencia al daño inducido por humedad, susceptibilidad a la deformación permanente) a las diferentes mezclas asfálticas.

- Determinar según cada tipo de mezcla asfáltica (densa y SMA), con qué asfalto se obtuvo el mejor desempeño en TSR y rueda cargada de Hamburgo.
- Demostrar que el proceso de modificación de mezclas asfálticas con caucho activado y reaccionado en planta es factible llevarlo a cabo de una manera eficaz sin tener la separación del asfalto y el caucho.
- Desarrollar un código en Python que permita obtener la relación esfuerzo-deformación para pavimentos de dos, tres y cuatro capas por la teoría de Burmister y validar los resultados con el software KENLAYER.
- Crear un código en Python que permita obtener el número de ejes equivalentes con el método de la UNAM.
- Implementar un código en Python con el cual se obtenga el grado PG con la normativa 2008 y 2018 de la SICT.
- Desarrollar un código de programación para obtener el módulo dinámico de una mezcla asfáltica, utilizando correlaciones basadas en los métodos del instituto del asfalto, Andrei, Witczak y Mirza (1999) y Witczak y Bari (2006).
- Diseñar y desarrollar una interfaz gráfica que integre todo el código realizado en Python mediante una interfaz fácil de entender.

## **2.5 Hipótesis**

Es posible que la modificación de asfaltos con RARX permita aumentar el desempeño de las mezclas asfálticas densas y SMA, y esto a su vez genere aumento de vida útil, beneficios económicos y ecológicos que si se hiciera con un asfalto convencional.

El desarrollo de un programa basado en la teoría de Burmister, que permita analizar pavimentos, modificar la ley de fatiga y deformación permanente, y que además

brinde al usuario herramientas como le obtención de ejes equivalentes, el cálculo del grado PG y estimar el módulo dinámico, proporcionará resultados de gran exactitud para la evaluación de pavimentos donde se vaya a implementar RARX. Esto a su vez mejore la toma de decisiones en la construcción y el mantenimiento de dichas vialidades.

## **2.6 Propuesta de solución**

La propuesta de solución consiste en la búsqueda de un banco de materiales el cual cumpla con los requisitos de calidad de la SICT y de la ASTM, esto con el fin de poder regionalizar el estudio. Por lo cual, el agregado se ensayará en un laboratorio certificado. Una vez que haya cumplido las características el pétreo, se planteará una propuesta granulométrica para una mezcla densa y una mezcla SMA con asfalto convencional (PG 64-22), asfalto PG 64-22 modificado con RARX y asfalto modificado con polímero PG 76-22.

Estas mezclas asfálticas se ensayarán con los mismos agregados y tratando de mantener la misma estructura granular, dado que en las mezclas con RARX, el caucho activado y reaccionado entra como una fracción más de pétreo. El contenido óptimo para la mezcla SMA y la densa que contengan RARX se replicará en las mezclas que no contengan RARX con el fin de no agregar una variable por el contenido de asfalto.

Posteriormente, se realizarán las pruebas de desempeño: rueda cargada de Hamburgo y resistencia a la tensión indirecta. Paralelamente al desarrollo de las pruebas de laboratorio, se desarrollará un software para el análisis de pavimentos.

Finalmente, se analizarán los resultados y se obtendrá si el RARX es una opción ecológica dado que este producto promete un aumento de vida útil, el cual se verá reflejado en menos emisiones al medio ambiente, menor consumo de agregados, menor consumo de asfalto, menor consumo de combustible y lo más importante

para el usuario de la vialidad, menos intervenciones de rehabilitación. De tal manera que se tiene que sustentar que la inversión en mezclas asfálticas modificadas con RARX darán todos estos beneficios.

En cuanto a la propuesta de solución respecto al análisis de pavimentos, el primer paso será el desarrollar un código en Python con la teoría de Burmister, la cual es una teoría de gran exactitud, ya que resuelve la ecuación de la elasticidad. Se verificarán los resultados obtenidos con el programa KENLAYER.

Posteriormente, se desarrollará un programa para determinar el número de ejes equivalentes a cualquier profundidad. Para esto, será importante ir obteniendo los coeficientes de daño para cada vehículo e irlos comparando con el instructivo para diseño estructural de pavimentos flexibles para carreteras desarrollado por la UNAM.

Además, se desarrollará un código que permita obtener el grado PG del asfalto, con la normativa 2008 y 2018 de la SICT, para brindar una herramienta adicional al momento de diseñar su pavimento.

Después, se desarrollará un código para que en caso de que se desconozca el módulo dinámico de la mezcla asfáltica, el diseñador pueda obtenerlo a través de correlaciones. Por lo cual, se realizará una investigación exhaustiva para elegir las correlaciones que brinden mayor exactitud.

Finalmente, se creará una interfaz gráfica. Esta interfaz integrará todos los programas desarrollados en Python, brindando así un programa que permita a los usuarios analizar sus pavimentos de una manera sencilla y eficaz.

### 3 Marco teórico

#### 3.1 Introducción

Una mezcla asfáltica es la combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico que se puede modificar con polímeros o a partir de hule molido de neumático. Para el buen comportamiento de un pavimento, debe de elegirse un banco de materiales que cumpla con los requerimientos de calidad que marque la normativa de SICT o ASTM. El incumplimiento de un parámetro en la calidad del agregado puede provocar fallas prematuras.

El cemento asfáltico brinda cohesión a la mezcla, por ende, deben de realizarse pruebas que garanticen la seguridad en planta, en el manejo y el desempeño del ligante. El cemento asfáltico deberá elegirse de acuerdo con la zona donde se empleará y al tránsito al cual estará sometido el pavimento. Una adecuada elección de agregados pétreos y cemento asfáltico se verá reflejado en una mezcla asfáltica resistente ante la fatiga y la deformación (Martínez, 2019).

La modificación de asfaltos se puede hacer a partir de polímeros o de hule molido de neumático, ambas opciones generan aumento en las propiedades reológicas del asfalto. En este capítulo se analizarán las diferentes pruebas que se requieren hacer en los agregados pétreos y en el asfalto. Además, se revisará la modificación de asfaltos a partir de hule molido de neumático, junto con los problemas que causan los neumáticos.

## **3.2 Agregados pétreos**

El agregado pétreo se puede definir como material de origen mineral que se encuentra en la naturaleza, y en algunos casos puede ser procesado para obtenerse en los tamaños deseados (Ayala, Delgado, Cuellar, & Salazar, 2019).

El comportamiento del agregado dependerá de sus propiedades, las cuales son de consenso y de origen. Las propiedades de consenso dependen de la trituration y de todo el proceso que pueda ser modificado por el hombre; las propiedades de origen, por otro lado, dependen del origen geológico de la roca. Por lo tanto, estas propiedades no pueden ser modificadas.

Para poder garantizar un comportamiento adecuado de la mezcla asfáltica, se deben de realizar pruebas de calidad a los agregados pétreos. Los agregados pétreos deberán de estar en un rango de valores dados por una normativa. Si los agregados pétreos no cumplen con los valores especificados en la norma, no podrán formar parte de una mezcla asfáltica, puesto que en caso de usarse afectarán el desempeño de la mezcla.

Todas las pruebas que se mencionan hacen referencia a normativa (ASTM, 2017).

## **3.3 Agregados gruesos y pruebas de calidad**

Se clasifica como agregado grueso a el material retenido en la malla número 4. A estos materiales se les realizan pruebas de calidad para asegurar su óptimo comportamiento en una mezcla asfáltica.

### **3.3.1 Densidad relativa del material pétreo seco y absorción**

La densidad relativa es la relación de la densidad de un material y la densidad de otro material de referencia, que en el caso de pétreos se utiliza de referencia la densidad del agua.

La prueba consiste en eliminar todo el material que pase la malla número 4 (4.75 mm) para posteriormente preparar una muestra que al menos debe de tener una masa mínima según su tamaño nominal. Se debe lavar la muestra para eliminar el polvo adherido. Después se seca al horno, seguido de sumergir el agregado en agua por el periodo de 24 horas. Cumplido el periodo, se procede a obtener la condición saturada superficialmente seca y registrar la masa. Después, se sumerge la muestra en agua a través de una canastilla y se obtiene la masa sumergida. Por último, se seca nuevamente la muestra y se registra la masa (Ayala, Delgado, Cuellar, & Salazar, 2019).

### **3.3.2 Desgaste de los Ángeles**

Los materiales pétreos son susceptibles a degradación desde el momento que son triturados, almacenados y cargados para llevar a la planta de mezclas asfálticas, al descargarse, cuando son enconados, durante su traslado, al ser llevados a las tolvas, cuando caen al vehículo que los transportará, durante la compactación y en su vida útil en obra. Por lo tanto, es crucial asegurarse que serán lo suficientemente resistentes para no sufrir demasiada desintegración. Esta prueba es un indicador de la tenacidad del agregado grueso.

Para llevar a cabo la prueba, se selecciona una granulometría para el agregado grueso, según esta granulometría es colocada una carga abrasiva. El agregado se coloca en la máquina de los Ángeles junto con la carga abrasiva y se hace girar la máquina durante cierto periodo. Al finalizar este periodo, se tamiza todo el material por la malla número 12 (1.7 mm) y el material que pase será desechado. La diferencia de la masa inicial y la masa retenida en la malla No. 12 después de la

prueba, todo esto dividido por la masa inicial y multiplicado por cien se le conoce como el porcentaje de desgaste de los Ángeles (ASTM, 2017).



*Figura 1 máquina de desgaste de los Ángeles*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### **3.3.3 Desgaste microdeval**

Esta prueba mide la resistencia por abrasión que tiene el agregado pétreo grueso en presencia de agua. La prueba consiste en seleccionar una masa de muestra, colocarla en la máquina de desgaste microdeval, agregar agua, verter la carga abrasiva y hacer girar durante un cierto tiempo. Luego, se lava el agregado y se criba por la malla No. 16 (1.18 mm) y se descarta todo el material que pase esa malla.

El porcentaje de desgaste microdeval se determina al obtener la diferencia de la masa inicial con la masa retenida en la malla No. 16, dividirla entre la masa inicial y multiplicarla por cien (ASTM, 2017).



*Figura 2 máquina de desgaste microdeval*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### **3.3.4 Intemperismo acelerado**

Esta prueba permite determinar la degradación que tendrá el agregado pétreo en presencia de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

Se debe de preparar la solución y durante toda la prueba debe de estar en los rangos de densidad establecidos por la normativa, una vez realizada la solución se dejará reposar 48 horas por lo menos previo a su uso. Luego, se prepara la muestra y se sumerge en la solución durante cierto periodo de tiempo, después se secan al horno y se repite nuevamente el ciclo. En total son 5 ciclos de inmersión y secado. Al final de estos ciclos, se lava la muestra hasta que esté libre de la solución y se realiza el secado en horno. Posteriormente, se criba el material según la última malla de la selección del rango de tamaños del agregado seleccionado. La diferencia de la masa inicial y la masa final todo esto entre la masa inicial multiplicado por 100 es el intemperismo acelerado que sufrió el agregado pétreo (Ayala, Delgado, Cuellar, & Salazar, 2019).



*Figura 3 prueba de intemperismo acelerado*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### **3.3.5 Porcentaje de partículas largas y lajeadas**

La forma de la partícula es un indicador clave para medir la tendencia del agregado pétreo grueso a fracturarse desde su fabricación, construcción de la carpeta asfáltica y a lo largo de su vida útil. Por esta razón, se busca que el agregado pétreo grueso tenga una forma esférica en su mayoría, ya que las partículas planas y alargadas tienden a fracturarse con mayor facilidad.

Para la elaboración de la prueba, se selecciona el tamaño nominal del agregado y se selecciona una muestra que al menos deberá de cumplir con una masa mínima, para que los resultados sean representativos. Seguidamente, se tamizan los agregados y se determina su granulometría. Después, se identifica el largo, ancho y espesor de cada grava, para colocar el largo en la abertura más grande del calibrador y, para posteriormente, pasar el espesor de la partícula por la abertura más pequeña del calibrador. Para que una partícula sea plana y alargada, tiene que pasar por la abertura más pequeña.

Al finalizar la prueba se tendrán 2 grupos, las partículas planas y alargadas o ni planas ni alargadas. La masa de las partículas planas y alargadas entre la masa total multiplicada por 100 es el porcentaje de partículas plana y alargadas (ASTM, 2017).



*Figura 4 calibrador ASTM para prueba de forma de la partícula*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### **3.3.6 Diferencias en la prueba forma de la partícula entre la normativa SICT y ASTM**

Si bien la normativa de la SICT toma de referencia la normativa de la ASTM para establecer sus normas, por lo general se obtienen resultados similares al realizar una prueba con las dos diferentes normativas, excepto en forma de la partícula. En este caso, se obtienen resultados muy diferentes. La mayor diferencia entre ambas pruebas radica en el calibrador con el que se realizan. Mientras que el calibrador ASTM es dinámico, es decir, se ajusta según cada partícula para cumplir con una relación que por lo regular es 5:1, aunque de la misma manera se puede adaptar para medir otras relaciones (2:1, 3:1), la SICT cuenta con dos calibradores, uno para partículas planas y otro para partículas alargadas. El calibrador de la SICT solo mide una relación 2:1, y ya tiene las dimensiones establecidas para cada partícula según su tamaño.

Por ejemplo, para una partícula de  $\frac{1}{2}$ " , en el calibrador de la SICT pasa por la misma abertura tanto una partícula que apenas y logró pasar la malla de  $\frac{3}{4}$ " que una partícula que apenas se retuvo en la malla de  $\frac{1}{2}$ ". Por lo cual, queda claro que estas partículas no tienen las mismas dimensiones y la normativa de la SICT las considera

como si midieran lo mismo, por lo cual con la relación que mide la SICT para la primera partícula no estaría midiendo una relación 2:1, a diferencia que en el calibrador ASTM si se pudiese medir esta relación 2:1.

### **3.3.7 Partículas trituradas**

En una mezcla asfáltica es importante tener en su gran mayoría partículas trituradas que presenten caras fracturadas, puesto que ayudan a aumentar la resistencia al corte e incrementar la fricción interna entre las partículas.

Esta prueba se puede hacer por medio de la determinación de masa o por el conteo de partículas. Para la determinación de masa, según el tamaño nominal del agregado se requiere contar con al menos una masa mínima para la realización de la prueba. Posteriormente, se extiende la muestra y se inspecciona cada partícula. Si la cara revisada tiene al menos una cuarta parte fracturada, se considera de esa manera. Se repite el procedimiento por cada una de las caras del agregado. Finalmente, se separan en tres grupos: partículas sin caras fracturadas, partículas con una cara fracturada y partículas con dos o más caras fracturadas.

Para el cálculo por masa, es la diferencia de la masa total y la masa de la muestra ensayada (sin caras fracturadas, con una cara fracturada o con dos o más caras fracturadas) todo esto dividido sobre la masa total de la muestra y multiplicado por cien.

El método de conteo, a diferencia del de masa, se expresa en el número total de partículas de la muestra menos el número de partículas sin fracturar, partículas con una cara fracturada o con dos o más caras fracturadas, según sea el caso. Todo esto entre el número total de partículas de la muestra multiplicado todo por cien (ASTM, 2017).

## **3.4 Agregados finos y pruebas de calidad**

El agregado fino de una mezcla asfáltica se refiere a todas las partículas que pasan a través de la malla número 4 (4.75 mm). Es fundamental cumplir con los criterios de calidad en cada una de las pruebas para el comportamiento óptimo de una mezcla asfáltica.

#### **3.4.1 Densidad relativa y absorción**

Mediante esta prueba se puede conocer la densidad relativa del agregado pétreo, que es la relación de la masa del agregado respecto a la masa de un volumen igual de agua.

Para realizar esta prueba por el método gravimétrico, se selecciona una muestra que se tendrá que agregar un porcentaje mínimo de humedad y se tendrá que dejar reposar durante un intervalo de tiempo. Acabando este intervalo, se deberá de encontrar la condición saturado superficialmente seco del agregado. Para determinar esta condición, se debe de llenar el molde con el agregado hasta que el agregado desborde. Posteriormente, con el pisón se le darán veinticinco golpes circulares, al finalizar se alza el molde. Si el agregado mantiene la forma del molde al retirarlo, significa que tiene exceso de humedad y se debe disgregar y secar con una corriente de aire tibio. Este procedimiento se repite hasta que se presente una caída pequeña del agregado al retirar el molde.

Después se introduce una muestra del agregado pétreo, dentro de un picnómetro y se eliminan las burbujas de aire. Luego, se pesa el agregado pétreo en picnómetro con agua y sin burbujas de aire, y se retira la muestra para secarla al horno y al final del secado se pesa. Finalmente se pesa el picnómetro con agua. Por otro lado, la absorción se refiere al aumento de masa debido a la penetración de agua en los poros del material. Los valores altos de absorción pueden hacer referencia a un material no duradero, es decir, que absorberá mayor cantidad de asfalto en una mezcla y por lo tanto no está disponible para desarrollar la misma película de asfalto que los agregados menos absorbentes, lo cual hace que se encarezca la mezcla asfáltica (Martínez, 2019).



*Figura 5 Realización de prueba de gravedad específica y absorción del agregado fino*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*



*Figura 6 Condición SSS agregado fino*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

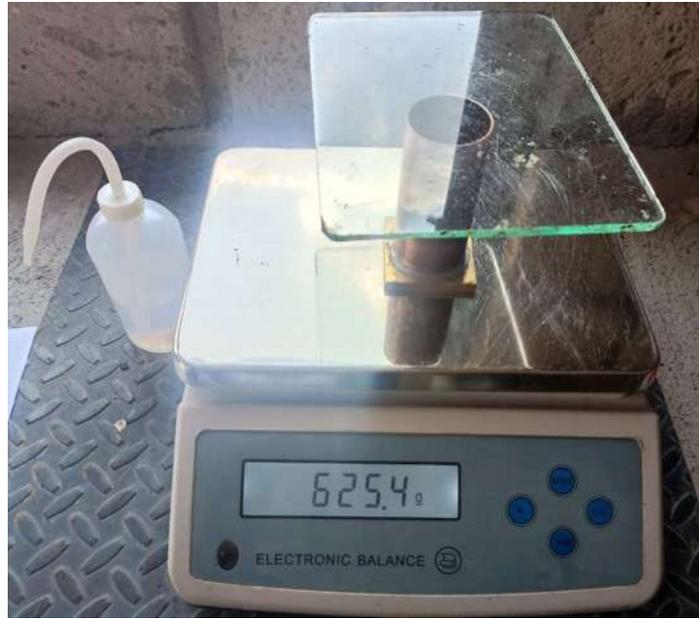
### 3.4.2 Angularidad

Esta prueba nos da una noción de la angularidad, esfericidad y textura del agregado pétreo. Consiste en preparar una muestra según lo establecido en la norma. Posteriormente, el medidor cilíndrico se pesa, se vierte la muestra en la parte superior del embudo, se bloquea la salida del agregado, si el dispositivo no cuenta con un componente para bloquear la salida, se deberá colocar un dedo en la parte inferior, y se deja caer libremente en el cilindro, se enrasa y finalmente se registra su masa. De igual manera se debe de conocer el volumen del cilindro. Para ello, es necesario calibrarlo. La calibración se realiza con agua destilada, una placa de vidrio y una capa de grasa que se colocará en los bordes del cilindro.



*Figura 7 Prueba angularidad del fino*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*



*Figura 8 Calibración del cilindro*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### **3.4.3 Equivalente de arena**

Esta prueba tiene como fin medir la cantidad de arcillas o finos plásticos que se encuentran en agregados pétreos que pasan la malla número 4 (4.75 mm).

Para la realización de esta prueba, se requiere la obtención de una muestra de agregado en un cilindro de prueba. Posteriormente, se llena una probeta de solución hasta las 4 pulgadas, se vacía la muestra, se coloca un tapón y se agita. Posteriormente, se inserta el tubo irrigador, se lava el material de las paredes mientras el irrigador baja hasta llegar al fondo del material, simultáneamente girar la probeta para remover el material del fondo y hacerlo entrar en suspensión. Se llena la probeta hasta las 15 pulgadas y se deja reposar cierto intervalo de tiempo.

Finalmente se toman las lecturas de la arcilla y de la arena, introduciendo un pisón y restándole 10 pulgadas a la lectura superior que dé. La relación de la lectura de la arena entre la lectura de la arcilla todo esto multiplicado por cien es el equivalente de arena (Ayala, Delgado, Cuellar, & Salazar, 2019).



Figura 9 Realización de la prueba equivalente de arena

Fuente: Imagen tomada por el autor



Figura 10 Probeta de equivalente de arena

Fuente: Imagen tomada por el autor

### 3.4.4 Azul de metileno

Esta prueba determina el grado de radioactividad del material que pasa la malla número 200. Si este valor es alto, puede significar problemas de adherencia entre el agregado pétreo y asfalto.

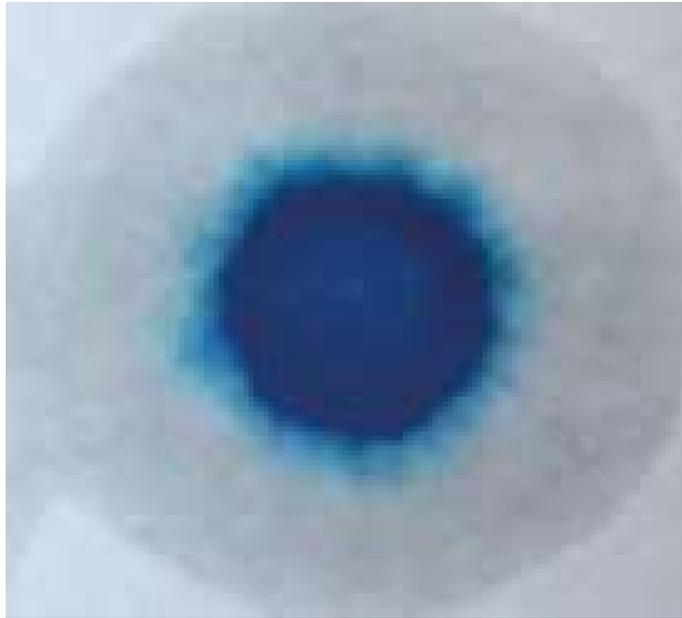
La prueba consiste en colocar 1 gramo de muestra en vaso de precipitado de 100 ml con 30 ml de agua. Luego, se agrega 1 ml de azul de metileno mientras el pétreo se encuentra en agitación con el agua. Se toma una gota de esta suspensión y se coloca en un papel filtro hasta que se forme un halo azul alrededor de la gota. Si esto no se cumple se seguirá agregando azul de metileno.

La relación entre los ml de azul de metileno utilizados hasta lograr formar el halo azul alrededor de la gota entre la masa del pétreo es el valor de azul de metileno para ese agregado (ASTM, 2017).



*Figura 11 Equipo de azul de metileno*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*



*Figura 12 Halo de cumplimiento de prueba azul de metileno*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### **3.5 Propuesta granulométrica**

La propuesta granulométrica consiste en la combinación de 2 o más agregados pétreos. Estos agregados deberán de representarse en porcentajes. Los pétreos deberán de cumplir con un esqueleto mineral, el cual esté dentro de los límites establecidos de la normativa.

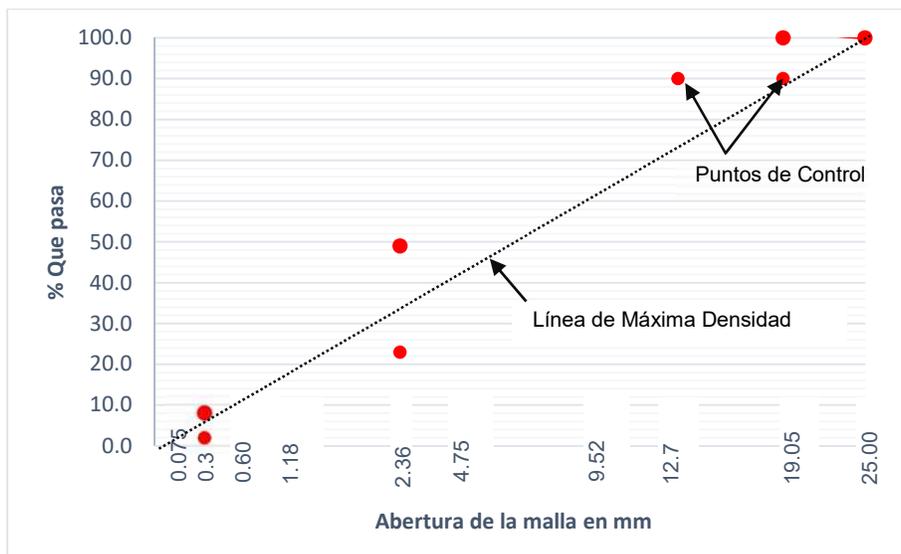
Para esta propuesta granulométrica, primero se deben de conocer los diferentes porcentajes de tamaños de partículas que contiene un agregado. Por lo tanto, es necesario determinar una granulometría por cada uno de los pétreos.

La granulometría se realiza con el fin de obtener los porcentajes de los diferentes tamaños de una muestra de material pétreo. Para su realización, es necesario introducir una muestra representativa del agregado a analizar a las mallas, cribar en su conjunto e individualmente en cada malla. Finalmente, se obtiene la relación en peso de cada una de los retenidos en las mallas. Con los retenidos se calcula el

porcentaje que pasa. Este porcentaje se relaciona con el tamaño de la malla y se gráfica.

Para la propuesta granulométrica, basta con multiplicar el porcentaje que pasa en cada malla por el porcentaje a utilizar, de la sumatoria de cada malla de cada agregado se obtendrá la propuesta final.

La representación gráfica de las granulometrías para una mezcla densa en la ASTM se realiza como se muestra en la *Gráfica 1*. Donde en el eje horizontal se representa la abertura de las mallas elevando su abertura a la 0.45 y en eje vertical se representa el porcentaje que pasa. Además, que contiene puntos de control por mallas, es decir, que dependiendo del tamaño nominal de la mezcla asfáltica establece tolerancias para diferentes mallas, no en todas tiene tolerancias como se muestra en la *Tabla 1*. En cuanto a la normativa de la SICT se representa gráficamente en una escala logarítmica como se muestra en la *Gráfica 2*. En esta normativa todas las mallas tienen tolerancia y quedan representadas por las envolventes de color rojo, la propuesta de granulometría de diseño deberá estar entre esas dos envolventes.



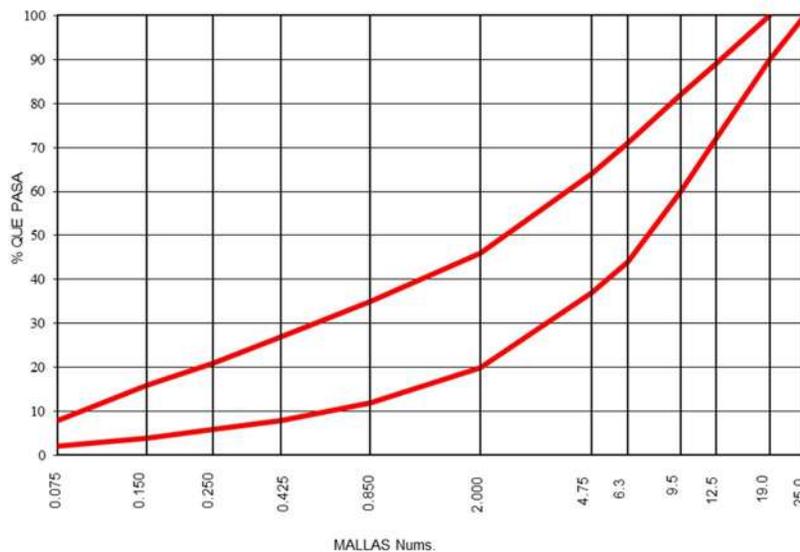
*Gráfica 1 Representación de la granulometría con la normativa ASTM*

*Fuente: Elaboración propia*

Tamaño nominal del material pétreo mm (pulg)						
Designación	Abertura mm	37.5	25	19	12.5	9,5
		(1-1/2")	(1")	(3/4")	(1/2")	(3/8")
Porcentaje que pasa						
2"	50	100-100	-	-	-	-
1 1/2"	37.5	90-100	100-100	-	-	-
1"	25	-90	90-100	100-100	-	-
3/4"	19	-	-90	90-100	100-100	-
1/2"	12.5	-	-	-90	90-100	100-100
3/8"	9.5	-	-	-	-90	90-100
4	4.75	-	-	-	-	-90
8	2.36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
16	1.18	-	-	-	-	-
30	0.60	-	-	-	-	-
50	0.30	-	-	-	-	-
100	0.15	-	-	-	-	-

Tabla 1 Requisitos de granulometría para los diferentes tamaños nominales en la normativa ASTM en mezcla asfáltica densa

GRÁFICA DE COMPOSICIÓN GRANULOMETRICA



Gráfica 2 Representación de la granulometría con la normativa de la SICT

Fuente: Elaboración propia

Malla		Tamaño nominal de material pétreo mm				
Abertura mm	Designación	9.5	12.5	19	25	37.5
		( $\frac{3}{8}$ )	( $\frac{1}{2}$ )	( $\frac{3}{4}$ )	(1)	( $1\frac{1}{2}$ )
Porcentaje que pasa (en masa)						
50	2 in	-	-	-	-	100
37.5	1½ in	-	-	-	100	90-100
25	1 in	-	-	100	90-100	74-90
19	$\frac{3}{4}$ in	-	100	90-100	79-92	62-83
12.5	$\frac{1}{2}$ in	100	90-100	72-89	58-81	46-74
9.5	$\frac{3}{8}$ in	90-100	76-92	60-82	47-75	36-68
6.3	$\frac{1}{4}$ in	70-89	56-81	44-71	36-65	30-59
4.75	N° 4	56-82	45-74	37-64	30-58	25-53
2	N° 10	26-64	25-55	20-46	17-42	13-38
0.85	N°20	18-49	15-42	12-35	9-31	6-28
0.425	N° 40	13-37	11-32	8-27	5-24	3-21
0.25	N° 60	10-29	8-25	6-21	4-19	2-16
0.15	N° 100	6-21	5-18	4-16	2-14	1-12
0.075	N° 200	2-10	2-9	2-8	1-7	0-6

*Tabla 2 Requisitos de granulometría para los diferentes tamaños nominales en la normativa SICT en mezcla asfáltica densa*

### 3.6 Volumetría de Mezclas asfálticas

Una mezcla asfáltica es una mezcla elaborada con agregados pétreos y material asfáltico, eventualmente con aditivos, cuyas propiedades mecánicas dependen de cada uno de los componentes de su proporción relativa en la mezcla asfáltica (Gómez, 2013).

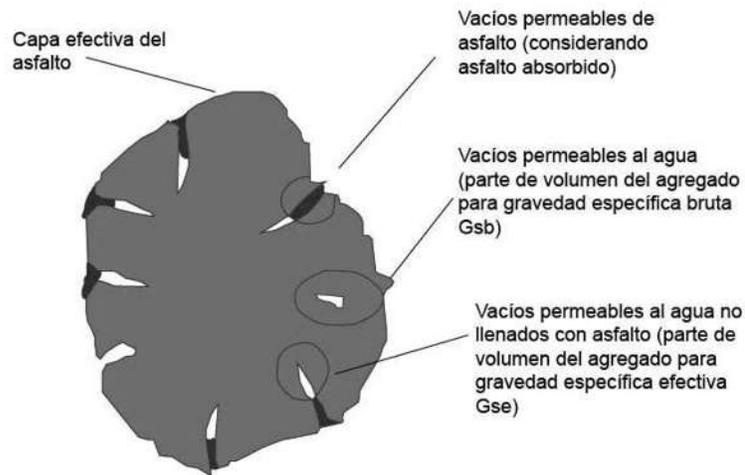
Determinación de la gravedad específica

Se define como la relación entre la densidad del agregado comparada con la densidad del agua.

Gravedad específica bruta ( $G_{sb}$ ) se define como la relación que existe de la masa seca dividida entre el volumen bruto. El volumen bruto es la sumatoria del volumen sólido del agregado y el volumen de agua contenida en los poros superficiales.

Gravedad específica aparente ( $G_{sa}$ ) es la división de la masa seca entre el volumen aparente. El volumen aparente solo incluye el volumen del sólido del agregado.

Gravedad específica efectiva ( $G_{se}$ ) Es el resultado de dividir la masa seca y el volumen efectivo del agregado. El volumen efectivo incluye el volumen de los sólidos del agregado y el volumen de los poros de superficie llenos con agua, sin considerar el asfalto.



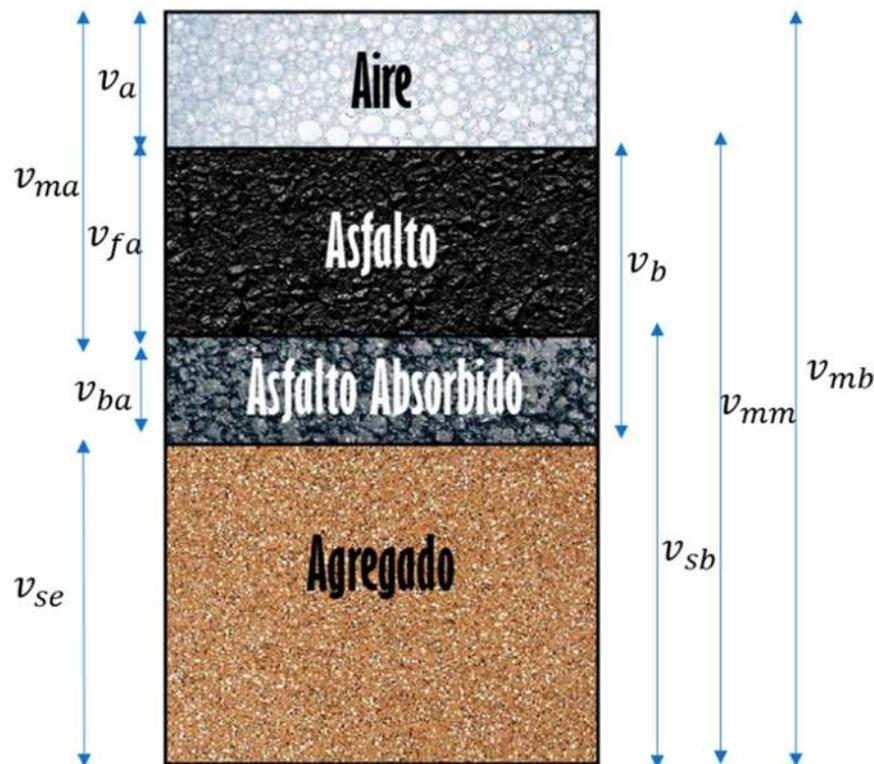
*Figura 13 Gravedades específicas del agregado pétreo*

*Fuente: Elaboración propia*

Para obtener el contenido óptimo de asfalto, se deben de realizar especímenes con una granulometría previamente seleccionada e ir agregando asfalto, partiendo de un contenido de asfalto inicial, el cual se puede seleccionar partiendo de alguna ecuación o a partir de la experiencia en de agregados y mezclas de la zona que tenga el diseñador. Progresivamente se harán aumentos de 0.5%. Posteriormente, se deberá de obtener la volumetría de cada uno de los especímenes. El contenido

de asfalto óptimo será aquel que cumpla con todos los parámetros volumétricos que pide la normativa con la cual se esté diseñando, además, debe cumplir con las pruebas de desempeño.

En la *Figura 14* se muestra un diagrama de fases de la mezcla asfáltica, el cual está compuesto por el agregado, el asfalto absorbido por el agregado, el asfalto y el aire. Mediante esta figura se pueden definir todas las propiedades volumétricas como se muestra a continuación:



*Figura 14 Diagrama de fases de la mezcla asfáltica*

*Fuente: Elaboración propia*

El desempeño de una mezcla se mide en la normativa de la SICT a través de flujo y la estabilidad de la mezcla asfáltica. En protocolo AMAAC dependiendo del nivel se mide el desempeño como se muestra en la *Figura 15*. Para nivel I incluye el diseño volumétrico, selección de asfalto por grado PG y susceptibilidad a la

humedad (TSR). El nivel II incluye lo del nivel I más susceptibilidad a la deformación permanente (rueda cargada de Hamburgo). El nivel III incluye lo del nivel II y módulo dinámico. El nivel IV incluye el nivel III y fatiga.



*Figura 15 Niveles de diseño para mezclas asfálticas por protocolo AMAAC*

*Fuente: Elaboración propia*



*Figura 16 Mezcla asfáltica*

*Fuente: Elaboración propia*

Contenido de vacíos de aire ( $V_a$ ): es el volumen que ocupa el aire dentro de una mezcla asfáltica. Se representa como un porcentaje del volumen total de la mezcla asfáltica.

Vacíos del agregado mineral (VAM): es el volumen ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla asfáltica compactada: Se representa como porcentaje del volumen total.

Vacíos llenos con el asfalto (VFA): Es el espacio del VAM que contiene asfalto.

Volumen efectivo de agregado del agregado mineral ( $V_{se}$ ): es el volumen que ocupa el agregado mineral.

Volumen total del agregado mineral ( $V_{sb}$ ): es el volumen ocupado por el agregado mineral y el asfalto absorbido.

Volumen de asfalto absorbido ( $V_{ba}$ ): es el volumen que ocupa el asfalto que es absorbido dentro de una mezcla asfáltica.

Volumen de asfalto total ( $V_b$ ): es el espacio volumétrico ocupado por el asfalto y el asfalto absorbido.

Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos ( $V_{mm}$ ): es el espacio volumétrico ocupado por el agregado pétreo, asfalto absorbido y asfalto sin contemplar vacíos de aire.

Volumen total de la mezcla asfáltica: es el volumen que contempla el agregado pétreo, asfalto absorbido, asfalto y vacíos de aire.

Gravedad específica del cemento asfáltico ( $G_b$ ): es la relación de la masa de un volumen dado de asfalto entre el peso de igual volumen de agua.

Gravedad específica bruta de la mezcla compacta ( $G_{mb}$ ): corresponde a la densidad de la mezcla asfáltica compactada.

Gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta ( $G_{mm}$ ): es la masa del agregado pétreo más la masa del asfalto dividido por el volumen de ambos componentes sin incluir el volumen de vacíos.

Contenido de asfalto ( $P_b$ ): es la cantidad de cemento asfáltico que contiene una mezcla asfáltica, este es representado en porcentaje con respecto al agregado o con respecto a la mezcla asfáltica.

Contenido de asfalto efectivo ( $P_{be}$ ): es la cantidad de masa de cemento asfáltico no absorbido.

Contenido de asfalto no absorbido ( $P_{ba}$ ): es la cantidad de masa de asfalto absorbido por el agregado.

### **3.7 Asfaltos**

El asfalto es un hidrocarburo bituminoso, el cual se obtiene a partir del petróleo. Puede obtenerse mediante un proceso de destilación en una refinería o por medios naturales. La consistencia del asfalto dependerá de la temperatura a la que se

encuentre. A temperatura ambiente, tendrá una consistencia sólida o semisólida, y a temperaturas altas, cambiará su consistencia a líquida.

Tiene un comportamiento viscoelastoplástico dependiendo de las cargas que reciba. Se puede comportar como un sólido elástico, que puede recuperar su forma después de la aplicación de las cargas. También, se puede comportar como un sólido plástico que presenta deformaciones permanentes después de aplicar cargas más elevadas, o como un fluido que tiende a desplazarse, dependiendo de su viscosidad que, bajo la aplicación de su temperatura, siendo más viscoso a bajas temperaturas y reduciendo su viscosidad según se aumente su temperatura.

Para la formación del petróleo es necesario depósitos de materia orgánica en estratos inferiores de la corteza terrestre, los cuales proporcionan condiciones variables de temperatura y presión que a través de millones de años, dan origen a este recurso no renovable (Oiltanking, 2016).

### **3.7.1 Composición del asfalto**

El asfalto está constituido por asfaltenos y maltenos (resinas y aceites). Los asfaltenos aportan resistencia y consistencia, dan capacidad de soporte de carga al asfalto. Las resinas aportan aglutinación (cohesión y adhesión), mientras que los aceites aportan fluidez al asfalto. La cantidad de aceites determinan la viscosidad del asfalto.

### **3.7.2 Obtención del asfalto en refinería**

Una vez que es obtenido el petróleo en un yacimiento, se procede a llevarlo a alguna refinería para obtener una variedad de productos como la gasolina, el diésel, el combustóleo hasta el propio asfalto. La refinación del petróleo es un proceso complejo utilizado para separar las fracciones de los diversos hidrocarburos del petróleo crudo (petróleo sin procesar), también llamado petróleo (Oiltanking, 2016).

Dependiendo de qué tan larga es la cadena de hidrocarburos de cada compuesto del petróleo, su punto de ebullición varía, entre más larga es esta cadena de hidrocarburos mayor será el punto de ebullición. El proceso más común para separar los compuestos del petróleo crudo es mediante la destilación, consiste en calentar el petróleo. Los compuestos evaporarán y se elevan; al enfriarse, se condensa y se forma un líquido que se recolecta en bandejas y se transfieren a condensadores para enfriarse aún más.

Al final de este proceso de refinación queda un residuo, al cual se le deben de regresar algunos de sus componentes que perdió durante la destilación para poder obtener el asfalto. Estos residuos son generalmente ricos en asfaltenos y pobres en resinas en aceites por lo cual se le debe de agregar un diluyente al residuo que le proporcione resinas y aceites. La naturaleza del diluyente variará en cada refinería según los excedentes que tengan, por lo tanto, pueden variar las características de cada asfalto por lote, aunque sea de la misma refinería.

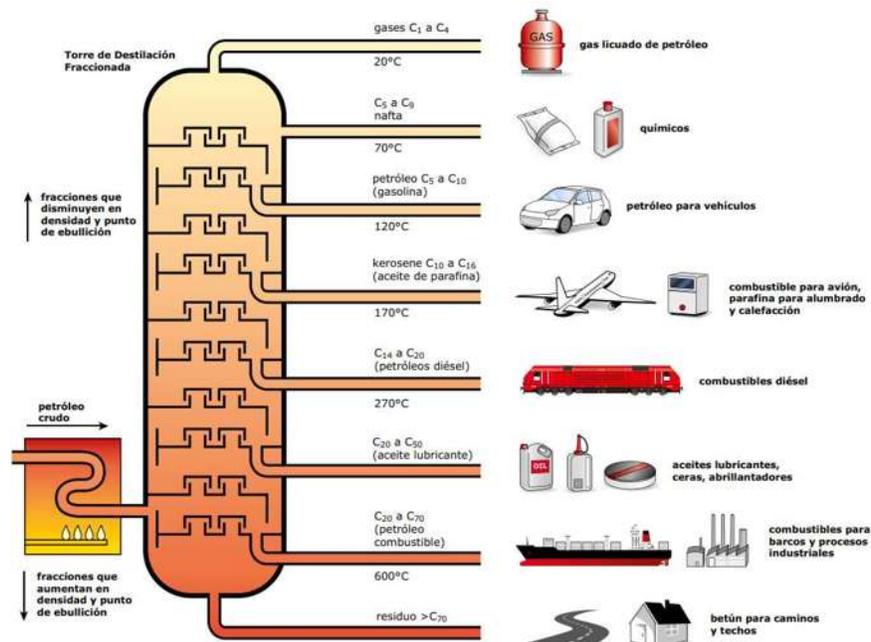


Figura 17 Refinación del petróleo

Fuente: <https://www.oiltanking.com>

## 3.8 Propiedades de los asfaltos y pruebas de calidad

### 3.8.1 Clasificación de asfaltos por grado PG

El grado PG (Performance Grade) es el grado de desempeño de un cemento asfáltico, el cual queda definido en un rango de temperaturas, una máxima y una mínima. Este rango de temperaturas asegura un buen desempeño del cemento asfáltico, evitando deformaciones a la temperatura máxima y agrietamientos térmicos en la temperatura mínima. Además de la temperatura se debe de considerar la intensidad del tránsito y la velocidad de operación.

Para obtener el rango de temperaturas se deberán obtener datos estadísticos del clima de la zona en donde se desarrollará el proyecto, se deberá de contar con un registro de al menos 20 años con las temperaturas máximas y mínimas de la zona.

Temperatura máxima

Para la temperatura máxima se utiliza la ecuación 1 que viene enmarcada en la normativa de la SICT (N-CMT-4-05-004/18, 2018).

$$T_{máx_i} = 54.32 + 0.78T_{airM} - 0.0025Lati^2 - 15.14 \log(H + 25) + Z(9 + 0.61\sigma_{TairM}^2)^{0.5} \quad (1)$$

$T_{máx}$ =Temperatura máxima calculada debajo de la superficie del pavimento

$T_{airM}$ = Temperatura máxima promedio del aire de los 7 días consecutivos más cálidos registrados por lo menos en los últimos 20 años

$Lati$ =Latitud

$H$ =Profundidad (mm), se recomienda utilizar 20 mm

$Z$ = Valor para el nivel de confiabilidad, se recomienda utilizar 2.055 para un nivel de confiabilidad de 98%

$\sigma_{TairM}^2$  = Desviación estándar de las temperaturas de los 7 días consecutivos más cálidos registradas en al menos 20 años en la zona

Temperatura Mínima

Para obtener la temperatura mínima se utiliza la ecuación 2.

$$T_{mín_i} = -1.56 + 0.72T_{airm} - 0.004Lat^2 + 6.26 \log(H + 25) - Z(4.4 + 0.52\sigma_{TairM}^2)^{0.5} \quad (2)$$

Tmin=Temperatura mínima esperada del pavimento asfáltico debajo de la superficie

Tairm=Promedio de las temperaturas mínimas anuales del aire registradas en al menos los últimos 20 años en la zona

Lat=Latitud

H=Profundidad (mm), se recomienda utilizar 20 mm

Z= Valor para el nivel de confiabilidad, se recomienda utilizar 2.055 para un nivel de confiabilidad de 98%

$\sigma_{TairM}^2$  = Desviación estándar de las temperaturas mínimas anuales del aire registradas en al menos 20 años en la zona

### 3.8.2 Selección del grado PG según la N-CMT-4-05-004/08

Para seleccionar el grado PG por la normativa de la SICT del año 2008, una vez que se estableció la temperatura máxima se le harán tres ajustes, los cuales son: por intensidad de tránsito, por velocidad lenta y por tránsito detenido. Como se muestra en la *Tabla 3*. El procedimiento es el siguiente:

1.- Determinar la temperatura máxima y mínima según la *Ecuación 1 y 2*

2.- Determinar el grado PG según las temperaturas calculadas, redondeando a la temperatura más cercana para el grado PG. En la normativa 2008 para la temperatura máxima se disponía de (64, 70, 76, 82 y 88) y para la temperatura mínima (-22, -28, -34 y -40). Por ejemplo, si la temperatura máxima calculada fuera de 65.7°C y la mínima de -12°C, se debería de seleccionar el grado PG siguiente más cercano a la temperatura máxima es decir a PG 70 y no a un PG 64 dado que un 64 no cubriría por completo el rango máximo de temperaturas. En la temperatura mínima se elegiría la más cercana que en este caso sería -22. Dando un asfalto PG 70-22.

3.- Entrar a la *Tabla 3* y realizar el nivel de ajuste según las características de la vialidad.

<b>Intensidad del tránsito</b> ( $\Sigma L_{10}$ )	<b>Grado PG seleccionado por clima</b>	<b>Ajuste por intensidad del tránsito</b>	<b>Ajuste por velocidad lenta</b> (Entre 10 y 30 km/h)	<b>Ajuste por tránsito detenido</b> (Cruceros)
$\Sigma L_{10} < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
$10^6 \leq \Sigma L_{10} \leq 10^7$	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$\Sigma L_{10} > 10^7$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

*Tabla 3 Ajuste de grado PG por la normativa de la SICT del año 2008*

### 3.8.3 Selección del grado PG según la N-CMT-4-05-004/08

En la normativa de la SICT del año 2018 establece que una vez que se obtiene el grado PG, no se hacen incrementos de seis en seis a la temperatura máxima según las condiciones de tránsito, sino que se le agrega una letra después de la temperatura máxima.

Velocidad de operación km/h  Intensidad del tránsito ( $\Sigma L$ ) <sup>[1]</sup>	Nivel de ajuste		
	$v > 70$	$20 \leq v \leq 70$	$v < 20$
$\Sigma L < 10^6$	Normal (S)	Alto (H)	Muy alto (V)
$10^6 \Sigma L \leq 30 \times 10^6$	Alto (H)	Alto (H)	Muy alto (V)
$\Sigma L > 30 \times 10^6$	Muy alto (V)	Muy alto (V)	Extremadamente alto (E)

Tabla 4 Nivel de ajuste por la normativa de la SICT del año 2018

### 3.8.4 Pruebas de calidad en los cementos asfálticos

Al cemento asfáltico se le realizan diversas pruebas de calidad al asfalto original, al asfalto envejecido a corto plazo y al asfalto envejecido a largo plazo, a continuación, se detalla cada una de las pruebas.

### 3.8.5 Punto de inflamación Cleveland

El asfalto, al ser un producto derivado del petróleo contiene materiales volátiles que a cierta temperatura producirán flamas. Para asegurar la seguridad en su manejo, se realiza la prueba de punto de inflamación, la cual consiste en colocar asfalto en la copa Cleveland en la cual se eleva la temperatura hasta que al pasar por la muestra una flama se produzcan en la muestra flamas en la muestra. La

temperatura a la cual se produjo este fenómeno se registra como el punto de inflamación. Esta prueba permite establecer una temperatura límite de seguridad en el manejo del asfalto prevenir accidentes.



*Figura 18 Copa Cleveland*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### **3.8.6 Viscosidad rotacional**

El ensayo de viscosidad evalúa la trabajabilidad del cemento asfáltico (en estado original) a temperaturas altas, permitiendo su manipulación, bombeo, mezclado y su aplicación. La prueba de viscosidad rotacional permite establecer temperaturas de mezclado y compactación para una mezcla asfáltica, mediante cartas de viscosidad-temperatura (Martínez, 2019).

Para realizar esta prueba, se requiere tener la muestra bajo una temperatura controlada (135°C). Se mide la resistencia que opone el asfalto a deformarse, se determina el par de torsión necesario para que la muestra gire a una velocidad dada.



*Figura 19 Viscosímetro rotacional*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### **3.8.7 Punto de reblandecimiento**

Esta prueba consiste en colocar muestras de cemento asfáltico en dos anillos y colocarla dentro de un vaso de precipitado con agua a 5°C sobre un soporte. Se colocan sobre cada anillo una esfera para posteriormente elevar la temperatura hasta que la esfera produzca una deformación de 25 mm. A la temperatura a la cual se produce esa deformación se le conoce como punto de reblandecimiento. El objetivo de esta prueba es medir la consistencia del cemento asfáltico.



*Figura 20 Equipo de punto de reblandecimiento*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

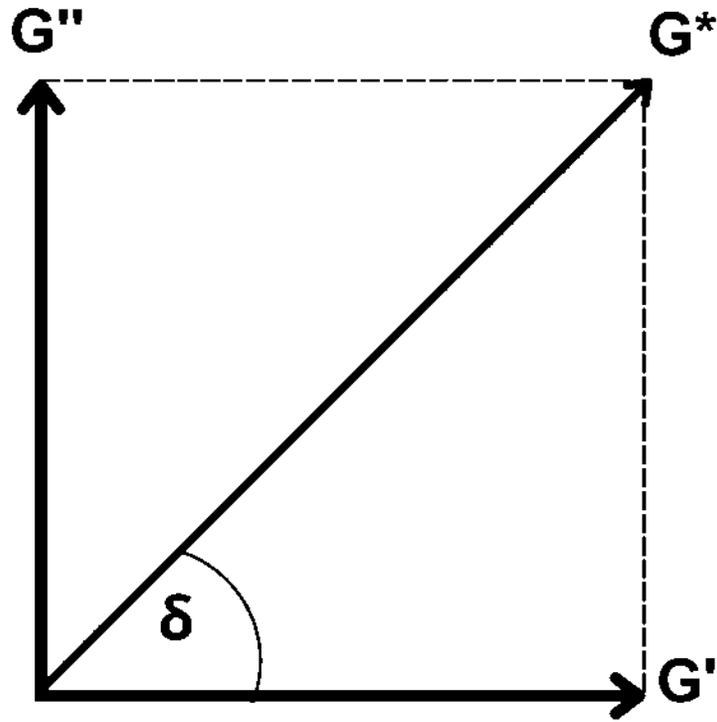
### **3.8.8 Módulo reológico de corte dinámico**

Esta prueba permite conocer las características reológicas del asfalto, las cuales son el módulo de corte dinámico y el ángulo de fase.

El módulo de corte es la resistencia del cemento asfáltico a deformarse por esfuerzos cortantes repetidos. El ángulo de fase se representa como el desfase que existe entre el esfuerzo cortante y su deformación debido a ese esfuerzo.

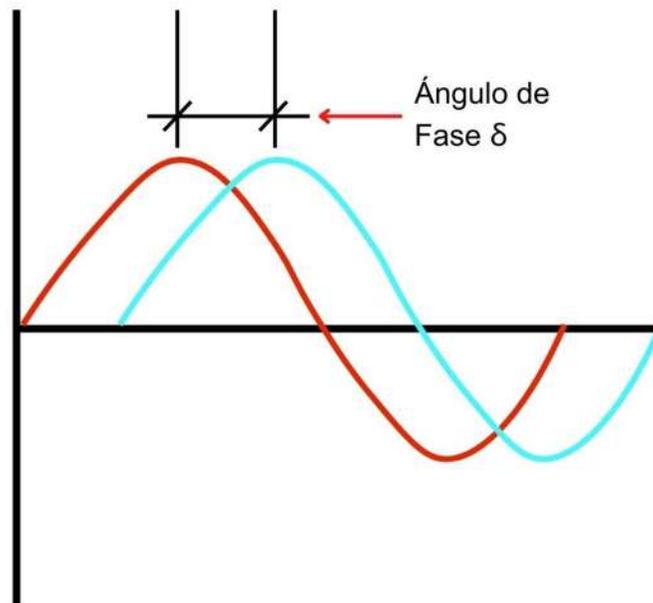
Entre mayor sea  $\delta$ , el material será más viscoso. Un material que experimente un comportamiento totalmente elástico experimenta un  $\delta=0^\circ$ , mientras que uno puramente viscoso presenta  $\delta=90^\circ$ .  $G^*$  y  $\delta$  son utilizados para intentar predecir la resistencia al ahuellamiento y al agrietamiento por fatiga (Lopez, 2015).

El módulo complejo ( $G^*$ ) tiene dos componentes, una es el módulo de almacenamiento ( $G'$ ) que es la energía que encada oscilación se libera elásticamente y que es almacenada. La otra componente es el módulo de pérdida ( $G''$ ), esta componente representa la velocidad de disipación de energía durante la oscilación, es la componente viscosa y se refiere a deformaciones permanentes.



Gráfica 3 Módulos

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 4 Ángulo de fase

Fuente: Elaboración propia



*Figura 21 Funcionamiento del reómetro de corte dinámico*

*Fuente: Elaboración propia*

### **3.8.9 Envejecimiento del asfalto a corto plazo**

Los asfaltos a lo largo de su vida útil experimentan envejecimiento por dos fenómenos, la oxidación y la pérdida de componentes debido a la evaporación. En el proceso de mezclado, transporte, tendido y compactación el asfalto se envejece en un periodo de tiempo muy corto. Para simular esta condición, el asfalto es sometido al envejecimiento de corto plazo en el horno RTFO (Horno de envejecimiento de la película delgada). El procedimiento consiste en vaciar el asfalto original en tubos de vidrio, los cuales serán colocados en un horno que los hará girar, y a su vez, dentro del tubo existirá un flujo de aire que ayudará a su envejecimiento.



*Figura 22 Horno RTFO*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### **3.8.10 Envejecimiento del asfalto a largo plazo**

Una vez tendida la mezcla, la evaporación de sus componentes y la oxidación serán mucho más lentas. Para simular el envejecimiento a largo plazo se utiliza la Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV, por sus siglas en inglés).

El PAV expone al asfalto a presiones y altas temperaturas durante 20 horas para reproducir el efecto del envejecimiento a largo plazo. El asfalto que se expone al envejecimiento a largo plazo tiene que haber pasado por el proceso de mezclado y construcción; el procedimiento PAV utiliza el asfalto envejecido en el RTFO (Anguas, 2003).



*Figura 23 Horno PAV*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### **3.8.11 Creep repetido multiesfuerzo**

En la normativa de 2008 para la clasificación del grado PG se hacía un ajuste por intensidad del tránsito y por tránsito detenido, llegando a aumentar hasta 3 grados PG. Para la normativa del año 2018 se implementó la prueba del creep repetido multiesfuerzo que describe el comportamiento del cemento asfáltico en el rango no lineal al añadir diferentes deformaciones.

El equipo en el que se hace esta prueba es en DSR, con asfalto envejecido a corto plazo RTFO en el cual se le aplica carga y se permite que la muestra se recupere. Con ello se obtiene una medida de la deformación permanente en el aglutinante, definida como el porcentaje de deformación residual en una muestra después de un ciclo de carga y recuperación dividido entre el esfuerzo aplicado (parámetro  $J_{nr}$  o creep compliance no recuperable) (Martínez, 2019)

### 3.8.12 Recuperación elástica por torsión

Esta prueba se les aplica a los asfaltos modificados, debido a su sencillez y el bajo costo del equipo, ésta prueba es la más utilizada en planta para verificar que un asfalto sea modificado.

La prueba consiste en colocar una muestra de asfalto en un recipiente a una temperatura de 25°C y se le aplica un esfuerzo de torsión mediante un eje, girándolo 180°, después de 30 minutos se suelta el cilindro y se determina el ángulo recuperado.



*Figura 24 Equipo de recuperación elástica por torsión*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### 3.8.13 Separación anillo esfera

Esta prueba se les aplica solamente a asfaltos modificados para verificar que el polímero está bien incorporado al cemento asfáltico. El método de prueba consiste en llenar unos tubos de aluminio con cemento asfáltico sometiéndolos a altas temperaturas durante dos días. Después, se colocan en un congelador a -7°C

durante al menos cuatro horas, posteriormente se corta el tubo en tres partes iguales y se toman los extremos para colocarlos en el horno. Posteriormente se le aplica el procedimiento de la prueba de reblandecimiento y se mide el grado de reblandecimiento a cada una de las muestras y se mide su diferencia, esta diferencia no será mayor a 2°C.



*Figura 25 Tubos de aluminio*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*



*Figura 26 Realización de prueba separación anillo esfera*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### **3.9 Asfaltos modificados**

Para que una mezcla asfáltica dure más, es necesario contar con un asfalto que aumente sus propiedades físicas, reológicas, y que tenga una mejor respuesta esfuerzo deformación y que sea resistente a la fatiga. Por lo tanto, los asfaltos se pueden modificar con polímeros o con hule molido de llanta.

### **3.10 Modificación de asfaltos a partir de hule molido de llanta**

Desde el año 2006, la normativa SICT en la N-CMT-4-05-002/06 ha permitido la modificación de asfaltos a partir de hule molido de neumático. Sin embargo, debido a las facilidades que ofrece modificar el asfalto con polímeros, estos han sido los más ocupados dejando en segundo plano el hule molido de neumático.

Cabe destacar que la modificación de asfaltos con caucho no solo contribuye al aumento del desempeño del asfalto, sino que también ayuda a darle un uso final a los neumáticos, los cuales pueden causar problemas de contaminación sino son adecuadamente gestionados al final de su vida útil. Esto es especialmente relevante en México ya que no existe un sistema de recolección eficiente para este tipo de residuos.

### **3.11 Pruebas de desempeño**

#### **3.11.1 Resistencia al daño por humedad TSR**

Para evaluar la resistencia al daño inducido por humedad, se realiza la prueba de TSR. En esta prueba se realizan por lo menos seis especímenes con  $7\pm 1\%$  de vacíos de aire. La mitad de los especímenes se acondicionarán y la otra mitad no se acondicionarán. El acondicionamiento implica alcanzar un grado de saturación

entre 70% y 80%, para posteriormente sellarlos con una película de plástico, después se tienen que meter en una bolsa de plástico y agregar 10 mililitros de agua. Después de esto, se dejan congelando por al menos 15 horas. A continuación del proceso de congelamiento, se colocarán los especímenes en un baño de agua a 60°C durante un día. Al finalizar el acondicionamiento se colocarán todos los especímenes en el baño de agua a 25°C durante por lo menos una hora, sin superar las 2 horas. Finalmente, los especímenes se colocarán dentro de la mordaza Lottman y se les aplicará carga hasta fallarlos. Este tipo de carga provoca un esfuerzo de tensión relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical y esta tensión es la que agota la probeta, desencadenando la rotura en el plano diametral. De esta manera se obtendrá el nivel esfuerzo al cual fallaron. La relación entre el esfuerzo promedio soportado por los especímenes acondicionados entre el esfuerzo soportado por los especímenes no acondicionados será el resultado de la prueba de TSR.



*Figura 27 Prueba de TSR*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### 3.11.2 Rueda de Hamburgo

La deformación permanente en la capa de rodamiento es debida a la baja resistencia al corte de la mezcla asfáltica para soportar cargas repetidas aplicadas por vehículos. Esta se manifiesta como una depresión longitudinal con ligero levantamiento lateral de la mezcla asfáltica, que también es llamada ahuellamiento (Flores, Delgado, & Gomez, 2018).

Los factores que determinan la formación del ahuellamiento (deformación permanente) en la mezcla asfáltica son la magnitud, la frecuencia del tránsito vehicular y las condiciones de clima (Vidal & Ossa, 2011). Además de estas características, para que se dé la deformación permanente, dependerá del tipo mezcla asfáltica y todas las características que esta engloba (agregados pétreos, propuesta granulométrica, contenido de asfalto, tipo de asfalto, propiedades volumétricas, etc.).

El problema de la generación del ahuellamiento en la mezcla asfáltica es que, en época de lluvias, dentro de la deformación se aloja el agua lo que puede provocar el acuaplaneo o hidroplaneo.

La prueba de rueda cargado de Hamburgo es utilizada para evaluar la deformación permanente de una mezcla asfáltica de granulometría densa de alto desempeño. Consiste en hacer pasar sobre especímenes de mezcla asfáltica dos ruedas de acero cargadas, los especímenes pueden ser de 150 mm de diámetro y 60 mm de espesor o de 260 mm de ancho, 320 mm de largo y 40 mm de espesor. Cada rueda tiene una carga de  $71.06 \pm 0.45$  kg y se aplica a una velocidad promedio de 30.5 cm/s, para dar de  $52 \pm 2$  pasadas por minuto. Las muestras de mezcla asfáltica se deben de mantener a una temperatura constante, por lo cual durante toda la prueba se tienen dentro de baño María a 50°C. El número total de pasadas dependerá del tránsito: para un nivel bajo, medio, alto y muy alto el número de pasadas es de 10,000, 15,000 y 20,000, respectivamente. Al finalizar la prueba después del número de pasadas no deberá exceder una deformación de 10 mm.



*Figura 28 Rueda cargada de Hamburgo*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

### **3.11.3 Módulo dinámico**

Se define como el valor absoluto de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y el de la deformación unitaria máxima (valor absoluto del módulo complejo), obtenida de un ensayo a compresión (uniaxial o triaxial), a flexión y tracción indirecta, utilizando cargas en forma cóncava (Higuera, Naranjo, & Cetina, 2011).

El módulo dinámico es una propiedad mecánica fundamental para el diseño de un pavimento asfáltico. Esta propiedad define propiedades visco elásticas lineales de la mezcla asfáltica, en función de la temperatura y velocidad de aplicación de la carga y es un parámetro de entrada en la guía de diseño empírico-mecanicista de pavimentos (Delgado, Gómez, & Flores, 2017).

El módulo dinámico de una mezcla asfáltica se puede obtener en laboratorio donde a la muestra se le aplica una fuerza de compresión axial en carga cíclica que se realiza a diferentes cargas y frecuencias. El cambio de temperaturas se simula, dado que la mezcla en operación trabajará a diferentes temperaturas. Las frecuencias representan la velocidad a la que circularán los vehículos. El esfuerzo

aplicado y la deformación axial recuperable del espécimen son medidos y empleados para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase.

El módulo dinámico varia cuando cambia la temperatura o cuando aumenta la frecuencia. Si aumenta la temperatura disminuye el módulo, pero si aumenta la frecuencia el módulo aumentará.

El módulo dinámico es un número complejo que consta de dos partes: la parte real, la cual representa la rigidez (parte elástica), y la imaginaria, que representa el amortiguamiento interno de los materiales (parte viscosa), (Huang, 1993).

#### **3.11.4 Fatiga en mezclas asfálticas**

El fenómeno de fatiga se define como el transcurso permanente, progresivo y localizado a los cambios de las condiciones del material expuesto a cargas repetidas, dando como resultado la aparición de fisuras o grietas que llevan a la rotura total después de un número de repeticiones (Alfaro, Flores, & Martinez, 2016).

La fatiga se caracteriza por una disminución de la resistencia mecánica de la mezcla asfáltica cuando se le aplican una serie esfuerzos dinámicos que son menores al valor último.

La falla por fatiga es generada por una serie de repeticiones de carga hasta que llega a un punto de cedencia el material. Al pasar un vehículo sobre el pavimento se generan esfuerzos cortantes y de tensión que generan microgrietas, estas microgrietas acumuladas generan macrogrietas visibles. La falla por fatiga es un indicador de que el pavimento ha fallado debido a que sobre paso el número de ejes equivalentes para el cual fue diseñado. Cuando esto ocurre, será necesaria una rehabilitación para evitar que el daño al pavimento continúe y se generen problemas como migración de finos de las capas inferiores a la superficie, y que en dado momento el costo por rehabilitación se incremente.

Mediante ensayos de laboratorio se ha determinado la relación que existe entre la deformación y la vida a fatiga como el número de veces  $N$  que la mezcla asfáltica soporta la sollicitación antes de fallar, se describe de la siguiente manera:

$$N = K_1 \varepsilon^{K_2} \quad (3)$$

Donde:

$N$ = Número de ciclos de carga hasta la fatiga del material

$\varepsilon$ = Deformación unitaria de tensión en micro deformaciones (mm/mm)

$K_1$  y  $K_2$ = Constantes que describen el comportamiento del material a fatiga

Para obtener resultados lo más reales posibles en un ensayo de fatiga en laboratorio, se debe de inducir a la muestra a un estado de esfuerzos similar al que estará sometido durante su vida útil.

Métodos de prueba

En la mayoría de los ensayos de fatiga, se da un deterioro progresivo del material (daño continuo), sin producirse por completo el fallo. Por lo que para la realización del ensayo debe establecerse el fallo, que podría suceder de dos diferentes maneras: a tensión controlada y deformación o desplazamiento controlado.

La fatiga de las mezclas asfálticas queda establecida dentro de 3 etapas.

Fase I - Adaptación

Se caracteriza por el inicio de la microfisuración, produciéndose un rápido descenso del módulo (Alfaro, Flores, & Martinez, 2016).

Fase II - Fatiga

Se caracteriza por una disminución moderada y casi lineal del módulo, quiere decir, un comportamiento estable de daño progresivo que avanza de manera más lenta (Martínez, 2019). Durante esta fase aparecen macrofisuras debido a la unión de las microfisuras de la fase I.

### Fase III - Falla

En esta fase el módulo decrece más rápido y el daño progresa rápidamente hasta que se produce la falla.

### Ensayo de fatiga en cuatro puntos

Mediante esta prueba de laboratorio se puede conocer la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas y de esta manera es posible optimizar el diseño de pavimentos.

Mediante un aparato se le da una carga sinusoidal repetida a la muestra en un rango de 0 a 10 Hz. La muestra debe de tener 4 puntos de apoyo simples (se permite el movimiento horizontal y el momento). La carga se aplica en los dos puntos del centro. El equipo mide las deflexiones y las cargas. El criterio de falla se establece cuando se reduce al 50% la amplitud de la fuerza.



*Figura 29 Fatiga a cuatro puntos*

*Fuente: (Delgado, Gómez, & Flores, 2017).*

### **3.11.5 Ensayo de tracción indirecta para la obtención de la ley de fatiga**

El ensayo consiste en cargas de compresión en el plano diametral de la probeta, desarrollando un esfuerzo a tensión, perpendicular a la carga aplicada.

La vida a fatiga queda definida como el número de aplicaciones de carga hasta la rotura de la probeta.



*Figura 30 Prueba de fatiga por el ensayo de tracción indirecta*

*Fuente: UNE-EN-12697-24:2006, 2007*

### **3.12 Problemas ecológicos que provocan los neumáticos**

En México se desechan alrededor de 40 millones de neumáticos al año, mientras que la tasa de recuperación de las mismas es apenas del 10%, todo el restante termina en vertederos, ríos y rellenos sanitarios (jornada, 2019). Los neumáticos, además de contaminar, favorecen la reproducción de fauna nociva dentro de ellos, como los mosquitos que transmiten el dengue.

Debido a que el caucho que poseen las llantas es altamente inflamable, debido a esto las llantas llegan a servir de combustible en procesos industriales. Sin embargo, los gases que se producen para en la combustión de los neumáticos son dañinos para la salud (Resendiz, 2007).

### **3.13 Modificación de asfalto con caucho**

#### **3.13.1 Vía seca para incorporación del caucho al asfalto**

Para la incorporación del hule molido de neumático por la vía seca es llevado a cabo durante la producción de la mezcla asfáltica. Añadiendo el hule molido al tambor mezclador sin que tenga contacto con la flama para no provocar su calcinación. Este hule es considerado una fracción más en la granulometría de la mezcla. Una ventaja más es que no se requiere de equipos especiales para la modificación y también la absorción de ruido (Anguas, 2003) es mayor si se compara con el proceso húmedo (Paje, 2009).

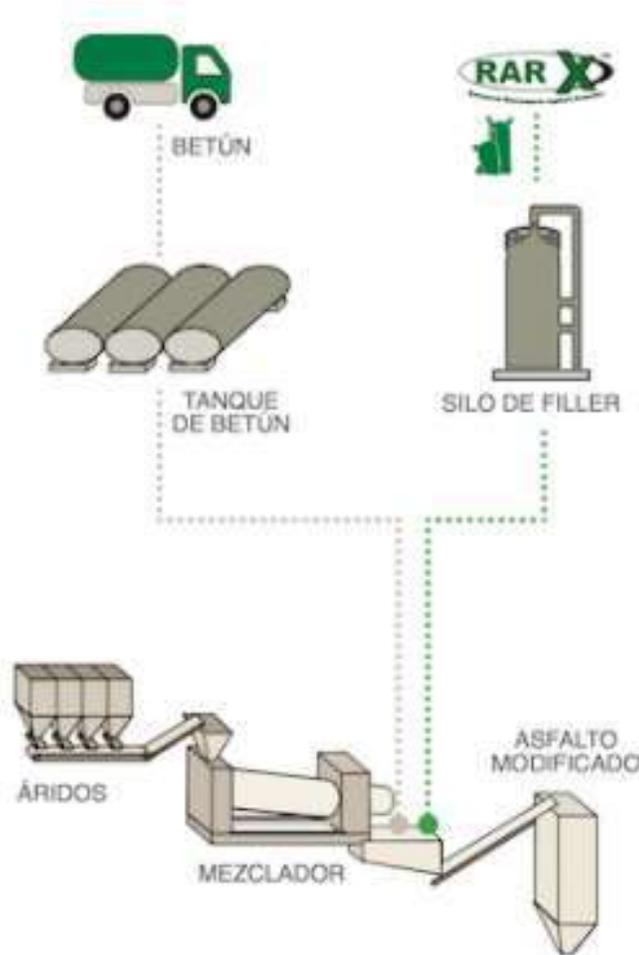
#### **3.13.2 Vía húmeda para la incorporación del caucho a la mezcla asfáltica**

Para la incorporación del hule molido de neumático al asfalto por la vía húmeda se hace antes de que el asfalto entre en contacto con los agregados pétreos, a diferencia de la vía seca. Para agregar el hule molido al asfalto es necesario equipo especial como en el procedimiento terminal blend, por lo cual el costo aumenta considerablemente en comparación a la incorporación por la vía seca.

### **3.14 RARX**

El RARX es un producto que mejora las condiciones mecánicas de la mezcla asfáltica. Está compuesto en su mayoría por polvo molido de neumático. Éste se agrega a la mezcla asfáltica durante el proceso de elaboración en el tambor

mezclador. No requiere digestión como en la vía húmeda, por lo cual no hay incremento energético en su elaboración como se muestra en la *Figura 31*. La facilidad que ofrece este producto es que se puede suministrar en costales (bigbag) o en camiones cisterna. Además, tiene la ventaja que no requiere un porcentaje mínimo de obra para su utilización, mejora la vida a fatiga del pavimento, permite mejores sistemas anti fisuras, ayuda a evitar roderas y permite reducir el espesor del pavimento (Cirtec, 2020).



*Figura 31 Fabricación de mezcla con RARX*

*Fuente: Cirtec*

### **3.15 Estudios acerca del RARX**

Existen estudios que se le han realizado al RARX en los que se han medido diferentes propiedades y beneficios del producto. Los estudios para determinar la viabilidad de utilizar RARX como alternativa se basan en hacer comparativas con otro tipo de asfalto y de esta manera determinar el ahorro. Algunos buscan demostrar los beneficios ecológicos, y otros, aunque no han sido directamente sobre el RARX, se han realizado a asfaltos modificados con caucho. Todo esto ha servido como punto de partida para muchas investigaciones. A continuación, se describen algunos de estos estudios.

En el artículo (Cirtec, 2020) “Propiedades de las mezclas asfálticas modificadas con RARX”, realiza la comparativa entre diferentes mezclas sin RARX y otras con este producto en diferentes dosificaciones.

Este artículo señala que al agregar RARX, la viscosidad de la mezcla aumenta por lo que se reduce su trabajabilidad. Recomiendan trabajar de 5°C a 10°C arriba de lo que se trabajan mezclas sin RARX. Sin embargo, en ningún momento muestran gráficas de temperatura-viscosidad del cemento asfáltico a diferentes contenidos de RARX. Por lo tanto, mencionar que solo se debe aumentar la temperatura de 5 a 10°C no deja claro cuantitativamente por qué se elevan la temperatura. Es importante establecer las temperaturas de mezclado y compactación para evitar obtener valores incorrectos de la gravedad específica bruta de la mezcla compactada (Gmb) al momento de realizar el diseño.

Muestra también una comparativa de los ensayos de resistencia a la acción acelerada del agua. Los resultados muestran valores superiores cuando se incluye RARX, dando resultados superiores al 90% cuando se utiliza una mezcla SMA con un contenido de RARX del 2.86%.

Este estudio también contempla pruebas de fatiga, donde al hacer la comparativa con diferentes tipos de mezclas, sin embargo, en la mezcla en la cual se agrega polvo pre digerido RARX in situ ofrece el mejor desempeño a otras alternativas de

incorporación. También se hace un análisis de como el aumento a la fatiga reduce el espesor de la carpeta asfáltica, dando como resultado ahorro de material y costos en la preparación de la mezcla.

En la prueba de torsión, se observa una recuperación en mezclas que no contienen RARX del 30% y en mezclas que contienen RARX del 70%. Esto se ve traducido en una recuperación mayor después de la aplicación de esfuerzos.

En los ensayos de atenuación del ruido se tienen en cuenta la impedancia, que es la oposición que presenta el material a la transmisión de las ondas mecánicas de ruido, y del contenido de huecos en la superficie. Se analizan diferentes tipos de mezcla, con o sin RARX, con texturas similares, pero no iguales. Lo complicado de este análisis es que, en las muestras analizadas son diferentes tipos de mezclas, por lo cual no existe una comparativa real de la reducción del ruido. Ya que, al variar el tipo de mezcla, puede verse reducido el ruido si el contenido de vacíos es mayor, sin necesidad de agregar RARX. Por lo que en el estudio debía existir la comparativa del mismo tipo de mezcla sin RARX y con RARX.

En la prueba desgaste por rodada los resultados de deformación son menores para las mezclas que contienen RARX.

Finalmente, el artículo presenta recomendaciones de los contenidos de RARX según el tipo de mezcla.

En la tesis “Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas modificadas con hule molido devulcanizado”, Daniela Bocanegra analiza la incorporación de hule molido de neumático para mejorar las características de desempeño de las carpetas asfálticas. Se centra en la incorporación del caucho al asfalto por la vía húmeda mediante terminal blend, en el cual las partículas de hule molido se hinchan debido a la absorción de fracciones más ligeras contenidas en el asfalto” (Xiao, Amirkhanian y Shen, 2009).

Esta técnica se refiere a una forma del proceso húmedo, donde el hule de llanta se somete a un proceso de devulcanización y se mezcla con el aglutinante en una

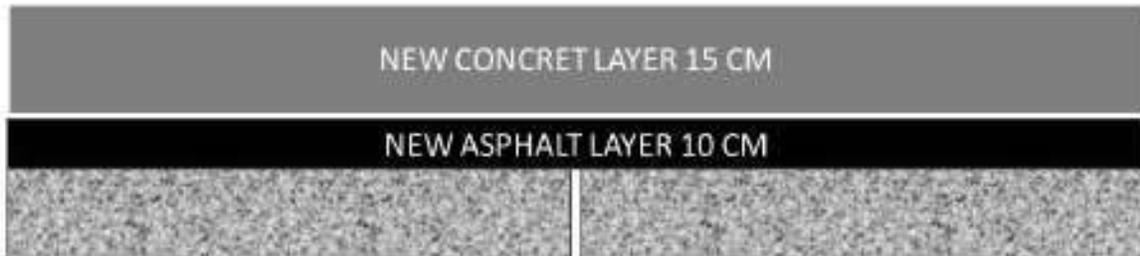
terminal de almacenamiento o refinería. En este caso, no se requiere de agitación posterior ya que las partículas de hule se mantienen dispersas uniformemente en la matriz de asfalto. Posteriormente, el cemento asfáltico modificado se transporta a la planta de concreto asfáltico o al sitio de trabajo (Martínez, 2019). Sin embargo, se requieren equipos especiales que llegan a aumentar considerablemente el costo del asfalto modificado.

Posteriormente, con el asfalto modificado a través de terminal blend se diseñan mezclas densas y se hace la comparativa en el desempeño (TSR, fatiga) con mezclas modificadas a partir de caucho. Posteriormente, hace un análisis de las propiedades reológicas de los diferentes asfaltos en comparación con los asfaltos modificados con hule molido. Finalmente, según sus leyes de fatiga se determina la durabilidad del pavimento.

En el artículo (Cirtec, 2020) “Estudio de análisis de ciclo de vida comparativo de rehabilitación de firmes de hormigón entre mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con aditivo RARX”, se hace un análisis del ciclo de vida para la autopista Pirámides-Tulancingo, la cual fue la primera vialidad en México en utilizar el RARX. La capa de rodamiento estaba conformada por tres diferentes tipologías: tramos de losas de concreto, tramos de concreto asfáltico y tramos de concreto asfáltico por debajo de losas de concreto. El problema principal de rehabilitar sobre losas de concreto es la reflexión de fisuras. Las primeras propuestas de solución fueron:

Rubblizing de losas de concreto: El procedimiento consiste en demoler las losas de concreto, utilizando ese material para estabilizar y hacer subbase a la nueva carretera. El problema de esta solución consiste en que es muy costoso y que conlleva bastante tiempo.

Firme de concreto sobre antiguo firme de concreto: Esta solución consistía en colocar una capa de carpeta asfáltica entre las 2 losas de concreto y de esta manera evitar la reflexión de fisuras en la losa nueva.

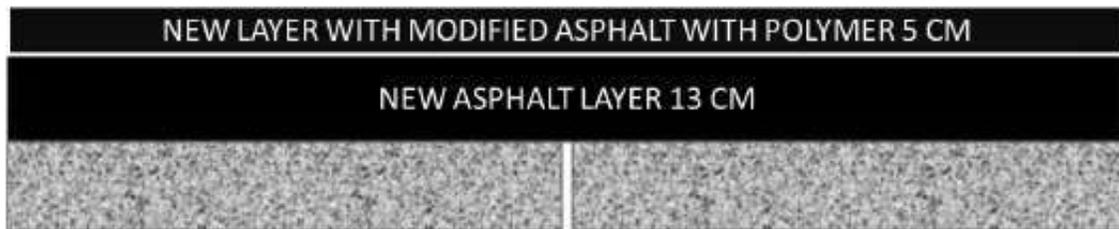


*Figura 32 Carpeta asfáltica y losa de concreto*

*Fuente: Cirtec*

Carpeta de concreto asfáltico sobre losa de concreto, con capa de rodadura de asfalto modificado: El gran espesor de concreto asfáltico retrasa la ascensión de fisuras, además de que la capa de rodadura da una superficie con una buena microtextura y macrotextura.

Esta fue la solución que se pretendía utilizar antes de conocer la solución con RARX, cabe destacar que a los 5 años de servicio requeriría mantenimiento (fresado y reasfaltado).

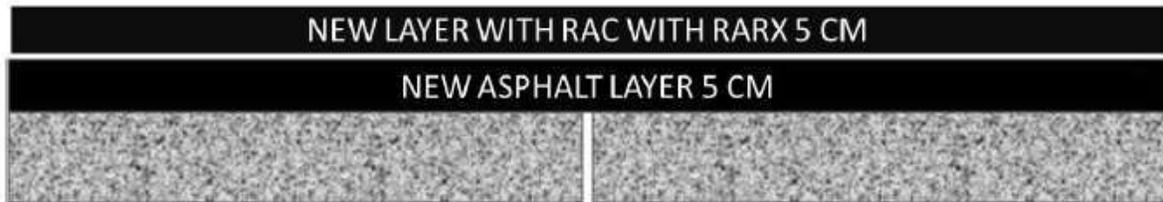


*Figura 33 Carpeta asfáltica de gran espesor y carpeta asfáltica con asfalto modificado*

*Fuente: Cirtec*

Carpeta de concreto asfáltico sobre losa de concreto, con capa de rodadura de concreto asfáltico con RARX: El uso del RARX permitió disminuir los espesores,

pasando la capa intermedia de 13 cm a tan solo 5 cm. Cabe destacar que esta solución no requiere mantenimiento a los 5 años, además de garantizar una vida útil superior a 10 años.



*Figura 34 Carpeta asfáltica con RARX*

*Fuente: Cirtec*

Para realizar la comparativa se toman 3 diferentes casos, el primer caso es una carpeta asfáltica de 13 cm de espesor con una capa de rodamiento con asfalto modificado con 5 cm de espesor, el segundo caso consiste en una carpeta asfáltica de 5 cm de espesor con una capa de rodamiento con RARX de 5 cm de espesor, como es evidente que la reducción de 8 cm en la capa intermedia tendría una reducción en el impacto ambiental en el tercer caso se consideró la capa intermedia de 13 cm y la capa de rodamiento con RARX de 5 cm.

El alcance del análisis del ciclo de vida es:

1- La producción del polvo de caucho obtenido a través de neumáticos reciclados, desde la cuna a la puerta de la fábrica.

2- La producción del RARX de la cuna a la puerta de fábrica

3 - La etapa de producción para las siguientes mezclas asfálticas:

\*Mezcla asfáltica para capa de rodadura convencional.

\*Mezcla asfáltica para capa intermedia.

\*Mezcla asfáltica de alta viscosidad con RARX para capa de rodadura.

4 - La etapa de proceso de construcción y la fase de reparación en la etapa de uso.

Para el artículo se consideran las 3 opciones diferentes y se evalúa su impacto ambiental para evaluar si la opción que conlleva RARX en realidad representa una disminución en el impacto ambiental. Este artículo concluye que la opción que incluye una capa de rodadura de 5 cm con RARX con una capa intermedia de 13 cm la puntuación única del impacto ambiental es un 13.52%, inferior que en el caso de la capa de rodadura convencional (13 cm de capa intermedia y 5 cm de capa de rodadura con asfalto modificado). Además, la mejora aumenta hasta un 49.47% si se emplea una capa intermedia de solo 5 cm y 5 cm de capa de rodadura con RARX.

### **3.15 Mezclas asfálticas**

Las mezclas asfálticas son una combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico. Dependiendo de la finalidad de la mezcla asfáltica la estructura mineral (granulometría) varia, de igual manera el cemento asfáltico puede llegar a variar en caso de que se busque un mejor desempeño, modificándolo a partir de polímeros o hule molido de neumático.

Existen varios tipos de mezclas asfálticas: densas, discontinuas y abiertas, cada una con una funcionalidad específica y diferente.

La mezcla asfáltica densa tiene como característica principal su aporte estructural al pavimento, lo que significa que ayuda a soportar las cargas del tránsito vehicular. Es la mezcla asfáltica más común.

Por otro lado, la mezcla abierta permite drenar de manera muy efectiva el agua debido a su alto contenido de vacíos de aire, pero no tiene una gran capacidad de soporte. Por lo tanto, se debe de utilizar en lugares de bajo tránsito.

Las mezclas discontinuas, como lo es la SMA, brinda características como reducción de ruido, buen drenaje de agua y resistencia al deslizamiento. Dependerá de las características del proyecto el tipo de mezcla asfáltica a utilizar.



*Figura 35 Tipos de mezclas asfálticas*

*Fuente: Elaboración propia*

### **3.16 Daños en pavimentos**

Un pavimento se diseña para que cumpla una vida útil y que, a lo largo de esta vida útil, ofrezca un buen servicio al usuario de la vialidad. Sin embargo, en cuanto más se acerque al final del periodo de diseño, el índice de servicio se irá reduciendo, hasta llegar a condiciones que afectarán la estabilidad y seguridad de la vialidad.

De acuerdo con la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT) solo el 31% de las carreteras federales en México están en buen estado, un 55% en estado regular y 14% tienen malas condiciones (SICT, 2021). El mal estado de las vialidades está asociado a un subdiseño del pavimento, a una estimación incorrecta de las cargas de los vehículos que superan las cargas de diseño, a la utilización de materiales de mala calidad, un deficiente control de calidad en la obra, una mala ejecución de los trabajos y a un mantenimiento inapropiado. La gravedad

de daño en el pavimento dependerá de la medida en que estas causas se combinen. Según el nivel de daño se elegirá el tipo de rehabilitación, que varía desde una rehabilitación superficial hasta una rehabilitación estructural.

### **3.16.1 Rehabilitación superficial**

Las medidas de rehabilitación superficial resuelven problemas relacionados con las capas superiores del pavimento, usualmente dentro de los 100 mm superiores. Las deficiencias que se presentan están relacionadas con el envejecimiento del asfalto y con el agrietamiento que se origina en la superficie debido a factores térmicos. (Rondón, 2012).

Para la rehabilitación superficial se pueden utilizar diferentes métodos. El más común es el fresado y el reemplazo, que consiste en retirar la carpeta asfáltica dañada y colocar una carpeta asfáltica nueva. La ventaja de este método es que es muy rápido.

### **3.16.2 Rehabilitación estructural**

Al resolver los problemas estructurales, debe entenderse que la estructura del pavimento es la que tiene las fallas, y no necesariamente los problemas se encuentren en los materiales que la constituyen (Rondón, 2012).

Para la rehabilitación estructural existen diferentes métodos; entre ellos y el más severo, es la reconstrucción total. Este se utiliza cuando toda la estructura del pavimento está dañada o cuando la rehabilitación de una parte del pavimento es más tardada o costosa que realizar la reconstrucción total. Esta opción involucra cerrar la vialidad durante bastante tiempo por lo cual puede llegar a no ser viable.

Otra opción es la construcción de capas adicionales. Éstas se colocan arriba de la superficie y se realizan para re nivelar o retrasar la reflexión de fisuras.

### **3.16.3 Reflexión de fisuras**

En pavimentos fisurados, que por lo general son pavimentos rígidos en los cuales las losas de concreto han fallado, comúnmente se demuelen las losas y se reemplazan. El inconveniente que esto representa es que la demolición y la habilitación de una nueva superficie es prolongada, por lo cual una opción rápida es construir una carpeta asfáltica por encima de la superficie fisurada con el fin de retardar la aparición de fisuras en la superficie.

El fenómeno de reflexión de fisuras consiste en una propagación de fisuras desde una capa estructural hasta la superficie y se originan por movimientos horizontales y/o verticales entre los bloques rígidos de la capa de soporte. Estos movimientos generan concentración de esfuerzos de tensión y/o corte en la capa ubicada sobre las juntas y/o fisuras de la capa rígida de movimiento (Rondón, 2012).

## **3.17 Ruido generado por pavimentos**

El ruido se ha convertido en un contaminante para la mayor parte de las masas urbanas, tornándose actualmente en un agravante para la salud de las personas, afectando tanto en lo físico como en lo psicológico (Durán, 2021).

El ruido que provoca un vehículo al circular por un pavimento es debido a sus componentes, y también es originado por el desplazamiento por el contacto neumático-pavimento.

Los factores que distinguen a un pavimento silencioso de uno ruidoso es principalmente la porosidad y la textura (Durán, 2021). Por lo que construir pavimentos flexibles reduce la contaminación auditiva con respecto a un pavimento rígido.

### **3.18 Ciclo de vida**

El ciclo de vida es un análisis que toma en cuenta el impacto ambiental desde la extracción de los materiales, producción, uso, tratamiento final, reciclado hasta su disposición final.

Hay cuatro fases en un estudio de ACV: la fase de definición del objetivo y el alcance, la fase de análisis del inventario, la fase de evaluación del impacto ambiental y la fase de interpretación.

El alcance de un ACV, incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle, depende del tema y del uso previsto del estudio. La profundidad y amplitud del ACV puede diferir considerablemente dependiendo del objetivo de un ACV en particular (ISO14040, 2006).

### **3.19 Huella de carbono**

La huella de carbono nace como una medida para cuantificar y generar un indicador del impacto que una actividad o proceso tiene sobre el cambio climático, más allá de los grandes emisores.

La huella de carbono se define como el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de CO<sub>2</sub> equivalentes, y sirve como una útil herramienta de gestión para conocer las conductas o acciones que están contribuyendo al aumento de nuestras emisiones, cómo podemos mejorarlas y realizar un uso más eficiente de los recursos (<https://mma.gob.cl>, 2018).

En los pavimentos existen 2 tipos de huellas de carbono las cuales son:

Directa: es la que ocurre durante la construcción, mantenimiento y reciclado del pavimento.

Indirecta: es un aumento de la huella de carbono debido al mal estado de la vialidad.

### **3.20 Módulo dinámico de la mezcla asfáltica**

La mezcla asfáltica no es un material que mantenga constantes sus propiedades. Al ser un material termo sensible, su respuesta dependerá de la temperatura a la que se encuentre. De igual manera, su comportamiento dependerá de la velocidad y la duración a la cual se le apliquen las cargas. Al ser un material que tiene esas variables, se debe de adaptar una prueba que pueda medir la variación del módulo. Por lo cual, se utiliza la prueba de módulo dinámico, en la cual se mete un espécimen de mezcla asfáltica a una cámara la cual lo mantiene a una temperatura establecida y se somete a cargas de compresión axial cíclicas a diferentes frecuencias. Las cargas a las que está sometida una mezcla asfáltica no son de igual magnitud y no son de forma permanente, por eso este ensayo representa estas condiciones a través de la variación de las cargas a diferentes frecuencias y temperaturas.

Con respecto al comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas, el módulo dinámico  $|E^*|$ , al igual que el cemento asfáltico, se ve significativamente afectado por la temperatura y la frecuencia de carga. Se ha comprobado que Un aumento de temperatura genera una disminución del módulo dinámico mientras que un aumento de la frecuencia de carga genera valores más altos de módulo dinámico. (Radovski & Teltayev, 2017), esta característica propia de los materiales visco elásticos se utiliza para construcción de curvas maestras.



*Figura 36 Prueba de módulo dinámico*

*Fuente: (Delgado, Gómez, & Flores, 2017)*

El módulo dinámico es un número complejo que consta de dos partes: la parte real, la cual representa la rigidez (parte elástica), y la imaginaria, que representa el amortiguamiento interno de los materiales (parte viscosa) (Huang, 1993).

El módulo dinámico es la relación de la amplitud del esfuerzo sinusoidal máximo y la amplitud de la deformación sinusoidal máxima (Delgado, Gómez, & Flores, 2017). Al aplicar una carga, hay un desfase con respecto a la deformación que es conocido como el ángulo de fase.

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$E^* = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)}} = |E^*| e^{i\delta} \quad (5)$$

Dónde:

$E^*$  = Módulo complejo

$|E^*|$  = Módulo dinámico

$\delta$  = Ángulo de fase

$\varepsilon_0$  = Deformación unitaria máxima

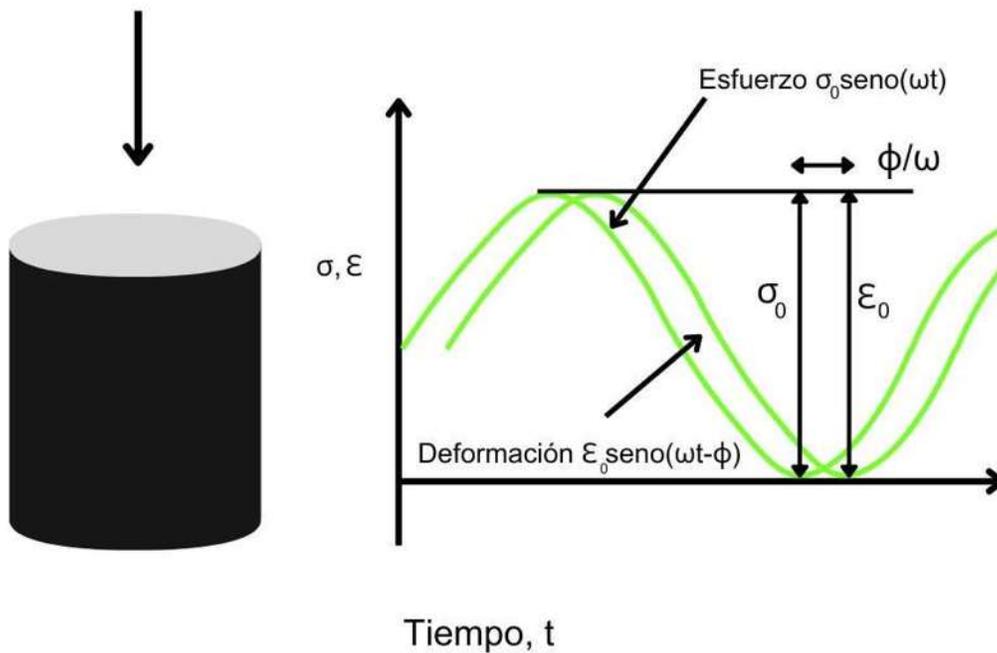
$\sigma$  = Esfuerzo

$\sigma_0$  = Esfuerzo máximo

t = Tiempo

$\omega$  = Velocidad angular

f = Frecuencia



Gráfica 5 Esfuerzo y deformación sinusoidal

Fuente: Elaboración propia

La importancia del módulo dinámico es que, mediante él se puede predecir el comportamiento de la mezcla asfáltica bajo las diferentes sollicitaciones que tendrá

a lo largo de su vida útil, a diferentes temperaturas. Dado que la prueba de módulo dinámico requiere de un equipo especializado, además de que conlleva mucho tiempo, se han empleado correlaciones empíricas o semi-empíricas, en las cuales se emplean características de la mezcla asfáltica.

Existen varias correlaciones para obtener el módulo dinámico, como se muestran en la *Tabla 5*. Sin embargo, para determinar qué modelo es más adecuado de utilizar, se deben evaluar cual modelo de predicción se acerca más a los datos obtenidos en laboratorio. Lara (2021) realizó un análisis comparativo entre el módulo obtenido en laboratorio y la capacidad de predecirlo a través de las ecuaciones del Instituto del Asfalto, Shell, Hirsch, Witczak–Mirza y Witczak-Bari.

En cuanto a los resultados obtenidos con el Instituto del Asfalto, se obtuvo una gran dispersión. Comenta que esto puede ser debido a que en la época en donde se obtuvo esa ecuación no se contaba con los asfaltos con los que se cuentan hoy en día, además que las características que actualmente se les piden a los pétreos son más estrictas.

En cuanto a la fórmula de Shell, los resultados son aceptables, aunque para temperaturas intermedias y altas el valor que predice de módulo dinámico está por debajo del medido en laboratorio.

Con respecto a la ecuación de Hirsch, comenta que presenta valores aceptables, aunque fue realizada esta ecuación con tan solo 206 datos. El éxito de esta ecuación, a pesar del número bajo de datos, considera que se debe a que utiliza el módulo cortante del cemento asfáltico, además de utilizar valores de la mezcla asfáltica como VAM y VFA.

En cuanto a la ecuación de Witczak–Mirza, muestra muy buena correlación de la predicción con respecto a los datos obtenidos en laboratorio. Esto es a consecuencia del gran número de datos que se utilizaron para su desarrollo con 2,750 módulos medidos.

En la ecuación de Witczak-Bari presenta un bajo valor de correlación, esto comenta el autor que puede ser a raíz de que el modelo se realizó con mezclas que utilizaban

asfaltos con granos de caucho reciclado. En resumen, la ecuación que predice mejor los módulos dinámicos es la ecuación de Witczak–Mirza como se muestra en la *Tabla 6*.

Modelo de Predicción  E*	Año de publicación	R <sup>2</sup>	Base de datos	
			Nm	Np
Van Der Poel	1954	ND	-	47
Heukelom & Klomp	1969	0.98	-	-
Witczak primera ecuación	1972	ND	29	87
Bonnaure	1977	ND	-	-
Witczak y Shook	1978	ND	41	369
Instituto del asfalto	1979	0.94	41	369
Witczak '81	1981	ND	41	369
Witczak, Miller y Uzam	1983	0.93	131	1179
Witczak y Akhter	1989	ND	131	1179
Witczak, Leahy, Caves y Uzan	1996	ND	149	1429
Witczak y Fonseca	1996	ND	149	1429
Andrei, Witczak y Mirza (Modelo 1-37A)	1999	0.96	205	2750
Hirsch, Cristensen, Pellinen y Bonaquist	2003	0.98	18	206
Witczak y Bari (Modelo I-40D)	2006	0.88	397	8750
Al-Khateeb	2006	0.98	18	206
Nm: Número de mezclas – Np: Número de puntos				

*Tabla 5 Modelos de ecuaciones para predicción del módulo dinámico*

*Fuente: (Lara, 2021)*

ID	Método	Parámetro de Ajuste			
		Sy	Se	Se/Sy	R <sup>2</sup>
IA	Instituto del Asfalto	5887.4	7352.8	1.28	0.628
SH	Shell	6146.4	3493.0	0.57	0.679
HCH	Hirsch	6146.4	1963.5	0.32	0.899
37A	NCHRP 1-37A	6170.2	1910.2	0.31	0.905
40D	NCHRP 1-40D	6180.7	3039.3	0.49	0.759

Tabla 6 Valores de los parámetros de ajuste de las ecuaciones de correlación

Fuente: (Lara, 2021)

A continuación, se presentan algunas ecuaciones para predecir el módulo dinámico. Estas ecuaciones requieren de una serie de parámetros específicos de la mezcla asfáltica, en lo que respecta a su granulometría y al asfalto.

### Instituto del asfalto (1979)

$$|E_m| = 100000 \cdot 10^{\beta_1} \quad (6)$$

$$\beta_1 = \beta_3 + 0.0000005\beta_2 - 0.00189\beta_2 \cdot f^{-1.1} \quad (7)$$

$$\beta_2 = \beta_4^{0.5} \cdot T^{\beta_5} \quad (8)$$

$$\beta_3 = 0.55383 + 0.028829(\rho_{200} \cdot f^{-0.1703}) - 0.03476Va + 0.70377\lambda + 0.931757f^{-0.02774} \quad (9)$$

$$\beta_4 = 0.483V_b \quad (10)$$

$$\beta_5 = 1.3 + 0.49825 \log(f) \quad (11)$$

Donde:

$|E_m|$ : Módulo de la mezcla, psi

$f$ : Frecuencia de la aplicación de la carga, Hz

$T$ : Temperatura de la mezcla, °F

$\rho_{200}$ : Porcentaje en peso del agregado que pasa la malla No. 200

$V_a$ : Volumen de los vacíos con aire, %

$V_b$ : Volumen de asfalto en la mezcla, %

$\lambda$ : Viscosidad del asfalto en 106 poises a 70°F

### Shell, Bonnaure (1977)

Para  $5 \times 10^6 \text{ N/m}^2 < S_b < 10^9 \text{ N/m}^2$

$$\text{Log} S_m = \frac{\beta_4 + \beta_3}{2} \cdot (\text{log} S_b - 8) + \frac{\beta_4 - \beta_3}{2} \cdot |\text{log} S_b - 8| + \beta_2 \quad (12)$$

Para  $10^9 \text{ N/m}^2 < S_b < 3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

$$\text{Log} S_m = \beta_2 + \beta_4 + 2.0959(\beta_1 - \beta_2 - \beta_4)(\text{log} S_b - 9) \quad (13)$$

$$\beta_1 = 10.82 - \frac{1.342(100 - V_g)}{V_g - V_b} \quad (14)$$

$$\beta_2 = 8.0 + 0.056V_g + 0.000213V_g^2 \quad (15)$$

$$\beta_3 = 0.6 \cdot \text{log} \left[ \frac{1.37V_g^2 - 1}{1.33V_b - 1} \right] \quad (16)$$

$$\beta_4 = 0.7582(\beta_1 - \beta_2) \quad (17)$$

Dónde:

$S_m$ : Módulo de la mezcla, N/m<sup>2</sup>

$S_b$ : Rigidez del cemento asfáltico

$t_w$ : Tiempo de aplicación de la carga

$V_g$ : Porcentaje en volumen del agregado

$V_b$ : Porcentaje en volumen del cemento asfáltico

**Andrei, Witczak y Mirza – Modelo I-37<sup>a</sup>-, (1999)**

$$\begin{aligned} \text{Log}E^* &= 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 + 0.058097V_a - 0.802208 \\ &\cdot \frac{V_{beff}}{(V_{beff} + V_a)} \\ &+ \frac{3.871977 - 0.021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(-0.996845 - 0.31351 \log(f) - 0.3935 \log(\eta))}} \end{aligned} \quad (18)$$

**Witczak y Bari - Modelo 1- 40D -, (2006)**

$$\begin{aligned} \log|E^*| &= -0.02 + 0.758 (|G_b^*|^{-0.0009}) \\ &\times \left[ 6.8232 - 0.03274P_{200} + 0.00431P_{200}^2 + 0.0104P_4 - 0.00012P_4^2 + 0.00016P_{38}^2 \right. \\ &\quad \left. - 0.0796V_a - 1.1689 \left( \frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) \right] \\ &+ \frac{1.437 + 0.03313V_a + 0.6926 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + 0.00891P_{38} - 0.00007P_{38}^2 - 0.081P_{34}}{1 + e^{(-4.5868 - .8176 \log|G_b^*| + 3.2738 \log(\delta_b))}} \end{aligned} \quad (19)$$

Dónde:

$|E^*|$ : Módulo dinámico, psi

$|G_b^*|$ : Módulo cortante dinámico del cemento asfáltico, Pa

### 3.21 Módulo de resiliencia

Las cargas que soportan los pavimentos son dinámicas, por ende, se necesita un ensayo que mide la variación de la respuesta esfuerzo-deformación ante carga cíclicas. En la carpeta asfáltica, se ocupa la prueba de módulo dinámico, mientras que en los suelos se utiliza la prueba de módulo de resiliencia. Para obtener la resistencia del suelo comúnmente se ocupa el CBR (California Bearing Ratio), también conocido en México como VRS (Valor Relativo de Soporte) y el módulo resiliente, la diferencia entre estas dos pruebas es que en la prueba de CBR se obtiene la carga a la cual se produce cierta penetración con respecto a la carga a la cual se produciría la misma penetración en una capa estándar de suelo triturado compactado. En cambio, en el módulo de resiliencia mide la capacidad que tiene un suelo para recuperarse ante una serie de cargas cíclicas. Por lo tanto, es más representativa la prueba de módulo resiliente.

El módulo resiliente es una medida de la capacidad los materiales para almacenar o absorber energía sin deformación permanente. Es decir, es una propiedad dentro del límite proporcional del material (Popov, 1990).

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (20)$$

Dónde:

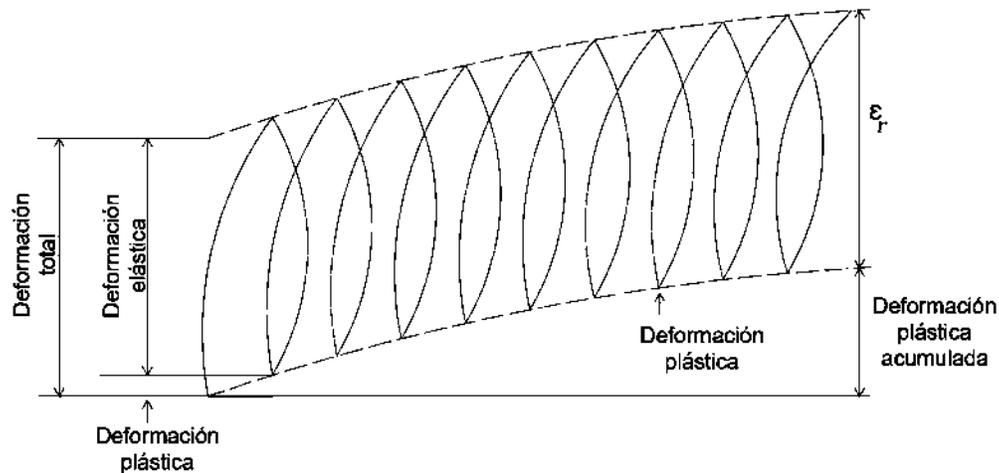
$M_R$  = Módulo resiliente

$\sigma_d$  = Esfuerzo desviador

$\varepsilon_r$  = Deformación unitaria recuperable (resiliente)

Cuando un material se somete a un ensayo de carga repetida, al inicio de la aplicación de carga, se da una deformación permanente y al mismo tiempo una deformación recuperable. Conforme aumenta el número de repeticiones carga, la

deformación plástica va disminuyendo y la deformación pasa a ser prácticamente toda recuperable (Huang Y. , 2004).



Gráfica 6 Deformaciones en la prueba de módulo resiliente

Fuente: Elaboración propia

El módulo resiliente se realiza mediante un ensayo triaxial de carga repetida que simula los estados de esfuerzos que experimenta el material por el tránsito de los vehículos. El ensayo consiste en la aplicación de un pulso de carga haversiana de magnitud fija, con una duración de carga de 100 ms y un periodo de reposo de 900 ms, sobre un espécimen de ensayo cilíndrico (102 mm de diámetro y 203 mm de altura, generalmente).

Durante el ensayo, la muestra se somete a un esfuerzo cíclico de manera dinámica y esfuerzo de confinamiento de forma estática proporcionado por medio de una cámara de presión triaxial. La respuesta total de la deformación axial resiliente (recuperable) de la muestra se mide y se utiliza para calcular el módulo resiliente, según la norma de ensayo AASHTO T 307 (AASHTO, 2019).

El ensayo se ejecuta para varios estados de esfuerzo, de manera que se pueda calcular un modelo de módulo resiliente para el material (Múnera & Aguilar, 2020).

### 3.22 Correlaciones de CBR para encontrar el módulo resiliente

El módulo resiliente se puede determinar mediante ensayos triaxiales de carga repetida, que simula los esfuerzos cíclicos que sufren las capas de suelo del pavimento. Sin embargo, al igual que el módulo dinámico, no todos los laboratorios cuentan con este equipo. Por lo cual se han desarrollado correlaciones para estimar el módulo resiliente a partir de otras propiedades mecánicas, como el CBR. Algunas de estas ecuaciones se muestran en la *Tabla 7*.

Relación	Referencia
$M_r(ksi) = 1.42CBR$ (21) Para suelos con CBR menores a 10	Heukelon y Klomp (1962)
$M_r(psi) = 5409CBR^{0.71}$ (22)	Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (Green y Hall, 1975)
$M_r(psi) = 3000CBR^{0.65}$ (23)	South African Council on Scientific and Industrial Research (CSIR)
$CBR = 0.62s_u(psi)$ (24) $M_r = 100 - 500s_u$ (25) $M_r = 500 - 1500s_u$ (26) $M_r(psi) = 160a2420CBR$ PI>30 PI<30 Dónde $s_u$ = resistencia al corte no drenada y PI = índice plástico	Black (1961) y Duncan y Buchignani (1976)
$M_r(psi) = 2555CBR^{0.64}$ (27)	Powell et al. (1984) y NCHRP (2004) Transport

		and Road Research Laboratory (TRRL) y M-E Pavement Design Guide-Level 2 (USA)
$M_r(psi) = 3116CBR^{0.67797}$	(28)	Webb y Campbell (1986) Departamento de Transporte de Georgia
$M_r(psi) = 10^{(0.85 \log(CBR)+2.971)}$	(29)	Newcomb y Birgisson (1999) Departamento de Transporte de Alabama
$\log M_r(ksi) = 1.0016 + 0.043(CBR) - 1.9557\left(\frac{\log \sigma_d}{CBR}\right) - 0.1705 \log \sigma_d$	(31)	Lofti (1984) y Lofti et al (1988)

Tabla 7 Correlaciones de módulo resiliente

Fuente: (Gopalakrishnan y Thompson, 2007)

### 3.23 Métodos de diseño de pavimentos flexibles de la UNAM

Dentro de los métodos de diseño de pavimentos flexibles más utilizados en México, se encuentra el desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Este método se realizó partiendo del análisis de datos experimentales en tramos de prueba en carreteras en servicio, de investigación teórica y de experimentación en laboratorio en la pista circular de pruebas, que influyó más recientemente en sucesivos perfeccionamientos (Rico, Téllez, & Garnica, 1998).

Para simplificar el problema, el método ocupa una hipótesis. Al utilizar la teoría de Terzhagi para el desarrollo del método, supone que es un sistema elástico-lineal, homogéneo e isótropo.

En los datos de entrada de este método es la caracterización del tránsito vehicular, a través de un TDPA (Tránsito Promedio Diario Anual) distribuido a con porcentajes a los vehículos que lo componen. Además de que se tendrá que establecer una tasa

de crecimiento anual y un periodo de diseño dado en años. Estos datos se tendrán que homologar en ejes equivalentes. Los ejes equivalentes se obtendrán para daño superficial (fatiga) y daño profundo (deformación permanente).

Otro parámetro de entrada es la caracterización de los materiales a utilizar. En cuanto a los suelos, se necesita obtener el CBR, y para suelo y carpeta se necesita el módulo de rigidez. En el caso de suelo puede ser obtenido mediante correlaciones en el programa DISPAV a través de la *Ecuación 32*. En el caso del módulo de rigidez de la carpeta asfáltica, sino se conoce el valor, se puede correlacionar a través de las ecuaciones del laboratorio Shell, Instituto del Asfalto, Modelo Witczak y del Instituto del Transporte de Texas.

$$E = 130 * CBR^{0.7} \quad (32)$$

Dónde:

E=Módulo de rigidez

CBR= Índice de soporte California

De igual manera, se tiene que elegir la confiabilidad, este parámetro se basa en que tanto se podrá reproducir lo previsto en proyecto en campo. Se debe de considerar este dato ya que en obra puede existir una variación en el proceso constructivo.

A través del Método de la UNAM, se obtienen los espesores de las capas del pavimento a través de un proceso iterativo. La desventaja de este método reside en que las leyes de fatiga y de deformación permanente no pueden ser cambiadas. Con la tecnología que se tiene hoy en día en cuanto a las mezclas asfálticas, no se puede suponer que una mezcla asfáltica convencional tendrá la misma ley de fatiga que una mezcla con asfalto modificado.

Para que el diseño sea óptimo, es necesario que se cumpla la revisión de fatiga y deformación permanente. La UNAM recomienda que la vida predecible, según la configuración del pavimento, sea de  $\pm 10\%$ . En caso de no pasar alguna revisión, se

pueden cambiar los módulos de los materiales, es decir, elegir materiales con mejores características y desempeño, también se pueden modificar los espesores o utilizar una base asfáltica.

### **3.24 Eje equivalente**

El eje equivalente se utiliza para establecer una igualdad entre los diferentes vehículos que componen el tránsito, en términos de carga, y por ende establecer el daño que se provocará. Si se quisiera establecer el daño que provoca cada vehículo por cada uno de sus ejes, se tendría un análisis más complejo; por lo tanto, los ejes equivalentes establecen una simplificación a la caracterización del tránsito vehicular.

El problema que se tiene con establecer el tránsito a través de ejes equivalentes es que no se conoce con exactitud las cargas de los vehículos. Estas cargas son muy variables y dependen de múltiples factores, entre ellos si el automóvil va cargado o no. Otro factor que influye bastante es si existen sobrecargas, ya que si solo consideramos que los vehículos no sobre pasan el límite legal y esto termina sucediendo, tendremos un diseño por debajo de los requerimientos de la vialidad. Sin embargo, con los ejes equivalentes se puede considerar una sobre carga con respecto a un porcentaje, pero de igual manera no se tendría certeza si esa condición se está cumpliendo. Partiendo de todas estas necesidades, se realizaron estaciones de pesaje dinámicas, en las cuales se establecen el tipo de vehículo que pasa sobre de ellas y el peso de cada eje. Con estos datos, se crearon lo espectros de carga, los cuales representan de una mejor manera al tránsito. A diferencia de los ejes equivalentes, los espectros de carga toman solo la información del tipo de eje del vehículo y la carga, se grafica en el eje horizontal las cargas y en el vertical el porcentaje.

### **3. 25 Caracterización del tránsito**

Para caracterizar el tránsito la AASHTO al igual el método de la UNAM lo hacen con ejes equivalentes, los cuales se obtienen de la siguiente manera:

$$\Sigma L = TDPA * CD * CT \sum_{i=1}^p C_i (W_i * \Sigma d_m + (1 - W_i) \Sigma d_v) \quad (33)$$

Dónde:

$\Sigma L$  = Sumatoria de ejes equivalentes

TDPA = Tránsito Diario Promedio Anual

CD = Coeficiente de distribución direccional

CT = Coeficiente de acumulación de tránsito

$d_m$  = Coeficiente de daño del vehículo tipo i cargado

$d_v$  = Coeficiente de daño del vehículo tipo i vacío

$W_i$  = Proporción de vehículos cargados

$$CT = 365 \sum_{i=1}^n (1 + r)^{i-1} = 365 \frac{(1 + r)^n - 1}{r} \quad (34)$$

Donde:

n = periodo de diseño en años

r = Tasa de crecimiento anual (%)

En el instructivo para diseño estructural de pavimentos flexibles para carreteras de la UNAM muestra un formato para el cálculo de ejes equivalentes el cual se debe de llenar de la siguiente manera:

En la columna de "Tipo de vehículo", se deben incluir los diferentes tipos de vehículos que conforman el tránsito vehicular, según su clasificación.

En “Composición del tránsito”, se debe indicar, en forma decimal, el porcentaje que ocupa cada vehículo dentro del TDPA. La suma tiene que ser igual a uno.

En la columna de “Coeficiente de distribución de vehículos cargados o vacíos”, se debe indicar por vehículos cuántos de esos vehículos van cargados y cuántos se consideran vacíos. La suma tiene que ser igual a uno por cada vehículo, pero la sumatoria total tiene que ser igual al número de vehículos que componen el TDPA.

En “Composición del tránsito cargados o vacíos” es el resultado de multiplicar la columna de “Composición del tránsito” por el “Coeficiente de distribución de vehículos cargados o vacíos”.

Para calcular los coeficientes de daño, se deben de establecer las profundidades para daño por fatiga y por deformación permanente. Según esta profundidad y el esfuerzo vertical que aplique cada vehículo, se obtendrá el coeficiente de daño. Estos coeficientes se pueden obtener a partir nomogramas o calculándolos directamente.

La columna de “Número de ejes sencillos equivalentes de 8.2 toneladas” se subdivide en dos columnas: una para carpeta y base y otra para subbase y terracerías. En la primera columna se divide para obtener los ejes equivalentes por fatiga, y la segunda columna para deformación permanente. Esta columna resulta de multiplicar la columna de “Composición del tránsito cargados y vacíos” por el “Coeficiente de daño”. Esta columna se tendrá que sumar y colocar el resultado enfrente de la celda que dice “Ejes equivalentes para tránsito unitario”, debajo de ese dato se colocará el TDPA inicial en el carril de proyecto. Por debajo, se debe colocar el “Coeficiente de acumulación de tránsito” y debajo de ese dato, el resultado de multiplicar estos tres últimos datos. Este resultado es el número de ejes equivalentes.

Una vez que se conoce el número de ejes equivalentes para fatiga y deformación permanente, el paso que sigue es proponer una configuración de pavimento, la cual debe de cumplir con la normativa. Se debe de ingresar el módulo de rigidez para cada uno de los materiales, en dado caso de que no se tenga este dato puede correlacionarse a través del CBR. Según las características de los materiales los espesores deberán de ser suficientes para soportar los ejes equivalentes de diseño y deberán de cumplir tanto para fatiga y deformación permanente, en dado caso de que no se cumpla según la condición que no se cumpla se podrá aumentar espesores, utilizar materiales de mejor resistencia o cambiar la configuración del pavimento.

Tipo de vehículo	Composición del tránsito <b>1</b>	Coeficiente de distribución de vehículos cargados o vacíos <b>2</b>	Composición del tránsito Cargados o vacíos <b>3 = 1 x 2</b>	Coeficientes de daño		Número de ejes sencillos equivalentes de 8.2 ton	
				Carpeta y Base Z=_____ <b>4</b>	Sub-base y terracerías Z=_____ <b>5</b>	Carpeta y Base <b>6 = 3 x 4</b>	Sub-base y terracerías <b>7 = 3 x 5</b>
		Cargados					
		Vacios					
		Cargados					
		Vacios					
		Cargados					
		Vacios					
		Cargados					
		Vacios					
Sumas	1.000	-----	1.000	Ejes equivalentes para tránsito unitario <b>8</b>			
Coeficiente de acumulación del tránsito, $C_T = \left[ \frac{(1+r)^n}{r} \right] 365$ n = Años de servicio = T = Tasa de crecimiento anual del tránsito = %				TDPA inicial en el carril de proyecto <b>9</b>			
				C <sub>T</sub> <b>10</b>			
TDPA = Tránsito Diario Medio Anual	CD Carril Proyecto =			$\Sigma \mathcal{L}$ <b>11 = 6 x 9 x 10</b>			

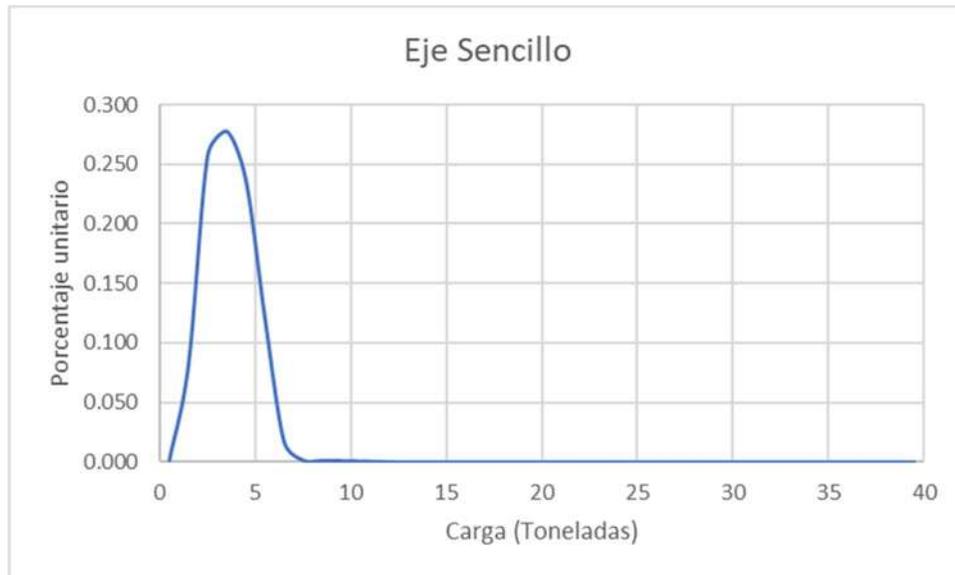
Tabla 8 Cálculo de ejes equivalentes

Fuente: (UNAM, 1981)

### 3.26 Espectros de carga

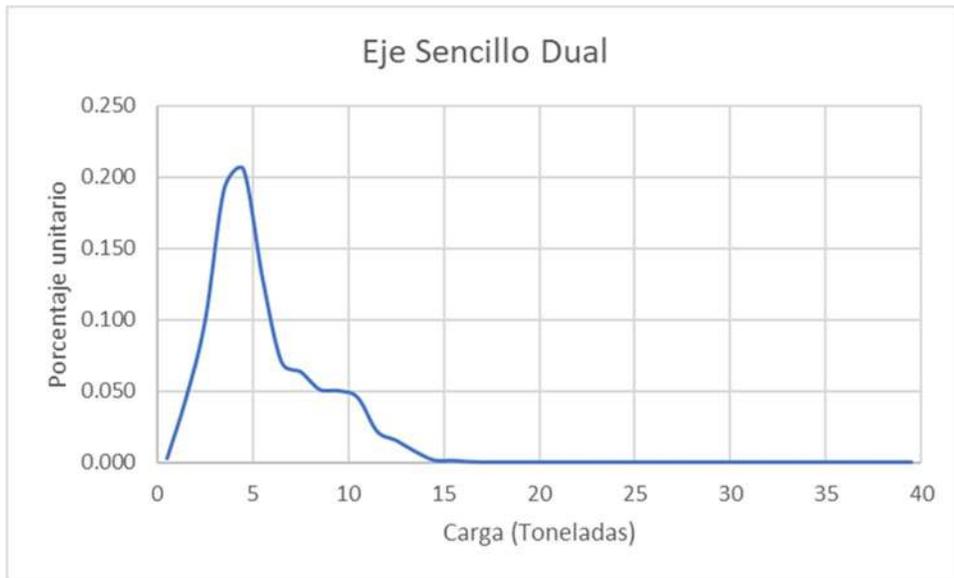
Los espectros de carga son una representación gráfica de la magnitud de las cargas y la frecuencia de cada una de ellas, separadas por intervalos. Esta representación se hace por cada eje. Al tratarse de una gráfica, es fácil analizar el comportamiento del tránsito y establecer según el tipo de eje el porcentaje de esos ejes que están

por encima del límite legal. Al obtener estos datos pueden servir para crear regulaciones dentro de la vía y penalizar a los vehículos que excedan los límites. Pero, además, estos datos también servirán para diseñar una vialidad con exactitud y de esta manera proveer la mejor solución para los años de servicio, diseñando con los espesores adecuados. La gran ventaja de los espectros de carga es que se obtiene una medición de las cargas reales de cada eje.



Gráfica 7 Espectro de carga para un eje sencillo

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 8 Espectro de carga para un eje sencillo dual

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 9 Espectro de carga para un eje tandem

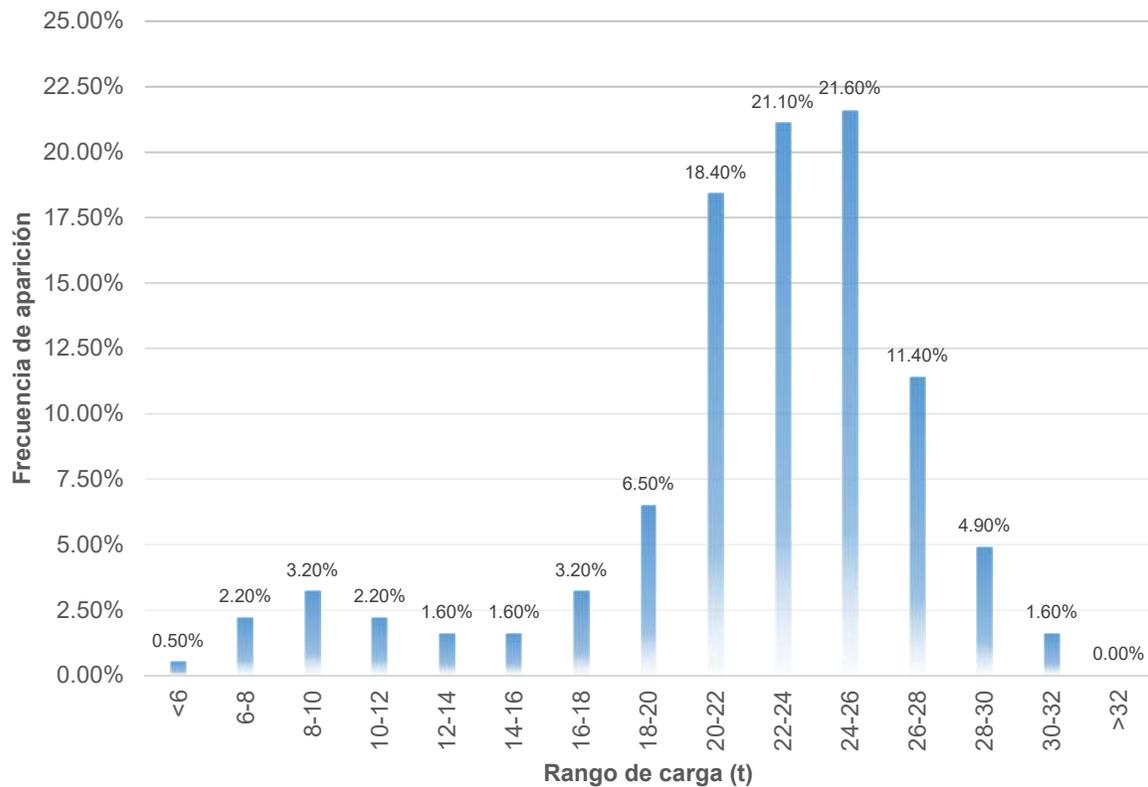
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 10 Espectro de carga para un eje tridem

Fuente: Elaboración propia

### ESPECTRO DE CARGA - EJES TRÍDEM



Gráfica 11 Representación de espectros de carga en gráfico de barras

Fuente: <http://paveing.blogspot.com>

## 3.27 Modelos de deterioro fatiga y deformación permanente

### 3.27.1 Fatiga

El fenómeno de fatiga es uno de los principales deterioros presentes en las mezclas asfálticas que conforman las capas de rodamiento de los pavimentos, el cual ocurre bajo la acción repetida del tránsito. La repetición de las cargas produce una pérdida en la rigidez del material hasta llegar a la falla. La resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas corresponde con su capacidad para soportar las cargas repetidas sin fallar o agrietarse. La vida de los pavimentos está directamente relacionada con este fenómeno, el cual deberá ser estudiado correctamente para asegurar un adecuado diseño estructural. (Gómez, Garnica, Delgado, & Mayra, 2020).

Las carpetas asfálticas fallan a fatiga, esto sucede por la repetición de cargas. Cada automóvil al pasar por la carpeta asfáltica genera daño. Este daño dependerá de la magnitud de su carga y de su tiempo de aplicación. El daño de cada vehículo se ve reflejado como una microgrieta, que, al pasar del tiempo, estas microgrietas se interconectan entre sí, generando una serie de grietas que van desde la parte inferior de la carpeta asfáltica hasta la superficie. La falla por fatiga se ve en el pavimento como la piel de cocodrilo, como se muestra en *Figura 37*.

Aunque a la mezcla asfáltica se le hagan pruebas de deformación permanente, como la de la rueda cargada de Hamburgo, la mezcla asfáltica no debe fallar por deformación permanente. Las pruebas que se le hacen de deformación permanente a la mezcla asfáltica solo es para asegurar que la mezcla asfáltica no tenderá a fallar de esta manera. La falla por deformación permanente de la mezcla asfáltica se denota como en la *Figura 38*.



*Figura 37 Falla por fatiga de la mezcla asfáltica*

*Fuente: [www.interempresas.net](http://www.interempresas.net)*



*Figura 38 Falla por deformación permanente de la mezcla asfáltica*

*Fuente: [www.interempresas.net](http://www.interempresas.net)*

### 3.27.2 Deformación permanente

La deformación permanente en pavimentos flexibles equivale a la acumulación de pequeñas deformaciones generadas con cada aplicación de carga y que son irreversibles. La aparición de roderas en un pavimento flexible se debe principalmente a dos causas: deformación permanente en las capas subyacentes, y/o deformación permanente en la carpeta asfáltica. La deformación se produce por la aplicación repetida de cargas a la subrasante, la subbase, o la base por debajo de la carpeta asfáltica. Aunque el empleo de materiales más rígidos reduce parcialmente este tipo de deformación, el fenómeno normalmente se considera más como un problema estructural de materiales (Garnica, Delgado, & Sandoval, 2005).

La formación de roderas afecta a la serviciabilidad de la vialidad, ya que en estas ondulaciones se almacenará agua y puede provocar hidroplaneo.

El hidroplaneo se genera cuando los neumáticos de un vehículo pierden contacto con la superficie de la carretera debido a una capa de agua y a la alta velocidad, lo que puede generar que el conductor pierda el control del vehículo.

### 3.27.3 Correlaciones a las leyes de fatiga

Cada tipo de mezcla asfáltica tendrá una ley de fatiga diferente. Con el avance en la tecnología de las mezclas asfálticas, es importante obtener esta ley para que el diseño del pavimento sea lo más cercano a la realidad. Las pruebas para fatiga requieren de un equipo especializado que es costoso, adicionalmente la prueba tarda demasiado tiempo. Por lo cual, muchas empresas han realizado investigaciones para obtener ecuaciones para establecer leyes de fatiga.

La ecuación de falla por fatiga es la siguiente:

$$Nf = f_1 * \epsilon_t^{-f_2} * E_{AC}^{-f_3} \quad (35)$$

Donde:

$Nf$  = Número de repeticiones admisibles

$\varepsilon_t$  = Deformación unitaria por tensión debajo de la carpeta asfáltica

$E_{AC}$  = Módulo de elasticidad o dinámico de la carpeta asfáltica (MPa)

$f_1, f_2, f_3$  = Coeficientes determinados en laboratorio por ensayos de fatiga.

### 3.27.4 Correlaciones para leyes de deformación permanente

De igual manera para deformación permanente existen diferentes ecuaciones para correlacionar. La ecuación de deformación permanente se muestra a continuación.

$$Nd = f_4 * \varepsilon_z^{-f_5} \quad (36)$$

$Nd$  = Número de repeticiones admisibles para prevenir la deformación permanente

$\varepsilon_z$  = Deformación unitaria por compresión arriba de la capa de la subrasante

$f_4, f_5$  = Coeficientes determinados mediante observación en campo

### 3.28 Hipótesis de Miner

La primer teoría de daño acumulativo fue propuesta por Palmgren en 1924 y desarrollada posteriormente por Miner en 1945 (Ruiz, Peláez, & Martínez, 2003).

La teoría explica la falla de los materiales bajo un estado de cargas. La falla se producirá cuando alcance un cierto número de ciclos. Si el número de ciclos que se le ha aplicado al material es menor al crítico, no se producirá la falla. Cada ciclo producirá solo una fracción de daño. En el caso de los pavimentos, las cargas que se le aplican a los pavimentos son variables, pero se estandarizan en ejes equivalentes. Cada vialidad se diseña a un cierto número de ejes equivalentes. Cada que pasa un vehículo provoca un daño en la vialidad que, al acumularse las afectaciones a través del tiempo provocan la falla.

$$D = \sum \frac{n}{N} \quad (37)$$

Donde:

D = Daño acumulado

n = Número de ciclos aplicados al material

N = Número de ciclos admisibles

En fatiga, se aplica la hipótesis de Miner, bajo la suposición de que al pasar un vehículo provoca una micro fisura en la carpeta asfáltica. La magnitud de la carga determinará la magnitud de la microfisura. Cada que paso de los vehículos se forman cada vez más microfisuras que poco a poco se van conectando entre ellas hasta provocar fisuras, que van desde la superficie hasta la parte baja de la carpeta asfáltica y es de esta manera que se crea la piel de cocodrilo en el pavimento.

En cuanto a la deformación permanente, de igual manera que en fatiga dependiendo de la magnitud de la carga cada que pase un vehículo el pavimento se deformará verticalmente, hasta que la deformación sea de una magnitud tal que no sea seguro transitar, para cada vía según su importancia se establece el valor máximo de deformación vertical (rodera).

Algunos aspectos que tiene en contra la utilización de la teoría de Miner es que predice un daño lineal y en los pavimentos no es así. Por ejemplo, una vialidad la cual está presentando un agrietamiento leve y, al llover y al paso de vehículos, provoca bombeo de finos. Si a esta vialidad se le aplica un tratamiento superficial, prolongará su vida útil. Por el contrario, y si no se le da mantenimiento, el daño será exponencial. Además, de que no el daño en pavimentos no solo se debe a la aplicación de cargas y a su frecuencia, sino también a factores climáticos.

Sin embargo, aunque la hipótesis de Miner tiene sus limitaciones, sirve para poder entender como es la falla de un material ante cargas repetidas.

### **3.29 Metodología empírico mecanicista**

Recibe el nombre esta metodología de diseño de pavimentos debido a que combina un modelado mecánico y un empírico. El modelado mecánico consiste en determinar la respuesta esfuerzo deformación del pavimento bajo una teoría, como elemento finito o bajo la teoría multicapa elástica. Las teorías definen los esfuerzos y las deformaciones. Con la parte empírica se obtienen los modelos de deterioro mediante las observaciones hechas en tramos de prueba.

El diseño final consiste en comparar el número de repeticiones esperadas de tránsito durante el período de diseño del pavimento con el número de repeticiones permisibles en la carpeta asfáltica y en las capas granulares, derivados de los modelos de deterioro. Si resultan mayores, quiere decir que los materiales todavía no satisfacen todas las repeticiones de tránsito, por lo tanto, se repite el procedimiento modificando la geometría del pavimento o las características elásticas de las capas (módulos dinámicos y módulos resiliente) hasta que cumplan con la solicitud de tránsito esperada (Coria, 2012).

# METODOLOGÍA EMPÍRICO-MECANICISTA

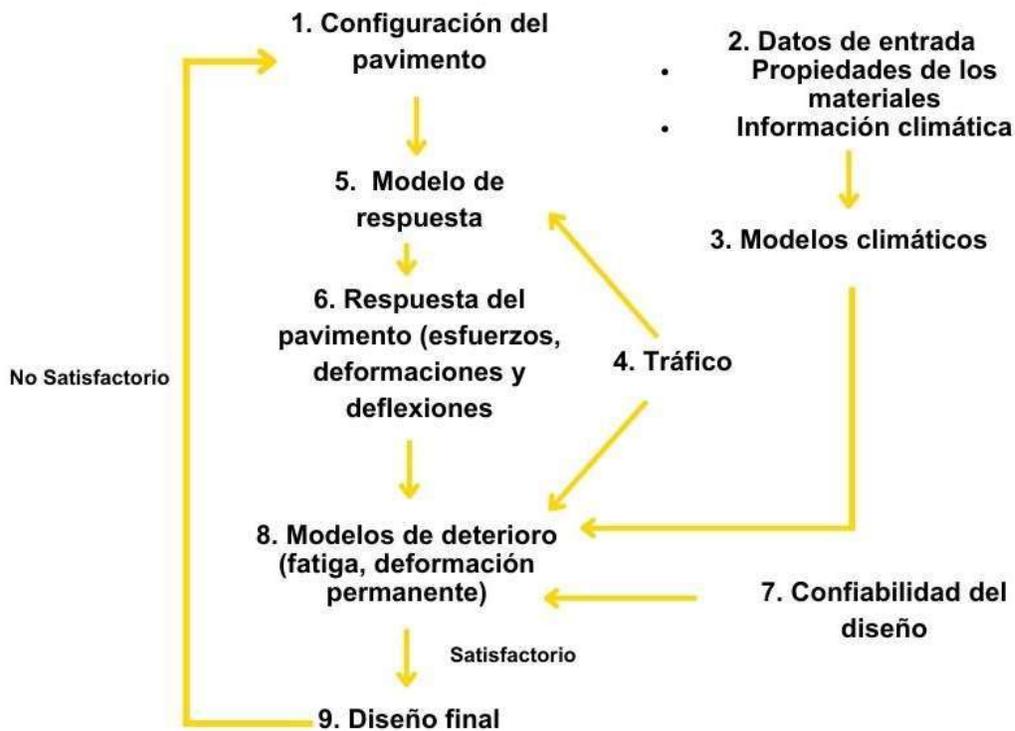


Figura 39 Metodología de diseño empírico-mecanicista

Fuente: Elaboración propia

## 3. 30 Análisis esfuerzo-deformación de un pavimento

El pavimento es un material difícil de analizar, dado que está compuesto de materiales diferentes. Para tratar de predecir su respuesta esfuerzo-deformación, se han propuesto diferentes soluciones. Entre ellas se encuentra la de Boussinesq. El inconveniente con la teoría de Boussinesq es que considera una masa de suelo en un medio continuo, es decir, que sus propiedades tanto físicas como mecánicas son uniformes en cada una de sus direcciones. Otra de las simplificaciones es la de Odemark.

El método de Odemark está basado en la suposición de que los esfuerzos y deformaciones por debajo de una capa dependen de la rigidez de esa capa solamente. Si el espesor, el módulo y la relación de poisson de una capa son

cambiados, pero la rigidez permanece sin presentar cambios, los esfuerzos y deformaciones por debajo de la capa deben de permanecer constantes. El método consiste en encontrar un espesor equivalente, para la primera capa, con un módulo igual al de la segunda capa para generar un espacio semi infinito homogéneo, en donde se podría utilizar la teoría de Boussinesq (Coria C. , 2012)

Sin embargo, la teoría de Odemark es una simplificación, por lo cual para hacer un análisis de mayor exactitud se deben de recurrir a modelos matemáticos más avanzados.

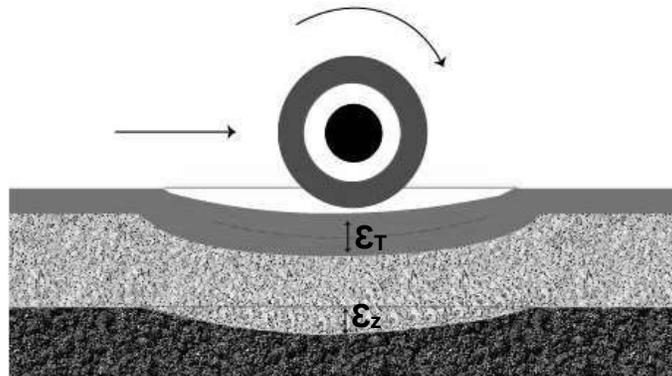


Figura 40 Esfuerzos de tensión y compresión en el pavimento

Fuente: Elaboración propia

### 3.30.1 Teoría de Boussinesq

La forma en que se distribuyen los esfuerzos en una masa de suelo fue conceptualizada por Boussinesq en 1883, quién dio la solución de distribución de esfuerzos debido a una carga puntual sobre un espacio semi infinito el cual es homogéneo, elástico e isotrópico.

Un espacio semi infinito es aquel en el que uno de sus lados está limitado, mientras que los otros no. Un espacio homogéneo es el que tiene las mismas características en todas sus direcciones, esto quiere decir que es una solo capa de suelo. En un material isotrópico no varían en ninguna dirección sus módulos de elasticidad y cortante, además del coeficiente de Poisson.

La solución para distribución de esfuerzos para una carga puntual fue expresada como:

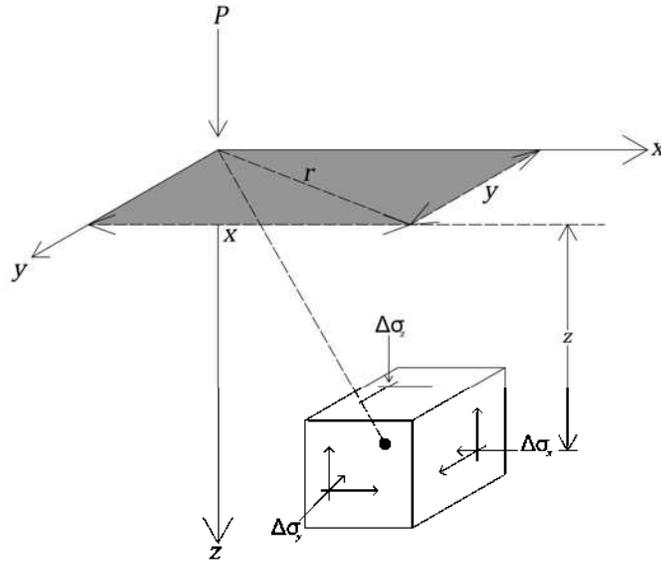


Figura 41 Esfuerzos en un medio elástico, causado por una carga puntual

Fuente: Elaboración propia

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{L^3} = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}} \quad (38)$$

Dónde:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (39)$$

$$L = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = r = \sqrt{r^2 + z^2} \quad (40)$$

Se puede describir la ecuación de la siguiente manera:

$$\sigma_z = \frac{P}{z^2} \left[ \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \right] \quad (41)$$

$$\sigma_z = \frac{P}{z^2} P_o \quad (42)$$

$$P_o = \frac{3}{2\pi} \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2} \right]^{5/2} \quad (43)$$

Posteriormente, Boussinesq extendió su solución para diferentes tipos de carga.

### 3.30.1 Teoría de Burmister

Burmister al igual que Boussinesq estudió la forma en que se distribuyen los esfuerzos en una masa de suelo, en cambio, Burmister consideró un sistema de capas. Este sistema está conformado por dos capas las cuales son homogéneas, isotrópicas y linealmente elásticas. La primera capa tiene un espesor definido, mientras que la segunda no y ambas en la dirección horizontal son semi infinitas. En un principio consideró solo dos capas, posteriormente extendió la solución para un número mayor de capas.

La teoría multicapa elástica es un método matemático para calcular las repuestas (deformación unitaria, esfuerzos y deflexiones) en una estructura con múltiples capas de espesor finito, exceptuando la última capa, la cual se supone con espesor y extensión infinita. Esta teoría supone que las capas son homogéneas, isotrópicas y con continuidad de esfuerzos. Basado en lo anterior, la teoría utiliza las

ecuaciones diferenciales de cuarto grado de la teoría de sólidos (Trejo, Rojas, Loria, & Aguilar, 2017).

Para determinar los esfuerzos y desplazamientos en un pavimento el cual es un sistema multicapa bajo una carga circular se utiliza la teoría de Burmister. Huang (1999) describe la obtención de los esfuerzos y deformaciones.

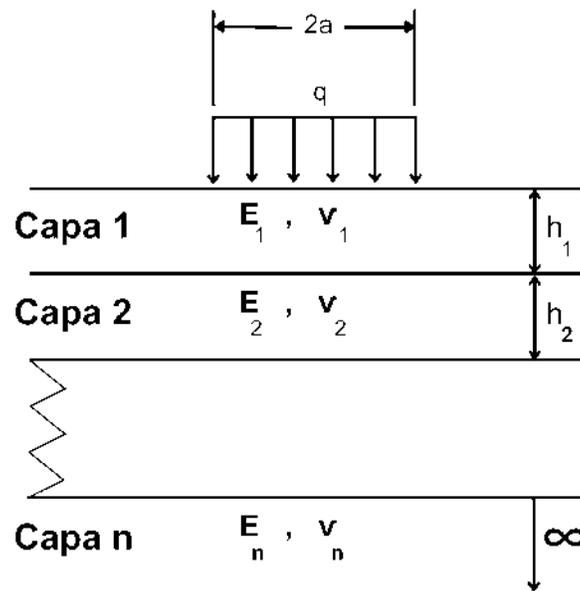


Figura 42 Sistema de capas para la distribución de esfuerzos de Burmister

Fuente: Elaboración propia

Para dar solución al problema, Burmister considero la ecuación diferencial de cuarto orden. Donde los esfuerzos son función de  $\phi$  y satisfacen la ecuación diferencial gobernadora (Huang, 2004). Para la resolución de este problema se hace con coordenadas cilíndricas.

$$\nabla^4 \phi = 0 \quad (44)$$

La distribución de esfuerzos está dada por:

$$\nabla^4 = \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad (45)$$

Los desplazamientos y esfuerzos pueden ser determinados por:

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (2 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial \phi}{\partial z^2} \right] \quad (46)$$

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \nu \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right] \quad (47)$$

$$\sigma_t = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \nu \nabla^2 \phi - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] \quad (48)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left[ (1 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \quad (49)$$

$$w = \frac{1 + \nu}{E} \left[ (1 - 2\nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] \quad (50)$$

$$u = \frac{1 + \nu}{E} \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial z} \right] \quad (51)$$

Para poder resolver la ecuación 1 se tienen que establecer las condiciones de continuidad y frontera. Como se observa en la ecuación, es de cuarto orden por lo que para poder ser solucionada se necesitan cuatro constantes de integración.

Dónde:

$$\rho = r/H \quad (52)$$

$$\lambda = z/H \quad (53)$$

H= es la distancia desde la superficie hasta el límite superior de la capa más baja.

Sustituyendo se obtiene:

$$\phi_i = \frac{H^3 J_0(mp)}{m^2} [A_i e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - B_i e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} - C_i m \lambda e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i m \lambda e^{-(\lambda - \lambda_{i-1})}] \quad (54)$$

Como es un sistema multicapa “i” se refiera a la capa en cuestión, las condiciones de continuidad y frontera darán por resultado las constantes A, B, C y D.  $J_0$  es una función de Bessel de primera clase y de orden 0.; m es un parámetro.

Al sustituir la *Ecuación (54)* en las *Ecuaciones (46), (47), (48), (49), (50) y (51)* se obtiene:

$$(\sigma^*_z)_i = -m J_0(mp) \{ [A_i - C_i (1 - 2v_i - m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} + [B_i + D_i (1 - 2v_i + m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} \quad (55)$$

$$\begin{aligned}
(\sigma_r^*)_i &= \left[ mJ_0(m\rho) - \frac{J_1(m\rho)}{\rho} \right] \{ [A_i + C_i(1 + m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} \\
&+ [B_i - D_i(1 - m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} + 2v_i m J_0(m\rho) [C_i e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i e^{-m(\lambda - \lambda_i)}]
\end{aligned} \tag{56}$$

$$\begin{aligned}
(\sigma_t^*)_i &= \frac{J_1(m\rho)}{\rho} \{ [A_i + C_i(1 + m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} + [B_i - D_i(1 - m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} \\
&+ 2v_i m J_0(m\rho) [C_i e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})}]
\end{aligned} \tag{57}$$

$$\begin{aligned}
(\tau_{rz}^*)_i &= mJ_1(m\rho) \{ [A_i + C_i(2v_i + m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} \\
&- [B_i - D_i(2v_i - m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \}
\end{aligned} \tag{58}$$

$$\begin{aligned}
(w^*)_i &= -\frac{1+v_i}{E_i} J_0(m\rho) \{ [A_i - C_i(2 - 4v_i - m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} \\
&- [B_i + D_i(2 - 4v_i + m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \}
\end{aligned} \tag{59}$$

$$\begin{aligned}
(u^*)_i &= \frac{1+v_i}{E_i} J_1(m\rho) \{ [A_i + C_i(1 + m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} \\
&+ [B_i - D_i(1 - m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \}
\end{aligned} \tag{60}$$

En dónde:

$\sigma_z$  =Esfuerzo en la dirección vertical o z

$\sigma_r$  =Esfuerzo en la dirección radial r

$\sigma_t$  =Esfuerzo en la dirección tangencial

$\tau_{rz}$  =Esfuerzo cortante

w=Desplazamiento en la dirección vertical z

u= Desplazamiento en la dirección radial r

$J_1$ =Función de Bessel de primer tipo y de orden uno

Las *Ecuaciones* (55), (56), (57), (58), (59) y (60) no son las ecuaciones finales, dado que estas son provocadas por una carga puntual  $-mJ_0(mp)$ . La teoría de Burmister está hecha para una carga distribuida circular de radio "a". Para lograr obtener los esfuerzos y desplazamientos debidos a esta carga circular, se tiene que integrar, por lo cual se utiliza el método de la transformada de Hankel, como se muestra a continuación:

$$\bar{f}(m) = \int_0^a qpJ_0(mp)dp = \frac{q\alpha}{m}J_1(m\alpha) \quad (61)$$

Dónde:

$$\alpha = \frac{a}{H} \quad (62)$$

Obteniendo la inversa de Hankel:

$$q(p) = \int_0^\infty \bar{f}(m)mJ_0(mp)dm = q\alpha \int_0^\infty J_0(mp)J_1(m\alpha)dm \quad (63)$$

$R^*$  es el esfuerzo o desplazamiento debido a la carga  $-mJ_0(mp)$  y  $R$  es debido a la carga  $q$ :

$$R = q\alpha \int_0^{\infty} \frac{R^*}{m} J_1(m\alpha) dm \quad (64)$$

El análisis se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Asignar valores sucesivos de  $m$ , desde 0 hasta un número positivo bastante grande hasta que  $R$  converja.
2. Para cualquier valor de  $m$ , determinar las constantes de integración,  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  y  $D_i$  desde las condiciones de continuidad y de contorno.
3. Sustituir esas constantes para obtener  $R^*$ .
4. Determinar  $R$  desde la Ecuación 64 por integración numérica.

En la integración numérica, los ceros de  $J_0(mp)$  y  $J_1(m\alpha)$  son determinadas y la integral entre estos dos ceros es evaluada por la fórmula Gaussiana de cuatro puntos.

Las condiciones de continuidad y frontera quedan definidas de la siguiente manera:

En la parte superior,  $i=1$  y  $\lambda=0$ , las condiciones de contorno:

$$(\sigma_z^*)_1 = -mJ_0(mp) \quad (65)$$

$$(\tau_{rz}^*)_1 = 0 \quad (66)$$

Resulta en dos ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} e^{-m\lambda_1} & 1 \\ e^{-m\lambda_1} & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -(1-2\nu_1)e^{-m\lambda_1} & 1-2\nu_1 \\ 2\nu_1 e^{-m\lambda_1} & 2\nu_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (67)$$

Para poder dar solución se supone que las diferentes capas del pavimento están unidas. En caso contrario la solución se debe proponer de diferente manera. Sin embargo, se considera que existe una continuidad de esfuerzos y desplazamientos para todos los puntos del sistema multicapa. Por lo tanto, cuando  $\lambda=\lambda_1$  las condiciones de continuidad están dadas por las *Ecuaciones (68)(69)(70)(71)*:

$$(\sigma_z^*)_1 = (\sigma_z^*)_{i+1} \quad (68)$$

$$(\tau_{rz}^*)_1 = (\tau_{rz}^*)_{i+1} \quad (69)$$

$$(w^*)_1 = (w^*)_{i+1} \quad (70)$$

$$(u^*)_1 = (u^*)_{i+1} \quad (71)$$

Resultan en cuatro ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} 1 & F_i & -(1-2v_i-m\lambda_i) & (1-2v_i+m\lambda_i)F_i \\ 1 & -F_i & 2v_i+m\lambda_i & (2v_i-m\lambda_i)F_i \\ 1 & -F_i & -(2-4v_i-m\lambda_i) & -(2-4v_i+m\lambda_i)F_i \\ 1 & F_i & 1+m\lambda_i & -(1-m\lambda_i)F_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{Bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} F_{i+1} & 1 & -(1-2v_i-m\lambda_i)F_{i+1} & 1-2v_i+m\lambda_i \\ F_{i+1} & -1 & (2v_{i+1}+m\lambda_i)F_{i+1} & 2v_{i+1}-m\lambda_i \\ R_i F_{i+1} & -R_i & -(2-4v_{i+1}-m\lambda_i)R_i F_{i+1} & -(2-4v_{i+1}+m\lambda_i)R_i \\ R_i F_{i+1} & R_i & (1+m\lambda_i)R_i F_{i+1} & -(1-m\lambda_i)R_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (72)$$

En estas ecuaciones:

$$F_i = e^{-m(\lambda_i - \lambda_{i-1})} \quad (73)$$

$$R_i = \frac{E_i (1 + v_{i+1})}{E_{i+1} (1 + v_i)} \quad (74)$$

Los esfuerzos y desplazamientos deben de desaparecer cuando  $\lambda$  tiende a infinito. Por lo tanto, se puede concluir que para todas las capas con  $i=n$ .

$$A_n = C_n = 0 \quad (75)$$

Para un sistema de n-capas, hay 4n constantes de integración. Con  $A_n = C_n = 0$ .

Para ahorrar tiempo en la resolución de ecuaciones simultáneas, se realizó un procedimiento en el cual solo se necesitan resolver dos ecuaciones, en lugar de 4n-2 ecuaciones.

$$\begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{Bmatrix} = [4 \times 4 \text{ matrix}] \begin{Bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (76)$$

Por multiplicaciones sucesivas, las constantes para la primera capa pueden relacionarse con las de la última capa por:

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ D_1 \end{pmatrix} = [4 \times 2 \text{ matrix}] \begin{pmatrix} B_n \\ D_n \end{pmatrix} \quad (77)$$

Para obtener las constantes de integración se supone que  $A_n$  y  $C_n$  son igual a cero, por lo cual solo se debe de resolver para obtener  $B_n$  y  $D_n$ . Esto se logra sustituyendo la Ecuación 77 en Ecuación la 67. Para obtener las constantes para la  $(n-1)$ -esima capa. El procedimiento se repite hasta obtener las constantes para todas las capas, hasta la primera capa.

Como se mencionó anteriormente, si las capas no están unidas, no existe continuidad por lo cual los esfuerzos cortantes y los desplazamientos radiales son iguales a cero, para ambos lados de la interface:

$$(\sigma_z^*)_i = (\sigma_z^*)_{i+1} \quad (78)$$

$$(w_z^*)_i = (w_z^*)_{i+1} \quad (79)$$

$$(\tau_{rz}^*)_i = 0 \quad (80)$$

$$(\tau_{rz}^*)_{i+1} = 0 \quad (81)$$

La Ecuación 72 puede ser reemplazada por:

$$\begin{bmatrix} 1 & F_i & -(1 - 2\nu_i - m\lambda_i) & (1 - 2\nu_i + m\lambda_i)F_i \\ 1 & F_i & 1 + m\lambda_i & -(1 - m\lambda_i)F_i \\ 1 & -F_i & 2\nu_i + m\lambda_i & (2\nu_i - m\lambda_i)F_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{pmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} F_{i+1} & 1 & -(1 - 2v_{i+1} - m\lambda_i)F_{i+1} & 1 - 2v_{i+1} + m\lambda_i \\ R_i F_{i+1} & R_i & (1 + m\lambda_i)R_i F_{i+1} & -(1 - m\lambda_i)R_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_{i+1} & -1 & (2v_{i+1} - m\lambda_i)F_{i+1} & 2v_{i+1} - m\lambda_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{pmatrix} \quad (82)$$

Si existe alguna interfaz conectada, se ocupa la *Ecuación 72* y si alguna interfaz no tiene fricción, se aplica la *Ecuación 82*. El procedimiento matemático es más rápido si todas las capas están conectadas entre sí.

## Capítulo 4

### 4 Metodología

#### 4.1 Plan experimental

Para la llevar a cabo este estudio, se seguirán una serie de pasos para garantizar que se logró llegar al objetivo final, que es comparar el desempeño de mezclas asfálticas densas y SMA con asfalto PG 64-22 modificado con RARX contra mezclas asfálticas del mismo tipo, con asfalto PG 64-22 y asfalto PG 76-22 modificado con polímero.

En primer lugar, se eligió el banco de materiales de “Las Víboras” ubicado en Acuitzio del Canje, en Michoacán. Se muestrearon tres agregados: grava, sello y arena. Posteriormente, se llevaron al laboratorio y se le hicieron todas las pruebas que enmarca la normativa ASTM y SICT. En todas las pruebas, los agregados cumplieron con los requisitos necesarios. En dado caso que alguno de los agregados no hubiera cumplido con una prueba, se hubiera elegido otro banco de materiales, dado que un agregado de mala calidad puede variar el desempeño de la mezcla asfáltica.

Una vez que se comprobó la calidad de los agregados pétreos, se procedió a diseñar las mezclas asfálticas, para posteriormente dar paso a la realización de pruebas de desempeño entre las cuales se encuentran TSR y rueda cargada de Hamburgo. El fin de las pruebas de desempeño es comparar cual mezcla asfáltica tiene mejor comportamiento en cada una de las pruebas.

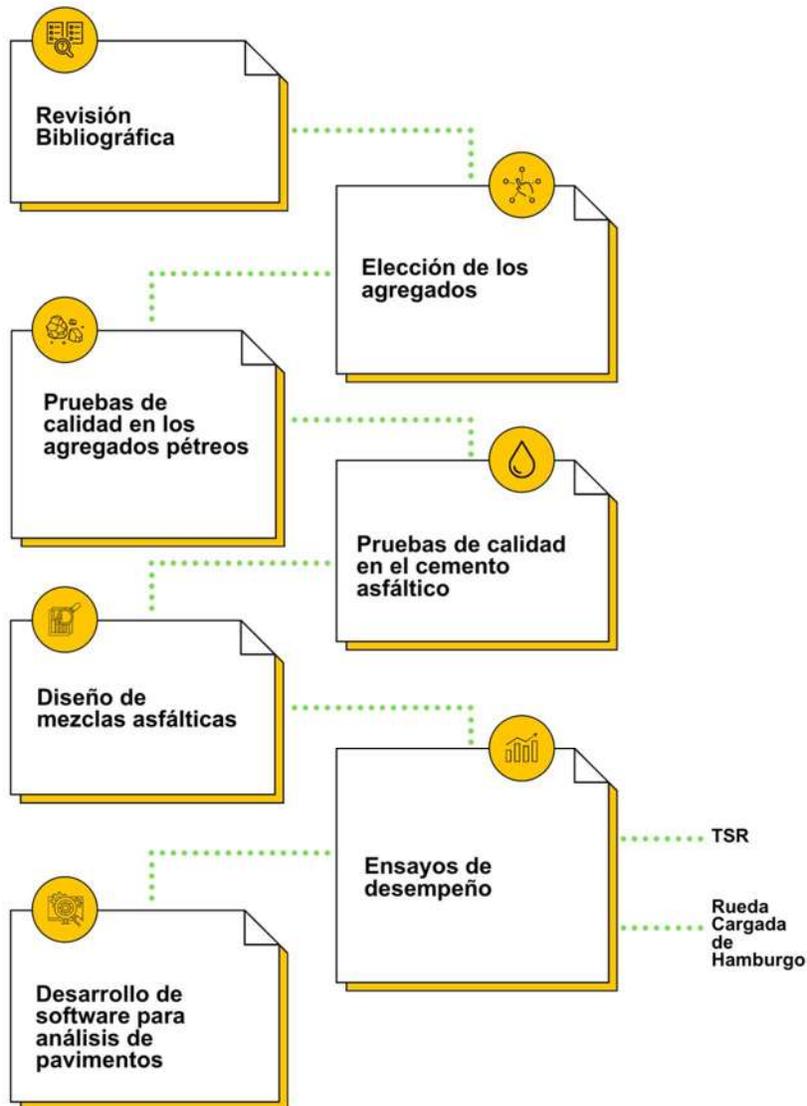


Figura 43 Plan experimental

Fuente: Elaboración propia

#### **4.1.1 Revisión bibliográfica**

En la revisión bibliográfica se realizó una recopilación exhaustiva de diversas tesis, artículos e investigaciones acerca de la modificación de asfaltos con polímeros y con hule molido de neumáticos. También en relación con problemáticas ambientales que provocan los neumáticos. De la misma manera, se revisó bibliografía de pruebas de desempeño con diferentes tipos de cementos asfálticos.

Además, durante la experimentación se revisaron diferentes manuales y normas acerca de cómo llevar a cabo las pruebas. En la elaboración del diseño y pruebas de desempeño constantemente se revisaron bibliografías para asegurar que se realizara de manera precisa y sin errores.

Además, la bibliografía debe de incluir métodos empíricos mecanicistas para el análisis de pavimentos.

#### **4.1.2 Elección de los agregados**

El banco elegido para obtener los agregados pétreos fue el de “Las Víboras”, ubicado en Acuitzio del Canje, en Michoacán. Se muestrearon tres agregados una grava, un sello y una arena.

Todos los agregados del banco “Las Víboras” cumplieron con lo establecido dentro de las normativas SICT y ASTM. Además, la granulometría de los agregados permitió su combinación para la mezcla densa y SMA, por lo cual no fue necesario muestrear otro banco. Solo en el caso de la mezcla SMA, se agregó carbonato de calcio para cumplir con el filler.



*Figura 44 Banco "Las Víboras"*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*



*Figura 45 Muestreo de agregado*

*Fuente: Imagen tomada por el autor*

#### **4.1.3 Pruebas de calidad en los agregados pétreos y análisis (caracterización)**

A los agregados gruesos se les realizaron las pruebas de densidad y absorción, granulometría, desgaste de los ángeles, desgaste microdeval, intemperismo acelerado y forma de la partícula. Al agregado fino se le realizaron las pruebas de densidad y absorción, equivalente de arena, contenido de vacíos no compactos y azul de metileno. En todas las pruebas realizadas, los agregados cumplieron con los estándares establecido en las normativas SICT y ASTM.

#### **4.1.4 Pruebas de calidad en el cemento asfáltico y análisis**

El cemento asfáltico utilizado es procedente de la refinería de Salamanca. A este cemento asfáltico se le realizaron las pruebas de calidad que enmarca la normativa de la SICT. Obteniendo así un asfalto PG 64-22 y un asfalto PG 76-22 modificado con polímero.

Se realizaron pruebas al asfalto original, que es la condición del asfalto cuando llega a planta, en este estado se le realizan pruebas de consistencia y de seguridad para una buena manipulación de este. A los asfaltos modificados adicionalmente se les realizan pruebas que garanticen que contienen polímero, como lo es recuperación elástica por torsión. Además, se les realiza una prueba que determina si existirá separación del polímero, esta prueba es separación anillo y esfera.

Al asfalto envejecido a corto plazo se le realizan pruebas. Para simular el envejecimiento del asfalto a corto plazo, se realiza a través del residuo de la prueba de película delgada, esto simula la condición de mezclado, tendido y compactación.

Para el envejecimiento a largo plazo, se simula el envejecimiento del asfalto a largo plazo, es decir, a lo largo de su vida útil. Se realizan una serie de pruebas entre las cuales destaca la determinación de la temperatura mínima del grado PG por el BBR (Bending Beam Rheometer).

#### **4.1.5 Diseño de mezclas asfálticas y análisis**

Se realizarán dos mezclas asfálticas (densa y SMA), eligiendo una dosificación de cada uno de sus componentes. Para la mezcla densa se utilizó la grava, la arena y RARX. En la mezcla SMA se utilizó sello, arena, un filler que en este caso fue carbonato de calcio y RARX. Una vez que se eligió la granulometría y se verificó que esta estuviera dentro de los parámetros, se partió de un contenido de asfalto inicial y se hicieron incrementos de 0.5%. Posteriormente, se verificó la volumetría y se eligió el contenido de asfalto que cumpliera de manera óptima con la volumetría. Se hizo el diseño para la mezcla con RARX, y para las demás mezclas se verificaron las propiedades volumétricas al contenido de asfalto óptimo de la mezcla con RARX. Esto con el objeto de no variar los contenidos de asfaltos en las diferentes mezclas y que con ello se indujeran más variables al experimento.

#### **4.1.6 Ensayos de desempeño**

En este paso se realizarán pruebas de desempeño a los diferentes tipos de mezcla para determinar según cada tipo de mezcla cual combinación (PG 64-22 con RARX, PG 64-22 y PG 76-22) tiene mejor comportamiento.

## **Capítulo 5**

### **5 Pruebas de calidad en asfaltos**

#### **5.1 Ejes equivalentes de proyecto**

Un dato preliminar importante para el diseño de la mezcla asfáltica es el tránsito de diseño dado en ejes equivalentes, por lo cual se tomó como referencia el proyecto de la carretera de cuota Pátzcuaro-Uruapan del tramo 14+700 al 17+400. Dado que en la carretera que en esta carretera se realizó un tramo de prueba de 3 km con

mezcla de granulometría discontinua tipo SMA con asfalto PG 64-22 modificado con RARX

Para obtener los ejes equivalentes se necesitan tener aforos vehiculares, los cuales se tomaron de los realizados por la SICT, obteniendo el TDPA para diferentes años como se muestra en la *Tabla 9*, la composición vehicular se muestra en la *Tabla 10* y las características del tránsito para calcular los ejes equivalentes se muestran en la *Tabla 11*. Dando como resultado 22,023,082 ejes equivalentes.

<b>Año</b>	<b>TDPA</b>
2011	8207
2012	8320
2013	8721
2014	7480
2015	8257
2016	9345
2017	10042
2018	10605
2019	10527
2021	10828

*Tabla 9 TDPA del año 2011 al año 2021*

<b>Composición Vehicular</b>	
<b>Tipo de Vehículo</b>	<b>Composición del tránsito</b>
A2	72%
B2	3%
C2	5%
C3	3%
T3-S2	9%
T3-S3	2%
T3-S2-R4	6%
<b>TOTAL</b>	<b>100.0%</b>

Tabla 10 Composición vehicular

Característica	Valor
TDPA	10828
Años de servicio	10
Tasa de crecimiento anual (%)	3.4
Factor direccional	0.5
Factor de utilización de carril	0.7
Porcentaje de vehículos cargados	70

Tabla 11 Características del TDPA

## 5.2 Determinación de grado PG

Para la obtención del grado PG se debe de obtener los datos de una estación climatológica que esté lo más cerca posible de la vialidad. Al menos deberá tener veinte años de registros. En este caso, se utilizó la estación climatológica de Pátzcuaro. Los datos obtenidos fueron los siguientes:



Figura 46 Estación climatológica Pátzcuaro

Fuente: Google Earth

TairM=37.43°C

$\sigma_{TairM}^2=1.1338$

Tairm=2.21 °C

$\sigma_{TairM}^2=0.4$

Latitud=19.50509

H=20 mm

Z=2.055

Sustituyendo en la *Ecuación 83*.

$$Tmáx_i = 54.32 + 0.78T_{airM} - 0.0025Lati^2 - 15.14 \log(H + 25) + Z(9 + 0.61\sigma_{TairM}^2)^{0.5} \quad (83)$$

Arroja una temperatura máxima de 63.96°C, por lo cual se redondea a 64°C.

En cuanto a la temperatura mínima, se obtuvo la temperatura mínima de cada uno de los años que conforman la serie de datos, sustituyendo en la *Ecuación 84* se obtienen el resultado de 2.12°C.

$$Tmín_i = -1.56 + 0.72T_{airm} - 0.004Lat^2 + 6.26 \log(H + 25) - Z(4.4 + 0.52\sigma_{TairM}^2)^{0.5} \quad (84)$$

Tmín=4.51°C

Se observa que en esta zona las temperaturas bajas no predominan, por lo cual se elige la temperatura más baja. Como se está trabajando con la N-CMT-4-05-004/08 se eligió la de -22°C.

Por lo tanto, el cemento asfáltico según la N-CMT-4-05-004/08 sería un asfalto PG 64-22 haciendo el ajuste por intensidad de tránsito se tendría que ocupar un asfalto PG 76-22, como se muestra en la *Tabla 12*.

Intensidad del tránsito ( $\Sigma L_{10}$ )	Grado PG seleccionado por el clima	Ajuste por intensidad del tránsito	Ajuste por velocidad lenta (Entre 10 y 30 km/h)	Ajuste por tránsito detenido (Cruceros)
$\Sigma L_{10} < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
$10^6 \leq \Sigma L_{10} \leq 10^7$	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$\Sigma L_{10} > 10^7$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

*Tabla 12 Ajuste por intensidad de tránsito*

Para realizar las mezclas asfálticas se ocuparon dos diferentes cementos asfálticos: un asfalto sin modificar y otro modificado. Para poder utilizar los cementos asfálticos deben de cumplir con lo establecido en la normativa de la SICT para la clasificación por grado PG.

El cemento asfáltico se envejece debido a la oxidación y a la evaporación de sus componentes. El primer proceso de envejecimiento es a corto plazo y se da en el

proceso de mezclado tendido y compactación. Posteriormente, se da un envejecimiento a largo plazo que tiene lugar después de la compactación de la mezcla asfáltica a lo largo de su vida útil. Para poder simular el envejecimiento a corto plazo en el asfalto, se utiliza el horno rotatorio de la película delgada (RTFO por sus siglas en inglés). Para el envejecimiento a largo plazo se utiliza la vasija de envejecimiento a presión (PAV por sus siglas en inglés).

En cuanto a la prueba de seguridad punto de inflamación Cleveland, que mide la temperatura a la cual el asfalto produce flamas al estar en contacto con fuego directo, la temperatura mínima es de 230°C. El asfalto convencional dio una temperatura de 281°C, mientras que el asfalto modificado dió una temperatura de 295°C.

Para que el asfalto pueda ser descargado, debe de tener una viscosidad adecuada. Mediante es la viscosidad rotacional a 135°C se mide la trabajabilidad del asfalto, el valor debe de ser menor a 3 Pa.s, para el asfalto sin modificar dio 0.537 Pa.s y para el asfalto modificado dio 1.501 Pa.s. Se puede observar que el asfalto modificado, al tener polímero, su viscosidad es mayor en comparación con un asfalto que no contiene polímero. Sin embargo, ambas viscosidades son aceptables, esto indica que ambos asfaltos pueden ser descargados sin problema.

En la prueba de reblandecimiento, se mide la consistencia del cemento asfáltico. Para el asfalto convencional, debe de ser de 48°C por lo menos, y para el asfalto modificado debe de ser 55°C mínimo. En ambos casos, se cumple con los requisitos.

En el asfalto modificado, se realiza la prueba de recuperación elástica por torsión y separación diferencia anillo esfera. En la primera prueba, se coloca asfalto en un cilindro a 25°C. Es importante respetar la temperatura de prueba, ya que el asfalto es termo sensible y un cambio de temperatura modificará su comportamiento. Luego se le aplica un esfuerzo que produce una deformación angular, para posteriormente retirar el esfuerzo y medir cuanta de esta deformación se recupera. Por lo menos se debe de recuperar el 35%. En este caso, se recuperó el 55% por lo cual está

dentro de la especificación. Esto quiere decir que el asfalto modificado utilizado tendrá una buena respuesta esfuerzo-deformación. En la prueba separación diferencia anillo esfera, se mide la estabilidad del polímero con el que se modificó el asfalto. Al estar almacenados los asfaltos modificados, puede existir una separación del polímero. En cuanto a esta prueba, la diferencia fue de  $0^{\circ}\text{C}$ , por lo cual se determina que el polímero se mantendrá estable dentro del cemento asfáltico.

En la clasificación por grado de desempeño, se utiliza el Reómetro de Corte Dinámico (DSR) para conocer la reología del asfalto. El módulo complejo  $G^*$  es una medida de rigidez, mientras que el ángulo de fase  $\delta$  mide la fluidez del material asfáltico. El módulo complejo es la suma de dos componentes vectoriales: el módulo de pérdida  $G''$  que representa la parte viscosa y el módulo de almacenamiento  $G'$  que es la parte elástica. entre estas dos componentes se encuentra el módulo complejo y el ángulo que se forma es el ángulo de fase.

Si el ángulo de fase fuera igual a  $0^{\circ}$ , al aplicar un esfuerzo y liberarlo de ese esfuerzo, el asfalto volvería por completo a su forma inicial. Sin embargo, si el ángulo fuera de  $90^{\circ}$ , al aplicar un esfuerzo y liberarlo, el asfalto se deformaría permanentemente.

El módulo reológico de corte dinámico ( $G^*/\sin \delta$ ) disminuye al ir aumentando la temperatura. Cuando el reómetro alcance el valor de 1 KPa, se detendrá y determinará la temperatura máxima para el grado PG. Estableciéndolo dentro de sus rangos es decir para un grado PG 64 irá de valores menores de  $70^{\circ}\text{C}$  y mayores o iguales a  $64^{\circ}\text{C}$ .

Para el caso del asfalto convencional, tiene un módulo de corte dinámico de 1.69 Kpa a  $64^{\circ}\text{C}$ , y para el asfalto modificado dió 1.5841 Kpa a  $76^{\circ}\text{C}$ . En cuanto al ángulo de fase, para el asfalto convencional tiene un valor de  $71.8^{\circ}\text{C}$  y para el asfalto modificado de  $66.3^{\circ}$ .

Mediante esta prueba se determinó que el grado PG para el asfalto convencional será 64 y para el asfalto modificado 76.

Con respecto al primer envejecimiento del asfalto por RTFO, el asfalto convencional se tiene una pérdida por calentamiento de 0.208%, mientras que el asfalto modificado tiene una pérdida de 0.624%. En ambos casos, es menor a 1% lo cual indica que no tienen componentes que se evaporarán con facilidad.

En la prueba de recuperación elástica por ductilometro, solo se les hace a los asfaltos modificados y debe de dar un valor de al menos 75%. Para el asfalto PG 76-22 da un valor de 80%, por lo tanto, el valor se encuentra dentro del parámetro.

Para determinar la temperatura mínima del grado PG, se utiliza el asfalto envejecido en PAV y la prueba de la rigidez a flexión en Reómetro de Viga a Flexión (BBR), donde se evalúa la resistencia del asfalto al agrietamiento térmico. En la temperatura a la cual cumplió con el valor de rigidez a flexión y la pendiente en ambos asfaltos fue a  $-12^{\circ}\text{C}$  lo cual indica que los asfaltos son -22.

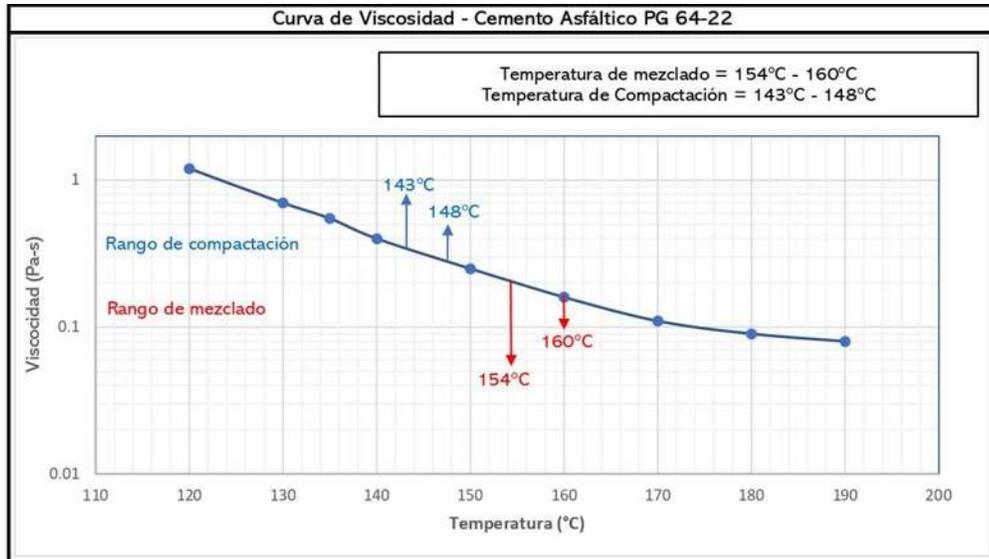
Respecto a la rigidización al cumplir como -22 se hace a la temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ , en el cual el valor no puede ser mayor de 5,000 Kpa. Para el asfalto convencional se obtuvo un valor de 2734.6 Kpa, y para el asfalto modificado da un valor 925.6 Kpa.

Se determina que el asfalto convencional cumple como un PG 64-22 y el asfalto modificado cumple como un PG 76-22.

El asfalto es un material termo sensible, por ende, su viscosidad varía con la temperatura. Para poder mezclar y compactar este material, debe de estar en los rangos de viscosidad. Para poder lograr las viscosidades mezclado y compactación se establecen rangos de temperaturas como se muestran en la *Gráfica 16* y *Gráfica 17*.

<b>ANÁLISIS DEL ASFALTO ORIGINAL</b>			
<b>TIPO DE PRUEBA</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>N-CMT-4-05-044/18</b>	<b>NORMATIVA</b>
Recuperación elástica por Torsión a 25°C (%)	N/A	35 mín	M-MMP-4-05-024/02
Punto de Inflamación Cleveland (°C)	281	230 mín	ASTM D 92
Viscosidad Rotacional 135°C (Pa-s)	0.537	3 máx	ASTM D 4402
Punto de Reblandecimiento (°C)	54	48 mín	ASTM D 36
Separación, Diferencia Anillo y Esfera (°C)	N/A	2 máx	ASTM D 7173
Módulo Reológico de Corte Dinámico a 64°C [G*/sinδ] (Kpa)	1.6900	1.0 mín	ASTM D 7175
Ángulo de Fase [δ] a 64°C	81.8	---	ASTM D 7175
Temperatura de Falla (°C)	-	---	ASTM D 7175
<b>ANÁLISIS DEL RESIDUO DE LA PRUEBA DE LA PELÍCULA DELGADA -RFTO (ASTM D 2872)</b>			
<b>TIPO DE PRUEBA</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>N-CMT-4-05-004/18</b>	<b>NORMATIVA</b>
Pérdida de Masa por Calentamiento a 163°C, (%)	0.208	1 máx	ASTM D 2872
Recuperación Elástica por Ductilómetro a 25°C, (%)	N/A	75 mín	ASTM D 6084
Módulo Reológico de Corte Dinámico a 64°C [G*/sinδ] (Kpa)	6.42	2.2 mín	ASTM D 7175
Ángulo de Fase [δ] a 64°C	71.8	---	ASTM D 7175
<b>DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE TRÁFICO Jnr (RFTO)</b>			
Respuesta Elástica 100 Pa a 64°C, (%)	27.91		AASHTO T-350
Respuesta Elástica 3200 Pa a 64°C, (%)	6.54		AASHTO T-350
Diferencia en Respuesta Elástica a 64°C, (%)	76.55		AASHTO T-350
Creep Compliance Jnr 100 Pa a 64°C, (Kpa <sup>-1</sup> )	0.7696		AASHTO T-350
Creep Compliance Jnr 3200 Pa a 64°C, (Kpa <sup>-1</sup> )	1.1446		AASHTO T-350
Diferencia en Creep Compliance Jnr a 64°C, (%)	-		AASHTO T-350
<b>ANÁLISIS DEL RESIDUO DE LA PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN -PAV (ASTMD 66521)</b>			
<b>TIPO DE PRUEBA</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>N-CMT-4-055-004/18</b>	<b>NORMATIVA</b>
Rigidización [G* sinδ] a 25°C (Kpa)	2734.6	5,000 máx	ASTM D 7175
Rigidez de Flexión a -12°C & 60 s, S (f) (Mpa)	129.45	300 máx	ASTM D 6648
Valor m a -12°C & 60 S (Adimensional)	0.302	0.300 mín	ASTM D 6648

Tabla 13 Certificado de calidad del asfalto PG 64-22



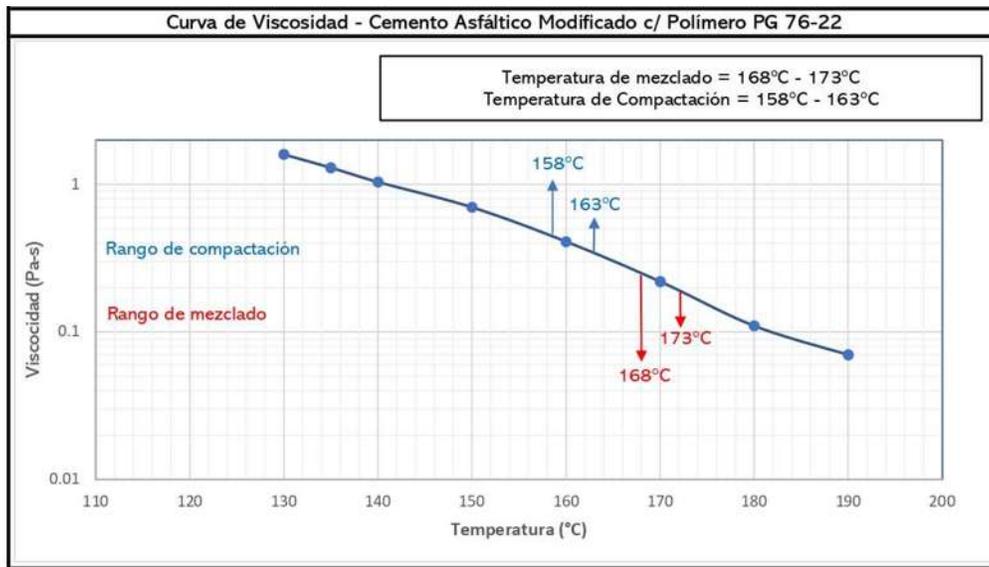
Gráfica 12 Curva temperatura-viscosidad del asfalto PG 64-22

Referencia: Mega Asfaltos

<b>ANÁLISIS DEL ASFALTO ORIGINAL</b>			
TIPO DE PRUEBA	RESULTADO	N-CMT-4-05-044/18	NORMATIVA
Recuperación elástica por Torsión a 25°C (%)	58	35 mín	M-MMP-4-05-024/02
Punto de Inflamación Cleveland (°C)	295	230 mín	ASTM D 92
Viscosidad Rotacional 135°C (Pa-s)	1.501	3 máx	ASTM D 4402
Punto de Reblandecimiento (°C)	70	48 mín	ASTM D 36
Separación, Diferencia Anillo y Esfera (°C)	0	2 máx	ASTM D 7173
Módulo Reológico de Corte Dinámico a 64°C [G*/sinδ] (Kpa)	1.5841	1.0 mín	ASTM D 7175
Ángulo de Fase [δ] a 64°C	66.3	---	ASTM D 7175
Temperatura de Falla (°C)	-	---	ASTM D 7175
<b>ANÁLISIS DEL RESIDUO DE LA PRUEBA DE LA PELÍCULA DELGADA -RFTO (ASTM D 2872)</b>			
TIPO DE PRUEBA	RESULTADO	N-CMT-4-05-004/18	NORMATIVA
Pérdida de Masa por Calentamiento a 163°C, (%)	0.624	1 máx	ASTM D 2872
Recuperación Elástica por Ductilómetro a 25°C, (%)	80	75 mín	ASTM D 6084
Módulo Reológico de Corte Dinámico a 76°C [G*/sinδ] (Kpa)	5.88	2.2 mín	ASTM D 7175
Ángulo de Fase [δ] a 76°C	50.8	---	ASTM D 7175
<b>DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE TRÁFICO Jnr (RFTO)</b>			
Respuesta Elástica 100 Pa a 76°C, (%)		---	AASHTO T-350
Respuesta Elástica 3200 Pa a 76°C, (%)		---	AASHTO T-350

Diferencia en Respuesta Elástica a 76°C, (%)	---	AASHTO T-350	
Creep Compliance Jnr 100 Pa a 76°C, (Kpa <sup>-1</sup> )	---	AASHTO T-350	
Creep Compliance Jnr 3200 Pa a 76°C, (Kpa <sup>-1</sup> )	---	AASHTO T-350	
Diferencia en Creep Compliance Jnr a 76°C, (%)	---	AASHTO T-350	
<b>ANÁLISIS DEL RESIDUO DE LA PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN -PAV (ASTMD 66521)</b>			
TIPO DE PRUEBA	RESULTADO	N-CMT-4-055-004/18	NORMATIVA
Rigidización [G*sinδ] a 25°C (Kpa)	925.6	5,000 máx	ASTM D 7175
Rigidez de Flexión a -12°C & 60 s, S (f) (Mpa)	83.23	300 máx	ASTM D 6648
Valor m a -12°C & 60 S (Adimensional)	0.315	0.300 mín	ASTM D 6648

Tabla 14 Certificado de calidad del asfalto PG 76-22



Gráfica 13 Curva temperatura-viscosidad del asfalto PG 76-22

Fuente: Mega Asfaltos

### 6 Pruebas de calidad en agregados pétreos

El primer paso el buen desempeño de una mezcla asfáltica es la elección de un banco de materiales que cumpla con los requerimientos de la normativa. Este proceso puede llegar a ser iterativo, es decir, se puede ir muestreando y ensayando cada banco de materiales de la zona hasta obtener el banco de materiales que sea mejor, o se puede partir de datos anteriormente obtenidos por algún laboratorio, como fue el caso de este trabajo. Por recomendación, se eligió el material del banco las víboras ubicado en la carretera Morelia-Pátzcuaro, km. 17+000, en el municipio de Acuitzio del Canje, estado de Michoacán.

El banco a elegir dependerá del costo del material, el costo del acarreo, capacidad de producción y sobretodo la calidad del agregado pétreo. Las mezclas a utilizar en una mezcla de granulometría densa y una mezcla de granulometría discontinua tipo SMA. Para ello, se muestreo una grava de tamaño nominal  $\frac{3}{4}$ " , un sello de tamaño nominal  $\frac{1}{2}$ " y una arena de tamaño nominal 4,75 mm. Para poder cumplir con el filler requerido para la mezcla SMA se ocupó carbonato de calcio (cal).

A continuación, se muestran el resultado de la calidad del agregado pétreo:

Ensayo	Grava	Sello	Arena	Protocolo AMAAC	SICT	Método de prueba
Gsb	2.553	2.578	2.507	N.A.	N.A.	ASTM C127
Absorción (%)	1.960	3.900	3.760	N.A.	N.A.	ASTM C127
Desgaste de los Ángeles (%)	13.590	22.800	-	30 máx. capas estructurales	30 máx.	ASTM C131
				25 máx. capas de rodadura		
Desgaste microdeval (%)	8.950	11.500	-	18 máx. capas estructurales	15 máx.	ASTM D6928
				15 máx. capas de rodadura		
Intemperismo acelerado (%) en sulfato de sodio	1.200	2.100	-	15 máx.	15 máx.	ASTM C88
Forma de la partícula (%)	3.470	3.000	-	5:1, 10% máx.	2:1 35 máx.	ASTM D4791
Equivalente de arena (%)	-	-	82.3	50 min. capas estructurales	55% min.	ASTM D2419
				55 min. capas estructurales		
Azul de metileno (mg/g)	-	-	9	15 máx. capas estructurales	12 máx.	AMAAC RA 05
				12 máx. capas de rodadura		
Angularidad del fino (%)	-	-	47.4	40 min.	45 min.	ASTM D1252

Tabla 15 Calidad de los agregados pétreos

Los agregados pétreos cumplen con la calidad para ser utilizado en mezclas asfálticas. En las pruebas de resistencia por abrasión, en las cuales se utiliza la prueba de desgaste de los ángeles y desgaste microdeval, se obtuvieron resultados dentro de lo especificado por las diferentes normativas. Esto indica que el agregado grueso no se degradará en exceso en los procesos de elaboración del pétreo, transporte, mezclado, tendido y compactación.

Existen varios tipos de intemperismo que sufren las rocas, por factores químicos, físicos y biológicos. En esta prueba, se somete al agregado grueso a la saturación en sulfato de sodio y posteriormente, se somete a calor mediante un horno. El sulfato de sodio, al entrar en contacto con el aire forma cristales que desintegran al agregado grueso. En esta prueba se obtuvieron valores que cumplen de manera óptima con lo solicitado. Lo cual indica que el agregado grueso no sufrirá en gran medida de los efectos del intemperismo.

Las partículas que no tienen una forma cúbica, es decir, que son planas y alargadas, tienden a fracturarse. Por lo tanto, es indispensable obtener el porcentaje que tiene cada agregado de estas partículas. En caso de presentar un porcentaje fuera de rango, se debe hacer un cambio en la trituración. Al ser una propiedad de consenso, el valor se puede modificar. En esta prueba, los valores obtenidos son idóneos.

El equivalente de arena es una prueba empírica que mide la relación de finos plásticos que pueden llegar a ser nocivos para la mezcla asfáltica. En cuanto a esta prueba, el mínimo requerido es de 55%. Sin embargo, la arena de banco la víbora da un equivalente de arena de 82.3%, muy por encima del mínimo.

Respecto a la prueba de azul de metileno, mide la reactividad del material que pasa la malla 200. A este material se le añade azul de metileno hasta que el material fino ya no pueda absorberle. Un valor alto indica que el material fino puede ser muy expansivo, además de que a valores altos han mostrado problemas de adherencia. El valor obtenido fue de 9 mg/g, por lo tanto, se considera apto.

En relación a la prueba de angularidad del fino, muestra que la arena generará la suficiente trabazón entre partículas, teniendo una mayor resistencia al esfuerzo cortante.

Los resultados de las pruebas de calidad muestran que los agregados pétreos del banco las víboras son idóneos para utilizarlos en una mezcla asfáltica, ya que cumplen con todos los requisitos de calidad solicitados por el protocolo AMAAC y por la normativa de la SICT.

### 7 Diseño de mezclas asfálticas

Una vez que el agregado pétreo ha cumplido con la calidad se procede a hacer una combinación de los agregados pétreos para cumplir con la granulometría de diseño.

La granulometría indica la distribución de tamaños que tiene un agregado pétreo. Para esta prueba se utilizaron las mallas  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{8}$ ", No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100 y la No. 200. Dando los resultados de la *Tabla 16*.

Con el fin de evaluar el desempeño de distintas mezclas asfálticas, se realizaron dos mezclas: una SMA y una densa, ambas con tres diferentes asfaltos (PG 64-22, PG 64-22 modificado con RARX y PG 76-22 modificado con polímero tipo I SBS). Por lo cual, se realizaron las siguientes propuestas granulométricas.

No. De malla	Abertura (mm)	Grava % que pasa	Sello % que pasa	Arena % que pasa	Cal % que pasa	RARX % que pasa
3/4"	19.05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1/2"	12.7	76.6	98.4	100.0	100.0	100.0
3/8"	9.52	53.6	82.5	100.0	100.0	100.0
No. 4	4.75	8.1	11.9	98.8	100.0	100.0
No. 8	2.36	1.7	1.3	64.6	100.0	100.0
No. 16	1.18	1.3	1.0	37.6	100.0	98.9
No. 30	0.6	1.1	0.8	21.3	100.0	95.6
No. 50	0.3	1.0	0.8	13.6	100.0	60.6
No. 100	0.15	0.8	0.7	8.8	100.0	32.4
No. 200	0.07	0.7	0.5	5.0	88.2	15.4

*Tabla 16 Granulometrías de los materiales*

Cada normativa establece tolerancias granulométricas según el tipo de mezcla y el tamaño nominal. Para las mezclas asfálticas densas se utilizó la normativa del protocolo AMAAC para un tamaño nominal de ¾" y para las mezclas SMA, se utilizó la normativa AASHTO para un tamaño nominal de 3/8".

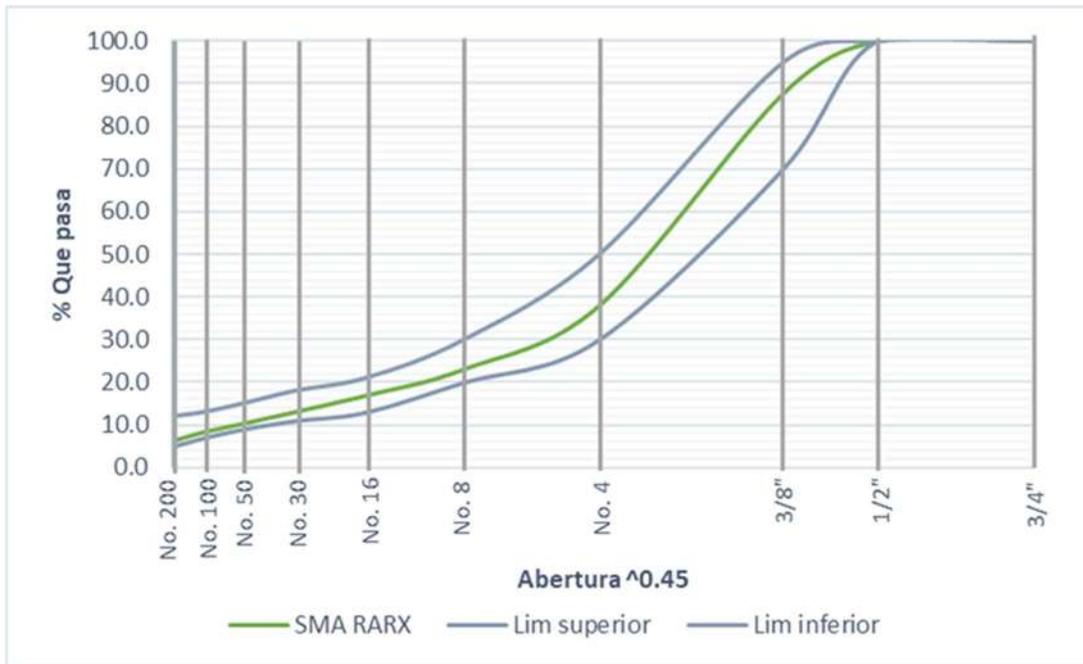
Se trabajarán dos tipos de mezclas asfálticas: una densa y una SMA. Para cada mezcla se le añadirán tres diferentes asfaltos (PG 64-22, PG 64-22 modificado con RARX y PG 76-22). Dado que el RARX se agrega como una fracción más del petróleo, se ajustaron las granulometrías que no llevaban RARX para que todas las curvas fueran similares y no se introdujera una variable más que pudiera cambiar el desempeño de las mezclas asfálticas.

## 7.1 Propuesta granulométrica para mezcla SMA con asfalto PG 64-22 modificado con RARX

Para la mezcla SMA se utilizó el sello a un 70%, arena al 22%, cal al 5% y 3% de RARX. Logrando el siguiente cuerpo mineral:

No. De malla	Abertura (mm)	% que pasa	Puntos de control	
			Superior	Inferior
¾"	19.05	100.0	100	100
½"	12.7	100.0	100	100
3/8"	9.52	87.8	70	95
No. 4	4.75	38.0	30	50
No. 8	2.36	23.1	20	30
No. 16	1.18	16.9	13	21
No. 30	0.6	13.1	11	18
No. 50	0.3	10.3	9	15
No. 100	0.15	8.4	7	13
No. 200	0.07	6.3	5	12

*Tabla 17 Granulometría de la mezcla SMA con RARX*



Gráfica 14 Granulometría de la mezcla SMA con RARX

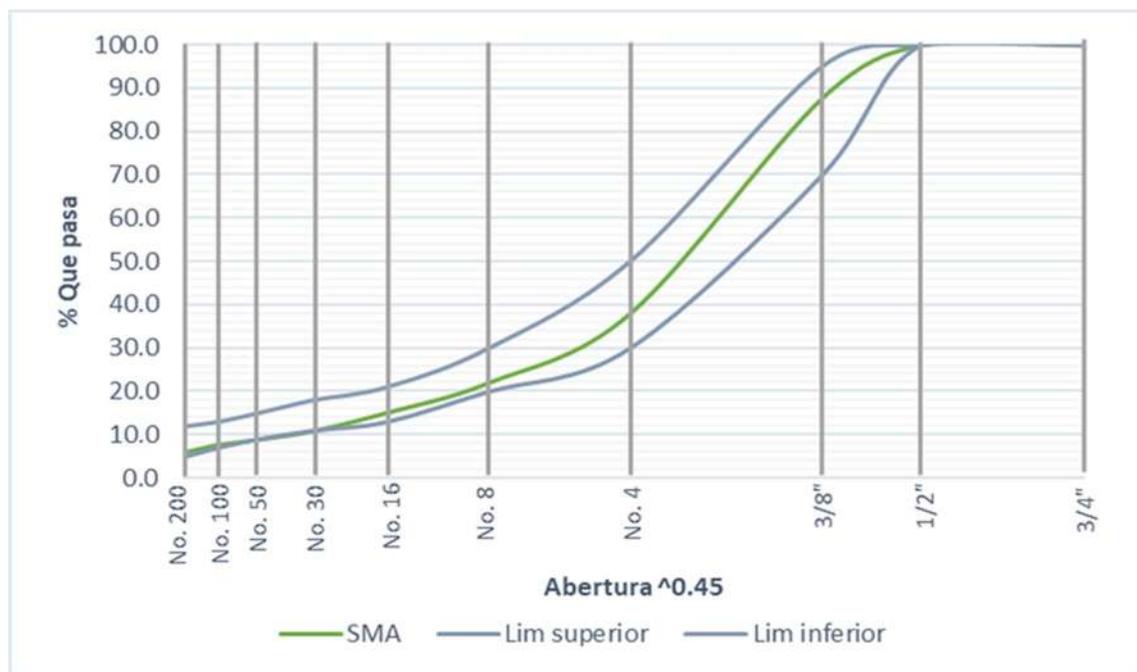
Fuente: Elaboración propia

## 7.2 Propuesta granulométrica para mezcla SMA con asfalto PG 64-22 y PG 76-22 modificado con polímero

Debido a que en esta mezcla asfáltica no lleva RARX, el porcentaje que conlleva el caucho activado y reaccionado se le adicionó a la arena, dando una dosificación de 70% sello, 25% arena y 5% cal.

No. De malla	Abertura (mm)	% que pasa	Puntos de control	
			Superior	Inferior
3/4"	19.05	100.0	100	100
1/2"	12.7	100.0	100	100
3/8"	9.52	87.8	70	95
No. 4	4.75	38.0	30	50
No. 8	2.36	22.1	20	30
No. 16	1.18	15.1	13	21
No. 30	0.6	10.9	11	18
No. 50	0.3	8.9	9	15
No. 100	0.15	7.7	7	13
No. 200	0.07	6.0	5	12

Tabla 18 Granulometría de las mezclas SMA que no llevan RARX



Gráfica 15 Granulometría de las mezclas SMA que no llevan RARX

Fuente: Elaboración propia

## 7.3 Fibra celulosa

La fibra celulosa tiene la función de inhibir el escurrimiento del asfalto en mezclas asfálticas SMA, dado que este tipo de mezclas tienen un contenido alto de cemento asfáltico. En las mezclas que utilizan RARX no es necesaria.

La fibra entra en una tolva especial al final del tambor mezclador, esta fibra debe de suministrarse homogéneamente. La fibra utilizada fue la de la *Tabla 19*.

<b>FIBRA CELULOSA</b>		
<b>Descripción del producto</b>		
FCSMA-500 es un material de fibra de celulosa respetuoso con el medio ambiente. Es gris en apariencia. FCSMA-500 cumple con las especificaciones de AASHTO.		
<b>Propiedades</b>		
	<b>Especificaciones AASHTO</b>	<b>FCSMA-500</b>
Análisis granulométrico malla 20, % de aprobación	75-95%	75-95%
Análisis granulométrico malla 40, % de aprobación	55-75%	55-75%
Análisis granulométrico malla 140, % de aprobación	20-40%	20-40%
pH	6.5-8.5	6.5-8.5
% Ceniza	13-23%	13-23%
Contenido de Humedad	<5%	<5%
Absorción de aceite (aceite mineral). Tiempos de fibra wt	4-6	4-6
Longitud de Fibra	<0.25 pulgadas	<0.25 pulgadas (6.35mm)
<b>Funciones</b>		<b>Aplicaciones</b>
Para mezclas SMA debido al mayor contenido de asfalto que se logra mediante la utilización de la fibra, reduciendo el escurrimiento del asfalto durante la producción y tendido de mezcla. Reportando 20 años de vida útil en promedio		

*Tabla 19 Fibra celulosa utilizada en la mezcla SMA*

## 7.4 Prueba de escurrimiento

Mediante esta prueba, se puede determinar el escurrimiento de la mezcla asfáltica SMA. Este ensayo consiste en elaborar la mezcla SMA y agregar diferentes porcentajes de fibra celulosa. El escurrimiento máximo que puede presentar es del 0.3%. La mezcla se coloca dentro de un vaso de precipitado y se mete al horno a una temperatura de 25°C y 15°C por encima de su temperatura de mezclado para asfaltos convencionales y modificados, respectivamente. Se deja dentro del horno durante una hora. Posteriormente, se retira la mezcla asfáltica y se pesa el vaso con el residuo de la mezcla SMA.

Para la mezcla con asfalto PG 64-22 y PG 76-22 se utilizó el 0.3% de fibra celulosa.

<b>Mezcla SMA con asfalto PG 64-22</b>					
<b>Contenido de asfalto (%)</b>	<b>Contenido de fibra (%)</b>	<b>Peso del recipiente (gr)</b>	<b>Peso de la mezcla asfáltica (gr)</b>	<b>Peso del recipiente y residuo (gr)</b>	<b>Escurrecimiento (%) 0.3% máx.</b>
6.81	0.2	387.2	1026.2	390.6	0.33
	0.3	391.7	1158.1	393.6	0.19
	0.4	391.8	1071.4	392.9	0.10

*Tabla 20 Resultados de prueba de escurrimiento en mezcla SMA con asfalto PG 64-22*

<b>Mezcla SMA con asfalto PG 76-22</b>					
<b>Contenido de asfalto (%)</b>	<b>Contenido de fibra (%)</b>	<b>Peso del recipiente (gr)</b>	<b>Peso de la mezcla asfáltica (gr)</b>	<b>Peso del recipiente y residuo (gr)</b>	<b>Escurrecimiento (%) 0.3% máx.</b>
6.81	0.2	391.6	1136.2	394.6	0.26
	0.3	387.1	1338.3	389.4	0.17
	0.4	387.2	1134	388.1	0.08

*Tabla 21 Resultados de prueba de escurrimiento en mezcla SMA con asfalto PG 76-22*



Figura 47 Prueba de escurrimiento

## 7.5 Diseño de mezcla SMA

Una mezcla asfáltica es la combinación de agregados pétreos y cemento asfáltico. Una vez que se tiene la estructura mineral del pétreo, se le adiciona asfalto a partir de un contenido de asfalto inicial y se van haciendo incrementos en el cemento asfáltico, por lo regular de 0.5%, con el fin de encontrar el contenido óptimo de asfalto. El contenido óptimo es aquel donde se cumplen todos los parámetros volumétricos y de desempeño establecidos por la normativa.

Para la mezcla asfáltica SMA, se inició con un contenido 5.5% con respecto al agregado hasta un contenido de 7.0%, con avances de 0.5%. El número de giros que se le aplicaron a las pastillas fueron de 125, conforme a la *Tabla 22*. Para no introducir más variables, se diseñó primero la mezcla que contenía RARX y ese mismo contenido de asfalto se les aplicó a las demás mezclas SMA. Para el caso de las mezclas densas, se diseñó de igual manera la mezcla asfáltica que contiene RARX y se replica el contenido a las mezclas con los otros ligantes asfálticos.

Las características que debe cumplir la mezcla SMA son las de la *Tabla 23*. El primer paso para obtener el contenido de asfalto óptimo es revisar el contenido de asfalto al cual se cumple con los vacíos de aire. En este caso, se observa que para un contenido de 6.5% se tienen vacíos de aire de 5.1%, lo cual está ligeramente por encima de la tolerancia. Para un contenido de 7% los vacíos son de 3.7%, además de que se cumple con VAM y VFA. Sin embargo, las mezclas asfálticas deben tener una buena relación costo beneficio y con el fin de ocupar menos asfalto se buscó llegar al 4% de vacíos. Este valor se obtiene por interpolación entre los contenidos de asfalto de 6.5% y 7%. El valor al cual cumple adecuadamente la mezcla fue de 6.8% dando un 4.2% de vacíos de aire, con 18.3% de VAM y 76.9% de VFA. Todas las propiedades granulométricas se grafican según cada contenido de asfalto, como se muestra en la *Gráfica 18, Gráfica 19, Gráfica 20, Gráfica 21 y Gráfica 22*.

Ejes equivalentes (millones)	Parámetros de compactación			Aplicaciones típicas
	Nini	Ndis	Nmáx	
< 0.3	6	50	75	Tránsito muy ligero (caminos locales, calles de ciudad, donde los camiones están prohibidos)
0.3 a < 3	7	75	115	Tránsito medio (carreteras alimentadoras, libramientos)
3 a < 30	8	100	160	Tránsito medio a alto (calles de ciudad, caminos estatales, interestatales)
≤ 30	9	125	205	Alto tránsito (intersecciones, subidas, estacionamiento de camiones)

*Tabla 22 Número de giros según el transito esperado*

<b>Característica o dosificación</b>	<b>Valor</b>
Vacíos en mezcla, %	4.0 ± 1
Vacíos en el agregado mineral, %	17 mín.
Vacíos ocupados por el asfalto, %	75 a 82
Resistencia al daño inducido por humedad (TSR), <sup>1</sup> %	80 mín.
Fibras, <sup>2</sup> %	0.3 mín.
Contenido de asfalto, <sup>2</sup> %	6.0 mín.
Escurrecimiento de asfalto, <sup>3</sup> %	0.3 máx.

*Tabla 23 Requisitos de calidad para mezclas SMA*

Contenido de asfalto/agregado (%)	Contenido de asfalto/mezcla (%)	Promedio Gmb (Ton/m3)	Gmm (Ton/m3)	Va (%) 4%±1	VAM (%) 17 min.	VFA (%) 75-82
5.5	5.21	2.203	2.364	6.8	18.6	63.4
6.0	5.66	2.217	2.358	6.0	18.5	67.7
6.5	6.10	2.228	2.347	5.1	18.6	72.7
7.0	6.54	2.250	2.336	3.7	18.2	79.8

*Tabla 24 Propiedades volumétricas a diferentes contenidos de asfalto para la mezcla SMA con RARX*

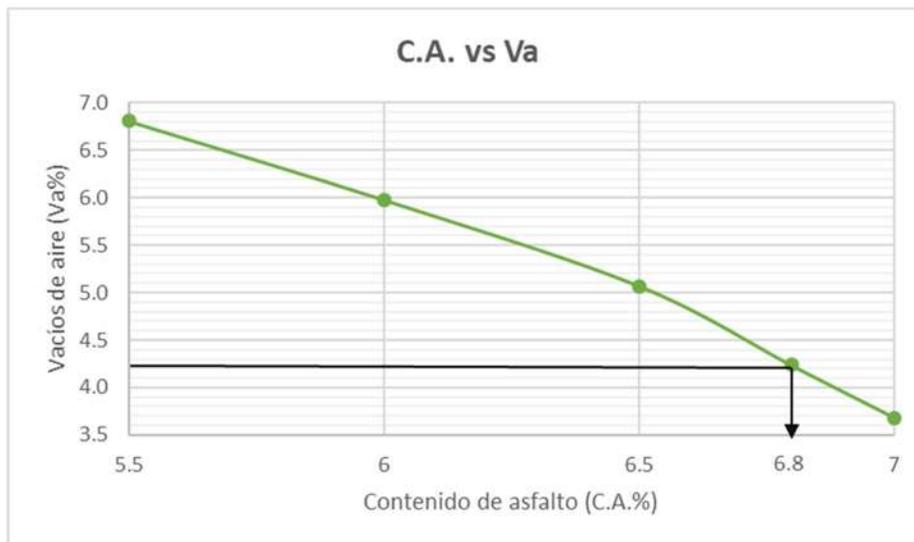
Contenido de asfalto/agregado (%)	Contenido de asfalto/mezcla (%)	Promedio Gmb (Ton/m3)	Gmm (Ton/m3)	Va (%) 4%±1	VAM (%) 17 min.	VFA (%) 75-82
6.8	6.37	2.241	2.340	4.2	18.3	76.9

*Tabla 25 Propiedades volumétricas al contenido de asfalto óptimo para la mezcla SMA con RARX*

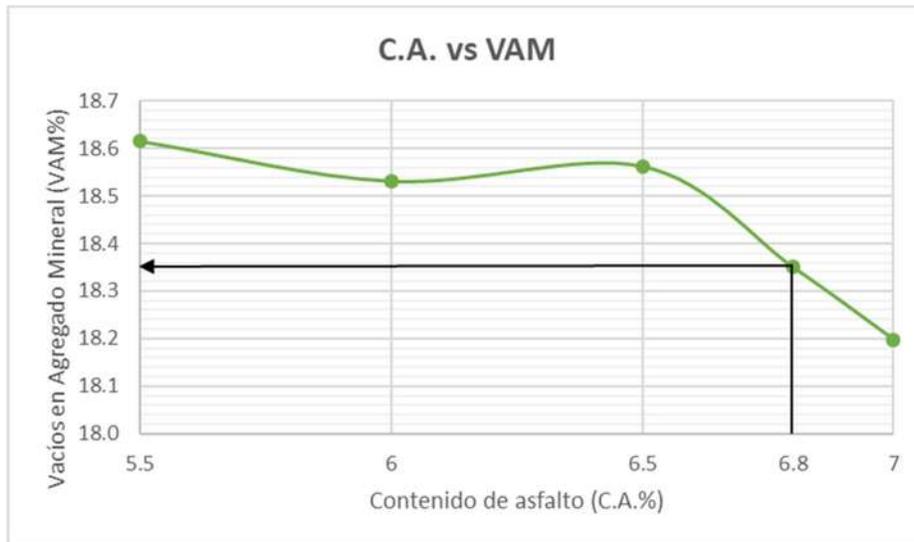


Figura 48 Pastilla de mezcla asfáltica para diseño

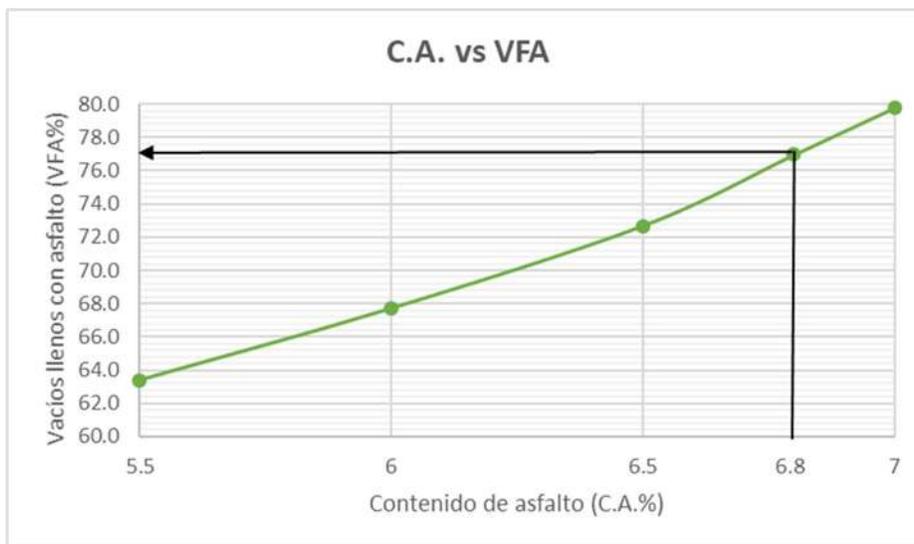
Fuente: Imagen tomada por el autor



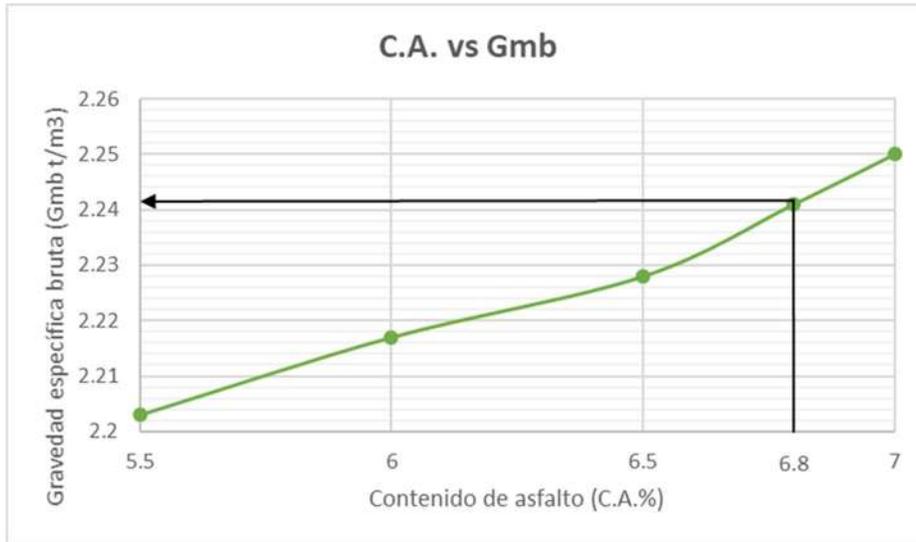
Gráfica 16 Contenido de asfalto y vacíos de aire



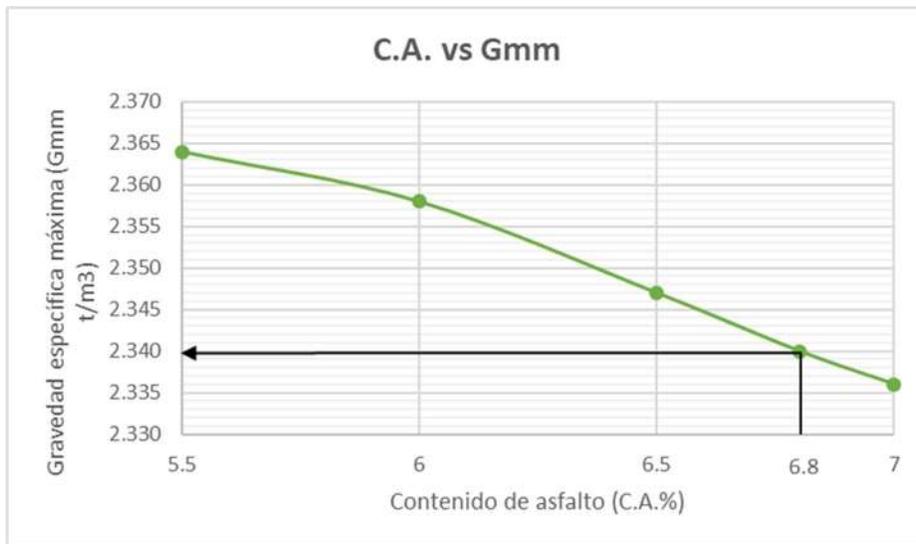
Gráfica 17 Contenido de asfalto y vacíos en el agregado mineral



Gráfica 18 Contenido de asfalto y vacíos llenos por el asfalto



Gráfica 19 Contenido de asfalto y gravedad específica bruta de la mezcla compacta



Gráfica 20 Contenido de asfalto y gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta

Como se mencionó anteriormente, el contenido de asfalto debe de mantenerse constante en las tres mezclas SMA con el fin de no agregar más variables, dado que un aumento en el contenido de cemento asfáltico podía verse reflejado en el desempeño. Para la mezcla con asfalto PG 64-22 y PG 76-22 se les aplicó el mismo

contenido de asfalto que para la mezcla con PG 64-22 y RARX, y se obtuvieron sus propiedades volumétricas como se muestra en la *Tabla 26*.

Tipo de cemento asfáltico utilizado	Contenido de asfalto / agregado (%)	Contenido de asfalto / Mezcla (%)	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad mezcla compactada (gr/cm <sup>3</sup> )	Vacíos (%)	VAM (%)	VFA (%)
PG 64-22 + RARX	6.8	6.37	2.340	2.241	4.23	17.97	76.46
PG 64-22	6.8	6.37	2.394	2.289	4.39	16.15	72.84
PG 76-22	6.8	6.37	2.375	2.267	4.55	16.95	73.18

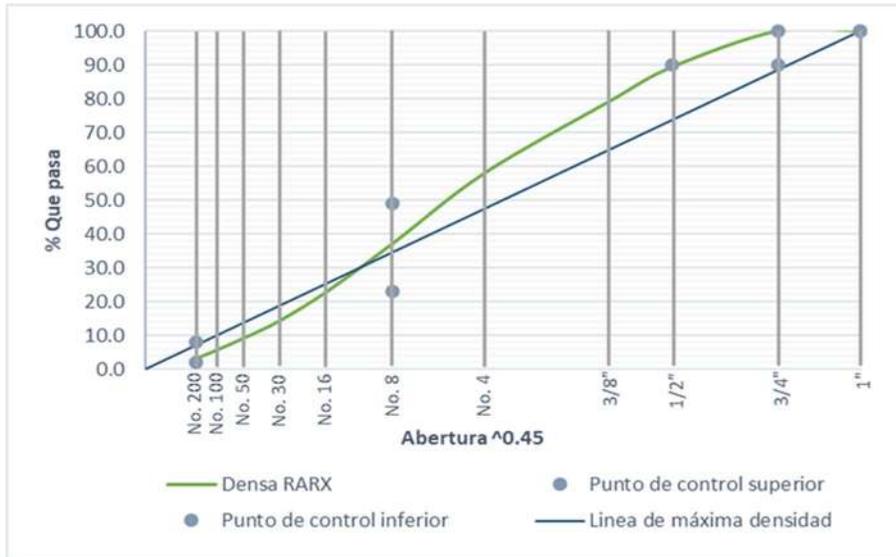
*Tabla 26 Propiedades volumétricas de las diferentes combinaciones con el mismo contenido de asfalto*

## 7.6 Propuesta granulométrica para mezcla densa con asfalto PG 64-22 modificado con RARX

Para la mezcla densa se ocupó 45% de grava, arena al 52% y 3% de RARX, dando la siguiente granulometría:

No. De malla	Abertura (mm)	% que pasa	Puntos de control	
			Superior	Inferior
1"	25	100.0	100	100
3/4"	19.05	100.0	90	100
1/2"	12.7	89.4		90
3/8"	9.52	79.1		
No. 4	4.75	58.0		
No. 8	2.36	37.4	23	49
No. 16	1.18	23.1		
No. 30	0.6	14.4		
No. 50	0.3	9.3		
No. 100	0.15	5.9		
No. 200	0.07	3.3	2	8

Tabla 27 Granulometría de la mezcla densa con RARX



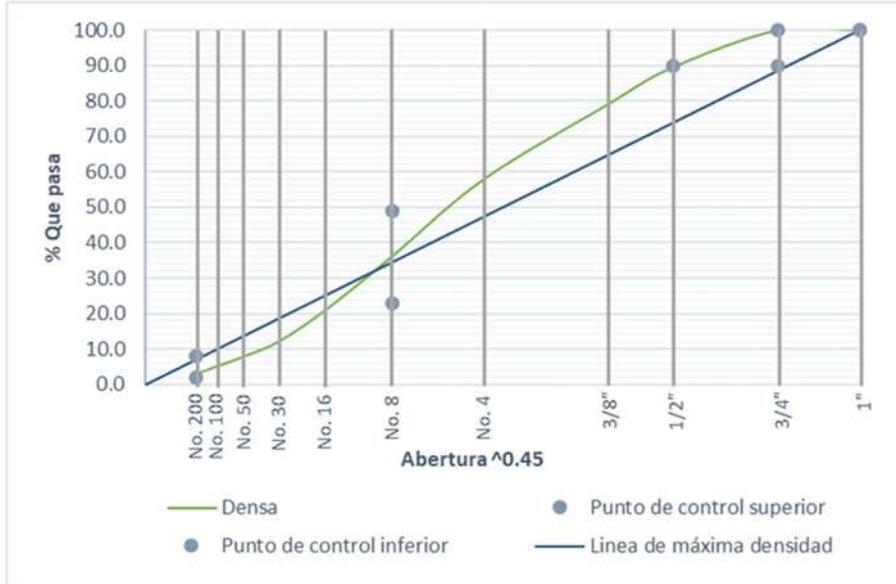
Gráfica 21 Granulometría de la mezcla densa con RARX

## 7.7 Propuesta granulométrica para mezcla densa con asfalto PG 64-22 y PG 76-22 modificado con polímero

Para la mezcla densa que no lleva RARX la dosificación es de 45% grava y 55% arena.

No. De malla	Abertura (mm)	% que pasa	Puntos de control	
			Superior	Inferior
1"	25	100.0	100	100
3/4"	19.05	100.0	90	100
1/2"	12.7	89.4		90
3/8"	9.52	79.1		
No. 4	4.75	58.0		
No. 8	2.36	36.3	23	49
No. 16	1.18	21.2		
No. 30	0.6	12.2		
No. 50	0.3	7.9		
No. 100	0.15	5.2		
No. 200	0.07	3.0	2	8

Tabla 28 Granulometría de las mezclas densas sin RARX



Gráfica 22 Granulometría de las mezclas densas sin RARX

## 7.8 Diseño de mezcla densa

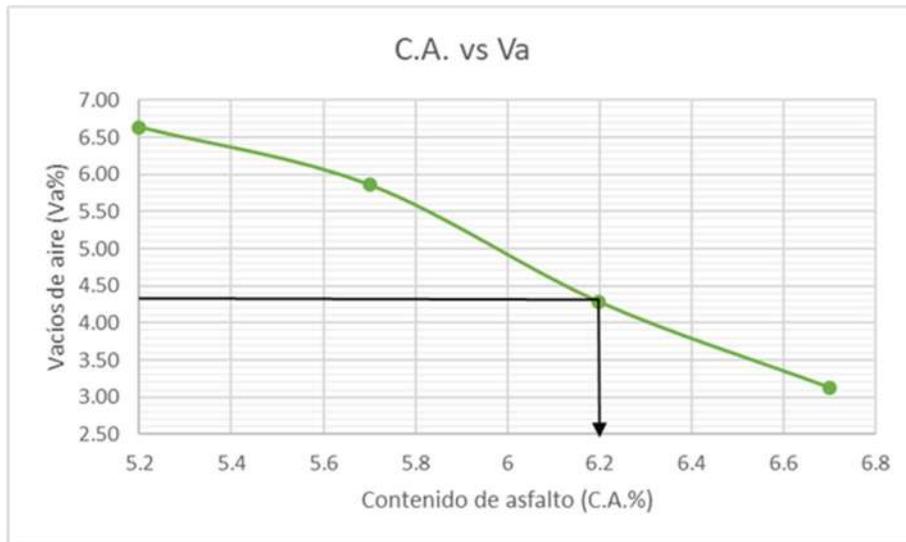
En la mezcla densa, se partió de un contenido de 5.2% y se hicieron incrementos de 0.5%. En el contenido de 6.2%, cumple en cuanto a vacíos de aire, volumen de agregado mineral y vacíos llenos por el asfalto, por lo cual se eligió el 6.2% con respecto al agregado como el óptimo. Los requisitos de calidad son los de la *Tabla 29*. Al igual que en las mezclas SMA, se graficaron las propiedades volumétricas a diferentes contenidos de asfalto, como se observa en la *Gráfica 23*, *Gráfica 24*, *Gráfica 25*, *Gráfica 26* y *Gráfica 27*.

Requerimientos para el diseño volumétrico de la mezcla										
Nivel de tránsito	Densidad requerida (% de la gravedad específica teórica máxima - Gmm)			Vacíos de agregado mineral mínimo en % - VMA					Vacíos llenos de asfalto en %	Relación filler asfalto
	Nivel de compactación giratoria			Tamaño nominal (mm)						
	Nini	Ndis	Nmax							
	37.5	25	19	12.5	9.5					
< 0.3	≤ 91,5	96	≤ 98	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	70-80	0.6-1.2
0.3 a < 3	≤ 90,5								65-78	
3 a < 30	≤ 89								65-75	
≥ 30										

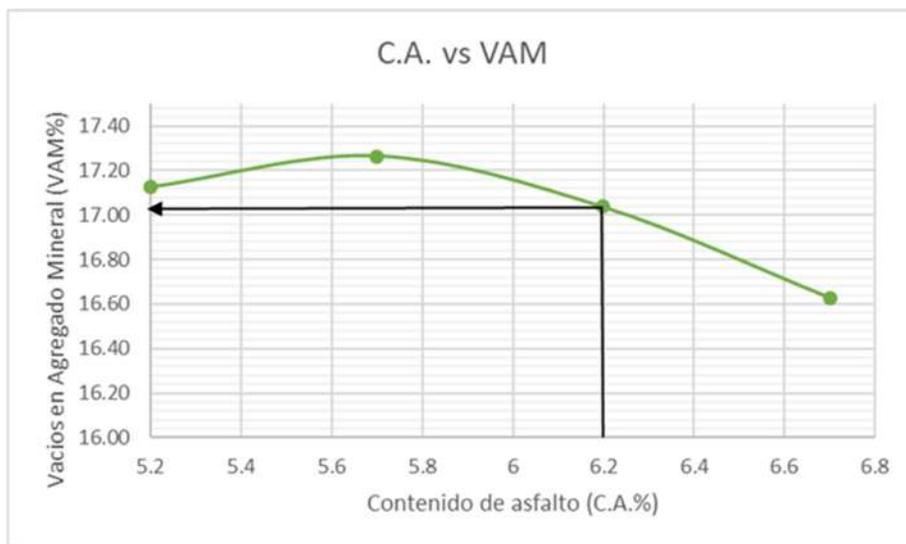
Tabla 29 Parámetros volumétricos para una mezcla asfáltica densa según el nivel de tránsito

Contenido de asfalto/agregado (%)	Contenido de asfalto/mezcla (%)	Promedio Gmb (Ton/m3)	Gmm (Ton/m3)	Va (%) 4%±1	VAM (%) 13 min.	VFA (%) 65-75
5.2	4.94	2.210	2.367	6.63	17.13	61.27
5.7	5.39	2.218	2.356	5.86	17.26	66.07
6.2	5.84	2.236	2.336	4.28	17.03	74.87
6.7	6.28	2.259	2.332	3.13	16.63	81.17

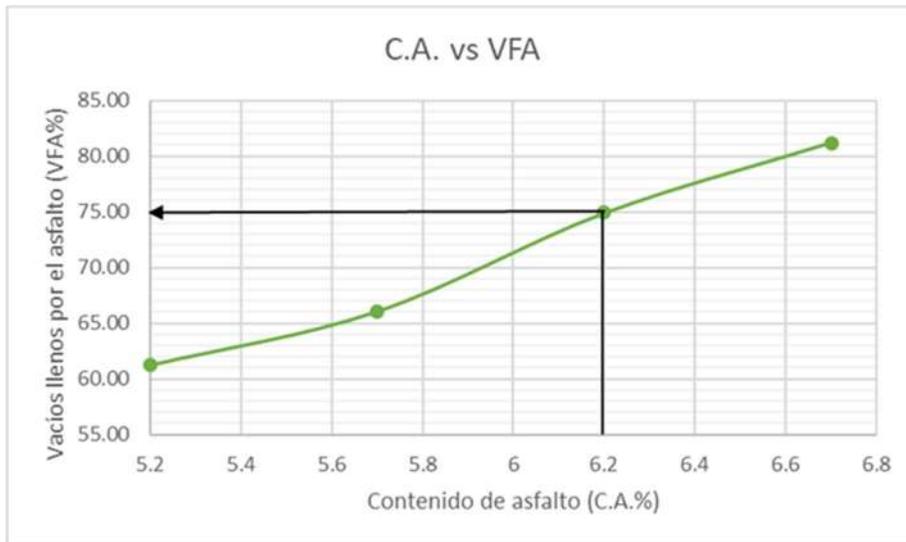
Tabla 30 Propiedades volumétricas a diferentes contenidos de asfalto para la mezcla densa con RARX



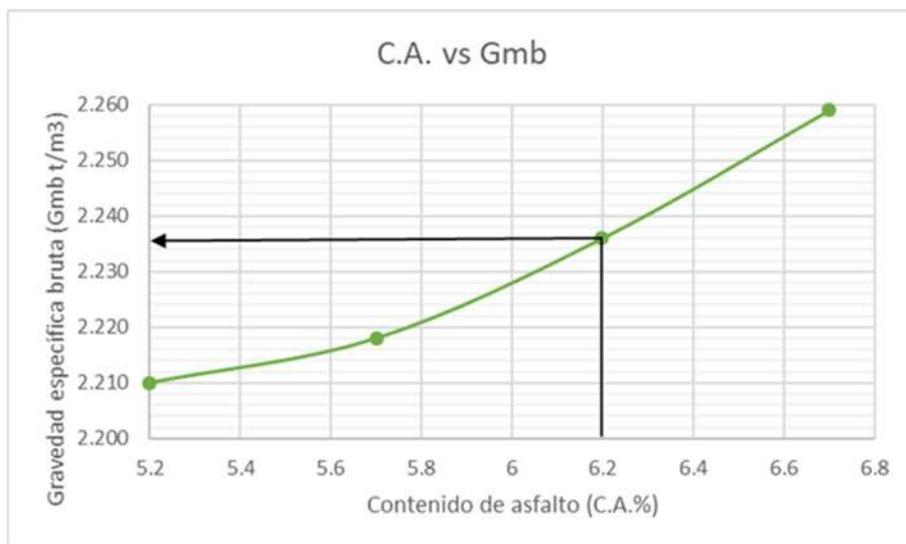
Gráfica 23 Contenido de asfalto y vacíos de aire



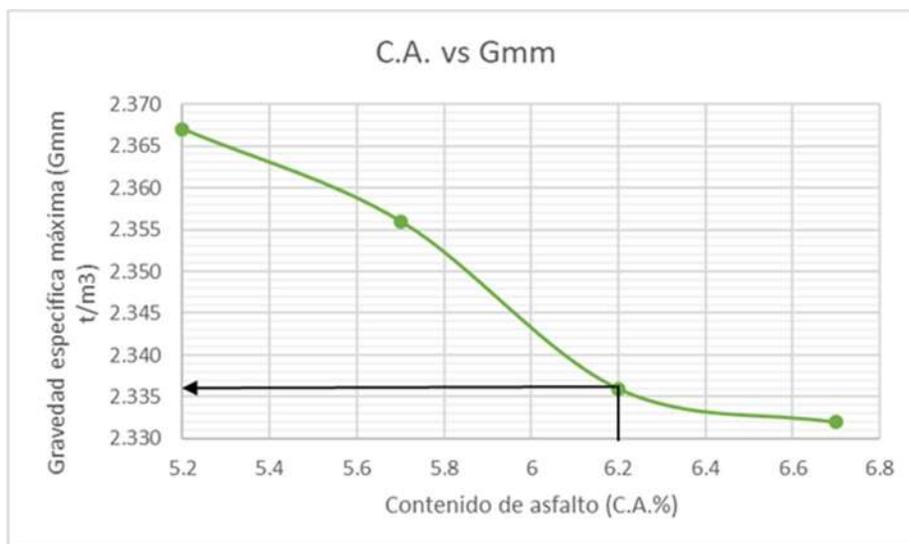
Gráfica 24 Contenido de asfalto y vacíos en el agregado mineral



Gráfica 25 Contenido de asfalto y vacíos llenos por el asfalto



Gráfica 26 Contenido de asfalto y gravedad específica bruta de la mezcla compacta



Gráfica 27 Contenido de asfalto y gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta

Para las mezclas asfáltica densas al igual que en las mezclas SMA se replicó el contenido óptimo de la mezcla densa con PG 64-22 y RARX en las mezclas densas con PG 64-22 y PG 76-22. Se observa que las mezclas que no contienen RARX necesitan más asfalto ya que tienen más vacíos, sin embargo, todas las mezclas cumplen.

Tipo de cemento asfáltico utilizado	Contenido de asfalto / agregado (%)	Contenido de asfalto / Mezcla (%)	Densidad máxima (gr/cm3)	Densidad mezcla compactada (gr/cm3)	Vacíos (%)	VAM (%)	VFA (%)
PG 64-22 + RARX	6.2	5.84	2.336	2.236	4.28	16.71	74.39
PG 64-22	6.2	5.84	2.399	2.287	4.67	14.78	68.41
PG 76-22	6.2	5.84	2.411	2.292	4.94	14.59	66.18

Tabla 31 Propiedades volumétricas de las diferentes combinaciones con el mismo contenido de asfalto

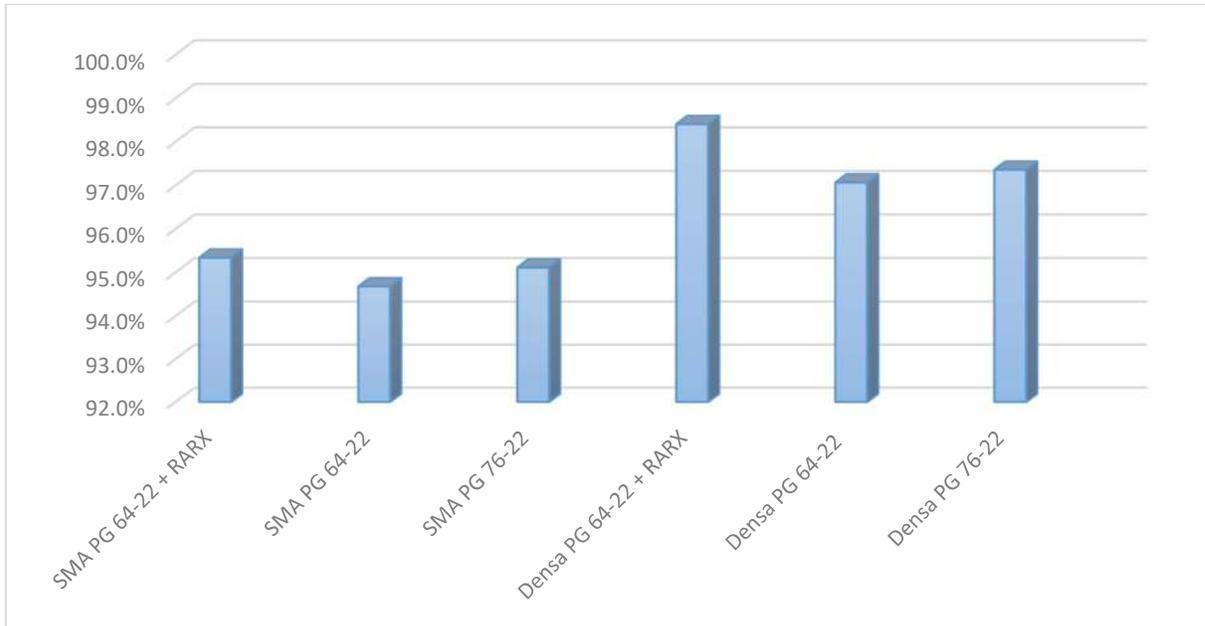
### 8 Ensayes de desempeño

#### 8.1 Resistencia al daño inducido por humedad TSR

Además de cumplir con los requisitos de granulometría y volumetría, una mezcla para ser considerada óptima tendrá que cumplir con el desempeño según el nivel para el cual se haya diseñado. En el daño inducido por humedad, tendrá que tener una relación mayor o igual al 80%. Los resultados que se obtuvieron para cada tipo de mezcla con cada combinación de asfalto se muestra en la *Tabla 32* y en la *Gráfica 28*.

Tipo de mezcla	TSR	(Kpa)	Relación TSR (%)
SMA PG 64-22 + RARX	No acondicionado	698.73	95.3%
	Acondicionado	666.17	
SMA PG 64-22	No acondicionado	943.48	94.7%
	Acondicionado	893.28	
SMA PG 76-22	No acondicionado	955.59	95.1%
	Acondicionado	908.9	
Densa PG 64-22 + RARX	No acondicionado	830.65	98.4%
	Acondicionado	817.42	
Densa PG 64-22	No acondicionado	1128.77	97.1%
	Acondicionado	1095.66	
Densa PG 76-22	No acondicionado	1269.05	97.4%
	Acondicionado	1235.54	

*Tabla 32 Resultados de TSR para las diferentes mezclas asfálticas*



Gráfica 28 Resultados de TSR

Todas las mezclas cumplen a TSR. De las mezclas SMA, la que mejor cumple es la mezcla que tiene RARX, con un TSR de 95.3%. Sin embargo, el esfuerzo que soporta es de 698.73 Kpa para las no acondicionadas y de 666.17 para las acondicionadas.

Con respecto a las mezclas asfálticas densas, la que presentó mejor desempeño fue la mezcla que contiene RARX con un TSR de 98.4%. No obstante, al igual que en las mezclas SMA soporta menos esfuerzo que con los otros asfaltos.

## 8.2 Susceptibilidad a la deformación permanente

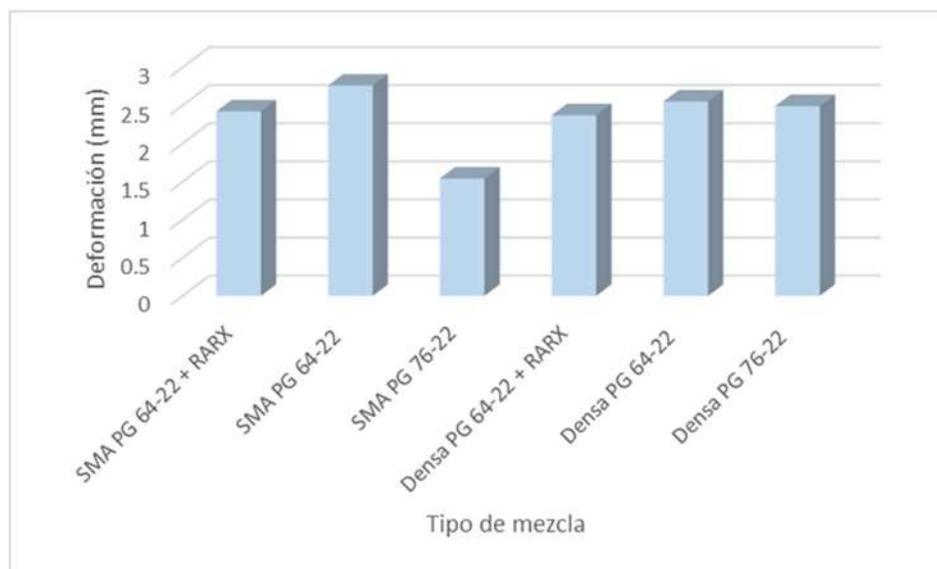
Si bien el método de falla de una mezcla asfáltica es por fatiga, se debe de tener la certeza que la mezcla asfáltica no fallará por deformación permanente. Para esto, existe una serie de pruebas en el cual se puede medir la tendencia de la mezcla asfáltica a deformarse permanentemente. Para esta investigación, se utilizó la rueda cargada de Hamburgo, en la cual se pasa una rueda metálica sobre 2 especímenes

de mezcla asfáltica saturados con agua a 50°C, 20,000 ciclos, y se obtiene la deformación, la cual debe de ser menor a 10 mm. La prueba se hace por duplicado y se obtiene un promedio de la deformación.

La mezcla SMA que resistió más fue la que contiene asfalto PG 76-22 con 1.54 mm de deformación. En las mezclas densas la que mejor se comportó fue la mezcla que contiene RARX con 2.37 mm de deformación, como se muestra en la *Tabla 33* y la *Gráfica 29*.

Tipo de mezcla	Promedio (mm)
SMA PG 64-22 + RARX	2.42
SMA PG 64-22	2.76
SMA PG 76-22	1.54
Densa PG 64-22 + RARX	2.37
Densa PG 64-22	2.55
Densa PG 76-22	2.49

*Tabla 33 Resultado de la rueda cargada de Hamburgo para las diferentes mezclas*



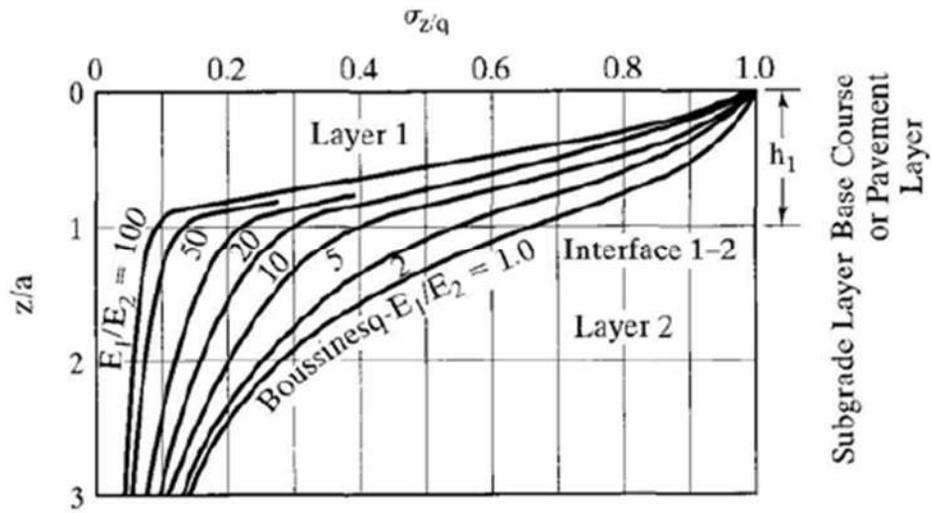
*Gráfica 29 Resultado de la rueda cargada de Hamburgo para las diferentes mezclas*

# 9 Desarrollo del programa de análisis de pavimentos Pav Analyzer

## 9.1 Descripción general del programa

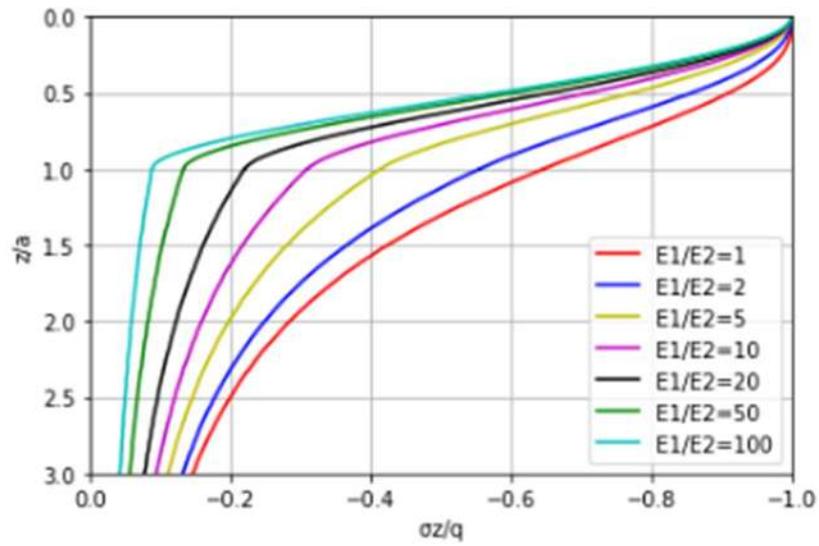
En este capítulo se describirá el proceso para la realización del programa de análisis de pavimentos Pav Analyzer. El programa se desarrolló utilizando Python, dado que es un lenguaje de programación de código abierto, además que cuenta con una gran variedad de librerías que potencializan su funcionamiento.

El primer paso para la creación del software fue el desarrollo del código para la teoría de Burmister. Los datos se validaban con el programa Kenlayer del Dr. Huang. Además, se generaron graficas de la distribución de esfuerzos verticales para distintas relaciones de módulos de elasticidad ( $E1/E2$ ) bajo una carga circular. Se comparó esta distribución de esfuerzos con la gráfica de Huang (2004) de la *Gráfica 30* con la *Gráfica 31* que es de elaboración propia, ambas son para un sistema de dos capas. La *Gráfica 32* es la distribución de esfuerzos para un sistema de tres capas, mientras que la *Gráfica 33* muestra la distribución de esfuerzo en un sistema de 4 capas. En todos estos casos la última capa es de un espesor infinito.



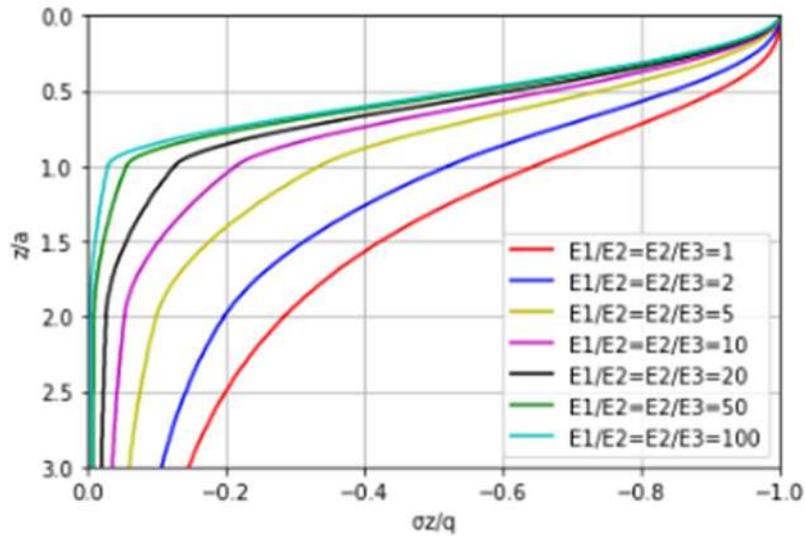
Gráfica 30 Distribución de esfuerzos verticales en un sistema de dos capas

Fuente: Huang, 2004



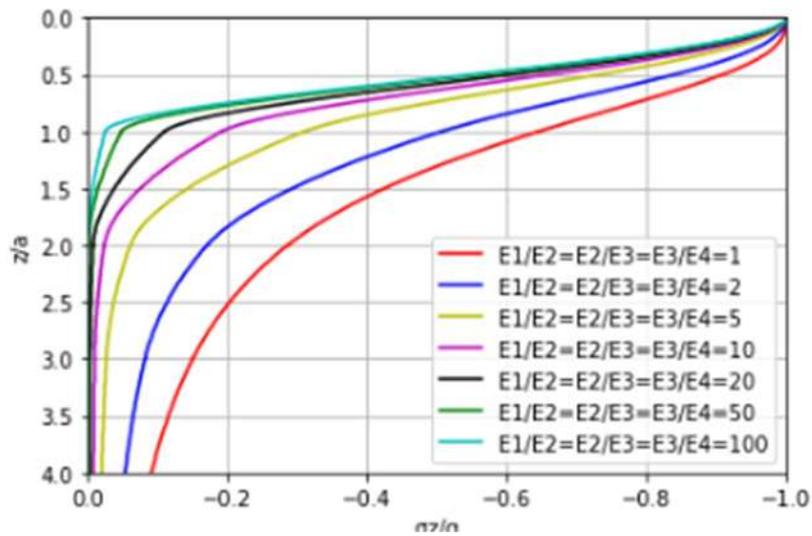
Gráfica 31 Distribución de esfuerzos verticales en un sistema de dos capas

Fuente: elaboración propia



Gráfica 32 Distribución de esfuerzos verticales en un sistema de tres capas

Fuente: elaboración propia



Gráfica 33 Distribución de esfuerzos verticales en un sistema de cuatro capas

Fuente: elaboración propia

Posteriormente, se creó un código de programación en el cual se pudieran obtener los ejes equivalentes por el método desarrollado por la UNAM. Para validar los datos

por vehículo, se calculó una serie de coeficientes de daño correspondientes a 0, 15, 30 y 60 cm, los cuales fueron comparados con aquellos establecidos en el instructivo para diseño estructural de pavimentos flexibles para carreteras (1981). Este programa permite al usuario obtener los ejes equivalentes a cualquier profundidad.

Asimismo, se llevó a cabo un código en el cual, si el usuario no ha realizado pruebas de módulo dinámico en su mezcla asfáltica, puede obtenerlo a través de correlaciones. Esto se logra a través de correlaciones del Instituto del Asfalto (1979), Andrei, Witczak y Mirza (1999) y Witczak y Bari (2006). De acuerdo con la investigación de Lara (2021) en su estudio titulado “Evaluación de métodos indirectos para la determinación de módulo dinámico de mezclas asfálticas”, encontró que la ecuación que obtuvo el mayor coeficiente de correlación es la propuesta por Andrei, Witczak y Mirza, seguida por la ecuación de Witczak y Bari. Cabe resaltar que para la correlación de este modelo se desarrolló con mezclas con granos de caucho reciclado y al último se encuentra la ecuación del Instituto del Asfalto con menor coeficiente de correlación.

Además, se implementó un código para la selección del grado PG. El usuario debe de ingresar los datos de las características de temperatura y de tránsito, además el programa calcula la temperatura máxima y la mínima según la normativa de la SICT. Adicionalmente, proporciona que asfalto se debe de utilizar por temperatura, así como el ajuste según las características del tránsito. También entrega el tipo de asfalto haciendo esta corrección según la normativa de la SICT del año 2008, y entrega el tipo de asfalto con la normativa de la SICT del año 2018, en donde se añade una letra al lado de la temperatura máxima según las características del tránsito.

Posteriormente se creó la interfaz gráfica, la cual fue diseñada con el objetivo brindar al usuario una experiencia intuitiva y de fácil comprensión, facilitando la familiarización con el programa.

## 9.2 Ventana de inicio

El programa al inicio brinda cuatro opciones, las cuales son análisis del tránsito, análisis de pavimentos, obtención de módulos a través de correlaciones y selección del grado PG como se muestra en la *Figura 49*.



*Figura 49 Portada de programa*

## 9.3 Análisis de tránsito

Al dar clic en el botón “Análisis de tránsito”, se despliega la ventana de la *Figura 50*. En esta ventana, el usuario puede obtener los ejes equivalentes mediante el método de la UNAM a cualquier profundidad. El usuario deberá de elegir el tipo de camino entre las opciones de (Camino A, Camino B o Camino C), si elige el camino B o C se deshabilitarán automáticamente los vehículos que no estén autorizados para

estos caminos. Después, el usuario tendrá que ingresar las características del TDPA para el diseño del carril del proyecto. Además, deberá añadir la profundidad a la cual desea calcular el daño superficial (fatiga) y el daño profundo (deformación permanente). Este programa además permite incluir sobre carga y sobre presión de neumáticos, en forma de porcentaje. Si el usuario no ingresa todos los datos, el programa lanza una notificación de error, como el de la *Figura 51*.

Posteriormente, el usuario debe de ingresar el porcentaje de cada vehículo que compone el TDPA. La sumatoria tiene que ser igual a cien, en caso de que la sumatoria no sea igual a cien, el programa lanzará un mensaje de advertencia como el de la *Figura 52*. De esta manera, se obtendrán los ejes equivalentes a la profundidad deseada como se muestra en la *Figura 53*. Asimismo, si se ingresa un carácter o una letra, el programa mostrará una notificación de error como el de la *Figura 54*. Estos mensajes de error están predeterminados en todas las ventanas que conforman el Pav Analyzer.

Después de haber ingresado las características del tránsito el programa tiene un botón en la parte inferior derecha “Análisis de pavimentos” al dar clic a esta opción el programa dirigirá al usuario a la sección donde podrá continuar con el análisis del pavimento.

Si se da clic sobre el signo de interrogación que se encuentra a un costado del campo de texto de TDPA podrá obtener ayuda, como se muestra en la *Figura 55*.

Para realizar un ejemplo del uso del programa, se llenarán los datos con los valores de la *Tabla 34* y *Tabla 35*.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
TDPA	3228
Años de servicio	10
Tasa de crecimiento anual (%)	2.4
Factor direccional	0.5
Factor de utilización de carril	0.7
Porcentaje de vehículos cargados	70
Profundidad a calcular los EE para fatiga (cm)	23
Profundidad a calcular los EE para deformación permanente (cm)	83

*Tabla 34 Características del tránsito*

Vehículo	Porcentaje
A2	72
B2	3
C2	5
C3	3
T3-S2	9
T3-S3	2
T3-S2-R4	6

Tabla 35 Composición del TDPA



### Cálculo de ejes equivalentes por el método de la UNAM

**Ingrese los siguientes datos:**

Elija el tipo de camino

TDPA

Años de servicio

Tasa de crecimiento anual (%)

Factor direccional

Factor de utilización de carril

Porcentaje de vehículos cargados (%)

Profundidad para fatiga (cm)

Profundidad para deformación permanente (cm)

Sobrecarga (%)

Sobre presión de neumáticos (%)

**Ingrese el porcentaje de cada vehículo que compone el TDPA (%)**

A2 <input type="text"/>	C3-R2 <input type="text"/>
A'2 <input type="text"/>	C3-R3 <input type="text"/>
B2 <input type="text"/>	T2-S1-R2 <input type="text"/>
B3 <input type="text"/>	T2-S1-R3 <input type="text"/>
B4 <input type="text"/>	T2-S2-R2 <input type="text"/>
C2 <input type="text"/>	T3-S1-R2 <input type="text"/>
C3 <input type="text"/>	T3-S1-R3 <input type="text"/>
C4 <input type="text"/>	T3-S2-R2 <input type="text"/>
T2-S1 <input type="text"/>	T3-S2-R3 <input type="text"/>
T2-S2 <input type="text"/>	T3-S2-R4 <input type="text"/>
T2-S3 <input type="text"/>	T2-S2-S2 <input type="text"/>
T3-S1 <input type="text"/>	T3-S2-S2 <input type="text"/>
T3-S2 <input type="text"/>	T3-S3-S2 <input type="text"/>
T3-S3 <input type="text"/>	
C2-R2 <input type="text"/>	
C2-R3 <input type="text"/>	

Figura 50 Ventana cálculo de ejes equivalentes

## Cálculo de ejes equivalentes por el método de la UNAM

**Ingrese los siguientes datos:**

Elija el tipo de camino

TDPA  (?)

Años de servicio

Tasa de crecimiento anual (%)

Factor direccional

Factor de utilización de carril

Porcentaje de vehículos cargados (%)

Profundidad para fatiga (cm)

Profundidad para deformación permanente (cm)

Sobrecarga (%)

Sobre presión de neumáticos (%)

**Ingrese el porcentaje de cada vehículo que compone el TDPA (%)**

A2	<input type="text" value="72"/>	C3-R2	<input type="text"/>
A2	<input type="text"/>	C3-R3	<input type="text"/>
B2	<input type="text" value="3"/>	T2-S1-R2	<input type="text"/>
		T2-S1-R3	<input type="text"/>
		T2-S2-R2	<input type="text"/>
		T3-S1-R2	<input type="text"/>
		T3-S1-R3	<input type="text"/>
		T3-S2-R2	<input type="text"/>
		T3-S2-R3	<input type="text"/>
T2-S1	<input type="text"/>	T3-S2-R4	<input type="text" value="6"/>
T2-S2	<input type="text"/>	T2-S2-S2	<input type="text"/>
T2-S3	<input type="text"/>	T3-S2-S2	<input type="text"/>
T3-S1	<input type="text"/>	T3-S3-S2	<input type="text"/>
T3-S2	<input type="text" value="9"/>		
T3-S3	<input type="text" value="2"/>		
C2-R2	<input type="text"/>		
C2-R3	<input type="text"/>		

**Error** X

¡Error! Faltan completar campos

Figura 51 Error debido a no ingresar todos los datos

## Cálculo de ejes equivalentes por el método de la UNAM

**Ingrese los siguientes datos:**

Elija el tipo de camino

TDPA  (?)

Años de servicio

Tasa de crecimiento anual (%)

Factor direccional

Factor de utilización de carril

Porcentaje de vehículos cargados (%)

Profundidad para fatiga (cm)

Profundidad para deformación permanente (cm)

Sobrecarga (%)

Sobre presión de neumáticos (%)

**Ingrese el porcentaje de cada vehículo que compone el TDPA (%)**

A2	<input type="text" value="72"/>	C3-R2	<input type="text"/>
A'2	<input type="text"/>	C3-R3	<input type="text"/>
B2	<input type="text" value="3"/>	T2-S1-R2	<input type="text"/>
		T2-S1-R3	<input type="text"/>
		T2-S2-R2	<input type="text"/>
		T3-S1-R2	<input type="text"/>
		T3-S1-R3	<input type="text"/>
		T3-S2-R2	<input type="text"/>
		T3-S2-R3	<input type="text"/>
T2-S1	<input type="text"/>	T3-S2-R4	<input type="text"/>
T2-S2	<input type="text"/>	T2-S2-S2	<input type="text"/>
T2-S3	<input type="text"/>	T3-S2-S2	<input type="text"/>
T3-S1	<input type="text"/>	T3-S3-S2	<input type="text"/>
T3-S2	<input type="text" value="9"/>		
T3-S3	<input type="text" value="2"/>		
C2-R2	<input type="text"/>		
C2-R3	<input type="text"/>		

**Error** X

¡Error! la sumatoria del TDPA es de 94.0

Figura 52 Mensaje de error debido a que la sumatoria del TDPA es diferente a 100

## Cálculo de ejes equivalentes por el método de la UNAM



**Ingrese los siguientes datos:**

Elija el tipo de camino

TDPA  (?)

Años de servicio

Tasa de crecimiento anual (%)

Factor direccional

Factor de utilización de carril

Porcentaje de vehículos cargados (%)

Profundidad para fatiga (cm)

Profundidad para deformación permanente (cm)

Sobrecarga (%)

Sobre presión de neumáticos (%)

Los equivalentes a 23.0 cm son de 6,589,993

Los equivalentes a 83.0 cm son de 9,090,743

**Ingrese el porcentaje de cada vehículo que compone el TDPA (%)**

A2 72	C3-R2
A2	C3-R3
B2 3	T2-S1-R2
B3	T2-S1-R3
B4	T2-S2-R2
C2 5	T3-S1-R2
C3 3	T3-S1-R3
C4	T3-S2-R2
T2-S1	T3-S2-R3
T2-S2	T3-S2-R4 6
T2-S3	T2-S2-S2
T3-S1	T3-S2-S2
T3-S2 9	T3-S3-S2
T3-S3 2	
C2-R2	
C2-R3	

Figura 53 Cálculo de ejes equivalentes

## Cálculo de ejes equivalentes por el método de la UNAM

**Ingrese los siguientes datos:**

Elija el tipo de camino

TDPA  (?)

Años de servicio A

Tasa de crecimiento anual (%)

Factor direccional

Factor de utilización de carril

Porcentaje de vehículos cargados (%)

Profundidad para fatiga (cm)

Profundidad para deformación permanente (cm)

Sobrecarga (%)

Sobre presión de neumáticos (%)

**Ingrese el porcentaje de cada vehículo que compone el TDPA (%)**

A2	<input type="text"/>	C3-R2	<input type="text"/>
A'2	<input type="text"/>	C3-R3	<input type="text"/>
B2	<input type="text"/>	T2-S1-R2	<input type="text"/>
B3	<input type="text"/>	T2-S1-R3	<input type="text"/>
	<input type="text"/>	T2-S2-R2	<input type="text"/>
	<input type="text"/>	T3-S1-R2	<input type="text"/>
	<input type="text"/>	T3-S1-R3	<input type="text"/>
	<input type="text"/>	T3-S2-R2	<input type="text"/>
	<input type="text"/>	T3-S2-R3	<input type="text"/>
T2-S2	<input type="text"/>	T3-S2-R4	<input type="text"/>
T2-S3	<input type="text"/>	T2-S2-S2	<input type="text"/>
T3-S1	<input type="text"/>	T3-S2-S2	<input type="text"/>
T3-S2	<input type="text"/>	T3-S3-S2	<input type="text"/>
T3-S3	<input type="text"/>		
C2-R2	<input type="text"/>		
C2-R3	<input type="text"/>		

**Error**

¡Error! Debe ingresar números

Figura 54 Error debido al ingreso de una letra o un caracter

**TDPA: Tránsito Diario Promedio Anual**

El factor direccional: Se utiliza 1.0 si la carretera es de un solo sentido y 0.5 si la carretera es de dos sentidos según la AASHTO

Factor de utilización de carril: Se recomienda emplear 0.5 para carreteras de dos carriles, 0.4 a 0.5 para cuatro carriles, y 0.3 a 0.4 para seis o más carriles según la UNAM. Si es de un carril se recomienda 1.0, de dos carriles de 0.8 a 1.0, de tres carriles de 0.6 a 0.8 y si es de cuatro o más de 0.5 a 0.75 según la AASHTO.

Porcentaje de vehículos cargados: Se sugiere emplear una proporción de camiones cargados de 60% y 80%.

La profundidad a la cual se debe calcular la fatiga debe de ser por debajo de la carpeta asfáltica, el método de la UNAM recomienda calcularlo a 0 cm.

La profundidad a la cual se debe de calcular el daño profundo para deformación permanente la UNAM recomienda hacerlo a 30 cm.

Sin embargo, después al hacer el análisis del pavimento se puede regresar a corregir la profundidad para calcular el daño por fatiga y por deformación permanente, este proceso puede ser iterativo.

Figura 55 Sección de ayuda para el cálculo de ejes equivalentes

Para obtener los pesos de los vehículos cargados se hizo conforme a la NOM-012-SCT-2-2017 como se muestra en la *Tabla 36* y *Tabla 37*, en donde también se obtuvieron los vehículos que son permitidos para los caminos tipo A, B y C. En cuanto a los pesos de los ejes vacíos se hicieron de acuerdo al instructivo para diseño estructural de pavimentos flexibles UNAM, 1981.

Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino (t)						
Configuración de ejes		Vehículo	Tipo de camino			
			ET4 Y ET2 A4 Y A2	B4 Y B2	C	D
	SENCILLO DOS LLANTAS	B	6.50	6.00	5.50	5.00
	MOTRIZ SENCILLO CUATRO LLANTAS	B	12.50	10.50	9.00	8.00
	MOTRIZ DOBLE O TANDEM SEIS LLANTAS	B	17.50	13.00	11.50	11.00
	MOTRIZ DOBLES O TANDEM OCHO LLANTAS	B	21.00	17.00	14.50	13.50

*Tabla 36 Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino*

Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino (t)						
Configuración de ejes		Vehículo o configuración	Tipo de camino			
			ET4 Y ET2 A4 Y A2	B4 Y B2	C	D
	SENCILLO DOS LLANTAS	C-R y T-S-R	6.50	6.00	5.50	5.00
		C y T-S	6.50	6.00	5.50	5.00
	SENCILLO CUATRO LLANTAS	C-R y T-S-R	10.00	9.50	8.00	7.00
		C y T-S	11.00	9.50	8.00	7.00
	MOTRIZ SENCILLO CUATRO LLANTAS	C-R y T-S-R	11.00	10.50	9.00	8.00
		C y T-S	12.50	10.50	9.00	8.00
	MOTRIZ DOBLE O TANDEM SEIS LLANTAS	C-R y T-S-R	15.00	13.00	11.50	11.00
		C y T-S	17.50	13.00	11.50	11.00
	DOBLE O TANDEM OCHO LLANTAS	C-R y T-S-R	17.00	15.00	13.50	12.00
		C y T-S	19.00	15.00	13.50	12.00
	MOTRIZ DOBLE O TANDEM OCHO LLANTAS	C-R y T-S-R	18.00	17.00	14.50	13.50
		C y T-S	21.00	17.00	14.50	13.50
	TRIPLE O TRIDEM DOCE LLANTAS	C-R y T-S-R	23.50	22.50	20.00	NA
		C y T-S	26.50	22.50	20.00	NA

Tabla 37 Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino

NA= NO AUTORIZADO

## 9.4 Análisis de pavimentos

Al dar clic en la pestaña “Análisis de pavimentos” ya sea desde la pantalla de inicio o después de haber calculado los ejes equivalentes, se desplegará la ventana de la *Figura 56*. En la cual el usuario deberá elegir de cuántas capas está conformado el pavimento a analizar, teniendo en cuenta que la última capa tiene un espesor infinito.



*Figura 56 Ventana de selección de capas del pavimento a analizar*

Para realizar el análisis para un pavimento, el programa solicita ingresar datos como el espesor, módulos, coeficientes de poisson y la profundidad a la cual se requiere calcular la fatiga y la deformación permanente. La fatiga se debe de calcular por

debajo de la carpeta asfáltica, y la deformación permanente por encima de la subrasante.

Para mostrar el funcionamiento de esta sección se plantea un ejemplo de un pavimento de cuatro capas, el cual tiene las características de la *Tabla 38*.

<b>Material</b>	<b>Módulo (Kpa)</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>	<b>Espesor (cm)</b>
Carpeta asfáltica	5,500,000	0.33	23
Base Hidráulica	450,000	0.35	30
Sub base	220,000	0.40	30
Subrasante	110,000	0.45	semi infinita

*Tabla 38 Características de las capas del pavimento*

En la *Figura 57* se muestra el vaciado de datos, una vez que el usuario ha terminado de llenar los datos, si cuenta con la ley de fatiga y deformación permanente puede ingresar las constantes en la parte inferior izquierda. Las constantes  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$  se refieren a fatiga y las constantes  $f_4$  y  $f_5$  a deformación permanente como se muestra en la *Ecuación 35* y la *Ecuación 36*. Sin embargo, si el usuario no cuenta con estos datos puede dar clic al botón “Calcular” sin haber llenado las constantes, ya que el programa tomará por default las constantes del Instituto del Asfalto. El programa mostrará como resultado los valores de la *Figura 58* en dónde se obtiene los esfuerzos verticales, radiales, tangenciales y cortantes, además muestra la deformación que para la primera fila es de tensión por debajo de la carpeta asfáltica y para la segunda fila es de compresión por encima de la subrasante. Posteriormente muestra los ejes equivalentes que soportará esa estructura de pavimento, si el usuario ingreso datos de las características de su tránsito vehicular aparecerá los ejes equivalentes de proyecto, además el programa hará una comparativa y le mostrará una notificación al usuario que puede ser que la vida a fatiga o a deformación permanente no cumple y que tendrá que aumentar los módulos y/o los espesores. No obstante, si el diseño es adecuado para soportar las cargas de proyecto se mostrará un mensaje como el que se sitúa en la parte inferior

izquierda de la *Figura 58*. Es importante mencionar que los esfuerzos que tienen signo positivo son de tensión y los de signo negativo son de compresión.

**Análisis de pavimentos de cuatro capas**

Espesor de la capa 1 (cm)	23
Espesor de la capa 2 (cm)	30
Espesor de la capa 3 (cm)	30
Módulo de la capa 1 (kPa)	5500000
Módulo de la capa 2 (kPa)	450000
Módulo de la capa 3 (kPa)	220000
Módulo de la capa 4 (kPa)	110000
Coefficiente de Poisson de la capa 1	0.33
Coefficiente de Poisson de la capa 2	0.35
Coefficiente de Poisson de la capa 3	0.40
Coefficiente de Poisson de la capa 4	0.45
Profundidad a la cual se quiere calcular fatiga (cm)	23
Profundidad a la cual se quiere calcular deformación permante (cm)	83

En caso de que cuente con ley de fatiga y deformación permanente ingresela

f1  f2  f3

f4  f5

*Figura 57 Análisis de un pavimento de cuatro capas*

Coordenada	Esfuerzo vertical (KPa)	Esfuerzo radial (KPa)	Esfuerzo tangencial (KPa)	Esfuerzo cortante (KPa)	Deformación	Tránsito que soporta el pavimento (EE)	Tránsito de proyecto (EE)
23.0 cm	-77.52	529.758	529.758	-0.002	6.9185356e-05	6,841,584	6,589,993
83.0 cm	-9.98	-0.144	-0.144	-0.0	-8.9549091e-05	1,810,317,463	9,090,743

**La vida a fatiga y a deformación permanente es adecuada. ¡Buen trabajo!**

Regresar Salir

Figura 58 Resultados del análisis del pavimento

Si el usuario desea modificar la ley de fatiga o deformación permanente, puede realizarlo desde la parte inferior izquierda, como se muestra en la *Imagen 59*, en donde se cambian las constantes a las de la compañía Shell.

En la *Figura 60* se muestran los resultados en donde se varío solo la ley de fatiga y deformación permanente, los cuales son diferentes a los calculados por default con las constantes del instituto del asfalto.

### Análisis de pavimentos de cuatro capas



Espesor de la capa 1 (cm)	23
Espesor de la capa 2 (cm)	30
Espesor de la capa 3 (cm)	30
Módulo de la capa 1 (kPa)	5500000
Módulo de la capa 2 (kPa)	450000
Módulo de la capa 3 (kPa)	220000
Módulo de la capa 4 (kPa)	110000
Coefficiente de Poisson de la capa 1	0.33
Coefficiente de Poisson de la capa 2	0.35
Coefficiente de Poisson de la capa 3	0.40
Coefficiente de Poisson de la capa 4	0.45
Profundidad a la cual se quiere calcular fatiga (cm)	23
Profundidad a la cual se quiere calcular deformación permante (cm)	83

En caso de que cuente con ley de fatiga y deformación permanente ingresela

f1 0.0685    f2 5.671    f3 2.363

f4 6.15e-7    f5 4

*Figura 59 Modificación de la ley de fatiga y deformación permanente*

Coordenada <b>Z</b>	<b>Esfuerzo vertical (KPa)</b>	<b>Esfuerzo radial (KPa)</b>	<b>Esfuerzo tangencial (KPa)</b>	<b>Esfuerzo cortante (KPa)</b>	<b>Deformación</b>	<b>Tránsito que soporta el pavimento (EE)</b>	<b>Tránsito de proyecto (EE)</b>
23.0 cm	-77.52	529.758	529.758	-0.002	6.9185356e-05	3,158,589	6,589,993
83.0 cm	-9.98	-0.144	-0.144	-0.0	-8.9549091e-05	9,563,797,871	9,090,743

La vida a deformación es adecuada, pero la vida a fatiga no lo es. Intente aumentar el espesor o los módulos

*Figura 60 Resultado de cambiar la ley de fatiga y deformación permanente*

En caso de que el usuario tenga dudas acerca de la ley de fatiga y deformación permanente, dar clic en botón “Ayuda (?)” y desplegará la ventana de la *Figura 61*.

Las ecuaciones genericas para fatiga y deformación permanente están dadas por:

$$Nf = f1 * \epsilon^{-f2} * E^{-f3}$$

$$Nd = f4 * (\epsilon c)^{-f5}$$

Los coeficientes f1, f2, f3 son determinados en laboratorio mediante ensayos de fatiga.  
 Los coeficientes f4 y f5 son determinados por experimentación en campo, para deformación permanente.  
 En caso de que haya hecho estos estudios ingrese, los coeficientes en la ventana anterior.  
 Si no cuenta con los coeficientes, existen instituciones que han realizado estudios y han establecido los coeficientes, como se muestra a continuación:

Ecuación	f1	f2	f3	f4	f5
Instituto del asfalto	0.0796	3.291	0.854	1.365e-9	4.477
Shell	0.0685	5.671	2.363	6.15e-7	4.0

Nota: En caso de no ingresar los coeficientes serán utilizados los del instituto del asfalto

*Figura 61 Ventana de ayuda*

## 9.5 Módulo dinámico

El módulo dinámico de la mezcla asfáltica es una propiedad fundamental para el análisis del pavimento. Esta prueba es costosa y prolongada, por lo cual varios investigadores e instituciones han desarrollado correlaciones para obtener el módulo dinámico de las mezclas asfálticas, a partir de sus características granulométricas, volumétricas y del cemento asfáltico. Al dar clic en la ventana inicial sobre la opción “Módulos” se despliega la ventana de la *Figura 62*. En donde muestra al usuario tres diferentes ecuaciones, con las cuales puede calcular el módulo dinámico. Cada ecuación pide diferentes datos. Además, el programa brinda ayuda al usuario para cada ecuación al dar clic sobre el botón “(?)”.

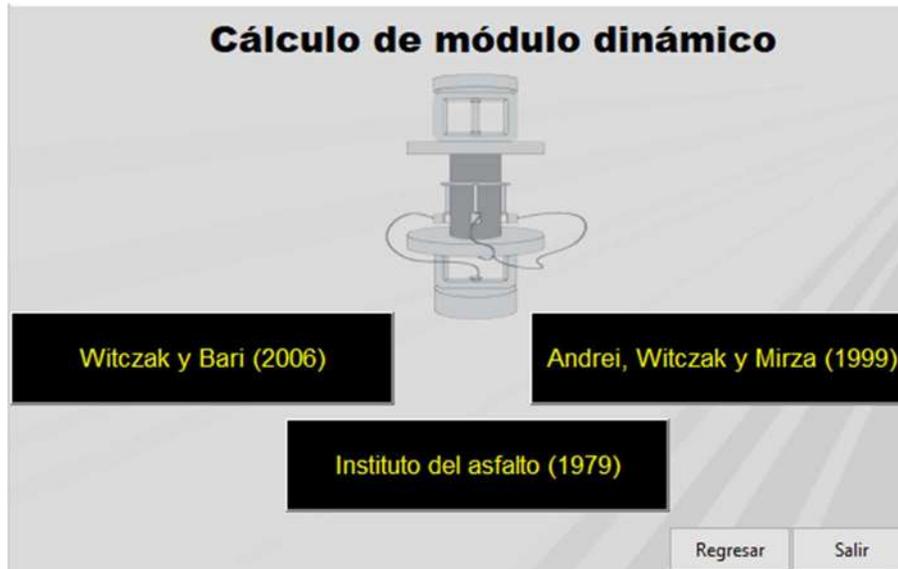


Figura 62 Ventana para la elección del cálculo del módulo dinámico

## 9.6 Grado PG

En cuanto a la sección para calcular el grado PG, el usuario debe de ingresar los datos que haya obtenido de su estación climatológica y las características de su tránsito. El programa realizará el cálculo de la temperatura máxima y la mínima, mediante estas temperaturas establecerá el grado PG. Luego, según las características del tránsito hará el ajuste y mostrará el grado PG según la normativa de la SICT del año 2008. Posteriormente, calculará el grado PG con la normativa del año 2018. Si el usuario tiene alguna duda, puede hacer clic en cualquiera de los dos botones ubicados debajo de la sección "Referencias". El primer botón lo llevará a la normativa de la SICT del año 2008 y el segundo botón lo llevará a la del año 2018. Se realiza un ejemplo como se muestra en la *Figura 63*.

## SELECCIÓN DE GRADO PG

Temperatura máxima promedio de los 7 días consecutivos más calido	<input type="text" value="37.43"/>
Desviación estándar para los 7 días consecutivos más calurosos	<input type="text" value="1.1338"/>
Promedio de las temperaturas mínimas anuales del aire	<input type="text" value="2.21"/>
Desviación estándar de las temperaturas mínimas anuales	<input type="text" value="0.4"/>
Latitud (°, Use 5 decimales)	<input type="text" value="19.50509"/>
Profundidad (mm, se recomienda utilizar 20 mm)	<input type="text" value="20"/>
Valor para nivel de confiabilidad (se recomienda 2.055)	<input type="text" value="2.055"/>
Intensidad del tránsito (ejes equivalentes)	<input type="text" value="22023082"/>
Velocidad del proyecto (km/hr)	<input type="text" value="110"/>
Tránsito detenido (cruceos)	<input type="text" value="No existen cruceos"/> ▾

**Referencias:**

Calcular

**Tmax = 63.96 °C      Tmin = 4.51 °C**

**El cemento asfáltico con la normativa 2008 con el nivel de ajuste debe de ser un PG 76-22**

**El cemento asfáltico con la normativa 2018 con el nivel de ajuste debe de ser un PG 64H-16**

Regresar

Salir

*Figura 63 Cálculo del grado PG*

### 10 Conclusiones

Los neumáticos en México no tienen un sistema de reciclaje, por lo cual generan contaminación propiciando la existencia de fauna nociva.

Las nuevas tecnologías en ingeniería deben de brindar sustentabilidad y un mejor comportamiento esfuerzo-deformación.

Las mezclas asfálticas modificadas con caucho no son muy utilizadas en México, por lo que para su implementación requiere de estudios que respalden su aumento de desempeño en términos cuantitativos y cualitativos.

De acuerdo con los resultados obtenidos en TSR, se observa que las mezclas que contienen RARX soportan menos esfuerzo que las mezclas que no contienen RARX. Aunque, dan una mejor relación de TSR. En las mezclas SMA, la mezcla que mejor comportamiento tuvo fue la que contiene RARX, con un TSR de 95.3%.

Respecto a los resultados en deformación permanente, la mezcla SMA que mejor se comportó fue la mezcla con asfalto PG 76-22, con 1.54 mm de deformación.

En cuanto a la deformación permanente en mezclas densas, la que mejor se comportó fue la mezcla que contiene RARX, con 2.37 mm de deformación.

En conclusión, se puede observar que las mezclas con RARX tienen un comportamiento adecuado en cuanto al daño por humedad y a la deformación permanente. No obstante, hace falta realizar pruebas de fatiga para tener una comparativa adecuada.

El programa Pav Analyzer permite obtener el número de ejes equivalentes a través del método de la UNAM a cualquier profundidad del pavimento. Esto proporciona información valiosa para el análisis y diseño de pavimentos.

Pav Analyzer permite agregar sobrecargas y/o sobre presión a los vehículos que conforman el TDPA. Lo cual es importante dado que un aumento en las cargas de los vehículos o en las presiones de inflado de los neumáticos puede afectar la vida útil y el comportamiento del pavimento.

El software realiza el análisis de pavimentos a través de la teoría de Burmister y permite cambiar las leyes de deformación permanente y fatiga para realizar análisis más exactos.

Pav Analyzer ofrece herramientas de gran utilidad para el usuario, como el cálculo del módulo dinámico a través de correlaciones y la obtención del grado PG con la normativa de la SICT del año 2008 y 2018.

El programa de análisis de pavimentos Pav Analyzer brinda una interfaz intuitiva y fácil de usar para el usuario, es importante tener en cuenta que el código desarrollado en Python tiene la capacidad de llamar a las funciones mediante API (Application Programming Interface). Esta combinación permite realizar análisis más complejos y avanzados, brindando mayor libertad y flexibilidad para llevar a cabo diversas operaciones. Sin embargo, es necesario contar con conocimientos de programación para aprovechar plenamente esta funcionalidad y realizar análisis más detallados.

### 11 Bibliografía

- Alfaro, J., Flores, J., & Martinez, C. (2016). *Estudio comparativo de las leyes de fatiga en mezclas asfálticas convencionales haciendo uso de la viga de fatiga*. El Salvador.
- Anguas, P. G. (2003). *ALGUNOS ASPECTOS DE LA DENSIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON EL COMPACTADOR GIRATORIO*.
- ASTM. (2017).
- Ayala, Y., Delgado, H., Cuellar, V., & Salazar, A. (2019). *Manual de ensayos para laboratorio*. Sanfaldilla, Querétaro .
- Cambio Climático México*. (Diciembre de 2020). Obtenido de <https://cambioclimatico.gob.mx/>
- Cirtec. (2020).
- Cirtec. (2020). *Estudio de análisis de ciclo de vida comparativo de rehabilitación de firmes de hormigón entre mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con aditivo RAR-X*. Madrid.
- Coria, C. (2012). *Elaboración de un Programa de Diseño de Pavimentos Flexibles*.
- Coria, C. (2012). *Modelo de respuesta estructural multicapa para diseño de pavimentos flexibles UMICH PAV*. Morelia, Michoacán.
- Delgado, Gómez, & Flores. (2017). *Propuesta de método de prueba de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México*.
- Delgado, H., Gómez, J., & Flores, M. (2017). *Propuesta de método de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México*.

- Durán, M. (2021). *Evaluación del ruido al borde de un camino en pavimentos rígidos y flexibles para proponer medidas de amortiguamiento acústico*. Perú.
- Fernandez, G. G. (2020). En México hace falta invertir en infraestructura. *El economista*.
- Flores, M., Delgado, H., & Gomez, J. (2018). *Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas con la rueda cargada de Hamburgo*.
- Garnica, P., Delgado, H., & Sandoval, C. (2005). *Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas*. Sanfaldilla, Qro.
- Gómez, A. (2013). *Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño*.
- Gómez, J., Garnica, P., Delgado, H., & Mayra, F. (2020). *Módulos de rigidez de mezclas asfálticas ensayadas en vigas a flexión basados en la metodología Calme*. Sanfaldilla Qro.
- Higuera, C., Naranjo, M., & Cetina, J. (2011). *Determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica por correlaciones*.
- Horacio, D., José, G., & Mayra, F. (2017). Propuesta de método de prueba de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México.
- <https://mma.gob.cl>. (2018).
- Huang. (1993). *Pavement Analysis and Design*.
- Huang. (2004). *Pavement analysis and design*. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- ISO14040. (2006).
- jornada, L. (2019). TIP México impulsa el reciclaje de neumáticos. *La jornada*.

- Lara, (2021). Evaluación de métodos indirectos para la determinación del módulo dinámico de las mezclas asfálticas. *Universidad del Norte*.
- Lopez, W. A. (2015). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *Revista ingeniería*.
- Martínez, D. B. (2019). *Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas modificadas con hule devulcanizado*.
- Múnera, J. C., & Aguilar, J. P. (2020). *Estimación del módulo resiliente para materiales granulares en Costa Rica*. *Revista Infraestructura Vial /*.
- Ordoñez, S. M. (2006). *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*.
- Popov. (1990). *Engineering mechanics of solids*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Proyectos México*. (2020). Obtenido de [https://www.proyectosmexico.gob.mx/porque-invertir-en-mexico/destino-atractivo/sd\\_inversion-historica-en-infraestructura/](https://www.proyectosmexico.gob.mx/porque-invertir-en-mexico/destino-atractivo/sd_inversion-historica-en-infraestructura/)
- Regal, A. (2009). *Los caminos del imperio romano*.
- Resendiz, C. V. (2007). *Estudio de las alternativas de aprovechamiento de las llantas en desuso*.
- Rico, A., Téllez, R., & Garnica, P. (1998). *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias*. Sanfaldilla Qro.
- Rondón, M. F. (2012). *Rehabilitación de pavimentos por reflexión implementando sistemas de membrana antifisuras S.A.M.I.*
- Ruiz, J., Peláez, J., & Martínez, A. (2003). *Teorías de daño acumulativo en la fatiga*.
- Solución a la teoría de Multicapa Elástica y software de calculo de las respuestas del pavimento PITRA PAVE*. (2017).

- Tellez, R. (2012). *Pavimentos rígidos ó flexibles, concreto vs. asfalto, dilema en Infraestructura de Vías Terrestres.*
- Trejo, Rojas, Loria, & Aguilar. (2017). *Solución a la teoría de Multicapa Elástica y software de calculo de las respuestas del pavimento PITRA PAVE.* Medellín, Colombia.
- Trejos, C., Rojas, F., Loria, L., & Aguilar, J. (2017). *Solución a la teoría de Multicapa Elástica y software de calculo de las respuestas del pavimento PITRA PAVE.* Medellín, Colombia.
- Trejos, C., Rojas, F., Loria, L., & Aguilar, J. (2017). *Solución a la teoría multicapa elástica y software de cálculo de las respuestas del pavimento PRITA PAVE.*
- Vidal, J., & Ossa, A. (2011). *Modelación y analisis de susceptibilidad a la deformación permanete en mezclas asfálticas.*
- Yelitza Ayala del Toro, H. D. (2019). *Manuel de ensayos para laboratorio.*

# Anexos

## Resultados de TSR de la mezcla SMA PG 64-22 con RARX

RESISTENCIA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD POR MEDIO DE LA RELACIÓN EN RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA (TSR) ASTM D4867								
CONTENIDO DE ASFÁLTO CON RESPECTO A LA MEZCLA			6.37					
Volumetría original			Subconjunto condicionado			Subconjunto no acondicionado		
Identificación del espécimen	CLAVE	UNIDAD	1 (2)	2 (3)	3 (4)	4 (5)	5 (6)	6 (7)
Dímetro	D	mm	100.40	100.40	100.30	100.40	100.10	100.30
Espesor	t	mm	61.70	61.60	61.80	61.70	61.60	62.10
Masa espécimen seco	A	g	980.4	981.8	981.6	982.8	986.1	986.3
Masa Sat. Superficialmente seco	B	g	991.4	993	993.5	995.1	995.7	996.30
Masa espécimen Sumergido	C	g	540.1	540.3	538.4	538.6	543.4	545.4
Volumen (B-C)	E	cm <sup>3</sup>	451.3	452.7	455.1	456.5	452.3	450.9
Gravedad específica bruta (A/E)	Gmb	t/m <sup>3</sup>	2.172	2.169	2.157	2.153	2.180	2.187
Gravedad específica teórica máxima	Gmm	t/m <sup>3</sup>	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34
Vacios (100(Gmm-Gmb)/Gmm)	H	%	7.16	7.32	7.83	8.00	6.83	6.52
Volumen de vacíos (H*E/100)	I	cm <sup>3</sup>	32.3	33.1	35.6	36.5	30.9	29.4
DESPUES DE PRESIÓN DE VACIO								
Masa Sat. Superficialmente seco	B'	g	1005.9	1008.1	1009.0			
Volumen de agua absorbida (B'-A)	J'	cm <sup>3</sup>	25.5	552.4	27.4			
Grado Saturación (100*J'/I)	S'	%	78.9	1667.5	79.0			
Masa espécimen sumergido	C'	g	550.5	552.4	552.1			
Volumen (B'-C')	E'	cm <sup>3</sup>	455.4	455.7	456.9			
Grado de expansión (100*(E'-E)/E)	Exp'	%	0.9	0.7	0.4			
DESPUES DE ACONDICIONAMIENTO								
Dímetro, cm.	D''	mm	100.33	100.48	100.23			
Espesor, cm.	t''	mm	61.25	61.75	61.78			
Masa Sat. Superficialmente seco	B''	g	1011.9	1011.4	1013.2			
Masa espécimen sumergido	C''	g	556.6	558.1	556.4			
Volumen (B''- C'')	E''	cm <sup>3</sup>	455.3	453.3	456.8			
Volumen de agua absorbida (B''-A)	J''	cm <sup>3</sup>	31.5	29.6	31.6			
Grado de saturación (100*J''/I)	S''	cm <sup>3</sup>	97.4	89.4	88.7			
Grado de expansión (100*(E''-E)/E)	Exp''	%	0.9	0.1	0.4			
Carga	P	kg	595	673	711	632	676	773
Carga	P''	N	5835.0	6599.9	6972.6	6197.83	6629.33	7580.58
Esfuerzo en seco (2P / tDπ)	S1	kg/cm <sup>2</sup>				6.50	6.98	7.90
Esfuerzo en húmedo (2P'' / t''Dπ)	S2	kg/cm <sup>2</sup>	6.16	6.91	7.31			
Esfuerzo en seco (2000*P / tDπ)	S1	kPa				636.94	684.44	774.80
Esfuerzo en húmedo (2000P'' / t''Dπ)	S2	kPa	604.48	677.17	716.85			
(Sta) Resistencia promedio del subconjunto no acondicionado (Kpa)	698.73							
(St) Resistencia promedio del subconjunto acondicionado (Kpa)	666.17							
(TSR) Relación de resistencia a la tensión indirecta (Stq/St*100) [%]	95.3%							

## Resultados de TSR de la mezcla Densa PG 64-22 con RARX

RESISTENCIA DE LA MEZCLA ASFALTICA COMPACTADA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD POR MEDIO DE LA RELACION EN RESISTENCIA A LA TENSION INDIRECTA (TSR)								
CONTENIDO DE ASFALTO CON RESPECTO A LA MEZCLA			5.84					
VOLUMETRIA ORIGINAL			SUBCONJUNTO ACONDICIONADO			SUBCONJUNTO NO ACONDICIONADO		
Identificación del espécimen	CLAVE	UNIDAD	1 (2)	2 (3)	3 (4)	4 (5)	5 (6)	6 (7 in)
Díametro	D	mm	99.80	100.10	100.10	100.30	100.20	100.10
Espesor	t	mm	61.73	61.73	61.40	61.50	61.60	61.50
Masa espécimen seco	A	g	1003	1023	1017.4	1013.9	1010.9	1015.2
Masa Sat. Superficialmente seco	B	g	1007.6	1027.9	1024.9	1022	1020.9	1022.70
Masa espécimen Sumergido	C	g	541.7	559.3	561.2	557.3	555.5	558.3
Volumen (B-C)	E	cm <sup>3</sup>	465.9	468.6	463.7	464.7	465.4	464.4
Gravedad específica bruta (A/E)	Gmb	t/m <sup>3</sup>	2.153	2.183	2.194	2.182	2.172	2.186
Gravedad específica teórica máxima	Gmm	t/m <sup>3</sup>	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336
Vacios (100*(Gmm-Gmb)/Gmm)	H	%	7.84	6.55	6.07	6.60	7.02	6.42
Volumen de vacíos (H*E/100)	I	cm <sup>3</sup>	36.5	30.7	28.2	30.7	32.7	29.8
DESPUES DE PRESION DE VACIO								
Masa Sat. Superficialmente seco	B'	g	1031.5	1045.1	1039.7			
Volumen de agua absorbida (B'-A)	J'	cm <sup>3</sup>	28.5	22.1	22.3			
Grado Saturación (100*J'/I)	S'	%	78.0	72.1	70.5			
Masa espécimen sumergido	C'	g	564.3	575.9	574.5			
Volumen (B'-C')	E'	cm <sup>3</sup>	467.2	469.2	465.2			
Grado de expansión (100*(E'-E)/E)	Exp'	%	0.3	0.1	0.3			
DESPUES DE ACONDICIONAMIENTO								
Díametro, cm.	D''	mm	100.5	100.45	100.63			
Espesor, cm.	t''	mm	62.55	61.85	62.43			
Masa Sat. Superficialmente seco	B''	g	1053.8	1040.1	1052.2			
Masa espécimen sumergido	C''	g	584.0	571.5	584.6			
Volumen (B''- C'')	E''	cm <sup>3</sup>	469.8	468.6	467.6			
Volumen de agua absorbida (B''-A)	J''	cm <sup>3</sup>	50.8	17.1	34.8			
Grado de saturación (100*J''/I)	S''	cm <sup>3</sup>	139.1	55.8	123.5			
Grado de expansión (100*(E''-E)/E)	Exp''	%	0.8	0.0	0.8			
Carga	P	kg	754	907	797	833	808	820
Carga	P''	n	7394.3	8894.7	7815.9	8168.98	7923.81	8041.49
Esfuerzo en seco (2P / tD $\pi$ )	S1	kg/cm <sup>2</sup>				8.60	8.33	8.48
Esfuerzo en húmedo (2P'' / t''D $\pi$ )	S2	kg/cm <sup>2</sup>	7.64	9.29	8.08			
Esfuerzo en seco (2000*P / tD $\pi$ )	S1	kPa				843.08	817.27	831.59
Esfuerzo en húmedo (2000P'' / t''D $\pi$ )	S2	kPa	748.82	911.42	792.03			
(Sta) Resistencia promedio del subconjunto no acondicionado (Kpa)			830.65					
(St) Resistencia promedio del subconjunto acondicionado (Kpa)			817.42					
(TSR) Relación de resistencia a la tensión indirecta (Stq/St*100) [%]			98%					

## Resultados de TSR de la mezcla SMA PG 64-22

CONTENIDO DE ASFÁLTO CON RESPECTO AL AGREGADO			%			6.805		
Volumetría original			Subconjunto condicionado			Subconjunto no acondicionado		
Identificación del espécimen	CLAVE	UNIDAD	1 (4)	2 (5)	3 (6)	4 (7)	5 (8)	6 (9)
Díametro	D	mm	99.85	99.78	99.75	99.65	99.85	99.88
Espesor	t	mm	60.38	60.60	60.88	60.75	60.93	60.43
Masa especimen seco	A	g	988.4	989.1	987.9	990.6	981.2	987.3
Masa Sat. Superficialmente seco	B	g	996.9	1000.1	1000.7	1000.8	992	995.20
Masa especimen Sumergido	C	g	550.8	552.8	555.3	552.6	546.5	548.2
Volumen (B-C)	E	cm <sup>3</sup>	446.1	447.3	445.4	448.2	445.5	447.0
Gravedad específica bruta (A/E)	Gmb	t/m <sup>3</sup>	2.216	2.211	2.218	2.210	2.202	2.209
Gravedad específica teórica máxima	Gmm	t/m <sup>3</sup>	2.394	2.394	2.394	2.394	2.394	2.394
Vacios (100(Gmm-Gmb)/Gmm)	H	%	7.45	7.63	7.35	7.68	8.00	7.74
Volumen de vacios (H*E/100)	I	cm <sup>3</sup>	33.2	34.1	32.7	34.4	35.6	34.6
<b>DESPUES DE PRESIÓN DE VACIO</b>								
Masa Sat. Superficialmente seco	B'	g	1013.3	1022.6	1018.2			
Volumen de agua absorbida (B'-A)	J'	cm <sup>3</sup>	24.9	33.5	30.3			
Grado Saturación (100*J'/I)	S'	%	74.9	98.1	77.8			
Masa especimen sumergido	C'	g	565.5	569.4	564.2			
Volumen (B'-C')	E'	cm <sup>3</sup>	447.8	453.2	454.0			
Grado de expansión (100*(E'-E)/E)	Exp'	%	0.4	1.3	1.9			
<b>DESPUES DE ACONDICIONAMIENTO</b>								
Díametro, cm.	D''	mm	99.54	100.13	100.02			
Espesor, cm.	t''	mm	60.3	60.68	61.02			
Masa Sat. Superficialmente seco	B''	g	1011.9	1011.4	1013.2			
Masa especimen sumergido	C''	g	556.6	558.1	556.4			
Volumen (B''- C'')	E''	cm <sup>3</sup>	455.3	453.3	456.8			
Volumen de agua absorbida (B''-A)	J''	cm <sup>3</sup>	23.5	22.3	25.3			
Grado de saturación (100*J''/I)	S''	cm <sup>3</sup>	70.7	65.3	77.3			
Grado de expansión (100*(E''-E)/E)	Exp''	%	2.1	1.3	2.6			
Carga	P	kg	1013	830	756	1023	702	1020
Carga	P''	N	9934.2	8139.6	7413.9	10032.25	6884.30	10002.83
Esfuerzo en seco (2P / tDπ)	S1	kg/cm <sup>2</sup>				10.76	7.35	10.76
Esfuerzo en húmedo (2P'' / t''Dπ)	S2	kg/cm <sup>2</sup>	10.74	8.70	7.89			
Esfuerzo en seco (2000*P / tDπ)	S1	kPa				1055.00	720.38	1055.05
Esfuerzo en húmedo (2000P'' / t''D''π)	S2	kPa	1053.65	852.85	773.33			
<b>(Sta) Resistencia promedio del subconjunto no acondicionado (Kpa)</b>			<b>943.48</b>					
<b>(St) Resistencia promedio del subconjunto acondicionado (Kpa)</b>			<b>893.28</b>					
<b>(TSR) Relación de resistencia a la tensión indirecta (Stq/St*100) [%]</b>			<b>94.7%</b>					

## Resultados de TSR de la mezcla Densa PG 64-22

RESISTENCIA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD POR MEDIO DE LA RELACIÓN EN RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA (TSR) ASTM D4867								
CONTENIDO DE ASFÁLTO CON RESPECTO AL AGREGADO			%		6.205			
Volumetría original			Subconjunto condicionado			Subconjunto no acondicionado		
Identificación del espécimen	CLAVE	UNIDAD	1 (2)	2 (3)	3 (4)	4 (10)	5 (11)	6 (12)
Díametro	D	mm	99.95	100.08	100.13	99.83	100.18	99.8
Espesor	t	mm	61.28	61.28	62.35	64.65	61.48	61.33
Masa espécimen seco	A	g	1013.9	1025	1033.5	1081.4	1030.3	1033.3
Masa Sat. Superficialmente seco	B	g	1026.5	1042.7	1049.1	1103.8	1047.4	1050.60
Masa espécimen Sumergido	C	g	571.0	586.6	588.2	619.7	587.1	587.2
Volumen (B-C)	E	cm <sup>3</sup>	455.5	456.1	460.9	484.1	460.3	463.4
Gravedad específica bruta (A/E)	Gmb	t/m <sup>3</sup>	2.226	2.247	2.242	2.234	2.238	2.230
Gravedad específica teórica máxima	Gmm	t/m <sup>3</sup>	2.411	2.411	2.411	2.411	2.411	2.411
Vacios (100(Gmm-Gmb)/Gmm)	H	%	7.68	6.79	6.99	7.35	7.16	7.51
Volumen de vacíos (H*E/100)	I	cm <sup>3</sup>	35.0	31.0	32.2	35.6	33.0	34.8
DESPUES DE PRESIÓN DE VACIO								
Masa Sat. Superficialmente seco	B'	g	1022.9	1040.5	1037.9			
Volumen de agua absorbida (B'-A)	J'	cm <sup>3</sup>	9.0	552.4	4.4			
Grado Saturación (100*J'/I)	S'	%	25.7	1783.9	75.6			
Masa espécimen sumergido	C'	g	568.5	578.1	578.1			
Volumen (B'-C')	E'	cm <sup>3</sup>	454.4	462.4	459.8			
Grado de expansión (100*(E'-E)/E)	Exp'	%	-0.2	1.4	-0.2			
DESPUES DE ACONDICIONAMIENTO								
Díametro, cm.	D''	mm	100.05	100.25	100.1			
Espesor, cm.	t''	mm	60.23	61.13	61.2			
Masa Sat. Superficialmente seco	B''	g	1030.4	1047.4	1047.3			
Masa espécimen sumergido	C''	g	579.4	588.9	590.9			
Volumen (B''- C'')	E''	cm <sup>3</sup>	451.0	458.5	456.4			
Volumen de agua absorbida (B''-A)	J''	cm <sup>3</sup>	16.5	22.4	13.8			
Grado de saturación (100*J''/I)	S''	cm <sup>3</sup>	47.2	72.3	42.8			
Grado de expansión (100*(E''-E)/E)	Exp''	%	-1.0	0.5	-1.0			
Carga	P	kg	1069	1097	1042	1050	1263	1069
Carga	P''	N	10483.4	10757.9	10218.6	10297.04	12385.86	10483.36
Esfuerzo en seco (2P / tD $\pi$ )	S1	kg/cm <sup>2</sup>				10.36	13.06	11.12
Esfuerzo en húmedo (2P'' / t''D $\pi$ )	S2	kg/cm <sup>2</sup>	11.29	11.40	10.83			
Esfuerzo en seco (2000*P / tD $\pi$ )	S1	kPa				1015.69	1280.24	1090.38
Esfuerzo en húmedo (2000P'' / t''D'' $\pi$ )	S2	kPa	1107.52	1117.56	1061.90			
(St <sub>a</sub> ) Resistencia promedio del subconjunto no acondicionado (Kpa)	1128.77							
(St) Resistencia promedio del subconjunto acondicionado (Kpa)	1095.66							
(TSR) Relación de resistencia a la tensión indirecta (Stq/St*100) [%]	97.1%							

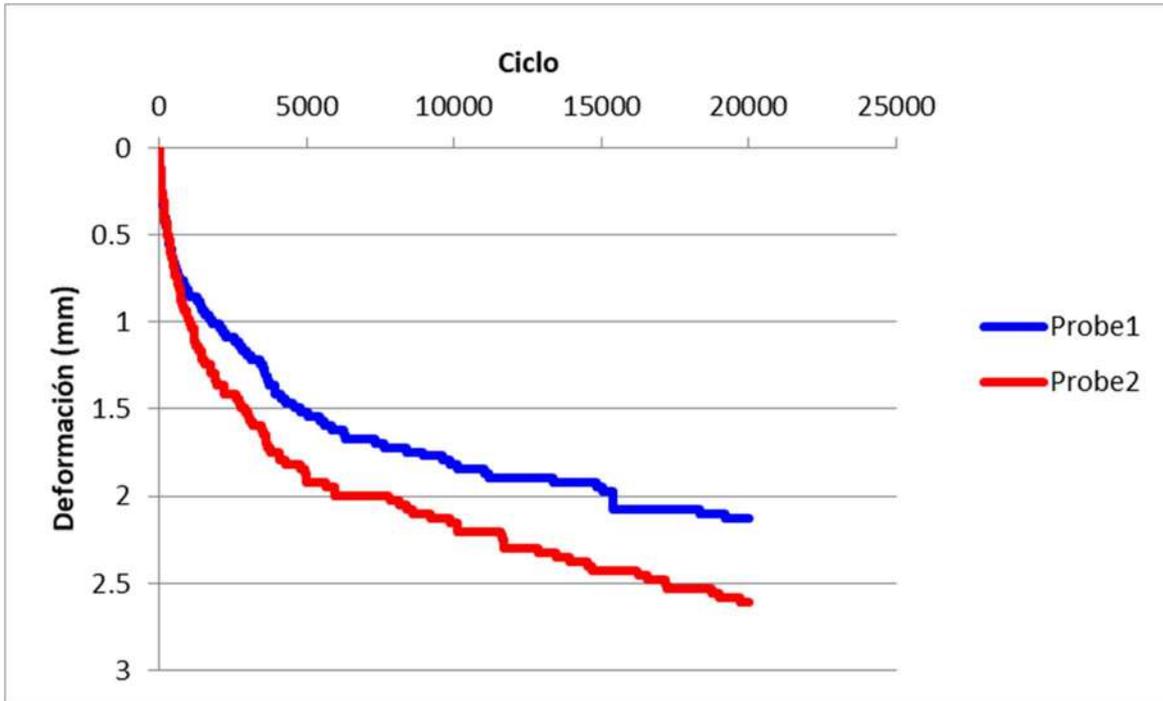
## Resultados de TSR de la mezcla SMA PG 76-22

RESISTENCIA DE LA MEZCLA ASFALTICA COMPACTADA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD POR MEDIO DE LA RELACION EN RESISTENCIA A LA TENSION INDIRECTA (TSR) ASTM D4867								
CONTENIDO DE ASFALTO CON RESPECTO AL AGREGADO			6.805					
Volumetría original			Subconjunto condicionado			Subconjunto no acondicionado		
Identificación del espécimen	CLAVE	UNIDAD	1 (4)	2 (5)	3 (6)	4 (7)	5 (8)	6 (9)
Díametro	D	mm	99.78	100.03	99.7	99.78	99.75	100.03
Espesor	t	mm	62.03	63.18	60.78	60.53	60.98	60.78
Masa espécimen seco	A	g	978.8	980.1	980.2	982.5	982.7	985.2
Masa Sat. Superficialmente seco	B	g	988.9	987.8	990.8	990.5	992.3	994.30
Masa espécimen Sumergido	C	g	544.5	542.3	545.2	542.9	545.2	546.4
Volumen (B-C)	E	cm <sup>3</sup>	444.4	445.5	445.6	447.6	447.1	447.9
Gravedad específica bruta (A/E)	Gmb	t/m <sup>3</sup>	2.203	2.200	2.200	2.195	2.198	2.200
Gravedad específica teórica máxima	Gmm	t/m <sup>3</sup>	2.375	2.375	2.375	2.375	2.375	2.375
Vacios (100(Gmm-Gmb)/Gmm)	H	%	7.26	7.37	7.38	7.58	7.46	7.39
Volumen de vacíos (H*E/100)	I	cm <sup>3</sup>	32.3	32.8	32.9	33.9	33.3	33.1
DESPUES DE PRESIÓN DE VACIO								
Masa Sat. Superficialmente seco	B'	g	1013.3	1020.5	1011.9			
Volumen de agua absorbida (B'-A)	J'	cm <sup>3</sup>	34.5	552.4	31.7			
Grado Saturación (100*J'/I)	S'	%	106.9	1682.8	77.8			
Masa espécimen sumergido	C'	g	554.0	556.2	559.8			
Volumen (B'-C')	E'	cm <sup>3</sup>	459.3	464.3	452.1			
Grado de expansión (100*(E'-E)/E)	Exp'	%	3.4	4.2	1.5			
DESPUES DE ACONDICIONAMIENTO								
Díametro, cm.	D''	mm	100.53	100.23	99.96			
Espesor, cm.	t''	mm	61.77	63.27	60.84			
Masa Sat. Superficialmente seco	B''	g	1013.3	1020.5	1011.9			
Masa espécimen sumergido	C''	g	554.0	556.2	559.8			
Volumen (B''- C'')	E''	cm <sup>3</sup>	459.3	464.3	452.1			
Volumen de agua absorbida (B''-A)	J''	cm <sup>3</sup>	34.5	40.4	31.7			
Grado de saturación (100*J''/I)	S''	cm <sup>3</sup>	106.9	123.1	96.4			
Grado de expansión (100*(E''-E)/E)	Exp''	%	3.4	4.2	1.5			
Carga	P	kg	915	904	893	936	932	918
Carga	P''	N	8973.1	8865.3	8757.4	9179.07	9139.84	9002.55
Esfuerzo en seco (2P / tD $\pi$ )	S1	kg/cm <sup>2</sup>				9.87	9.75	9.61
Esfuerzo en húmedo (2P'' / t''D $\pi$ )	S2	kg/cm <sup>2</sup>	9.38	9.08	9.35			
Esfuerzo en seco (2000*P / tD $\pi$ )	S1	kPa				967.53	956.57	942.66
Esfuerzo en húmedo (2000P'' / t''D $\pi$ )	S2	kPa	919.92	889.97	916.72			
(Sta) Resistencia promedio del subconjunto no acondicionado (Kpa)	955.59							
(St) Resistencia promedio del subconjunto acondicionado (Kpa)	908.87							
(TSR) Relación de resistencia a la tensión indirecta (Stq/St*100) [%]	95.1%							

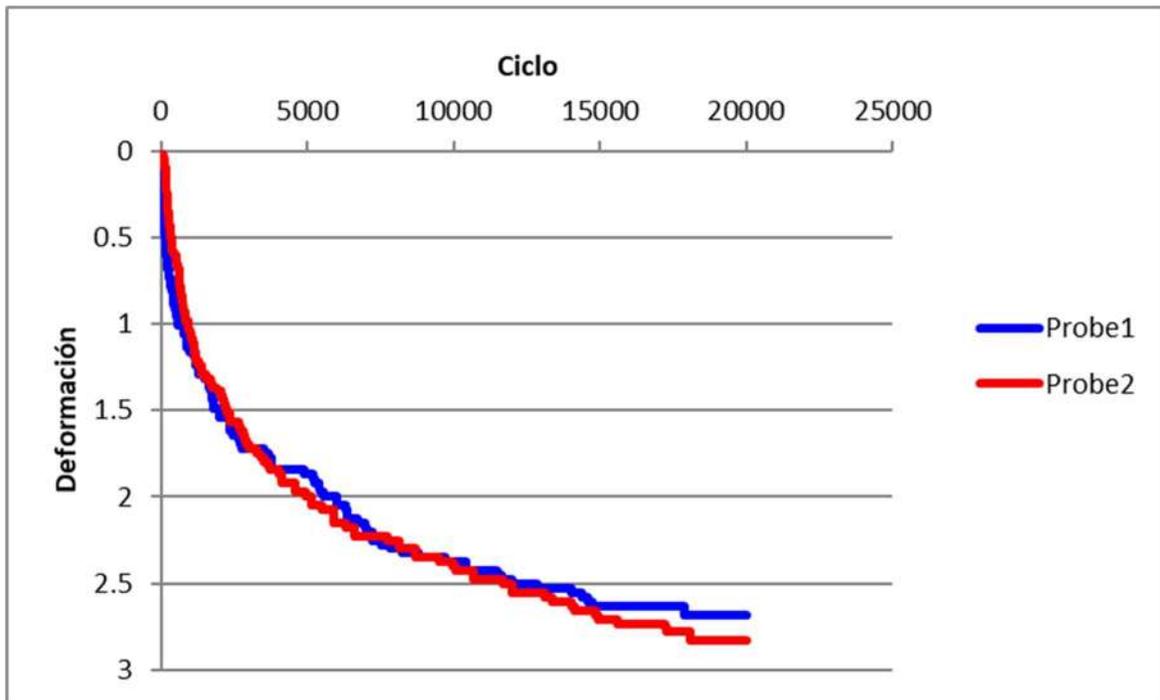
## Resultados de TSR de la mezcla Densa PG 76-22

RESISTENCIA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD POR MEDIO DE LA RELACIÓN EN RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA (TSR) ASTM D4867								
CONTENIDO DE ASFÁLTO CON RESPECTO AL AGREGADO			%		6.205			
Volumetría original			Subconjunto condicionado			Subconjunto no acondicionado		
Identificación del espécimen	CLAVE	UNIDAD	1 (2)	2 (4)	3 (5)	4 (6)	5 (7)	6 (3)
Díametro	D	mm	99.83	99.78	99.95	100.2	100.1	99.85
Espesor	t	mm	59.88	60.85	61	62.38	61.88	61.83
Masa espécimen seco	A	g	996.6	1012	1011.6	1025.1	1021	1010.3
Masa Sat. Superficialmente seco	B	g	1010.6	1020.2	1020.3	1041.3	1040	1017.30
Masa espécimen Sumergido	C	g	561.3	561.9	565.5	581.7	580.0	560.9
Volumen (B-C)	E	cm³	449.3	458.3	454.8	459.6	460.0	456.4
Gravedad específica bruta (A/E)	Gmb	t/m³	2.218	2.208	2.224	2.230	2.220	2.214
Gravedad específica teórica máxima	Gmm	t/m³	2.399	2.399	2.399	2.399	2.399	2.399
Vacios (100(Gmm-Gmb)/Gmm)	H	%	7.54	7.95	7.28	7.03	7.48	7.73
Volumen de vacíos (H*E/100)	I	cm³	33.9	36.5	33.1	32.3	34.4	35.3
DESPUES DE PRESIÓN DE VACIO								
Masa Sat. Superficialmente seco	B'	g	1022.9	1040.5	1037.9			
Volumen de agua absorbida (B'-A)	J'	cm³	26.3	552.4	26.3			
Grado Saturación (100*J'/I)	S'	%	77.6	1515.2	78.9			
Masa espécimen sumergido	C'	g	568.5	578.1	578.1			
Volumen (B'-C')	E'	cm³	454.4	462.4	459.8			
Grado de expansión (100*(E'-E)/E)	Exp'	%	1.1	0.9	1.1			
DESPUES DE ACONDICIONAMIENTO								
Díametro, cm.	D''	mm	100.05	100.25	100.1			
Espesor, cm.	t''	mm	60.23	61.13	61.2			
Masa Sat. Superficialmente seco	B''	g	1030.4	1047.4	1047.3			
Masa espécimen sumergido	C''	g	579.4	588.9	590.9			
Volumen (B''- C'')	E''	cm³	451.0	458.5	456.4			
Volumen de agua absorbida (B''-A)	J''	cm³	33.8	35.4	35.7			
Grado de saturación (100*J''/I)	S''	cm³	99.8	97.1	107.8			
Grado de expansión (100*(E''-E)/E)	Exp''	%	0.4	0.0	0.4			
Carga	P	kg	1179	1207	1232	1316	1213	1256
Carga	P''	N	11562.1	11836.7	12081.9	12905.62	11895.53	12317.22
Esfuerzo en seco (2P / tDπ)	S1	kg/cm²				13.40	12.47	12.95
Esfuerzo en húmedo (2P'' / t''Dπ)	S2	kg/cm²	12.46	12.54	12.80			
Esfuerzo en seco (2000*P / tDπ)	S1	kPa				1314.45	1222.58	1270.12
Esfuerzo en húmedo (2000P'' / t''Dπ)	S2	kPa	1221.48	1229.62	1255.53			
(Sta) Resistencia promedio del subconjunto no acondicionado (Kpa)			1269.05					
(St) Resistencia promedio del subconjunto acondicionado (Kpa)			1235.54					
(TSR) Relación de resistencia a la tensión indirecta (Stq/St''100) [%]			97.4%					

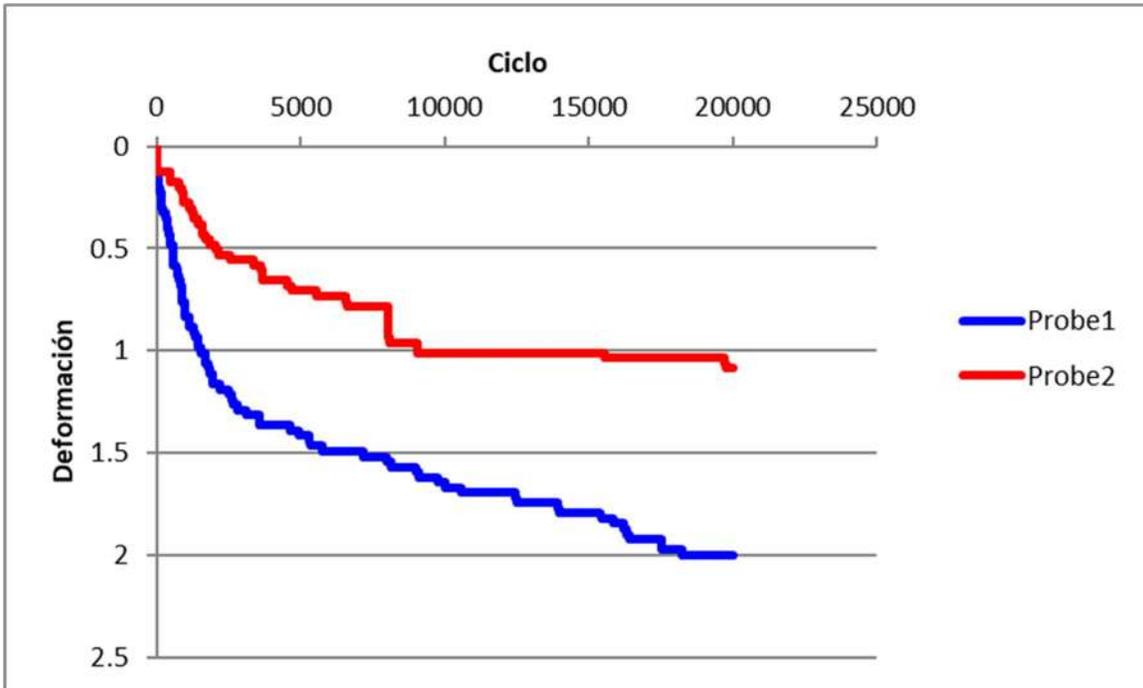
### SMA PG 64-22 RARX



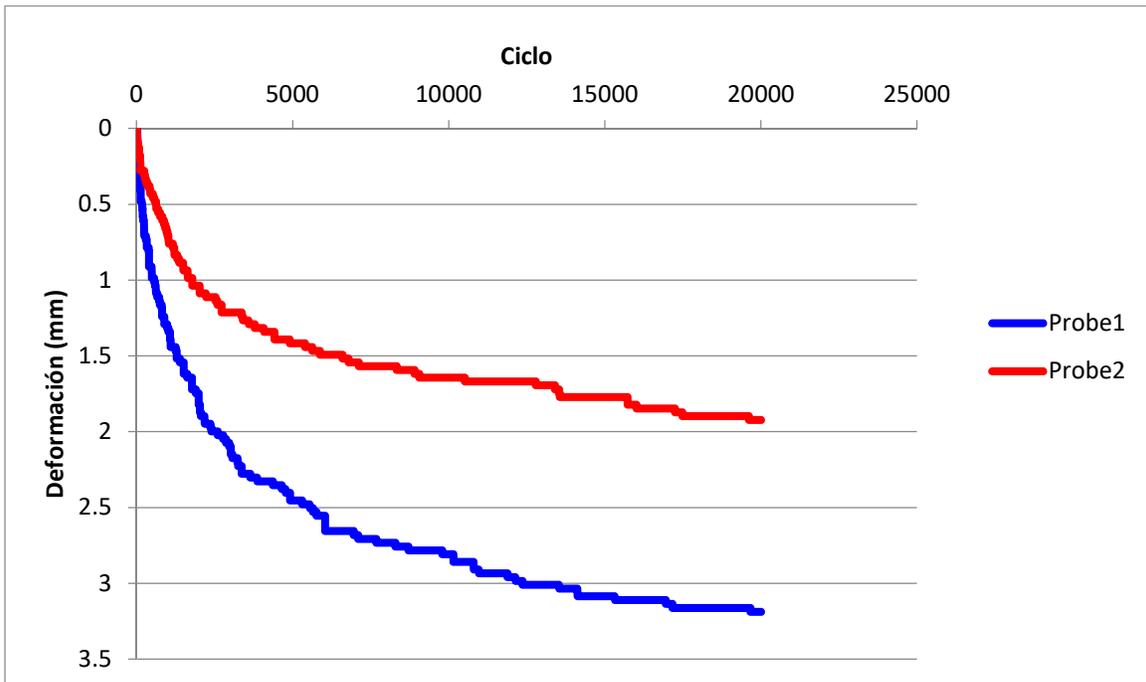
### SMA PG 64-22 HWT



### SMA PG 76-22 HWT



### Densa PG 64-22 HWT



Densa PG 64-22 RARX HWT

