



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

## Sustitución parcial del asfalto en una mezcla para pavimento a base de polímeros reciclados

Opción de titulación  
**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

**Presenta:**  
Eloy Parra Melgar

Dirigido por:  
Dra. Teresa López Lara

Dr. Teresa López Lara  
Presidente

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Secretario

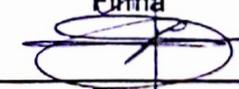
Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca  
Vocal

Dr. Horacio Delgado Alamilla  
Suplente

Dr. Francisco Javier García Rodríguez  
Suplente

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Manuel Toledano Ayala  
Director de la Facultad

  
\_\_\_\_\_  
Firma

  
\_\_\_\_\_  
Firma

  
\_\_\_\_\_  
Firma

  
\_\_\_\_\_  
Firma

  
\_\_\_\_\_  
Firma

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Septiembre 2018

## RESUMEN

Las carreteras desempeñan un papel crucial en el transporte de personas y bienes; sin embargo, su construcción implica impactos ambientales severos, debido a que, las técnicas y procesos usados tanto para la obtención del asfalto como para la elaboración de mezclas asfálticas, liberan una gran cantidad de gases a la atmósfera, que contribuyen de manera importante al calentamiento global. Debido a la limitación del petróleo, el aumento de los precios y el impacto sobre el medio ambiente, se desarrolló un aglutinante alternativo eficiente, rentable y respetuoso con el medio ambiente capaz de sustituir al asfalto. Esta investigación tuvo como objetivo explorar los beneficios potenciales del poliestireno para emplearlo como elemento principal del aglutinante debido a la versatilidad y reciclaje de este último. El reciclaje de este material soluciona el problema de la basura y puede garantizar un medio ambiente más limpio. Se realizaron pruebas de laboratorio basadas en los estándares AASHTO y ASTM para verificar las propiedades físicas y mecánicas. Los resultados se compararon con asfalto AC-20 como muestra de control para evaluar la viabilidad de la nueva mezcla. El resultado de esta investigación, muestra que, además de sustituir el 100% del asfalto, los valores a compresión y tensión son incrementados y la resistencia a la deformación aumenta sin presencia de agrietamientos superficiales por cambios de temperatura (3,100 Mpa). La mezcla demostró que los desechos utilizados después de un procesamiento adecuado mejoran los desempeños de los pavimentos y también resuelven problemas ambientales.

**Palabras Clave: Asfalto, Poliestireno Expandido, Sustitución, Reciclaje de Residuos, Resistencia.**

## **SUMMARY**

Roads play a crucial role in transporting people and goods; however, their construction involve harmful environmental impacts due to the techniques and processes used to obtain the asphalt as for the preparation of asphalt mixtures, release a large amount of gases into the atmosphere, which contribute significantly to warming global. Due to the limitation of oil, the increase in prices and the impact on the environment, an efficient, cost-effective and environmentally friendly alternative binder was developed capable of replacing asphalt. This research was to explore the potential benefits of recycled polystyrene as the main element of the binder due to the versatility and recyclability of the latter. The recycling of this material solves the issue of garbage and can ensure a cleaner environment. Laboratory tests based on AASHTO and ASTM standard were performed to verify physical and mechanics properties. Results were compared with AC-20 asphalt as control sample to assess the feasibility of new mixture. Outcome from this research shows that in addition to replacing 100% of asphalt, the compression and tension values improve and rutting resistance increases without the presence of surface cracking for changes in temperature (3,100 Mpa). The mixture showed that the waste used after adequate processing improves the performances of the pavements and also solves environmental problems.

**Keywords: Asphalt, Expanded Polystyrene, Replacement, Waste Recycling, Resistance.**

## **DEDICATORIA**

**Gracias, por la confianza y apoyo durante todo el periodo de estudio  
Familia Chávez Olvera, Parra Tondopó y Parra Melgar**

## **AGRADECIMIENTOS**

A través de estas líneas quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro por su apoyo para el desarrollo y fortalecimiento de este trabajo de investigación.

De igual manera, agradezco a la Dra. Teresa López Lara y al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza por la confianza, tiempo e información brindada para desarrollar y mejorar la investigación, así como al Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca por sus valiosas observaciones, las cuales, contribuyeron para alcanzar los objetivos trazados en este proyecto.

A los laboratorios de la Facultad de Ingeniería (UAQ), del Instituto Mexicano del Transporte y de la Universidad de Medellín, por haberme facilitado las herramientas y equipo necesario para efectuar las pruebas experimentales de la investigación.

A mis compañeros de generación de la Maestría en Vías Terrestres y Movilidad, por el simple hecho de haberlos conocido y haber forjado amistades con cada uno de ellos.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN</b> .....	3
<b>SUMMARY</b> .....	4
<b>DEDICATORIA</b> .....	5
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	6
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	9
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	11
<b>ÍNDICE DE ECUACIONES</b> .....	12
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	13
1.1 Descripción del problema.....	14
1.2 Justificación.....	15
1.3 Hipótesis .....	16
1.4 Objetivos .....	16
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	17
<b>2.1 Pavimentos</b> .....	17
2.1.1 Generalidades de los pavimentos .....	17
2.1.2 Tipos de pavimentos.....	18
2.1.3 Carpeta asfáltica.....	19
2.1.4 Influencia de los agregados pétreos.....	20
2.1.5 Permeabilidad en los pavimentos .....	21
<b>2.2 Asfaltos</b> .....	23
2.2.1 Generalidades de los asfalto .....	23
2.2.2 Producción del asfalto .....	24
2.2.3 Composición química del asfalto .....	26
2.2.3.1 Asfaltenos .....	27
2.2.3.2 Saturados .....	28
2.2.3.3 Aromáticos.....	28
2.2.3.4 Resinas o polares.....	29
<b>2.3 Polímeros</b> .....	29
2.3.1 Generalidades de los polímeros .....	30
2.3.2 Estructura de polímeros.....	30
2.3.3 Clasificación de polímeros.....	31

2.3.4 Polímeros reciclados .....	32
2.3.5 Poliestireno expandido .....	33
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1 Morfología y procesamiento del polímero reciclado .....</b>	<b>37</b>
3.1.1 Cadenas de reciclaje .....	37
3.1.2 Síntesis química .....	38
<b>3.2 Selección y preparación del agregado pétreo .....</b>	<b>39</b>
3.2.1 Selección y muestreo de materiales .....	39
3.2.2 Caracterización del agregado pétreo.....	40
<b>3.3 Ensayos de calidad .....</b>	<b>42</b>
3.3.1 Ensayo a compresión simple.....	42
3.3.2 Ensayo a tensión indirecta.....	43
3.3.3 Gravedad específica y densidad de la mezcla .....	44
3.3.4 Tasa de infiltración.....	46
3.3.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	47
3.3.5 Prueba cargada de hamburgo .....	48
3.3.6 Módulo dinámico.....	50
<b>3.4 Aplicación de la mezcla .....</b>	<b>52</b>
3.4.1 Tramo de prueba .....	52
<b>3.5 Resultados y discusión .....</b>	<b>56</b>
3.5.1 Polímero reciclado .....	56
3.5.2 Agregado pétreo .....	57
3.5.3 Compresión simple .....	57
3.5.4 Tensión indirecta .....	58
3.5.5 Gravedad específica y densidad .....	60
3.5.6 Tasa de infiltración.....	60
3.5.7 Microscopía de barrido .....	61
3.5.8 Rueda cargada de hamburgo .....	62
3.5.9 Módulo dinámico.....	64
3.5.10 Tramo de prueba .....	65
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>69</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Pág.
2.1	Estructura de pavimento flexible.....	19
2.2	Distribución de esfuerzos y presión vertical en pavimentos flexibles y rígidos .....	19
2.3	Agregado pétreo: (a) granulometría densa, (b) granulometría abierta .....	21
2.4	Esquema general en el diseño de pavimentos.....	22
2.5	Flujo real en los pavimento permeables .....	22
2.6	Refinería convencional .....	24
2.7	Estructura molecular de los asfaltos.....	26
2.8	Solubilidad de los asfaltenos .....	27
2.9	Estructura bidimensional de los tres modelos de asfaltenos (a1, a2, a3) .....	27
2.10	Moléculas saturadas, (a) Escualano y (b) Hopano.....	28
2.11	Estructura molecular del aromático. ....	28
2.12	Modelo micelar del asfalto (resinas).....	29
2.13	Clasificación de los polímeros a) lineal; b) ramificado y c) entrecruzado. ....	30
2.14	Clasificación de los polímeros a) naturales y b) sintéticos. ....	31
2.15	Poliestireno expandido nivel macroscópico.....	34
2.16	Poliestireno expandido nivel microscópico.....	34
2.17	Clasificación de partículas de poliestireno expandido. ....	35
3.1	Procedimiento metodológico. ....	36
3.2	Residuos de poliestireno expandido (a) material reciclado, (b) tratamiento (corte y trituración) y (c) partículas de tamaño homogéneo y libre de impurezas. ....	37
3.3	Reacción química del polímero (a) sustancias químicas, (b) agitación y reflujo continuo y (c) concentración del aglutinante. ....	38
3.4	Ubicación y zona geográfica del banco de materiales. ....	39
3.5	Muestreo (a) extracción e identificación y (b) transporte de los agregados. ....	40
3.6	Caracterización del agregado (a) cribado del material y (b) granulometría.....	41
3.7	Ensayos (a) desgaste de los ángeles y (b) partículas planas y alargadas.....	41
3.8	Compresión simple (a) preparación de probetas y (b) ensayo.....	42
3.9	Preparación de especímenes (a) polímero reciclado y (b) asfalto. ....	43
3.10	Tensión indirecta (a) polímero reciclado y (b) asfalto.....	44
3.11	Gravedad específica y densidad (a) peso seco y (b) peso sumergido.....	46
3.12	Tasa de infiltración (a) elaboración de la probeta y (b) prototipo. ....	46

3.13	Instalación de muestra para determinar la tasa de infiltración.....	47
3.14	Microscopía (a) Equipo Hitachi TM-100 y (b) preparación de muestra. ....	47
3.15	Microscopía (a) colocación de muestra y (b) desarrollo de imágenes. ....	58
3.16	Rueda cargada de Hamburgo (a) especímenes y (b) configuración de equipo. ....	48
3.17	Pendiente típica de la deformación permanente en mezclas asfálticas. ....	49
3.18	Desarrollo de la prueba (20,000 ciclos). ....	49
3.19	Equipo (a) compactador giratorio y (b) muestras de control.....	50
3.20	Alineamiento y espaciamiento de pines. ....	50
3.21	Equipo electrohidráulico con generador de onda. ....	51
3.22	Módulo dinámico (muestra de control). ....	51
3.23	Ubicación del tramo carretero.....	52
3.24	Deterioro del pavimento.....	53
3.25	Señalamiento y dispositivos de protección.....	53
3.26	Corte perimetral de la superficie de rodamiento.....	54
3.27	Limpieza y delimitación del área dañada.....	54
3.28	Aplicación de la mezcla .....	55
3.29	Compactación de la mezcla.....	55
3.30	Aglutinante elaborado con residuos de poliestireno expandido .....	56
3.31	Resistencia a compresión simple de las mezclas .....	58
3.32	Resistencia a tracción indirecta de las mezclas .....	59
3.33	Ruptura de las muestras (a) mezcla reciclada y (b) mezclas asfáltica.....	59
3.34	Desprendimientos (a) mezcla reciclada y (b) mezclas asfáltica .....	60
3.35	Permeabilidad de la mezcla reciclada .....	61
3.36	Microscopía de barrio de polímero puro .....	62
3.37	Microscopía de barrido de la mezcla reciclada.....	62
3.38	Profundidad de rodera en mezcla reciclada y asfáltica .....	63
3.39	Profundidad de ahuellamiento de la mezcla asfáltica.....	63
3.40	Profundidad de ahuellamiento de la mezcla reciclada .....	64
3.41	Módulo dinámico de la mezcla reciclada y asfáltica .....	65
3.42	Bacheo aislado con mezcla reciclada.....	66
3.43	Apertura al tránsito .....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Pág.</b>
2.1	Características de los polímeros utilizados para modificar el asfalto .....	33
3.1	Densidad relativa del agua y factor de conversión .....	45
3.2	Resultados de la caracterización del agregado pétreo.....	57

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación	Pág.
1 Resistencia a la compresión simple .....	42
2 Resistencia a la resistencia indirecta.....	43
3 Gravedad aparente del parafilm .....	44
4 Gravedad específica del parafilm .....	45
5 Gravedad específica de la muestra .....	45
6 Densidad de la muestra.....	45
7 Tasa de infiltración.....	46

# 1. INTRODUCCIÓN

Las carreteras son piezas clave en el desarrollo económico y social en cualquier país: por ello, Peng *et al.* (2017) junto con Gichaga (2016) consideran importante analizar y comparar, como las carreteras, proporcionan la oportunidad para el desarrollo económico y la urbanización e industrialización de una región.

De acuerdo con Costa *et al.* (2017) el asfalto, es el material con mayor demanda para la construcción de carreteras; el cual Balaguera *et al.* (2018) lo definen como un sistema coloidal, de origen natural con alta viscosidad y características elásticas, constituido por saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos. El consumo mundial del asfalto, es de aproximadamente 102 millones de toneladas por año, de los cuales el 85% es utilizado para la infraestructura carretera, Granados *et al.* (2015). Ahora bien, las carreteras de México, Wang *et al.* (2018) junto con Padilha y Ghisi (2017) estiman que en México más del 96% de las carreteras pavimentadas están cubiertas con este tipo de material, Estados Unidos y Europa con el 92% y 90% respectivamente.

El desempeño de los asfaltos en la construcción de pavimentos fue satisfactorio durante varias décadas. Sin embargo, Wang *et al.* (2017) sostienen que al día de hoy, se han presentado múltiples factores que hacen que el asfalto por sí solo no sea apto para su utilización, razones, que han sido atribuidas principalmente al incremento de los niveles de tráfico y a las condiciones climatológicas extremas. Por lo tanto, la modificación del asfalto con polímeros naturales o sintéticos de acuerdo con Yongbing *et al.* (2017), es la solución principal utilizada para resolver este problema, asegurando la durabilidad necesaria de las carreteras del mundo.

En suma de estos acontecimientos, surgió la idea de desarrollar un proceso metodológico para elaborar con materiales reciclados un aglutinante alternativo capaz de sustituir al uso del asfalto. Este producto, ofrecerá pavimentos con respuesta mecánica superior a las tradicionales y características únicas que puedan gestionar aspectos necesarios para preservar e impulsar la sustentabilidad en el área de los pavimentos.

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El asfalto ha sido destinado para la construcción de caminos desde la antigüedad ya que contiene características que lo acreditan como un material capaz de unir material pétreo; sin embargo, actualmente las mezclas asfálticas (no modificadas) ya no ofrecen la resistencia suficiente para soportar los cambios climáticos estrictos, el crecimiento de los volúmenes de tráfico y el aumento de cargas vehiculares. Tales factores, demuestran la necesidad de desarrollar aglutinantes alternativos con características mejoradas en comparación con los convencionales.

El uso de este material, de cierta manera se ha vuelto en un gran problema para el entorno ambiental y la salud de los trabajadores de la construcción, debido a que, el asfalto necesita ser calentado a una temperatura de 165-200°C. Este proceso arroja 0.048 KgCO<sub>2</sub>eq/kg a la atmósfera, un valor muy alto considerando que 43.7 toneladas de asfalto son requeridas para solo un kilómetro de carretera, lo que implica una emisión de 2.13 CO<sub>2</sub>eq/ton.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

La importancia de esta investigación, se debe, a la necesidad de estudiar y mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los pavimentos, como lo demuestran Polacco *et al.* (2015), donde nos plasman que la técnica de adicionar polímeros a las mezclas ha permitido obtener diseños adecuados que un asfalto por sí solo no resistiría, es decir, la función principal de los polímeros es el mejorar el comportamiento físico y mecánico.

Ahora bien, Gómez *et al.* (2016) afirman que el adicionar o incorporar elementos reciclados a los materiales de construcción habituales, además de ocasionar beneficios económicos y ambientales, se consiguen en la mayoría de los casos, incrementos en la calidad y las propiedades mecánicas en comparación con los tradicionales.

La mezcla elaborada con poliestireno expandido reciclado, fue propuesta con la intención de sustituir al asfalto en los pavimentos flexibles, debido a que, actualmente las técnicas y procesos usados tanto para la obtención de asfalto como para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, liberan una gran cantidad de gases a la atmosfera, que contribuyen de manera importante al calentamiento global. El uso de este material, como elemento principal de la mezcla, además de reutilizar grandes volúmenes de basura que demoran cientos de años en degradarse, consigue una reducción considerable en las emisiones de dióxido de carbono y ahorro de combustibles energéticos.

### **1.3 HIPÓTESIS**

La sustitución del 80% del asfalto por polímeros reciclados en una mezcla para pavimentos no afectará la resistencia a la tensión y al ahuellamiento por lo que esta sustitución aumenta su punto de esfuerzo en el cual ocurren las deformaciones permanentes.

### **1.4 OBJETIVO**

Igualar las propiedades mecánicas de una mezcla a base de polímeros reciclados con las que presentan las mezclas asfálticas, así como, disminuir su tendencia a las deformaciones permanentes de la primera.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

En esta sección, se discuten aspectos y características de los pavimentos flexibles, centrándonos en la composición y origen del asfalto y su importancia que tienen en su diseño. A la vez un acercamiento a las principales características de los polímeros con el objetivo de sustentar la implementación de estos últimos en el diseño del primero mediante la funcionalización del asfalto-polímero.

### **2.1 PAVIMENTOS**

Los pavimentos, además de conducir a la expansión de bienes y servicios, contribuyen de cierta manera al desarrollo económico y a la transformación regional. Por lo que, el objetivo principal de este capítulo, es explorar los diferentes tipos de pavimentos, así como, su estructuración y distribución esfuerzos, considerando que se examinarán los siguientes temas no solo para comprender las propiedades mecánicas sino también para interpretar el comportamiento y funcionamiento de la estructura.

#### **2.1.1 GENERALIDADES DE LOS PAVIMENTOS**

La infraestructura carretera de acuerdo con Saidi *et al.* (2018) son sistemas que organizan u gestionan sistemas complejos de flujos vehiculares, movimiento e intercambio de bienes y servicios. Por lo que Gichaga (2016), asegura que la expansión de la infraestructura vial además de brindar seguridad y accesibilidad a la población, contribuye sustancialmente a la industrialización y crecimiento económico de cualquier país.

Por otro parte, Peng *et al.* (2017) afirma que la expansión de las redes de infraestructura vial conducen a una mejora en el transporte y entrega de bienes y servicios, catalizando una distribución según su nivel de movilidad y accesibilidad. Ahora bien, Won *et al.* (2015), postula que las conexiones alcanzadas por la infraestructura carretera, generan tres tipos de impactos caracterizados en tres tipos: directo, indirecto y secundario. Los impactos directos son los relacionados con el servicio mejorado y la accesibilidad, incluido la inversión extranjera y extensión urbana. Para proveer paso a los indirectos, los cuales están dirigidos a la comunidad mediadora y el cambio de política hacia la percepción social y cambios secundarios en comportamiento individual.

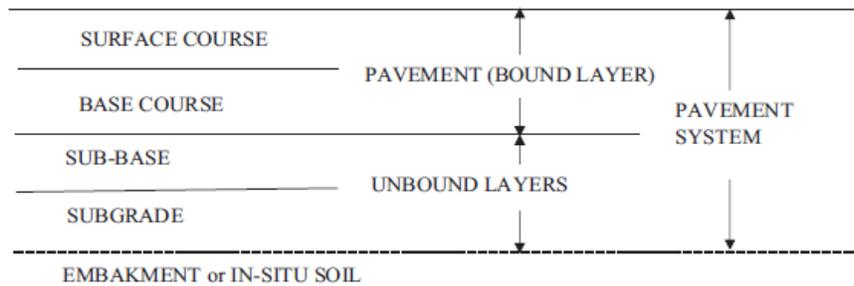
Hickman (2015), define a un pavimento como “*el conjunto de capas de materiales tratados o no, colocados sobre terrenos adecuados, brindando en todo momento una calidad, comodidad y seguridad en los tiempos de traslado*”. Las cuales y de acuerdo con Santos y Ferreira (2012) deben ser planeadas y diseñadas para soportar no solo las cargas vehiculares sino también las condiciones climatológicas extremas, con el propósito de maximizar la seguridad y calidad de la estructura.

Rondón *et al.* (2007), consideran que para que un pavimento cumpla adecuadamente sus funciones, la mezcla con la que se elabora la superficie de rodamiento debe adquirir las siguientes condiciones:

- Resistencia a la fisuración y susceptibilidad térmica.
- Resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento).
- Coeficiente de fricción (adecuado para evitar el derrape de los vehículos).
- Adherencia entre los agregados pétreos.
- Adherencia entre la carpeta y la base o sub-base.
- Cohesividad.
- Resistencia al envejecimiento.
- Resistencia a la fatiga.
- Larga vida de diseño con bajo costo de mantenimiento.

### **2.1.2 TIPOS DE PAVIMENTOS**

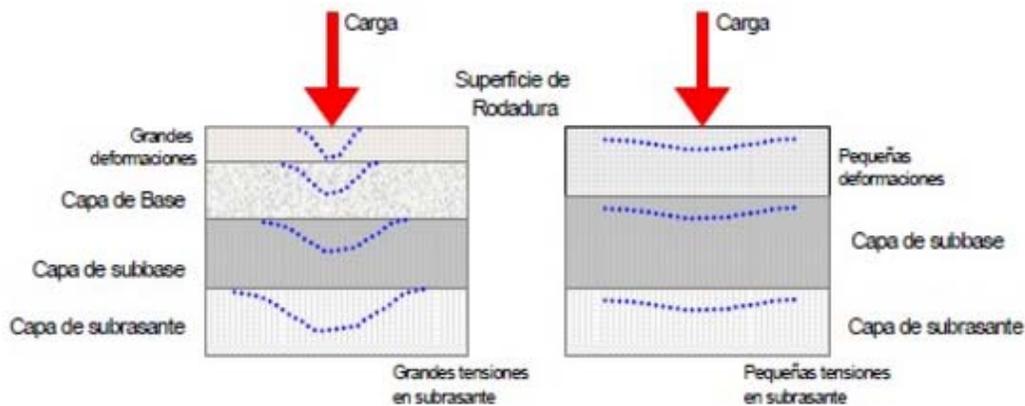
Pradeep *et al.* (2018), señalan que el objetivo principal de un pavimento es distribuir las cargas producidas por los vehículos a la subrasante. Por lo que Padilha y Ghisi (2017), sostienen que existen tres tipos de pavimentos (ver Figura 2.1), es decir, flexible (pavimento de asfalto), rígido (pavimento de hormigón de cemento Portland) y compuesto (capas flexibles y rígidas en el mismo pavimento).



**Figura 2.1 Estructura de pavimento flexible.**

Fuente: Pradeep *et al.* (2018).

Montejo (2002), sostiene que los pavimentos rígidos y flexibles no solo difieren del material constituido, sino también en la forma en que cada estructura distribuye los esfuerzos y la presión vertical sobre la subrasante (ver Figura 2.2). Razón por la cual Solanki y Zaman (2017), consideran que la presencia de capas estabilizadas en un pavimento, generará que la presión sea más neutra sobre la subrasante en comparación con una estructura convencional.



**Figura 2.2 Distribución de esfuerzos y presión vertical en pavimentos flexibles y rígidos.**

Fuente: Montejo (2002).

### 2.1.3 CARPETA ASFÁLTICA

Padilha y Ghisi (2017) identifica a la estructura de los pavimentos flexibles en cuatro capas, denominadas como: subrasante, subbase, base y capa de superficie, este conjunto de capas constituye la conformación de la estructura.

Sokon *et al.* (2016) especifican que un segmento carretero, además de aumentar la competitividad económica, debe ofrecer a los usuarios, superficies de rodamiento cómodas, rápidas y seguras en los tiempos de traslado, por lo que Chávez *et al.* (2011) recomiendan que la carpeta asfáltica no solo sea diseñada de acuerdo a los volúmenes de demanda sino también bajo las condiciones climatológicas reales con una planeación social, urbanística y ambiental.

Balaguera *et al.* (2018) junto Reyes (2009) asimilan al asfalto como el elemento básico en la construcción de estructuras, debido a su composición y capacidad para agrupar al agregado pétreo de un forma estable y resistente ante las cargas vehiculares y los agentes climatológicos.

Por otro lado Reyes *et al.* (2013) consideran dos aspectos básicos para el diseño de la carpeta asfáltica:

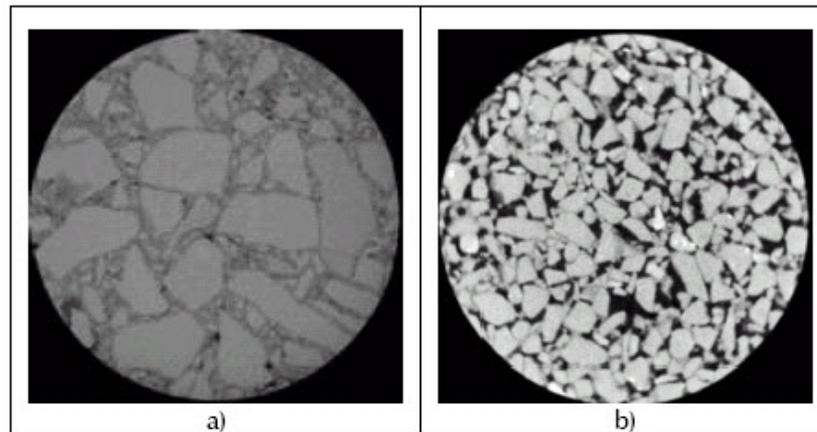
- **La Función Resistente:** determina los materiales y los espesores de las capas que se han de emplear en su construcción.
- **La Finalidad:** determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del firme, para que resulten seguras y confortables.

#### **2.1.4 INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS**

De acuerdo con Golalipour *et al.* (2012) los agregados son uno de los materiales de construcción clave utilizados en la industria de la construcción y la mayor parte de un pavimento flexible. Por lo tanto, las características del agregado afectan de manera impresionante el rendimiento de los pavimentos asfálticos.

El agregado mineral constituye aproximadamente el 95% de la mezcla asfáltica en peso. Por lo cual Chen *et al.* (2005) han demostrado que las características de los agregados, como el tamaño de partícula, la forma y la textura, influyen en el rendimiento y la capacidad de servicio del pavimento.

El conocimiento de las propiedades y la distribución granulométrica es crucial en el diseño de pavimentos de alta calidad, por lo que Álvarez *et al.* (2008), muestran el dominio de los agregados en el desempeño de la mezclas, dado que, la distribución granulométrica (Figura 2.3) además de intervenir en los valores de la deformación permanente ayuda a la transferencia de esfuerzos a las capas inferiores.

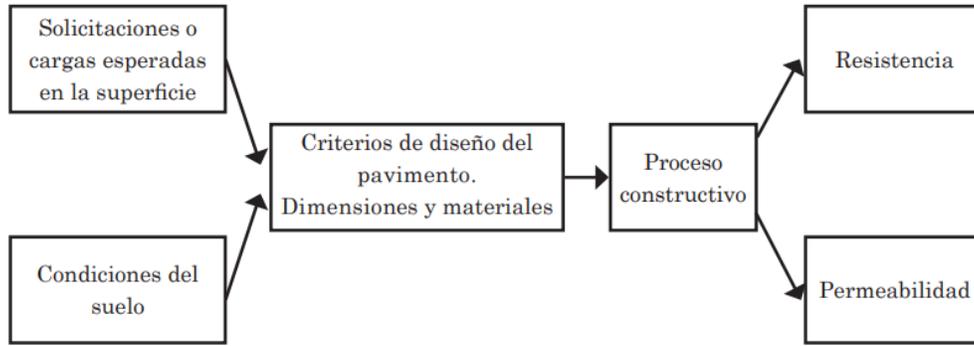


**Figura 2.3 Agregado pétreo: (a) granulometría densa, (b) granulometría abierta.**  
Fuente: Álvarez *et al.* (2008).

### 2.1.5 PERMEABILIDAD EN LOS PAVIMENTOS

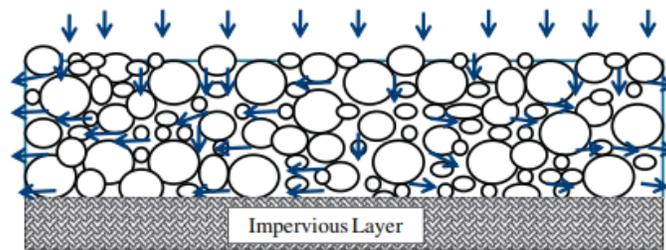
La penetración del agua y otros fluidos a las estructuras de acuerdo con Muhammad *et al.* (2015) puede provocar degradación y otros problemas estéticos que acortan la vida útil de la estructura. Por lo que Cárdenas *et al.* (2017), recomiendan en el diseño de los pavimentos, por un lado, en identificar las cargas producidas por los vehículos condiciones, y, por otro, en seleccionar los materiales con los que se dimensionan y construyen las componentes para determinar la resistencia y grado de permeabilidad (ver Figura 2.4).

A pesar de existir infinidad de aditivos impermeabilizantes para evitar deterioros por humedad, Muhammad *et al.* (2015) sugieren optar por sistemas permeables con el objetivo de evitar una gran cantidad de costos de mantenimiento y reparación gracias a su actividad y conductividad hidráulica.



**Figura 2.4 Esquema general en el diseño de pavimentos.**  
Fuente: Cárdenas *et al.* (2017).

Los sistemas permeables de acuerdo con Hamzah *et al.* (2012) ofrecen condiciones de conducción silenciosas, seguras y cómodas, principalmente para las carreteras de alta velocidad. Los altos vacíos de aire interconectados en esta mezcla (ver Figura 2.5) confieren sus enormes beneficios en comparación con la mezcla asfálticas tradicionales, que incluye la prevención del deslizamiento en agua; reducción de ruidos y salpicaduras y pulverizaciones, reducción del riesgo de deslizamiento en húmedo y mejora de la visibilidad de las marcas en el pavimento, especialmente durante la noche y las condiciones meteorológicas húmedas.



**Figura 2.5 Flujo real en los pavimento permeables.**  
Fuente: Hamzah *et al.* (2012).

Kyung *et al.* (2017) definen a la permeabilidad como la capacidad que posee un material para transferir líquidos a través de una red de poros completamente suturada bajo un gradiente de presión. Sin embargo, Vélez (2010) asegura que la permeabilidad no es una función simple de la porosidad ya que los poros se encuentren interrelacionados; es decir, que para que los niveles de porosidad, la estructura puede tener diferentes valores de permeabilidad si sus poros se interconectan en forma ininterrumpida o no.

Ahora bien, Cárdenas *et al.* (2017) consideran que los pavimentos permeables forman parte del conjunto de medidas que pueden llevarse a cabo para atender criterios de sustentabilidad ambiental en la industria de la construcción, en particular los relacionados con la conservación, el aprovechamiento y manejo de las aguas pluviales. Por lo que, el Instituto Mexicano de Cemento y del Concreto (IMCYC) establece un rango entre 0.20 y 0.54 cm/seg para ser considerado como pavimento permeable.

## **2.2 ASFALTOS**

En este apartado, se muestra información relacionada de manera general no solo el origen y su definición del asfalto, sino también la composición del elemento con la finalidad de comprender e igualar las características y comportamientos del material propuesto.

### **2.2.1 GENERALIDADES DE LOS ASFALTOS**

De acuerdo con Jaimes (2012) el petróleo es un mineral de origen fósil, producto de las transformaciones de materias orgánicas procedentes del zooplancton y de las algas depositadas en grandes cantidades en los fondos marinos o zonas lacustres del pasado geológico, llamados yacimientos petrolíferos. A estos depósitos, Varjani (2017) y Lv *et al.* (2016) los describen como entornos de altas temperaturas y presión, con salinidad bajo condiciones estrictamente anóxicas, con grandes contenidos de sustancias orgánicas (alcanos, alquenos, cicloalcanos, hidrocarburos aromáticos, entre otros en menor cantidad) y compuestos inorgánicos (sulfato y nitrato).

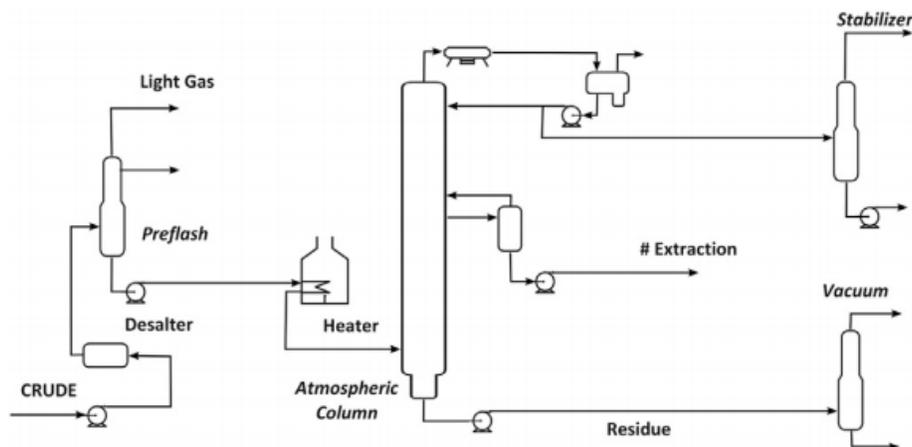
Por otro lado Xu y Wang (2016) deducen que el incremento del consumo del material se derivó a partir del auge de la industria automovilística y las ventajas que tiene este material para soportar los esfuerzos en la infraestructura carretera y aeroportuaria, teniendo de acuerdo con Reyes *et al.* (2013) proporcionar una íntima unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos, mejorando la capacidad portante de la estructura.

La *American Society for Testing Materials* en la normatividad ASTM-D8-11, define al asfalto como un material pegajoso de color marrón oscuro o negro compuesto por una mezcla de productos bituminosos que se encuentran en la naturaleza o se obtienen en el procesamiento del petróleo. Cárdenas y Fonseca (2009) consideran a este material como un elemento viscoelástico, debido a que, exhibe características viscosas y elásticas simultáneamente, con una postura intermedia entre el sólido de Hooke (elástico) y el líquido de Newton (viscoso).

## 2.2.2 PRODUCCIÓN DEL ASFALTO

La industria de la refinación es estratégica para la economía, ya que ofrece la oportunidad de agregar valor a los destilados. A los derivados del petróleo, Romo (2016) los considera como una fuente de abastecimiento de un sinnúmero de actividades que produce el ser humano (transporte, generación de electricidad y actividades que demandan calor en sus procesos).

Ahora bien, la transformación del petróleo de acuerdo con Hormaeche *et al.* (2016), está constituida por colosales plantas de producción continua (Figura 2.6), en las que el hidrocarburo es procesado físicamente y químicamente para producir desde compuestos muy livianos hasta los más pesados como los asfaltos. El proceso físico de separación Lawal y Zhang (2016), lo denominan destilación fraccionada y los catalogan en base a la volatilidad y puntos de ebullición.



**Figura 2.6 Refinería convencional.**  
Fuente: Sotelo *et al.* (2017).

La operación fundamental para la refinación del petróleo, Sotelo *et al.* (2017) la describen como una serie de etapas o tratamientos químicos para separar en varias fracciones de acuerdo a sus fines, de la siguiente manera:

1. **Preflash:** se eliminan los componentes más volátiles del crudo; esto para evitar el llanto en la columna de destilación atmosférica.

2. **Atmosférico:** el petróleo crudo se calienta hasta 338.4 ° C por un horno. El proceso de destilación opera a una presión constante de 104 kPa, ligeramente por encima del valor de presión atmosférica. El petróleo crudo se fracciona en cinco cortes, p. nafta, queroseno, diésel, gasóleo atmosférico (AGO) y residuos atmosféricos.

3. **Estabilizador:** el producto líquido (nafta) se trata a través de una columna para separar el gas del petróleo, operando a una presión constante de 1 030 kPa. En esta etapa, se obtienen gas combustible, GLP (gas de petróleo licuado) y nafta estabilizada.

4. **Destilación al vacío:** utilizando la carga no vaporizada de petróleo crudo de la etapa atmosférica, la columna opera a una presión constante de 2 kPa.

Ahora bien, con el fin de identificar los productos del hidrocarburo, se utilizó la clasificación propuesta de Mora y Marbot (2010), para los puntos de ebullición de los diferentes productos resultantes de la destilación:

- Gas natural o gas acompañante (temperatura de ebullición < 30 °C).
- Nafta ligera (30 a 80 °C). Nafta pesada (80 – 150 °C).
- Turbo combustible y queroseno (150-260 °C).
- Diésel o gasóleo (260 y 350 °C).
- Gasóleo de vacío (350 – 425 °C).
- Gasóleo pesado de vacío (425 – 510 °C).
- Asfaltos (temperatura de ebullición > 510 °C).

### 2.2.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ASFALTO

La composición química del asfalto, de acuerdo con Allen *et al.* (2012) es muy variada, debido a que, básicamente está constituida por mezclas extremadamente complejas de hidrocarburos, heteroátomos y metales que se combinan para formar moléculas únicas. La composición específica de un asfalto, en particular, dependerá de la procedencia del petróleo crudo del cual procede.

Por ello y debido a la complejidad del material, Oyekunle (2006) adopta el modelo micelar para configurar la estructura del asfalto y proveer la separación de este elemento en tres amplios grupos del tipo: aromáticos polinucleares y moléculas heteroaromáticas (asfaltenos), hidrocarburos nafto-aromáticos viscosos (aceites pesados) y compuestos heterocíclicos y polares (resinas).

Ahora bien, Huaquan *et al.* (2017) y Puello *et al.* (2009) afirman que la funcionalidad de las moléculas se clasifica en diferentes clases de acuerdo a su polaridad, aromaticidad, saturación y tamaño, considerando que las clases específicas son: los asfaltenos, aromáticos polares, nafténicos y saturados (Figura 2.7).

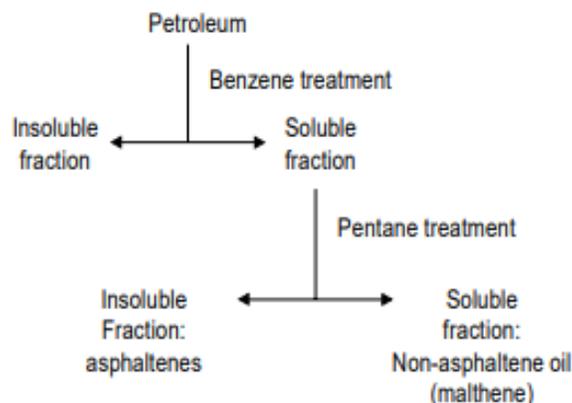


**Figura 2.7 Estructura molecular de los asfaltos.**

Fuente: Li y Greenfield (2013).

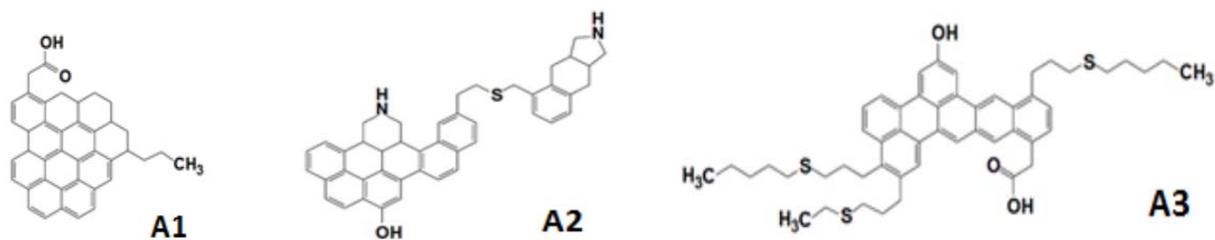
### 2.2.3.1 ASFALTENOS

Zorzenao *et al.* (2018) junto con Vargas y Sulroca (2015) definen a los asfaltenos, como mezclas compuestas de alto peso molecular, con anillos aromáticos enlazados a cadenas alquílicas con mezclas heterocíclicas que contienen nitrógeno, azufre y oxígeno, siendo insolubles en alcohol y soluble en aceite de trementina (Figura 2.8).



**Figura 2.8 Solubilidad de los asfaltenos.**  
Fuente: Pineda y Mestas (2001).

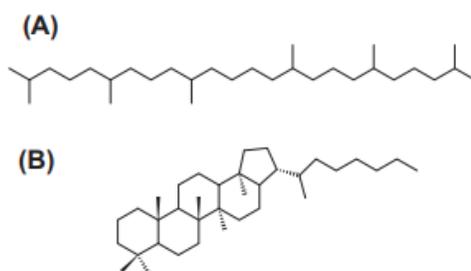
Debido a la complejidad del hidrocarburo, la caracterización molecular de los asfaltenos se tomó el modelo estructura propuesto por Yaseen y Mansoori (2017), donde nos muestra la información suficiente acerca de la estructura bidimensional de los asfaltenos (Figura 2.9).



**Figura 2.9 Estructura bidimensional de los tres modelos de asfaltenos (a1, a2, a3).**  
Fuente: Yaseen y Mansoori (2017).

### 2.2.3.2 SATURADOS

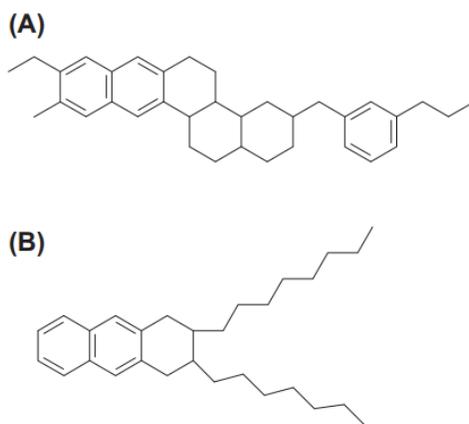
Los saturados de acuerdo con Li y Greenfield (2013) son los más ligeros que los asfaltenos y la estructura Lu *et al.* (2008) la representan mediante fracciones saturadas en escualanos u hopanos (Figura 2.10).



**Figura 2.10 Moléculas saturadas, (a) Escualano y (a) Hopano.**  
Fuente: Li y Greenfield (2013).

### 2.2.3.3 AROMÁTICOS

Los aromáticos, Múnera y Ossa (2014) afirma que es el componente más abundante del asfalto, debido a que, representan desde 30% al 45 % de una muestra, con una gama de compuestos de acuerdo con Galeana y Wax (2000) del tipo: parafínicos, nafténicos y aromáticos (Figura 2.11), los cuales son hidrocarburos de bajo peso molecular con una polaridad mínima.



**Figura 2.11 Estructura molecular del aromático.**  
Fuente: Li y Greenfield (2013).

#### 2.2.3.4 RESINAS O POLARES

Li y Greenfield (2013), consideran que las resinas además de tener una elevada proporción de hidrogeno y carbono también contienen pequeñas cantidades de oxígeno, azufre y nitrógeno, con pesos moleculares entre 500 y 50,000 y un tamaño de partícula de entre 1 y 5 mm (Figura 2.12).

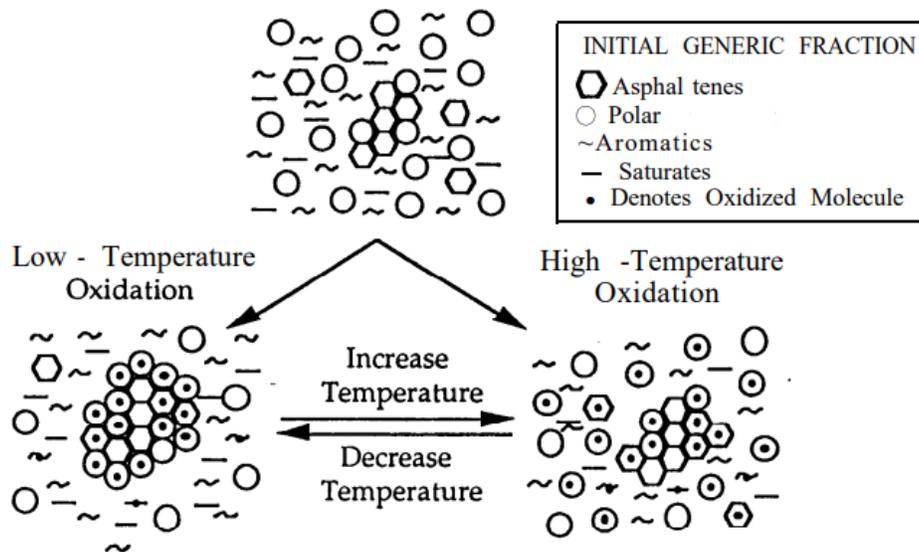


Figura 2.12 Modelo micelar del asfalto (resinas).  
Fuente: Jones y Kennedy (1991).

### 2.3 POLÍMEROS

Durante las últimas décadas, la cantidad de vehículos así como la velocidad y carga del tráfico ha aumentado drásticamente. Esta sobrecarga repentina y no planificada además de acortar fuertemente la vida útil de los pavimentos ha incrementado no solo los costos de mantenimiento sino también la seguridad de los usuarios. Para limitar el deterioro de los pavimentos, es necesario mejorar la calidad y el rendimiento de los pavimentos mediante la adición de polímeros. Por lo tanto, la finalidad de este capítulo, es comprender la composición y estructura de los polímeros para producir y desarrollar un nuevo aglutinante.

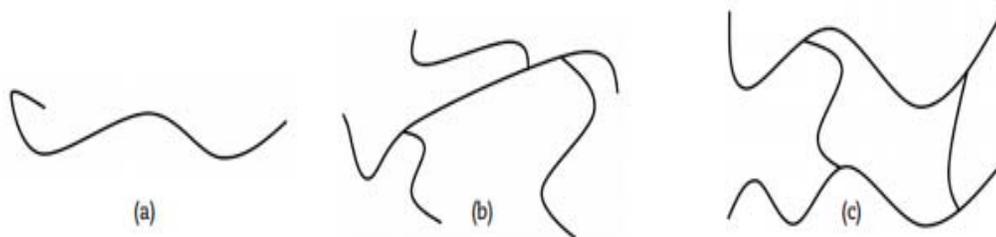
### 2.3.1 GENERALIDADES DE LOS POLÍMEROS

Hoy en día, los polímeros sintéticos se utilizan en una variedad de aplicaciones que cubren casi todas las áreas de la vida humana, ya que, de acuerdo con Podzimek (2017) pueden reemplazar los materiales convencionales con las propiedades en muchos aspectos por encima de los materiales clásicos. La baja densidad, la posibilidad de ajustar las propiedades a las aplicaciones requeridas, la resistencia a la humedad y los productos químicos, y la fácil trabajabilidad son las principales ventajas de los polímeros sintéticos.

Ahora bien Costa *et al.* (2017), deducen que los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utiliza desde el año 1843, con el propósito de mejorar las características que presentan los pavimentos flexibles cuando experimentan niveles elevados de tránsito y gradientes de temperatura extremos. Por lo que Polacco *et al.* (2015), afirman que esta adición es con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas y reológicas, como son: la susceptibilidad térmica, rigidez y resistencia al envejecimiento y deformaciones plásticas.

### 2.3.2 ESTRUCTURA DE POLÍMEROS

Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión de muchas unidades pequeñas, denominadas monómeros. Una sola molécula de polímero puede constar de cientos a un millón de monómeros, por lo que, Coreño y Méndez (2010) caracterizan la estructura de acuerdo al ordenamiento molecular: lineal, ramificado o entrecruzado (ver Figura 2.13).

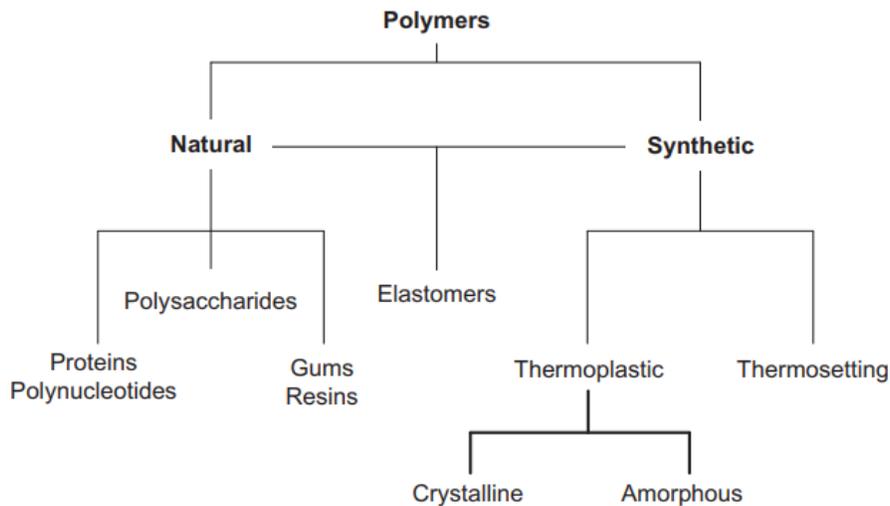


**Figura 2.13 Clasificación de los polímeros a) lineal; b) ramificado y c) entrecruzado.**  
Fuente: Coreño y Méndez (2010).

De acuerdo con Pethrick (2013), existen enlaces covalentes para mantener unidos los átomos en las moléculas de polímero y los enlaces secundarios mantienen juntos grupos de cadenas de polímeros para formar el material polimérico.

### 2.3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS

Hoy en día, existe infinidad de polímeros de acuerdo a su alto peso molecular, baja biodegradabilidad o baja disponibilidad. Sin embargo, Bernard (2017) clasifica a estas macromoléculas de acuerdo a sus funciones y estructuras encontradas en las mismas, como se muestra en la Figura 2.14.



**Figura 2.14 Clasificación de los polímeros a) naturales y b) sintéticos.**  
Fuente: Bernard (2017).

Por otro lado, Hasirci *et al.* (2017) clasifica a los polímeros de acuerdo a su:

- 1.- El origen: polímeros naturales o sintéticos.
- 2.- Proceso de polimerización: polímeros por condensación o adición.
- 3.- Las formas estructurales de las cadenas: polímeros lineales de red.
- 4.- La composición de la columna vertebral principal: homopolímeros y heteropolímeros.
- 5.- La estructura: polímeros orgánicos, inorgánicos o de coordinación.
- 6.- El peso molecular: oligómeros o polímeros altos.

7.- El comportamiento térmico: termoplásticos o termoestables.

8.- La disposición de las unidades repetitivas: homopolímeros o copolímeros (alternantes, aleatorios, de bloque).

9.- Los enlaces que se repiten en las cadenas: estos polímeros están clasificados de acuerdo con los enlaces químicos entre la unidad monoméricas que se repiten a lo largo de la cadena.

### **2.3.4 POLÍMEROS RECICLADOS**

La sostenibilidad es un concepto evolutivo del siglo XXI, y es definido por Kuhlma *et al.* (2010) como el uso de los recursos de la Tierra de tal manera que satisfacen la demanda de la generación actual sin obstaculizar las necesidades de las generaciones futuras. La creciente demanda de los recursos finitos de la Tierra ha creado un problema global y apremiante de la era moderna. De ahí la alta prioridad que se le da a la investigación para desarrollar una nueva carpeta que promueva fuertemente la protección de los recursos naturales y el uso de materiales reciclados o de desecho, para garantizar la sostenibilidad en carreteras y carreteras.

De acuerdo con Múnera y Ossa (2014), se han logrado algunas mejoras en las características del asfalto a través de la modificación del asfalto con polímeros sintéticos y naturales que pueden mejorar el rendimiento de carreteras y autopistas. Sin embargo González *et al.* (2002), demuestran que se han encontrado polímeros reciclados que muestran resultados similares o superiores a menor costo en la mejora del rendimiento de la carretera en comparación con los polímeros vírgenes.

Utilizar polímeros residuales como modificador de acuerdo con Kalantar *et al.* (2012) es beneficioso, ya que, atraerá beneficios económicos y ambientales, debido a que, el uso de polímeros reciclados como modificadores puede ayudar a mejorar el rendimiento del pavimento y reducirán el mantenimiento de las estructuras así como problemas de acumulación de residuos.

Diversidad de materiales se han usado como modificadores de ligantes. En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de materiales reciclados, así como, sus ventajas y desventajas como modificadores de asfalto.

**Tabla 2.1 Características de los polímeros utilizados para modificar el asfalto.**

Polímero	Ventajas	Desventajas	Usos
Polietileno (PE)	Resistencia a altas temperaturas. Resistencia al envejecimiento. Módulo alto.	Problemas de inestabilidad. Alto contenido de polímero. Sin recuperación elásticas.	Industrial. Pocas aplicaciones viales.
Polipropileno (PP)	Baja penetración. Plasticidad. Mejora la resistencia a la carga.	Problemas de separación. Baja Resistencia térmica.	No comercialmente.
PVC	Disposición de PVC de baja agrietamiento.	Actúa principalmente como relleno.	No comercialmente.
Resina epóxica	Menos temperatura susceptible. Mayor flexibilidad. Resistencia al agrietamiento.	Alto costo. Difícil mezcla.	Pavimentación de aeropuertos y revestimientos de puentes.
Caucho natural	Mejora la Resistencia al agrietamiento. Mayor ductilidad. Mayor elasticidad.	Sensible a la descomposición y a la absorción de oxígeno.	Pavimentación.

Fuente: Becker *et al.* (2001).

### 2.3.5 POLIESTIRENO EXPANDIDO

Mohajerani *et al.* (2017) definen al poliestireno expandido como un material polimérico de estructura celular cerrada, su fabricación implica el calentamiento de perlas expandibles de poliestireno con vapor y la colocación de estas perlas de poliestireno expandido calentadas en moldes para crear bloques prismáticos de poliestireno.

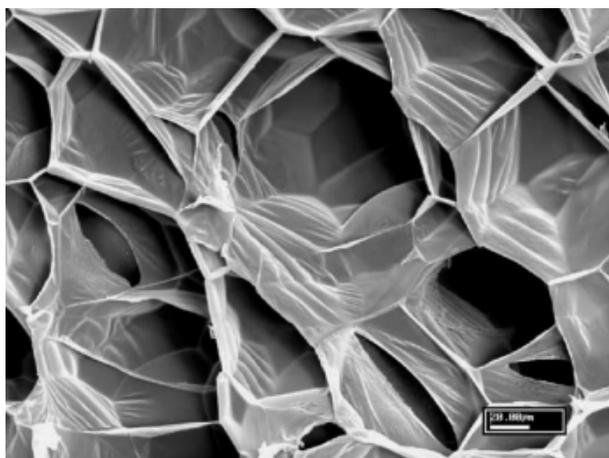
La composición del poliestireno expandido Cenavaro (2004) la especifica como un material plástico compuesto por 98% de aire y 2% de materia prima (poliestireno). Este material ha sido ampliamente aplicado de muchas maneras, como para la industria del embalaje, bienes de consumo, materiales de construcción, más allá de los procesos de fundición a presión de los bloques de motores de la industria del automóvil.

Por otro lado, Schmidt *et al.* (2011) estiman que la producción mundial de poliestireno es de aproximadamente tres millones de toneladas anuales, de las cuales, la industria de envasado y bienes de consumo son responsables del 54% de la producción total, seguidas del negocio de la construcción con el 46%.

La estructura de las espumas de poliestireno de acuerdo con Rossacci y Shivkumar (2003), puede ser visualizado en dos niveles. El nivel macroscópico, donde la estructura estándar generalmente con un diámetro del orden de 2-4 mm (Figura 2.15) y el nivel microscópico para la estructura celular presentada en cada esfera (Figura 2.16).

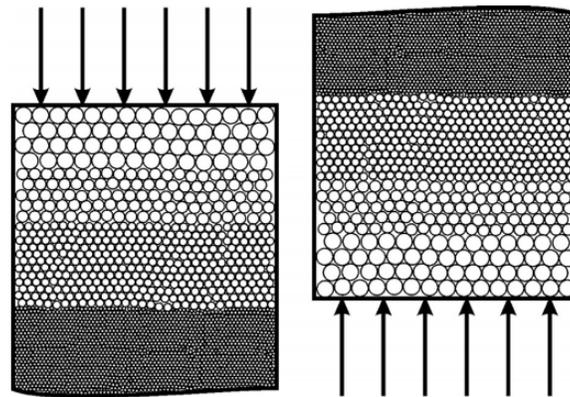


**Figura 2.15 Poliestireno expandido nivel macroscópico.**  
Fuente: Rossacci y Shivkumar (2003).



**Figura 2.16 Poliestireno expandido nivel microscópico.**  
Fuente: Rossacci y Shivkumar (2003).

Secerov *et al.* (2009) consideran que las partículas de poliestireno expandido están disponibles en un amplio rango de densidad, desde 15 hasta 900 kg/m<sup>3</sup>, y diámetro de partícula de 0.30 a 7.00 mm. Dándole la posibilidad de formar capas con características muy diferentes, ya sea con disminución o aumento de tamaño de las partículas (ver Figura 2.17).



**Figura 2.17 Clasificación de partículas de poliestireno expandido.**  
Fuente: Secerov *et al.* (2009).

### 3. METODOLOGÍA

El objetivo principal de este capítulo, es presentar las técnicas y procedimientos para desarrollar un nuevo aglutinante de poliestireno reciclado con mejores propiedades que los actualmente utilizados. En la Figura 3.1 se muestra la estructuración de cinco pasos, mismos que describen las actividades empleadas, como primer paso, se muestran la recolección y tratamiento de los residuos, así como la síntesis química aplicada, para la transformación del poliestireno. Posteriormente, se realizaron a través de los estándares ASTM y AASTHO, estudios para caracterizar el material pétreo y ensayos para verificar las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla. Una vez comprobada la calidad de la misma, se evaluó en un tramo de prueba de acuerdo a la normatividad nacional para determinar la factibilidad de la aplicación bajo condiciones reales.



**Figura 3.1 Procedimiento metodológico.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.1 MORFOLOGÍA Y PROCESAMIENTO DEL POLÍMERO RECICLADO

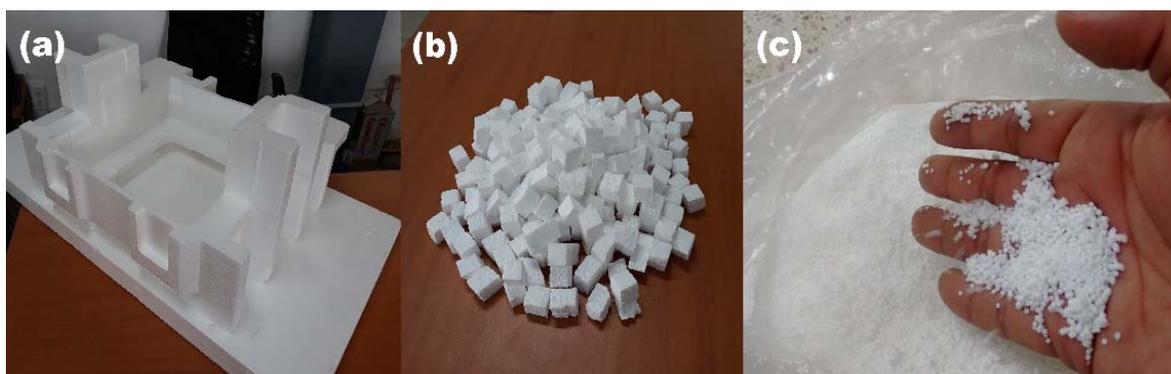
El propósito de esta sección, es determinar y establecer parámetros para efectuar la transformación del poliestireno, con el objetivo de producir y desarrollar un aglutinante con características únicas capaz de sustituir el uso de productos asfálticos.

#### 3.1.1 CADENAS DE RECICLAJE

La Asociación Nacional de Industrias del Plástico (ANIPAC), estiman que el consumo nacional del unisel en México es de 125 mil toneladas anuales, de las cuales el 25 por ciento se destinan a la fabricación de productos desechables para la industria alimenticia; el 75 por ciento restante se divide en el sector de la construcción y embalaje.

El poliestireno expandido utilizado en esta investigación, se obtuvo mediante la aplicación de cadenas de reciclaje en la Zona Metropolitana de Querétaro, México. La materia prima obtenida, fueron: placas, casetones y empaques deportivos y eléctricos de espesores variados.

El proceso de corte y trituración (Figura 3.2) se llevó a cabo en el Departamento de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Querétaro con el objetivo no solo de establecer un tamaño de partícula homogéneo sino también eliminar las impurezas (fracciones no deseadas).



**Figura 3.2 Residuos de poliestireno expandido (a) material reciclado, (b) tratamiento (corte y trituración) y (c) partículas de tamaño homogéneo y libre de impurezas.**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.2 SÍNTESIS QUÍMICA

Una vez concluida la fase de reciclaje, se determinó la interacción y combinación de sustancias para generar energía y enlaces capaces formar aglutinantes con mayor estabilidad, dicho proceso se efectuó Departamento de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Querétaro y la Universidad de Medellín, Colombia. (Síntesis química en registro de patente).

Los residuos de poliestireno, se disolvieron bajo reflujo continuo y agitación suave (Figura 3.3). Durante el período de agitación y adición de poliestireno, se usó un agitador de alta viscosidad (Ika Eurostar 20 Hi-Speed Digital) durante 25 minutos a una temperatura no superior a los 16°C.



**Figura 3.3 Reacción química del polímero (a) sustancias químicas, (b) agitación y reflujo continuo y (c) concentración del aglutinante.**

Fuente: Elaboración propia.

Para la producción del aglomerante se utilizó la normatividad NTC-OHSAS-18001, para atender la seguridad del personal ligado a las pruebas experimentales y aplicación del polímero reciclado, minimizando los factores de riesgo propios de la actividad, evitando de esta manera accidentes o lesiones asociados con este proceso.

## 3.2 SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL AGREGADO PÉTREO

Generalmente, las mezclas asfálticas están constituidas por asfalto y materiales pétreos, donde una mezcla tradicional de acuerdo con Rondón y Moreno (2015) está compuesta aproximadamente del 93-95% de materiales pétreos. Razón por cual, esta sección servirá para conocer e interpretar las características y propiedades de los agregados con el objetivo que la mezcla adquiera una calidad adecuada.

### 3.2.1 SELECCIÓN Y MUESTREO DE MATERIALES

Para la realización del trabajo se realizó la extracción de muestras representativas del banco ubicado el municipio del Marqués, en el estado de Querétaro, ubicado en el km. 8+000 de la carretera Querétaro-Tequisquiapan, con coordenadas geográficas 20°37'27.46" N latitud y 100°18'35.88" O (Figura 3.4).

Del banco se extrajeron aproximadamente 200 kilogramos conforme al procedimiento ASTM-D75, para después trasladarlas a las instalaciones del laboratorio de Mecánica de Suelos y Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería UAQ, lugar donde se verificó bajo ensayos establecidos la calidad de los agregados.



**Figura 3.4 Ubicación y zona geográfica del banco de materiales.**

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.5, se observa las instalaciones del banco de materiales, así como las operaciones de envase, identificación y transporte de los agregados con el objetivo de conocer la naturaleza y las propiedades del material. Cabe mencionar, que el muestreo se desarrolló bajo el código de seguridad de la compañía como actividad preventiva para la protección individual y disminución de accidentes.



**Figura 3.5 Muestreo (a) extracción e identificación y (b) transporte de los agregados.**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO PÉTREO

Una vez identificado el tipo de proyecto, Mohajerani *et al.* (2017) proponen diferenciar y valorar las propiedades de los materiales que conformaran las capas de la estructura con las normas pertinentes (ASTM y AASHTO), de modo que, los agregados tengan la capacidad de distribuir adecuadamente las cargas desde la superficie de rodamiento hasta la capa subrasante.

Para comprobar las propiedades físicas y mecánicas del material pétreo, se efectuaron y analizaron los siguientes ensayos:

- Análisis granulométrico, (ASTM C136)
- Desgaste de los ángeles, % (ASTM C131)
- Caras fracturadas, % (2 caras o más) (ASTM D5821)
- Partículas planas y alargadas, % (ASTM D4791)
- Equivalente de área, % (ASTM D2419)
- Densidad y absorción de agregados gruesos, % (ASTM C127)



**Figura 3.6 Caracterización del agregado (a) cribado del material y (b) granulometría.**  
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se estableció un procedimiento para mejorar la estructura granulométrica (Figura 3.6 y 3.7). El proceso utilizado no solo restringió el uso de partículas menores a 0.60 mm (pasan la malla #30), sino que también, los agregados con tamaño máximo de 2.36 mm (malla # 8), dado que, estas dimensiones no muestran la adhesión y recubrimiento esperado.

Los puntos principales que afectan el comportamiento de los pavimentos de acuerdo con León y Ramírez (2010) es la forma y textura, así como, la graduación, absorción, geología, resistencia y módulo de elasticidad, tamaño máximo, gravedad específica, resistencia al ataque de sulfatos y dureza de los agregados.



**Figura 3.7 Ensayos de calidad (a) desgaste de los ángeles y (b) partículas planas y alargadas.**

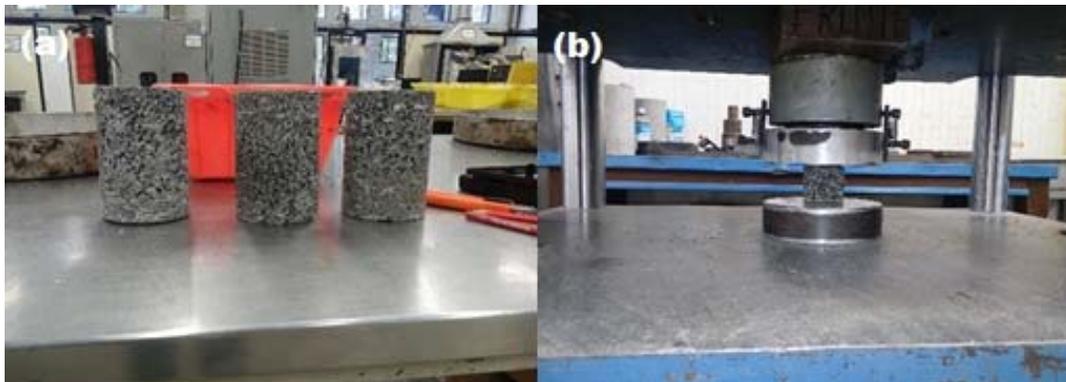
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 ENSAYOS DE CALIDAD

En la actualidad, se desarrolla un creciente interés por la gestión y control de calidad, con el fin de verificar que la infraestructura carretera brinde la seguridad y el nivel de servicio adecuado a los usuarios, por lo que a continuación, se describen los ensayos bajo las condiciones y técnicas desarrolladas con el objetivo de verificar la calidad y el comportamiento de la mezcla.

#### 3.3.1 ENSAYO A COMPRESIÓN SIMPLE

El procedimiento y análisis de este ensayo se realizó mediante la adaptación de los enfoques y parámetros definidos en la normatividad ASTM-C39. Los especímenes son preparados y curados bajo temperatura ambiente, sin contenidos de humedad con el objetivo de controlar la dosificación.



**Figura 3.8 Compresión simple (a) preparación de probetas y (b) ensayo.**

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.8 se puede observar el procedimiento para determinar la resistencia a la compresión simple. Se aplica una carga de manera uniforme y continua sin producir choques ni pérdida de carga con el objetivo de llevar hasta la ruptura para observar el tipo de falla y apariencia de la mezcla. Como resultado de esta prueba se hacen los registros correspondientes para calcular la resistencia a compresión simple mediante la siguiente ecuación.

$$R = \frac{P}{A} \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde  $R$  es resistencia a compresión simple ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ );  $P$  la carga máxima (Kg) y  $A$  es el área promedio de la sección transversal del espécimen ( $\text{cm}^2$ ).

### 3.3.2 ENSAYO A TENSIÓN INDIRECTA

El término de tensión o tracción indirecta se utilizara en un sentido amplio para imitar la respuesta de la estructura y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de agrietarse de acuerdo al método proporcionado por la norma ASTM-C496.



**Figura 3.9 Preparación de especímenes (a) polímero reciclado y (b) asfalto.**  
Fuente: Elaboración propia.

Actualmente este ensayo, además de ser un procedimiento muy simple, es uno de los principales exponentes para medir la resistencia a la tracción de las mezclas para pavimento, a través de la compresión diametral de la muestra, con aplicaciones de carga uniforme a lo largo de dos líneas opuestas hasta alcanzar la rotura (Figura 3.9 y 3.10), registrando la carga máxima para aplicar la siguiente ecuación y conocer la resistencia indirecta.

$$S_t = \frac{2000 P}{\pi t D} \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde  $S_t$  es resistencia a resistencia indirecta (kPa);  $P$  la carga máxima (N);  $t$  es el espesor o altura del espécimen (mm) y  $D$  el diámetro del espécimen (mm).



**Figura 3.10 Tensión indirecta (a) polímero reciclado y (b) asfalto.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y DENSIDAD DE LA MEZCLA

Esta prueba se refiere al procedimiento para la determinación de la gravedad específica y densidad de la mezcla reciclada para pavimentos a 25 °C. La gravedad específica y densidad de la mezcla son propiedades fundamentales, cuyos valores están afectados por la composición de la mezcla en términos del tipo y cantidad de agregados y los materiales del aglutinante.

En la figura 3.11, se observa el procedimiento de acuerdo a la normativa ASTM-D1188 y ASTM-D2726 para determinar la gravedad específica de la muestra. Una muestra seca y previamente pesada se cubre una película elastomérica (parafilm) y se le añade suficiente agua a una temperatura de 25 °C (77 °F), hasta llevar la muestra a un estado sumergido. Teniendo como resultado las medidas de peso y volumen correspondientes para calcular la gravedad específica a 25 °C (77 °F) mediante las siguientes expresiones matemáticas.

$$G_{al} = \frac{A_{al}}{A_{al} - B_{al}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde  $G_{al}$  es gravedad aparente del parafilm;  $A_{al}$  masa seca al aire (grs) y  $B_{al}$  es la masa bajo el agua (grs).

$$F = \frac{Dal - Aal}{Dal - Eal - \frac{Aal}{Gal}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Dónde  $F$  es gravedad específica del parafilm;  $AaI$  masa seca al aire (grs);  $DaI$  es la masa seca del espécimen envuelto (grs) y  $EaI$  es la masa de la muestra envuelta debajo del agua (grs).

$$\text{Gravedad específica de la muestra} = \frac{A}{D - E - \frac{D - A}{F}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Dónde  $A$  es la masa de la muestra seca al aire (grs);  $D$  es la muestra seca y recubierta (grs);  $E$  la masa del espécimen recubierto debajo del agua (grs) y  $F$  es la gravedad específica del recubrimiento determinada a 25 °C (77 °F).

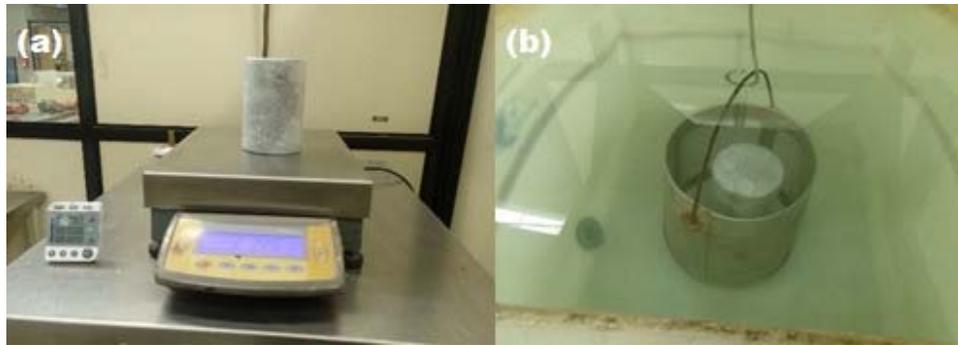
Para calcular la densidad de la mezcla, se calculará de la siguiente manera:

$$\text{Densidad} = \text{Gravedad específica de la muestra} * \text{densidad del agua a 25 °C (77 °F)} \quad (\text{Ec. 6})$$

**Tabla 3.1 Densidad relativa del agua y factor de conversión.**

Temperatura °C	Densidad Absoluta del agua	Factor de corrección
24	0.997327	1.000253
25	0.997075	1.000000
26	0.996814	0.999738
27	0.996544	0.999467
28	0.996264	0.999187
29	0.995976	0.998898
30	0.995678	0.998599

Fuente: ASTM-D1188.



**Figura 3.11 Gravedad específica y densidad (a) peso seco y (b) peso sumergido.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.4 TASA DE INFILTRACIÓN

El objetivo de esta prueba no solo es para evaluar la interconexión de los poros que determinan el volumen y la velocidad de infiltración de la estructura, sino también identificar los beneficios que ocasiona esta propiedad.



**Figura 3.12 Tasa de infiltración (a) elaboración de la probeta y (b) prototipo.**  
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los requisitos de la norma ASTM-D1701, se utilizó una corona de filtración de 300 mm (12.0”) de diámetro con sellado superficial en la estructura (Figura 3.12), con el propósito de descargar un volumen de agua predefinido con las mediciones de tiempo para determinar la velocidad de infiltración en el pavimento (Figura 3.13), de acuerdo a la siguiente expresión matemática.

$$I = \frac{K M}{D^2 T} \quad (\text{Ec. 7})$$

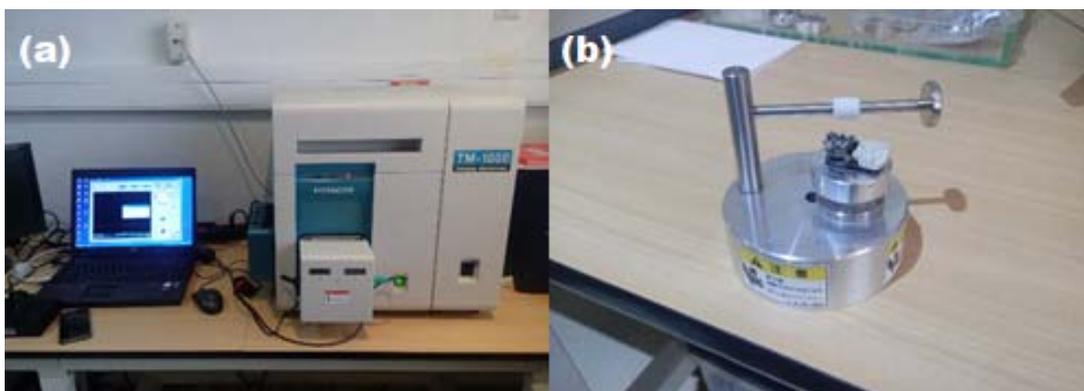
Dónde  $I$  es la tasa de infiltración (mm/hr);  $K$  la constante de cálculo (4,583,666,00 SI o 126,879 in);  $D$  es el diámetro interno de anillo (mm) y  $T$  el tiempo de (seg).



**Figura 3.13 Instalación de muestra para determinar la tasa de infiltración.**  
Fuente: Elaboración propia.

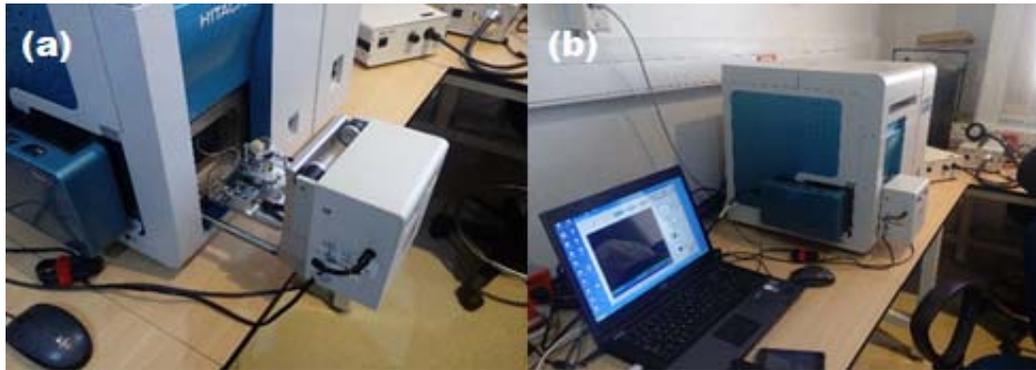
### 3.3.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

El aglutinante utilizado además de substituir a los productos asfálticos, exhibe características y texturas únicas a escala micrométrica y manométrica. Por lo que, esta prueba fue evaluada ampliamente en la Universidad Autónoma de México, con el objetivo de identificar y analizar la superficie y estructura de los poros.



**Figura 3.14 Microscopía de barrido (a) Equipo Hitachi TM-100 y (b) preparación de muestra.**  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.14, se muestra la preparación y graduación del equipo electrónico (*Scanning Electron Microscopy*), con la intención de formar con un haz de electrones una perspectiva detallada de la superficie y enlaces de la mezcla. Así mismo en la Figura 3.15, se visualiza el ordenador capaz la configuración y estructura del aglutinante.



**Figura 3.15 Microscopía (a) colocación de muestra y (b) desarrollo de imágenes.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.6 PRUEBA CARGADA DE HAMBURGO

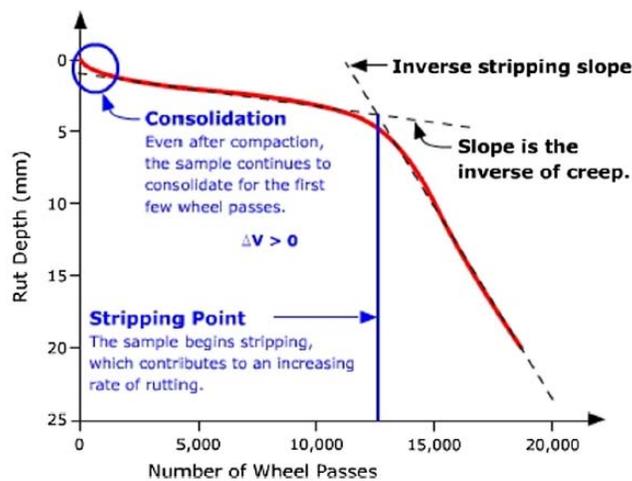
La presencia de agua junto con las condiciones ambientales y las cargas vehiculares originan desprendimiento y degradación de partículas en los pavimentos. Por lo que, el principal objetivo de este ensayo es identificar problemas de adherencia y la resistencia a la deformación permanente bajo condiciones extremas.



**Figura 3.16 Rueda cargada de Hamburgo (a) especímenes y (b) configuración de equipo.**  
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el procedimiento estándar de la prueba, las muestras de la figura Figuras 3.16 son elaboradas conforme a la norma AASTHO-T324, para evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente y al daño por humedad a una temperatura controlada de 50 °C (122 °F). El equipo cuenta con dos ruedas de acero de 46.99 mm de grosor y 203.2 mm (8") de diámetro durante un periodo de 20,000 ciclos (Figura 3.18).

De acuerdo a la normatividad ASSHTO-T324 el método es utilizado para determinar la susceptibilidad a la falla prematura de la mezcla debido a la debilidad de la estructura de agregado, una rigidez inadecuada del ligante o por daño a la humedad. Con el objetivo de acuerdo con Chaturabong y Bahia (2017) identificar la pendiente y profundidad de ahuellamiento con respecto al número de ciclos (Figura 3.17).



**Figura 3.17 Pendiente típica de la deformación permanente en mezclas asfálticas.**  
Fuente: Chaturabong y Bahia (2017).



**Figura 3.18 Desarrollo de la prueba (20,000 ciclos).**  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.7 MÓDULO DINÁMICO

Para la realización de este estudio, no solo se han adoptado por los procedimientos establecidos en la norma ASTM-D3497 y AASTHO-TP62, si no también, recomendaciones por el Instituto Mexicano del Transporte con el objetivo de preparar y ensayar la mezcla reciclada (Figura 3.19), para poder así, determinar el módulo dinámico y ángulo de fase para un rango de temperatura y frecuencias de carga establecidas.



**Figura 3.19 Equipo (a) compactador giratorio y (b) muestras de control.**  
Fuente: Elaboración propia.

Para medir el módulo dinámico, los especímenes son procesados y compactados mediante el equipo giratorio, de manera que la altura de muestra sea de 150 mm por 100 mm de diámetro. Por otro lado, el montaje de los pines será a través de adhesivos epóxicos distribuidos de forma lineal (Figura 3.20).



**Figura 3.20 Alineamiento y espaciado de pines.**  
Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo de la prueba, estará regida con criterios y parámetros propuestos por el Instituto Mexicano del Transporte. Las temperaturas fueron: 10, 20, 30, y 50 °C y las frecuencias de carga de: 0.1, 0.5, 1.0, 5, 10 y 25 Hz para cada una de las temperaturas (Figura 3.21 y 3.22).



**Figura 3.21** Equipo electrohidráulico con generador de onda.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.22** Módulo dinámico (muestra de control).  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 APLICACIÓN DE LA MEZCLA

#### 3.4.1 TRAMO DE PRUEBA

Una vez, que se finalizó la fase experimental se procedió a la aplicación de la mezcla en un tramo de prueba. La colocación se desarrolló de acuerdo a la normativa N-CSV-CAR-2-02-003/00, emitida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

La aplicación de la mezcla, se efectuó en la carretera federal 190 (Oaxaca-Tehuantepec), tramo: Totolapam-La Reforma, en el Estado de Oaxaca (Figura 3.23), con el objetivo de conocer el desempeño y comportamiento que adquirirá la mezcla bajo las condiciones reales de tránsito y clima.



Figura 3.23 Ubicación del tramo carretero.  
Fuente: SCT (2016).

#### Datos generales del tramo carretero

**Lugar:** San Pedro Totolapam, Oaxaca (MEX-190).

**Fecha de aplicación:** 19 de marzo del 2018, 11:30 a.m.

**Clima:** Soleado (27 °C).

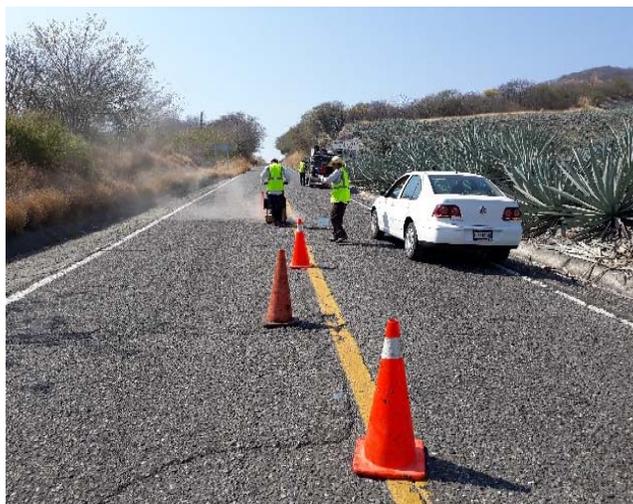
**Sensación térmica:** 20 °C.

Los deterioros que presenta un pavimento, provocan que la comodidad del usuario o la vida de servicio de estructura disminuyan. Generalmente, estos daños corresponden a los malos procesos constructivos o baja calidad de los productos asfálticos (ver Figura 3.24).



**Figura 3.24 Deterioro del pavimento.**  
Fuente: Elaboración propia

Los dispositivos de seguridad, se instalaron de acuerdo a la normativa NOM-086-SCT2-2015 con el objetivo de guiar al tránsito y resguardar la integridad física de los usuarios de la carretera, así como del personal que trabaja para colocar la mezcla (Figura 3.25).



**Figura 3.25 Señalamiento y dispositivos de protección.**  
Fuente: Elaboración propia.

Una vez colocado los dispositivos de seguridad, se efectuó el corte perimetral de las áreas marcadas en la superficie de rodamiento, con una maquina cortadora de disco (Ver Figura 3.26), para lograr que las paredes de la carpeta sean verticales y evitar daños a la carpeta fuera del área afectada.



**Figura 3.26 Corte perimetral de la superficie de rodamiento.**  
Fuente: Elaboración propia.

Después del corte, el pavimento dañado se retiró desde el interior hacia el perímetro del área afectada, empleando para ello la herramienta y equipo adecuado, con el objetivo que la superficie se encuentre libre de materiales extraños, polvo, grasa o encharcamientos (ver Figura 3.27).



**Figura 3.27 Limpieza y delimitación del área dañada.**  
Fuente: Elaboración propia.

La mezcla se extenderá de las orillas del área dañada hacia el centro para evitar la segregación, en cantidad suficiente y utilizando un dispositivo enrasador adecuado para que, una vez compactada, la superficie terminada quede uniforme y al mismo nivel que el resto de la carpeta (ver Figura 3.28).



**Figura 3.28 Aplicación de la mezcla.**  
Fuente: Elaboración propia.

La mezcla se compacta inmediatamente después de colocarla. La compactación se realizó con un compactador de rodillo liso vibratorio, modelo Joper RV4 (ver Figura 3.29).



**Figura 3.29 Compactación de la mezcla.**  
Fuente: Elaboración propia.

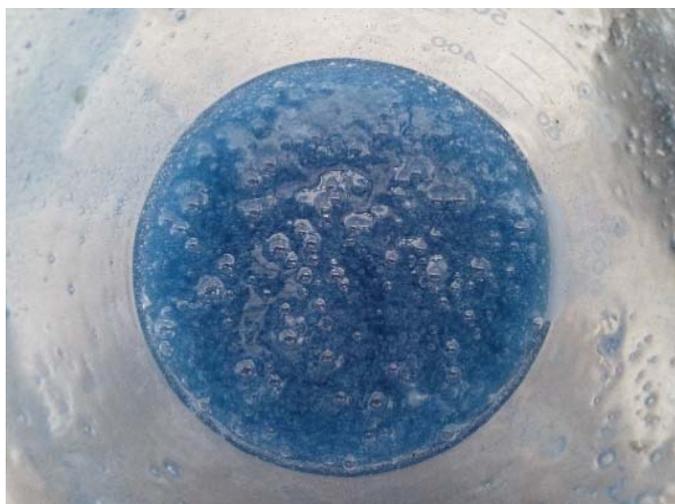
## 3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presenta un resumen y una descripción de cada uno de los ensayos y estudios realizados, con el objetivo de validar y comprobar el objetivo y la hipótesis planteada.

### 3.5.1 POLÍMERO RECICLADO

El material utilizado para el desarrollo del aglutinante fue poliestireno 100% reciclado con una densidad de  $29.4 \text{ Kg/m}^3$  y una composición centesimal (en masa) de acuerdo con el análisis elemental de 84.22% para Carbono (C), 7.12% para Hidrógeno (H), 0.18% para Nitrógeno (N) y 0.22% para Azufre (S).

El aglutinante reciclado (Figura 3.30), además de proporcionar una adhesividad superior a los productos tradicionales, adquiere una viscosidad similar a los ligantes cotidianos a una temperatura no superior de los  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $68 \text{ }^\circ\text{F}$ ).



**Figura 3.30 Aglutinante elaborado con residuos de poliestireno expandido.**  
Fuente: Elaboración propia.

El empleo de este aglutinante en proyectos de rehabilitación vial puede considerarse como una acción sostenible, ya que, en este tipo de mezclas se reutilizan cantidades considerables de residuos sin la necesidad de aplicar calefacción.

### 3.5.2 AGREGADO PÉTREO

Los procedimientos se llevaron a cabo con la normativa apropiada para evaluar las características de los agregados. El desarrollo se llevó a cabo en dos etapas, comenzando con la extracción del material pétreo seguida de la caracterización para el análisis físico y mecánico de los materiales con el objetivo de conocer su composición y resistencia (Tabla 3.2).

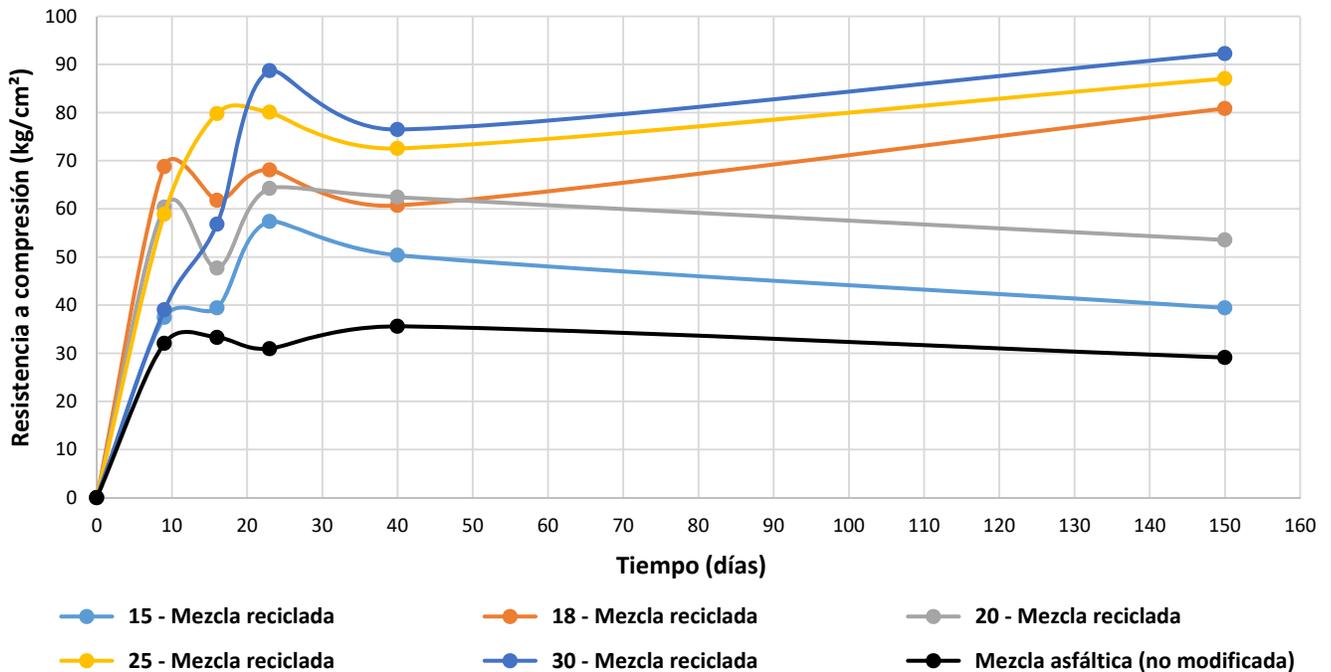
**Tabla 3.2 Resultados de la caracterización del agregado pétreo.**

Ensayo	Norma	Valor	Especificación
Desgaste de los ángeles (%)	ASTM C131	15.00 %	30.00% Máx.
Caras fracturadas (%)	ASTM D5821	97.00 %	90.00% Mín.
Partículas planas y alargadas (%)	ASTM D4791	7.00 %	10.00% Máx.
Absorción de los agregados gruesos (%)	ASTM D1664	2.30%	---
Equivalente de arena (%)	ASTM D2419	75.00%	50.00% Mín.
Densidad específica de la mezcla	ASTM D1188	1.8513	---

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.3 COMPRESIÓN SIMPLE

Los resultados de este ensayo, fueron prometedores, ya que, el aglutinante reciclado exhibe propiedades físicas superiores al asfalto (Figura 3.31). La incorporación y distribución del aglutinante, además de proporcionar una buena adhesividad y cohesión entre los materiales granulares, causa aumentos desde el 20% hasta 80% en la resistencia a la compresión con respecto a las mezclas normalmente utilizadas. Resistencia máxima a compresión fue de 92,26 kg/cm<sup>2</sup> con contenido al 30%.



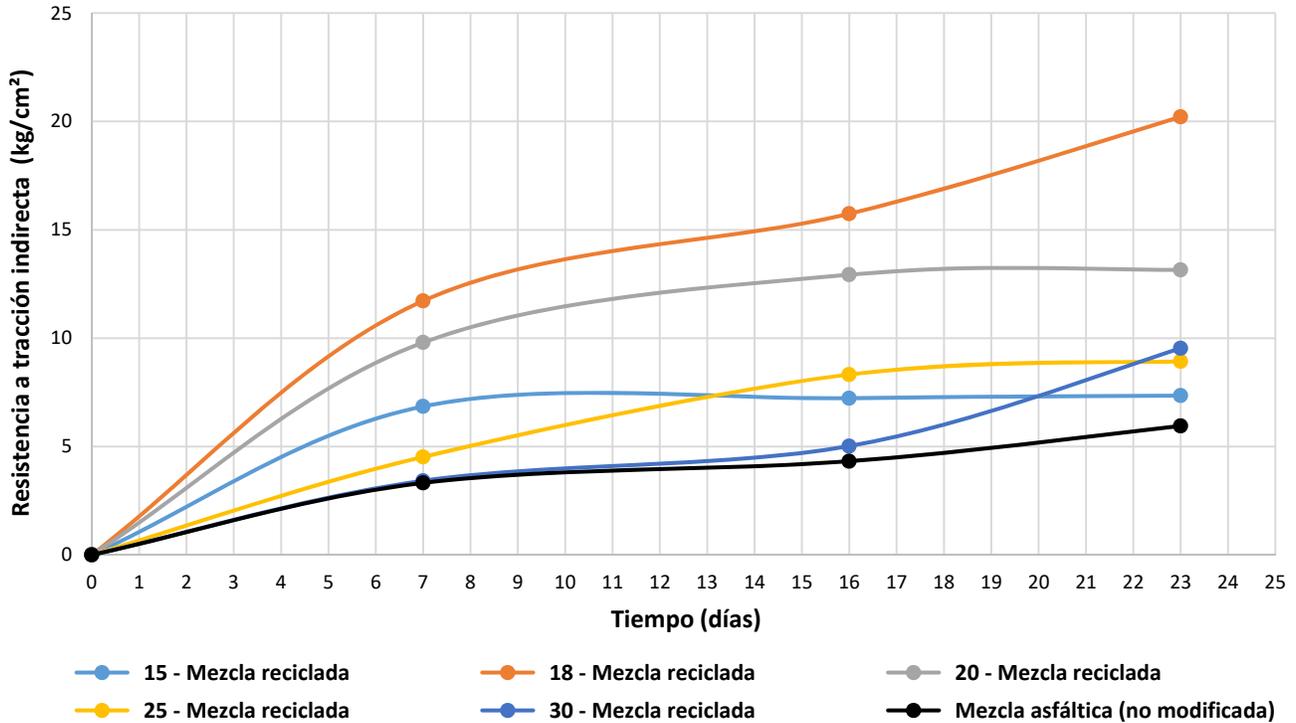
**Figura 3.31 Resistencia a compresión simple de las mezclas.**

Fuente: Elaboración propia.

El resultado que emerge de esta prueba es la evolución de su estabilidad, ya que, la resistencia promedio de cada porcentaje a partir de los 20 días se localiza junto o con diferencia significativa a la máxima. Ante este comportamiento, se seleccionó el porcentaje del 18 por ciento para continuar con las demás pruebas programadas en la investigación, puesto que no solo aporta una serie de ventajas en su elaboración, sino también ofrece comportamientos estables y resistentes a corto y largo plazo con alternativas para incrementar su punto de esfuerzo a las deformaciones permanentes (Figura 3.31).

### 3.5.4 TENSIÓN INDIRECTA

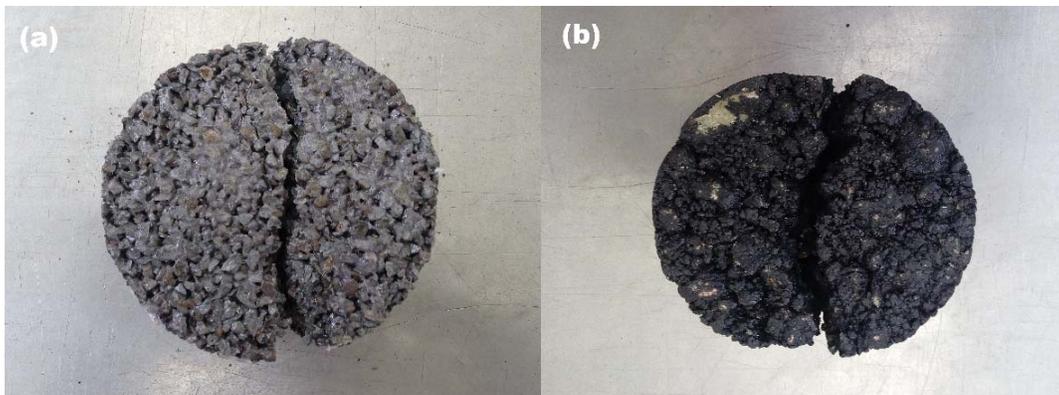
El valor de la resistencia a la tracción indirecta aumenta con el tiempo, lo que indica que el secado es un factor importante para evaluar la calidad relativa de la mezcla y estimar el potencial de celo o agrietamiento de la misma, como se muestra en la Figura 3.32. Los valores de la mezcla con un contenido del 20% fueron de 11.72 kg/cm<sup>2</sup>, 15.74 kg/cm<sup>2</sup> y 20.21 kg/cm<sup>2</sup>, en un período de secado de 7, 16 y 23 días, respectivamente. Los valores son equivalentes al 17% en la resistencia a la compresión



**Figura 3.32 Resistencia a tracción indirecta de las mezclas.**

Fuente: Elaboración propia.

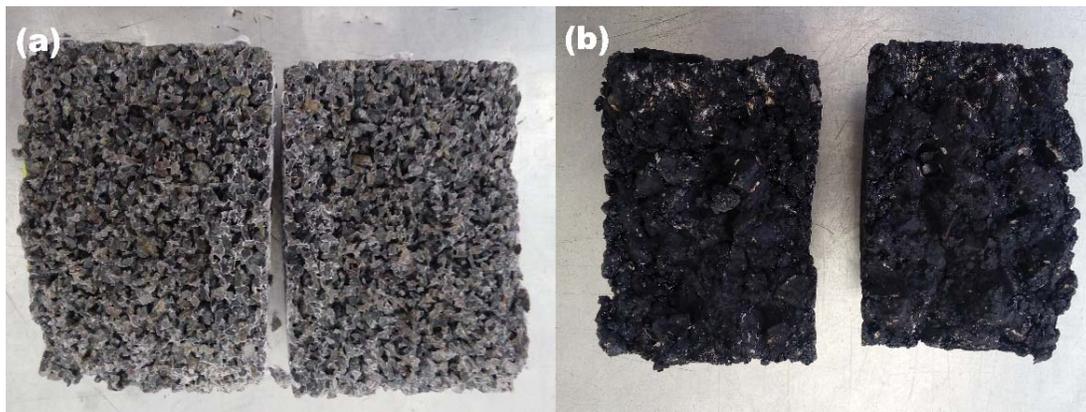
La porosidad disminuye en la carga inicial, y el contacto entre los agregados se vuelve más cercano; por lo tanto, la resistencia disminuye. Con una carga aumentada, comienzan a aparecer lesiones y la porosidad interna de la mezcla aumenta gradualmente; El microdaño del polímero crece lentamente y las grietas más grandes se expanden en la etapa de carga. La porosidad de la mezcla aumenta rápidamente y la muestra se fractura por completo (Figura 3.33).



**Figura 3.33 Ruptura de las muestras (a) mezcla reciclada y (b) mezclas asfáltica.**

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 3.34, se revela la forma y tipo de ruptura, mediante una inspección visual, se puede comprobar que no existe fractura del agregado sino una fisuración en el área del aglomerante causante del desprendimiento. La configuración del polímero, origina que la carga inducida, se distribuya uniformemente en todo el plano, misma que hace un comportamiento más estable.



**Figura 3.34 Desprendimientos (a) mezcla reciclada y (b) mezclas asfáltica.**  
Fuente: Elaboración propia

### **3.5.5 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y DENSIDAD**

Mediante este método, se determinó la densidad y gravedad específica de la mezcla compactada, con el objetivo de establecer las características volumétricas de la mezcla para determinar la composición de la misma. El resultado de este estudio manifestó una gravedad específica de 1.8513.

### **3.5.6 TASA DE INFILTRACIÓN**

El drenaje del agua debe ser considerado como factor clave en los proyectos carreteros, debido a que el exceso de agua combinado con el aumento vehicular, pronostican con el tiempo daños a la estructura. Los resultados del estudio realizado, muestra un coeficiente de permeabilidad de 0.5072 cm/seg, mismo que se encuentra en los rangos establecidos por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (0.20-054 cm/seg) para establecerlo como una filtración adecuada.



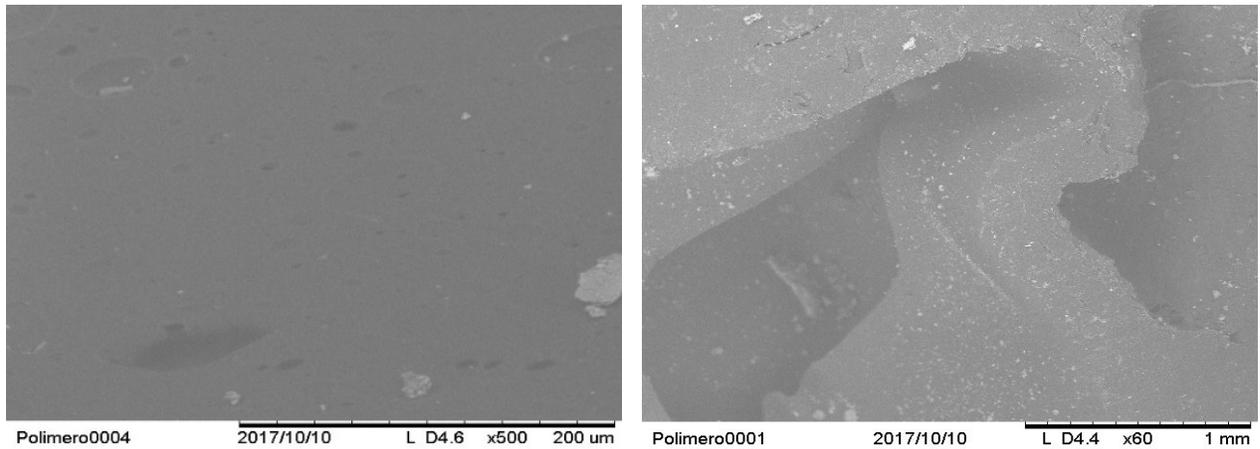
**Figura 3.35 Permeabilidad de la mezcla reciclada.**  
Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de permeabilidad, además de cumplir mecánicamente con los valores preestablecidos en la normatividad, depura el paso del agua y la acumulación de agua en la superficie de rodamiento de forma inmediata, por lo que, esta cualidad además de evitar encharcamientos y escurrimientos superficiales en toda la calzada brindará una mayor tracción y control a los conductores en periodos de lluvia (disminución del acuaplaneo), gestionará, recargas artificiales de los mantos acuíferos en cualquier región (Figura 3.35).

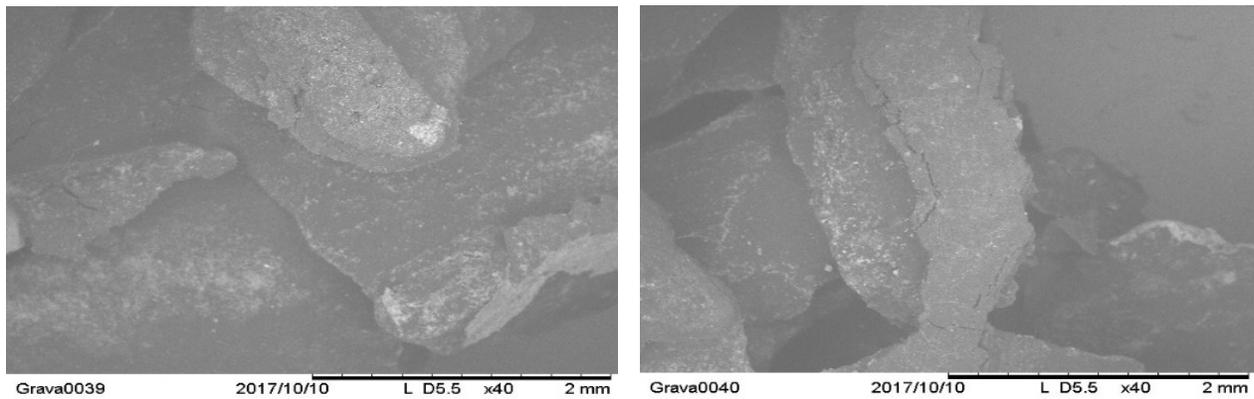
### **3.5.7 MICROSCOPIA DE BARRIDO**

Mediante la prueba de microscopía, se logró observar y vislumbrar la composición topográfica y tipo de enlace que manifiesta el aglutinante con el agregado pétreo (Figura 3.36). El grado de fluidez o plasticidad del material puro, se presenta de forma líquida (temperatura promedio 20°C) con un alto contenido de vacíos.

En las imágenes de alta resolución, se puede observar una recubrimiento homogéneo entre los agregados y enlaces ramificados con dimensiones y grosores idénticos entre cada partícula, mismos que estructuran los poros para depurar el agua (Figura 3.37).



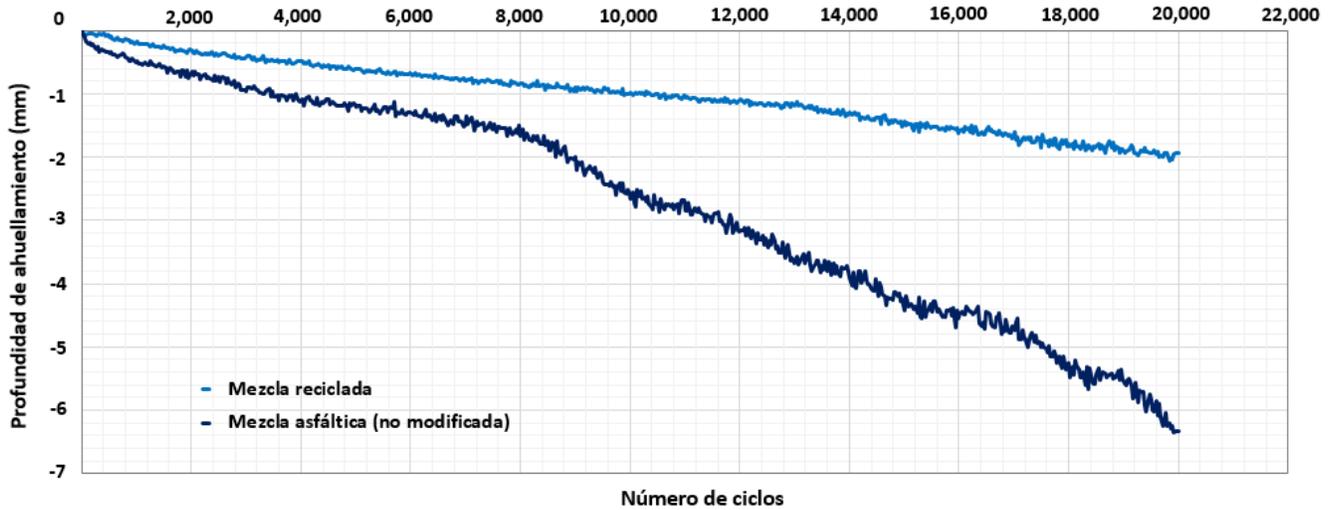
**Figura 3.36 Microscopía de barrido de polímero puro.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.37 Microscopía de barrido de la mezcla reciclada.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.8 RUEDA CARGADA DE HAMBURGO

El daño por humedad puede ser causado por una pérdida de adhesión entre el aglutinante y la superficie del agregado o por un debilitamiento de la fuerza de cohesión causado por la interacción con la humedad.



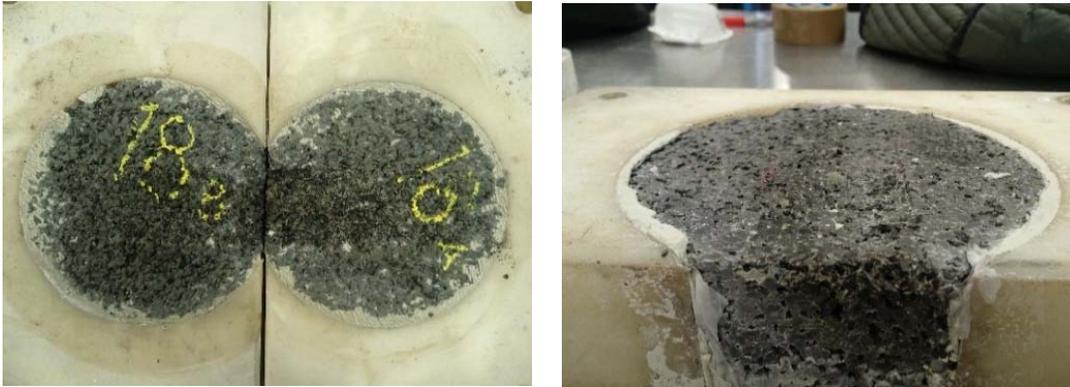
**Figura 3.38 Profundidad de rodera en mezcla reciclada y asfáltica.**  
Fuente: Elaboración propia.

Las pendientes de la mezcla de asfalto cambian a una pendiente pronunciada cuando el número de ciclos es mayor a 8,000 (Figura 3.38). Esto indica que en la zona primaria y secundaria, el mecanismo de la deformación permanente en la mezcla de asfalto es la densificación de los agregados. Sin embargo, después de alcanzar el pico, la dilatación y la pérdida de empaquetamiento de agregados dominan el mecanismo de temperatura. Las imágenes de la Figura 3.39, muestran claramente la profundidad de enraizamiento de 6,32 mm en este tipo de mezcla.



**Figura 3.39 Profundidad de ahuellamiento de la mezcla asfáltica.**  
Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 3.40, la mezcla reciclada, además de no mostrar una zona de fluencia durante los ciclos, la pendiente permanece asintótica sin presentar un punto de inflexión hacia la fatiga, dando resistencia a la deformación con estabilidad y sin movimiento de agregados. La profundidad del surco fue de 1.93 mm con este tipo de ligante (Figura 3.40).



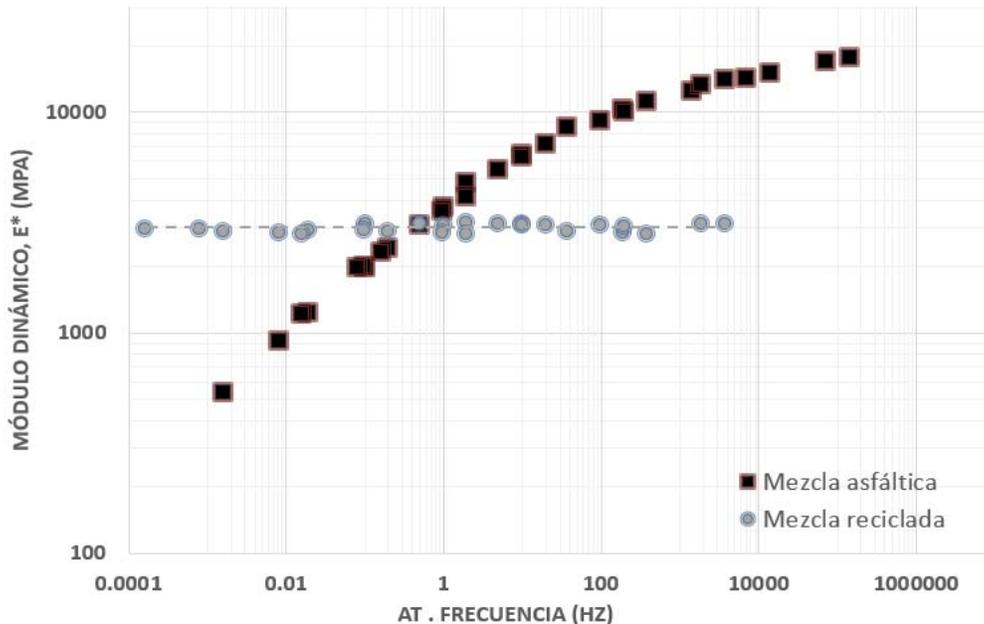
**Figura 3.40 Profundidad de ahuellamiento de la mezcla reciclada.**  
Fuente: Elaboración propia.

En contraste, la prueba cargada de Hamburgo permite hacer una estimación más apropiada del comportamiento de la mezcla mediante pruebas que simulan las condiciones reales. Por ello, se corrobora que el diseño y comportamiento de la mezcla elaborada con material reciclado garantizan un buen comportamiento a las cargas vehiculares, temperatura y humedad, es decir, estructuras de mejor calidad con aspectos sustentables.

### **3.5.9 MÓDULO DINÁMICO**

De acuerdo con Vidal (2006), la caracterización dinámica de los materiales utilizados en la construcción de carreteras es un reto indispensable para las regiones del país, pues de ello depende la certidumbre del dimensionamiento de la estructura de los pavimentos. El módulo dinámico de las mezclas asfálticas, se establecen como un parámetro importante dentro del diseño por métodos empírico-mecanicistas, pues hacen parte del algoritmo que ayuda a definir el espesor de cada capa.

Los especímenes reciclados mostraron valores de dinámicos de 3100 Mpa a diferentes frecuencias de carga y temperatura, demostrando que la mezcla elaborada con polímeros reciclados no presenta cambios por variación de temperatura ni frecuencia de carga (Figura 3.41).



**Figura 3.41 Módulo dinámico de la mezcla reciclada y asfáltica.**  
Fuente: Elaboración propia

El desarrollo de este estudio, comprende un análisis a la rigidez de la mezcla con respecto a diferentes temperaturas y frecuencias con respecto a la normativa ASTM-D3497 y AASTHO-TP62, para conocer e interpretar el comportamiento de la curva maestra de la mezcla con el objetivo de decretar el módulo del material.

### 3.5.10 TRAMO DE PRUEBA

Las actividades que se realizaron para reponer una porción una porción de la carpeta asfáltica que presenta daños como oquedades por desprendimiento o desintegración inicial de los agregados, registraron texturas y acabados uniformes con elevaciones similares al resto de la carpeta (Figura 3.42 y 3.43).



**Figura 3.42 Bacheo aislado con mezcla reciclada.**  
Fuente: Elaboración propia.

Una vez concluida la etapa de conservación, los residuos producto de la remoción de la carpeta dañada se transportaron al banco de desperdicios aprobado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en un vehículo protegido de lonas para impedir la contaminación del entorno o que se derramen.



**Figura 3.43 Apertura al tránsito.**  
Fuente: Elaboración propia.

## 4. CONCLUSIONES

Con base en los resultados informados en esta investigación, podemos confirmar la hipótesis planteada, ya que, utilizar poliestireno expandido como sustituto del asfalto mejora el desempeño y las características en comparación con el uso habitual de betún en la construcción de pavimentos. Las propiedades de la mezcla reciclada, mejoraron en todos los aspectos, lo que ayuda a aumentar la vida útil de los pavimentos.

A partir de estos estudios experimentales, es evidente que la resistencia a compresión simple aumenta hasta un 80% en comparación con la muestra convencional. El aumento en la resistencia se debe a los enlaces y uniones que genera el nuevo aglutinante. El valor a la tracción indirecta se ha incrementado hasta 20%. La viscosidad del aglutinante alterno tiene una disminución de aproximadamente 6.85% en comparación con la del betún convencional.

La resistencia al ahuellamiento, produce valores permisibles y muy superiores a la muestra de control. Debido, al comportamiento dinámico que adopta la mezcla, ya que, no ocurren deformaciones por temperatura o amplitud de frecuencia. Implantando un módulo dinámico a cualquier temperatura (3100 Mpa).

La mezcla, a pesar de adquirir texturas similares a las que ofrece el asfalto, forma en la parte interior canales aptos para filtrar de forma inmediata el agua pluvial (coeficiente de permeabilidad de 0.5072 cm/seg). Esta cualidad, además de eliminar acumulaciones de agua en la superficie de rodamiento, gestionará al mismo tiempo recargas artificiales en los mantos acuíferos de la zona.

El comportamiento del bacheo fue semejante a las pruebas experimentales, ya que, no presentaron deformaciones ni desprendimiento del material pétreo. El monitoreo de evaluación y desempeño (mensual), revelo que la rehabilitación con este tipo de mezcla no presento fallas en la superficie (agrietamiento o "cracking"), debido a la rigidez y y susceptibilidad a la humedad y cambios térmicos.

Con el empleo de este aglomerante reciclado, además de buscar mejoras sustanciales, también se busca, contribuir a la generación de una cultura del desarrollo sustentable en el área de pavimentos, ya que, con la eliminación de los consumos energéticos y la reutilización de materiales (poliestireno expandido), se contribuirá, en la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y volúmenes de residuos. Esta idea, representa una alternativa eficiente, económica y ecológica en la industria del pavimento.

Algunas ventajas de utilizar este aglutinante alternativo desde el punto de vista ecológico son las siguientes:

- No incluye cemento asfáltico en su elaboración.
- Reutilización de residuos que tardan cientos de años en degradarse (poliestireno expandido)
- La fabricación y desarrollo del aglutinante no se requiere de consumos energéticos (diésel o gasolina).
- Reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera.
- Tasa de infiltración capaz de gestionar la recarga artificial de mantos acuíferos.

Los resultados anteriores proporcionan un fuerte soporte para considerar este producto como material innovador, ya que, además de solventar problemas estructurales que han sido heredados de los procedimientos constructivos habituales; crea e introduce una tecnología de manufactura limpia, la cual, está estructurada y organizada por un procedimiento metodológico que puede ser desarrollado no solo en los países de América del Norte sino también al resto del mundo, consiguiendo formalmente una inclusión económica y social por el uso de materiales reciclados.

Por último, esta mezcla además de ofrecer infraestructuras con mejores propiedades mecánicas con aspectos medioambientales y sociales en el sector carretero, podrá establecer desde el punto de vista empresarial nuevas oportunidades sólidas de empleos para la construcción de carreteras sustentables.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen R., Little D. N. & Bhasin A., (2012), Structural characterization of micromechanical properties in asphalt using atomic force microscopy. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 24: 1317–1327.
- Álvarez L., Arámbula M. & Caro S., (2008), X-ray computed tomography and aggregate image system (AIMS) for studying hot mix asphalt and aggregates, *Engineering and Research*, 8(2): 142-151.
- AASHTO-T324 (2015), “Standard Test Method for Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)”, AASHTO, September 09, 2015.
- AASHTO-TP62 (2007), “Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)”, AASHTO, January 01, 2007.
- ASTM C39 (2017), “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, ASTM International, December 03, 2017.
- ASTM C127 (2015), “Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate”, ASTM International, January 01, 2015.
- ASTM C131 (2013), “Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine”, ASTM International, September 09, 2013.
- ASTM C136 (2014), “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse”, ASTM International, January 12, 2014.
- ASTM C496 (2017), “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, ASTM International, December 03, 2017.

ASTM D75 (2014), "Standard Practice for Sampling Aggregates", ASTM International, January 12, 2014.

ASTM D811 (2011), "Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements", ASTM International, January 12, 2014.

ASTM D1188 (2010), "Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples", ASTM International, September 09, 2010.

ASTM D1701 (2017), "Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete", ASTM International, January 06, 2017.

ASTM D2419 (2014), "Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate", ASTM International, January 06, 2014.

ASTM D2726 (2017), "Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures", ASTM International, January 06, 2017.

ASTM D3497 (2003), "Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures", ASTM International, October 15, 2017.

ASTM D4791 (2010), "Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate", ASTM International, June 01, 2010.

ASTM D5821 (2013), "Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate", ASTM International, December 01, 2013.

Balaguera A., Carvajal G., Alvertí J. & Fullama P., (2018), Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review, *Resources, Conservation & Recycling*, 132: 37-48.

Becker Y., Mendez M. & Rodriguez Y., (2001), Polymer modified asphalt. *Technological Vision*, 9: 39-50.

- Bernard E. O., (2017), Polymer Chemistry and Synthesis. *Polymer Science and Engineering*, 2: 17–40.
- Cárdenas J. & Fonseca E., (2009), Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura, *Revista EIA*, 12: 125-137.
- Cárdenas G., Eusebio A. & Jaimes J., (2017), Pavimentos permeables, una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso de agua, *Ciencia ERGO-SUM*, 24(2): 173-180.
- Canevarolo A. (2004), Técnicas de caracterización de polímeros, Editorial ArtLiber, 168.
- Coreño A. & Méndez B., (2010), Relación estructura-propiedades de polímeros, *Educación Química*, 21(4): 291-299.
- Costa L., Fernandez S., Silva H. & Olivera J., (2017), Study of the interaction between asphalt and recycled plastics in new polymer modified binders (PMB), *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29(1): 192-197.
- Chaturabong P. & Bahia H., (2017), The evaluation of relative effect of moisture in Hamburg wheel tracking test, *Constructions and Building Materials*, 153: 337-345.
- Chávez V., Hernández B. & Manzano R., (2011), Modelación del envejecimiento de los pavimentos asfálticos con la metodología de la superficie de respuesta, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 12(4): 373-382.
- Chen J., Lin K. & Chang M., (2005), Influence of coarse aggregate shape on the strength of asphalt concrete mixture, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6: 1062-1062.
- Galeana L. & Wax H., (2000), Precipitation from petroleum fluids: a review. Asphalts and asphaltenes, *Developments in petroleum science series*, 40: 557–608.

- Gichaga F., (2016), The impact of road improvements on road safety and related characteristic, *IATSS Research*, 40: 72–75.
- Granados H., Álvarez B., Echeverría S. & Andrade L., (2015), Consumo de energía y emisiones de bióxido de carbono del sector refinación de petróleo en México de 2015 a 2030, *Revista Ingeniería y tecnología*, 4: 105-135.
- Golalipour A., Jamshidi E., Niazi Y., Afsharikia Z. & Khadem M. (2012), Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt, *Social and Behavioral Sciences*, 53(3): 440-449.
- González O., Peña J., Muñoz M., Santamaría A., Pérez A. & F. Martínez, (2002), Rheological techniques as a tool to analyze polymer-bitumen interactions: bitumen modified with polyethylene and polyethylene-based blends, *Energy & Fuel*, 16: 1256-1263.
- Gómez M., Pérez I. & Pasandín A., (2016), Recycled construction and demolition waste in cold asphalt mixture: evolutionary properties, *Journal of Cleaner Production*, 112: 588-598.
- Jaimes N. & Miguel A., (2012), Petróleo: Historia y perspectivas geopolíticas, *Revista Aldeas del mundo*, 17(4): 65-70
- Jones D. & Kennedy T., (1991), The Asphalt model: results of the SHRP asphalt research program, *Transportation Research Board*, 4: 1-11.
- Hickman R., Givoni M., Bonilla D. & Banister D. (2015), *Transport and Development*, Edited Edward Elgar, 736.
- Hamzah M., Mohd H. & Van M., (2012), Permeability loss in porous asphalt due to binder creep, *Construction and Building Materials*, 30: 10-15.
- Hasirci V., Yilgor P., Endogan T., Eke G. & Hasirci N., (2017), Polymer fundamentals: Polymer Synthesis, *Comprehensive Biomaterials II*, 1: 478-506.
- Hormaeche A., Pérez D. & Txetxu S., (2016), *El Petróleo y la Energía en la Economía*, Editorial IKEI, 298.

Huaquan S., Tao X., Pei Z. & Ruiling J. (2017), Combustion properties of saturates, aromatics, resins, and asphaltenes in asphalt binder, *Construction and Building Materials*, 136: 515-523.

Kalantar Z., Rehan K. & Mahrez A., (2012), A review of using waste and virgin polymer in pavement, *Construction and Building Materials*, 33: 55-62.

Kuhlman T. & Farrington J. (2010), What is sustainability, *Journal Sustainability*, 2: 3426-3448.

Kyung S., Wonho B., Seul W., Min W. & Kwang M., (2017), Design of semi-rigid type of flexible pavements, *Construction and Building Materials*, 151: 907-915.

Lawal S. & Zhang J., (2016), Fault Monitoring and Fault Tolerant Control in Distillation Columns, *Chemical Engineering and Advanced Materials*, 3(11): 865-870.

León M. & Ramírez F., (2010), Caracterización morfológica de agregados para concretos mediante el análisis de imágenes, *Revista Ingeniería de Construcción*, 25(2): 215–240.

Li D. & Greenfield M., (2013), Chemical compositions of improved model asphalt systems for molecular simulations, *Fuel Journal*, 15: 347-356.

Lu X. & Redelius P., (2008), New test method for determination of wax content in crude oils, residues and bitumens, *Fuel*, 87: 43–51.

Lv L., Zhou L., Wang L., Liu J., M B. & Yang S., (2016), Selective inhibition of methanogenesis by sulfate in enrichment culture with production water from low-temperature oil reservoir, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 108: 133-141.

Mora A. & Marbot R., (2010), Determinación de las fracciones del petróleo crudo con el empleo de la destilación simulada por cromatografía gaseosa como método alternativo, *Revista CENIC*, 41(2): 105-112.

Montejo F., (2002), Ingeniería de pavimentos, Editorial Stella Valbuena de Fierro, 378.

- Mohajerani A., Ashdown M., Abdhashi L. & Nazem M. (2017), Expanded polystyrene geofoam in pavement construction, *Construction and Building Materials*, 157: 438-448.
- Muhammad N., Keyvanfar A., Majid M., Shafaghat A. & Mirza J., (2015), Waterproof performance of concrete: a critical review on implemented approaches, *Construction and Building Materials*, 101: 80-90.
- Múnera J. & Ossa E., (2014), Polymer modified bitumen: optimization and selection, *Materials & Design*, 62: 91-97
- NTC (2007), Norma Técnica Colombiana NTC-OHSAS-18001, Sistema de gestión en seguridad y salud ocupacional. Consejo Colombiano de Seguridad, 24 de octubre de 2017.
- Oyekunle L., (2006). Certain Relationships between Chemical Composition and Properties of Petroleum Asphalts from Different Origin. *Oil & Gas Science and Technology*, 61(3): 433-441.
- Padilha T. & Ghisi E. (2017), Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72: 473-484.
- Peng N., Hua L., Voon W. & Kulanthayan S., (2017), Relative improvements in road mobility as compared to improvements in road accessibility and economic growth: A cross-country analysis, *Transport Policy*, 60: 24-33.
- Pethrick A., (2013), Polymer structure characterization, *Journal RSC*, 60: 24-33.
- Pineda F. & Mesta H., (2001), Petroleum asphaltene: generated problematic and possible biodegradation mechanisms, *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 43(3): 143-150.
- Podzimek S., (2017), Synthetic polymers, *Sciences and Chemical Engineering*, 34: 257-266.
- Polacco G., Merusi F. & Stastna G., (2015), A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility, *Advances in Colloid and Interface Science*, 224: 72-112.

- Puello M. & Nikolaevna A., (2009), Técnicas instrumentales para la evaluación del envejecimiento en los asfaltos, *Iteckne innovación e investigación en ingeniería*, 6(2): 1-11.
- Pradeep K., Gautam P., Agrawal R. & Harshwardhan S., (2018), Sustainable use of waste in flexible pavement: A review, *Construction and Building Materials*, 180: 239-253.
- Reyes O. R., (2009), Cambios dinámicos y mecánicos de una mezcla asfáltica densa por las propiedades del asfalto y energía de compactación, *Ingeniería y desarrollo*, 26: 139-155.
- Reyes O., Fuentes P. & Moreno T., (2013), Comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos modificados con ceras, *Ingeniería y desarrollo*, 31(1): 161-178.
- Rossacci J. & Shivkumar S., (2003), Bead fusion in polystyrene foams, *Journal of Materials Science*, 38: 201-206.
- Rondón Q., Rodríguez R. & Moreno A., (2007), Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de policloruro de vinilo (PVC) polietileno de alta densidad (PEAD) y poliestireno (PS), *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 6(11): 91-104.
- Romo D., (2016), Refinación de petróleo en México y perspectiva de la Reforma Energética Problemas del Desarrollo, *Revista Latinoamericana de Economía*, 47(187): 139-164.
- Saidi S., Kattan L., Jayasinghe P., Hettiaratchi P. & Taron J., (2018), Integrated infrastructure systems – A review, *Sustainable Cities and Society*, 36: 1-11.
- Santos J. & Ferreira A., (2012), Pavement Design Optimization Considering Costs and M&R Interventions, *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 53(3): 1182-1191.
- Secerov S., Sokolovic S. & Govedarica D., (2009), Performance of expanded polystyrene particles in deep bed filtration, *Separation and Purification Technology*, 68: 267-272.

- Sokon Z., Bliznak V., Sedlak P., Zacharov P., Pesice P. & Skuthan M., (2016), Ensemble forecasts of road surface temperatures, *Construction and Building Materials*, 187: 33-41.
- Solanki P. & Zaman M., (2017), Design of semi-rigid type of flexible pavements, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(2): 99-111.
- Sotelo D., Favela C., Sotelo G. & Gallegos C., (2017), Design and implementation of a control structure for quality products in a crude oil atmospheric distillation column, *ISA Transactions*, 71(2): 573-584.
- Schmidt, P., Cioffi, M., Voorwald, H. & Silveria, J., (2011), Flexural Test On Recycled Polystyrene, *Engineering Procedia*, 10: 930-935.
- SCT (2000), Norma Oficial Mexicana N-CSV-2-02-003/00. Bacheo superficial aislado. Diario Oficial de la Federación 24 de junio de 2015.
- SCT (2015), Norma Oficial Mexicana NOM-086-SCT2-2015. Señalamiento y dispositivos para protección en zonas de obras viales. Diario Oficial de la Federación 24 de junio de 2015.
- Varjani S. J., (2017), Microbial degradation of petroleum hydrocarbons, *Bioresource Technology*, 223: 227-286.
- Vargas T. & Sulroca G., (2015), Estudio morfológico comparativo de asfaltenos en crudo cubanos al utilizar n-pentano y n-hexano como agente precipitante, *Ingeniería del Petróleo*, 6(2): 43-48.
- Vélez L. M., (2010), Permeabilidad y porosidad del concreto, *Revista Tecno-Lógicas*, 25: 169-187.
- Wang Y., Chong, D. & Wen Y., (2017), Quality verification of polymer-modified asphalt binder used in hot-mix asphalt pavement construction, *Construction and Building Materials*, 150: 157-166.

- Wang T., Xiao F., Zhu X., Huang B., Wang J. & Amirkhani S., (2018), Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement, *Journal of Cleaner Production*, 180: 139-158.
- Won S., Cho S. & Kim S., (2015), The neighborhood effects of new road infrastructure: transformation of urban settlements and resident's socioeconomic characteristic in Danang, Vietnam. *Journal Habitat International*, 50: 169-179.
- Yaseen S. & Mansoori G., (2017), Molecular dynamics studies of interaction between asphaltenes and solvents, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 156: 118-124.
- Yongbing X., Zefeng G., Fengchao L., Shen S. & Bingzheng L., (2017), Modified asphalt properties by blending petroleum asphalt and coal tar pitch, *Fuel Journal*, 16: 64-70.
- Xu G. & Wang H., (2016), Molecular dynamics study of interfacial mechanical behavior between asphalt binder and mineral aggregate, *Construction and Building Materials*, 121: 264-254.
- Zorzenao P., Mariath R. & Pinto F., (2018), Asphaltenes subfractions extracted from Brazilian vacuum residue: Chemical characterization and stabilization of model water-in-oil (W/O) emulsions, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 160: 1-11.