



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

Sustitución del Asfalto a Base de Polímeros Plásticos Reciclados Para
Pavimentos

Opción de titulación

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería

Presenta:

Ing. Límberg Artemio Enríquez Figueroa

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

Dra. Teresa López Lara

Presidente

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca

Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangél

Vocal

Dr. Francisco Javier García Rodríguez

Suplente

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Suplente

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Fecha: julio de 2020

DEDICATORIA

A mis padres y hermano, quienes forman la piedra angular de mi vida por la manera de incentivarme a seguir siempre hacia adelante.

A mi novia por su apoyo incondicional, cariño y comprensión durante todo este tiempo.

A mis amigos de vida como de generación que de una u otra manera me daban ánimos para no claudicar, ayudando que mi estancia fuese más amena y divertida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme fortaleza y permitir culminar esta etapa de mi vida.

Este logro es un esfuerzo en conjunto, por ello, dirijo unas palabras a las siguientes personalidades y entes que sin ellos no hubiese sido posible el desarrollo y culminación de este proyecto de vida.

A la Dra. Teresa López Lara por haberme brindado su conocimiento y sobre todo tiempo invaluable para sacar adelante este trabajo en tiempo y forma.

Al Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca por sus comentarios y consejos a lo largo de este período, pudiendo presentar un documento suficientemente prolijo.

A mis sinodales, el Dr. Francisco Javier García Rodríguez que siempre estuvo en la disposición de aportar desde diferentes puntos, ya fueran técnicos y/o prácticos, al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza y el Dr. Jaime Horta Rangél por sus valiosos y atinados comentarios en el aspecto técnico.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro por su incondicional apoyo durante este período.

Tabla de contenido

	Pág.
DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN	9
ABSTRACT.....	10
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	13
1.2 JUSTIFICACIÓN	14
1.3 HIPÓTESIS	15
1.4 OBJETIVO	15
CAPÍTULO II ESTADO DEL ARTE	16
2.1 PAVIMENTOS	17
2.2 ASFALTO.....	27
2.3 POLÍMEROS	31
2.4 MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS	36
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	40
3.1 OBTENCIÓN DEL POLÍMERO	41
3.2 SELECCIÓN DEL AGREGADO PÉTREO Y ASFALTO	42
3.3 DISEÑO DE LA MEZCLA	48
3.3.1 <i>DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL ENSAYO MARSHALL</i>	<i>48</i>
3.3.2 <i>ELABORACIÓN DE LAS PASTILLAS PARA EL ENSAYE MARSHALL (NORMAS DE CONSTRUCCIÓN SCT 1981 TOMO IX, 5-5.10 (ASTM D 6926)</i>	<i>51</i>
3.3.3 <i>ELABORACIÓN DE PASTILLAS CON POLÍMERO.....</i>	<i>53</i>
3.4 PRUEBAS A LA MEZCLA.....	56
3.4.1 <i>DETERMINACIÓN DE LOS PORCENTAJES DE VACÍOS EXISTENTES EN LA MEZCLA ASFÁLTICA (ASTM-D1188).....</i>	<i>56</i>

3.4.2 DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD Y FLUJO DE LOS ESPECÍMENES MARSHALL (ASTM- D6927)	58
3.4.3 ENSAYE A TENSIÓN INDIRECTA	59
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
4.1 OBTENCIÓN DEL POLÍMERO	61
4.2 AGREGADO PÉTREO	62
4.3 PRUEBA DE VISCOSIDAD ROTACIONAL.....	66
4.4 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO.....	68
4.5 ENSAYES A LAS DIFERENTES MEZCLAS	70
CAPÍTULO V CONCLUSIONES	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
ANEXOS	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
2.1 Estructura de pavimento flexible	19
2.2 Comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos	19
2.3 Sección típica de un pavimento rígido	20
2.4 Sección típica de un pavimento flexible	23
2.5 Tipos de superficie de rodadura en pavimentos flexibles	24
2.6 Agregado pétreo a) granulometría densa, b) granulometría abierta	26
2.7 Conformación de una refinería convencional	28
2.8 Estructura molecular de los asfaltos	30
2.9 Clasificación de los polímeros a) lineal, b) ramificado y c) entrecruzado	32
2.10 Clasificación de los polímeros a) naturales y b) sintéticos	33
2.11 Proceso productivo del polipropileno	35
3.1 Procedimiento metodológico	40
3.2 Taparrosas obtenidas a través de recolección	41
3.3 Agregado pétreo natural para usarse en mezcla asfáltica	42
3.4 Localización del banco de materiales sobre la autopista Querétaro – Tequisquiapan	43
3.5 Muestreo del agregado pétreo	44
3.6 Caracterización del agregado pétreo. a) Tamices y b) Máquina de los ángeles	45
3.7 Cubeta de asfalto EKBE	46
3.8 Principio de funcionamiento del viscosímetro rotacional	47
3.9 Calentado de material pétreo y asfalto en estufa	55
3.10 Mezcla de los agregados pétreos y asfalto con el polipropileno (PP)	55
3.11 Proceso de enfriamiento de pastillas con polipropileno (PP)	56
3.12 Determinación del espesor de la pastilla	57
3.13 Peso de la pastilla sin recubrir al aire	57
3.14 Peso de la pastilla cubierta con estearato al aire	58
3.15 Pastillas en saturación a 60 °C	59
3.16 a) Configuración de la carga, b) Rotura del specimen	60
4.1 a) Taparrosas de PP recicladas, b) Hojuelas obtenidas del proceso de molienda	61

4.2 Curva granulométrica de agregados pétreos	65
4.3 Gráfica Viscosidad – Temperatura	67
4.4 Gráficas para determinación de contenido óptimo de asfalto	69
4.5 Gráfica de pesos volumétricos de las diferentes mezclas	71
4.6 Gráfica de vacíos de las diferentes mezclas	72
4.7 Gráfica de vacíos en el agregado mineral (VAM) de las diferentes mezclas.....	72
4.8 Gráfica de estabilidad de las diferentes mezclas	73
4.9 Gráfica de flujo de las diferentes mezclas	73
4.10 Gráfica de tensión indirecta con las diferentes mezclas	75

Dirección General de Bibliotecas UAO

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
2.1 Estudios realizados con polímeros en mezclas asfálticas	37
2.2 Características generales de los modificadores	39
3.1 Ensayes para caracterización del material pétreo	45
3.2 Graduación propuesta para mezclas cerradas (densas)	49
3.3 Parámetros de diseño de mezclas Marshall	50
3.4 Porcentaje de vacíos de agregado mineral (VAM)	51
3.5 Contenido mínimo de asfalto	52
3.6 Porcentaje de asfalto utilizado en las mezclas asfálticas de diseño	53
3.7 Proporciones de la mezcla con polímero	54
4.1 Distribución granulométrica Material 1	62
4.2 Distribución granulométrica Material 2	63
4.3 Distribución granulométrica Material 3	63
4.4 Distribución granulométrica para mezclas sfálticas de granulometría denas	64
4.5 Caracterización de agregado grueso	66
4.6 Caracterización de agregado fino	66
4.7 Temperaturas de mezclado y compactación para la elaboración de mezclas asfálticas	67
4.8 Resumen de resultados Marshall para la determinación del contenido óptimo de asfalto ..	68
4.9 Muestra de control.....	70
4.10 Características obtenidas en las mezclas con diferentes proporciones de hojuelas de polipropileno.....	71
4.11 Resistencia a tensión indirecta con diferentes proporciones de hojuelas de polipropileno..	74
5.1 Mezclas con hojuelas de polipropileno (PP) aptas para una vía con alta intensidad de tránsito	77

RESUMEN

En la actualidad las carreteras son la principal vía de movilidad para los seres humanos y mercancías con ello ocasionando un efecto positivo en la economía de una región determinada, sin embargo, a causa de las técnicas y procesos utilizados para llevar a cabo su construcción, resultan ser una de las principales fuentes de contaminación por medio de gases liberados hacia la atmósfera, contribuyendo de manera directa al calentamiento global. Conocedores que el asfalto es un derivado del petróleo y actualmente la tecnología usada para su producción genera un gran impacto negativo sobre el medio ambiente, además de ser un compuesto finito, por ello esta investigación tuvo como objetivo el desarrollo de una mezcla asfáltica modificada a través de la inclusión de polímeros plásticos reciclados como sustituto parcial del asfalto sin afectar las propiedades mecánicas de una mezcla convencional para pavimentos flexibles.

De lo anterior, se exploraron los beneficios potenciales del polipropileno reciclado para emplearlo como uno de los componentes principales en una mezcla para pavimento flexible y con ello se realizaron pruebas de laboratorio basadas en los estándares AASHTO y ASTM (por ser normas internacionales) para verificar sus propiedades mecánicas. Como parámetro de control se utilizó el asfalto PG 64-22 el cual nos ayudó a evaluar la nueva mezcla. El enfoque de esta investigación se centra en demostrar la factibilidad de la sustitución parcial del asfalto en una mezcla permitiendo obtener resultados favorables en los valores de tracción indirecta y Marshall, garantizando que el pavimento conservará su calidad durante toda su etapa de servicio, por un lado, mientras por el otro se espera fortalecer el desarrollo de mezclas amigables con el medio ambiente, colaborando con la optimización de recursos naturales como también en la reducción de gases efecto invernadero y volúmenes de desechos sólidos sin reutilizar.

Palabras clave: Asfalto, sustitución, reciclaje de residuos, polipropileno, mezcla, propiedades mecánicas

ABSTRACT

Nowdays roads play a crucial role in transporting people and merchandise, having a positive effect on the economy of a given region, however, due to the techniques and processes used to carry out their construction, they are be one of the main sources of pollution by means of gases released into the atmosphere, contributing significantly to global warming. Asphalt is a petroleum derivative and currently the technology used for its production generates a negative impact on the environment as well as being a finite compound, so this research aimed at developing a modified asphalt mix through the inclusion of recycled plastic polymers as a partial substitute for asphalt without affecting the mechanichal properties of a conventional pavement mix.

About las text, the potential benefits of recycled polypropylene for use as one of the main components of a flexible pavement mix were explored and laboratory tests based on the AASHTO and ASTM standards were carried out to verify its mechanichal properties. As a control parameter PG 64-22 asphalt is used which helped us to evaluate the new mix. The focus of this research is to demonstrate the feasibility of the partial substitution of the asphalt in a mixture allowing to obtain favourable results in the indirect traction and Marshall values, guaranteeing that the pavement will retain its quality troughout its service stage, on the one hand, while for the other, it is expected to strengthen the development of environmentally friendly mixtures, collaborating with the optimization of natural resources as well as reducing greenhouse gases and volumes of solid waste without reuse.

Keywords: asphalt, sustitution, waste recycling, polypropylene, asphalt Mix, mechanichal properties

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

Las carreteras son piezas clave para incentivar el desarrollo económico y social en cualquier país: por ello, Keane (1996) y Martínez (2014) consideran que las redes carreteras son la infraestructura de mayor uso y principal vía de movilidad de los seres humanos, además de tener un impacto a nivel micro y macroeconómico en la productividad de una determinada region. Consecuentemente, Ibarrola (2008) destaca la inversión en construcción y mantenimiento de redes carreteras como una herramienta de crecimiento económico, generando condiciones de estabilidad en un país.

Un pavimento está conformado por una serie de capas superpuestas, de manera horizontal, las cuales con base en su función son diseñadas y construidas con materiales apropiados y posteriormente compactados, teniendo como material principal el asfalto en la construcción de pavimentos flexibles generando una amplia satisfacción durante varias décadas, lo cual replican Costa *et al.* (2017) al mencionar a el asfalto como el material de 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. 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, los cuales ocasionan un efecto dinámico provocando ciertas fallas

estructurales sobre la capa de rodadura, y a las condiciones climatológicas extremas a consecuencia del calentamiento global. Por lo tanto, entre las diversas soluciones para combatir estos deterioros que terminan representando un gasto debido al mantenimiento constante que se le debe realizar para mantener al pavimento en óptimas condiciones y así otorgarle plena seguridad al usuario durante su trayecto encontramos, la modificación del asfalto a través de polímeros naturales o sintéticos que de acuerdo con Yongbing *et al.* (2017), resulta ser la solución principal para resolver estos problemas, de este modo pudiendo asegurar la durabilidad necesaria de las carreteras a nivel mundial.

En suma de estos acontecimientos, surgió la idea de desarrollar un proceso metodológico para elaborar con materiales reciclados un compuesto alternativo capaz de sustituir de manera parcial la cantidad de asfalto utilizada en una mezcla convencional para pavimentos flexibles. Con ello, se pretende presentar una mezcla que ofrezca una mejor respuesta ante los deterioros que se puedan presentar en la capa de rodadura, a causa de los fenómenos descritos anteriormente, por medio de características únicas obtenidas a través de los resultados de esta investigación y con ello preservar e impulsar la sustentabilidad en el área de los pavimentos.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, tal cual señalan Valdés *et al.* (2012) los pavimentos asfálticos o flexibles son los más utilizados en la construcción de las redes carreteras de los diferentes países, teniendo en cuenta que su comportamiento en la fase de operación o servicio dependerá directamente de su diseño y calidad de los materiales con los que se construya, sin embargo, esto no garantiza un desempeño óptimo por parte del pavimento, como mencionan Múnero y Ossa (2014), al mencionar que una mezcla asfáltica convencional (hecha de asfalto y agregados pétreos) para pavimentos asfálticos no es capaz de satisfacer con las demandas del usuario actual, lo cual conlleva que se lleguen a presentar una gran cantidad de deterioros sobre su superficie (capa de rodadura) de manera temprana, como son: deformaciones por agrietamiento, baches y roderas; siendo estos últimos los más comunes en este tipo de pavimentos.

El uso de materiales desechables hoy en día es a gran escala debido a su bajo costo haciéndolo de fácil acceso, sin embargo, la poca o nula planificación en algunos casos sobre el manejo de sus desperdicios post-consumo en la actualidad lo ha convertido en un problema de suma importancia en todos los sectores. Una de las principales causas de la poca generación de nuevos productos a partir de los ya desechados es el económico, al resultar poco factible en cuestión de costos para las empresas, por ello es necesario buscar alternativas que nos permitan hacer uso de estos productos por medio de su reutilización y así disminuir el daño que estos ocasionan al medio ambiente, aunado a este problema encontramos que la elaboración tanto de mezclas asfálticas como de sí solo el asfalto son una de las principales fuentes de creación de gases efecto invernadero, lo cual provoca alteraciones de forma directa en el medio ambiente.

Como se conoce los pavimentos flexibles suelen tener un proceso degenerativo natural; de igual forma los deficientes procesos de rehabilitación generan costos adicionales en cuanto a material y tiempos de traslado, dichas problemáticas se

pueden ver reducidas con uso de materiales que ayuden a mejorar las propiedades mecánicas de la estructura, por ello en esta investigación se lleva a cabo el desarrollo de una metodología, por medio del uso de polímeros obtenidos de desechos generados post-consumo, de una mezcla asfáltica modificada que cumpla con los estándares necesarios para cubrir las necesidades de las condiciones de tránsito actual.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Por un lado, Figueroa *et al.* (2009) señalan que uno de los principales problemas con el que permanentemente se enfrentan los ingenieros de pavimentos es la calidad de las mezclas asfálticas, pudiendo considerar una amplia gama de factores que pueden intervenir, como son: las características de los materiales que la constituyen y el proceso de elaboración. Mientras por otro lado, Múnera y Ossa (2014) y Palma *et al.* (2015) mencionan que factores como los altos volúmenes de tránsito, la circulación de vehículos cada vez más grandes y pesados, provocan que el asfalto por sí sólo no sea apto para ser utilizado, por tanto, Figueroa *et al.* (2007) plantean el uso de polímeros en mezclas asfálticas los cuales ocasionarán una reducción significativa en la cantidad de éste. Por ende, esta investigación reside en la necesidad de realizar una mejora en las características mecánicas de las mezclas asfálticas por medio de la aplicación de polímeros como sustitutos parciales del asfalto, estos conseguidos a través de materiales reciclados, que permita cumplir de manera correcta la vida útil para el que fue diseñado el pavimento para con ello obtener una alternativa que nos permita mantener nuestras carreteras en óptimas condiciones durante más tiempo, además de contribuir con la elaboración de una mezcla amigable con el medio ambiente.

1.3 HIPÓTESIS

La sustitución parcial del asfalto utilizado en una mezcla tradicional mediante plásticos reciclados no influirá de forma negativa en las propiedades mecánicas de tensión indirecta así como en sus características Marshall.

1.4 OBJETIVO

Desarrollar una mezcla asfáltica modificada a base de polímeros reciclados que a través de la evaluación del ensayo de tensión indirecta y resultados de las características Marshall se aprecie una mejora o igualdad en las propiedades obtenidas a través de una mezcla asfáltica tradicional, aunado a esto lograr una reducción de asfalto.

CAPÍTULO II ESTADO DEL ARTE

Como parte de la presente investigación, se procede a explicar en primera instancia los términos, conceptos y características que dan parte a este trabajo, con el fin de abrir un panorama general y con ello tener una idea más clara sobre los temas que se abundaron.

GENERALIDADES

La infraestructura carretera de acuerdo con Saidi *et al.* (2018) son sistemas que organizan o gestionan sistemas complejos de flujos vehiculares, movimiento e intercambio de bienes y servicios, por lo cual Gichaga (2016), asevera 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, con ello mejorando la calidad de vida de sus habitantes.

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 de la siguiente manera: 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 posteriormente abrir 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.

Con lo escrito anteriormente nos damos cuenta que la ingeniería en vías terrestres es una de las principales herramientas para crear un ambiente próspero, otorgando una mejora significativa en la calidad de los habitantes de una región

determinada, siendo una de las piedras angulares la construcción de carreteras, las cuales su nivel de desempeño durante su etapa de servicio dependerá directamente del tipo de pavimento utilizado, con esto abrimos paso al siguiente subtema donde hablaremos sobre los tipos que existen y sus principales características.

2.1 PAVIMENTOS

Los pavimentos, son bienes y servicios que contribuyen al desarrollo económico de una region al ser estos la principal vía de movilidad terrestre. Este capítulo tiene como finalidad explorar los diferentes tipos de pavimentos, así como, su estructura considerando que también serán examinados temas de intereés con el fin de comprender sus propiedades mecánicas y con ello poder contar con una mayor interpretación sobre el comportamiento y funcionamiento de dicha estructura.

Como primer punto se hará mención de una definición sobre ¿qué es un pavimento? para ello Hickman (2015) delimita 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”. A lo cual se suman Santos y Ferreira (2012) mencionando que dichas capas 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 un pavimento podrá llevar a cabo sus funciones de manera adecuada siempre y cuando la mezcla (sin tomar en cuenta que sea asfáltica o de concreto hidráulico) con la que se elabora la superficie de rodamiento cumpla con las siguientes condiciones:

- Un diseño estructural adecuado para resistir el impacto de las cargas ocasionadas por el tránsito al que esté sometida la estructura durante sue

tapa de servicio y con ello evitar la generación de deformaciones permanentes (ahuellamiento), falla por fatiga y/o envejecimiento por oxidación del asfalto.

- Resistencia a la fisuración y susceptibilidad térmica a causa de los agentes por intemperismo.
- Buena adherencia entre la carpeta y base o sub-base hidráulica.
- Una textura superficial capaz de resistir el tránsito, además de constar por un coeficiente de fricción que evite que los vehículos puedan derrapar.
- Poseer un color adecuado que evite fenómenos tales como son: el reflejo y deslumbramiento.
- Un buen diseño de drenaje que brinde protección al pavimento evitando el encharcamiento de líquidos que a la postre se puedan infiltrar a las capas inferiores como también evitar el acuaplaneo.
- Llevar a cabo un buen proceso constructivo que a la larga permita evitar al máximo la ejecución de tareas de mantenimiento.
- Por ultimo, reducir el ruido ocasionado por los neumáticos de los vehículos que transitan la vialidad, con el fin de ofrecer confort al usuario y medio ambiente.

TIPOS DE PAVIMENTOS

En un principio los pavimentos se han dividido en dos tipos, flexibles y rígidos para fines prácticos como mencionan Rico y del Castillo (1977). De acuerdo con Yorder y Witczak (1975) los definen de la siguiente manera: los pavimentos flexibles pueden consistir en una superficie relativamente delgada construida de concreto asfáltico sobre una base y subbase, las cuales descansan sobre la subrasante compactada. Mientras, los pavimentos rígidos se encuentran conformados por concreto hidráulico y pueden contar o no con una sub-base que sirva como capa de transición entre la capa de rodadura y la subrasante, sin embargo, en la actualidad

y con ayuda de nuevas tecnologías desarrolladas nos encontramos con la siguiente clasificación, Padilha y Ghisi (2017), mencionan que existen tres tipos de pavimentos, clasificándolos como: flexibles (pavimentos de concreto asfáltico) (Figura 2.1), rígidos (pavimentos de concreto hidráulico) y los pavimentos compuestos (constituido por capas flexibles y rígidas en el mismo pavimento).

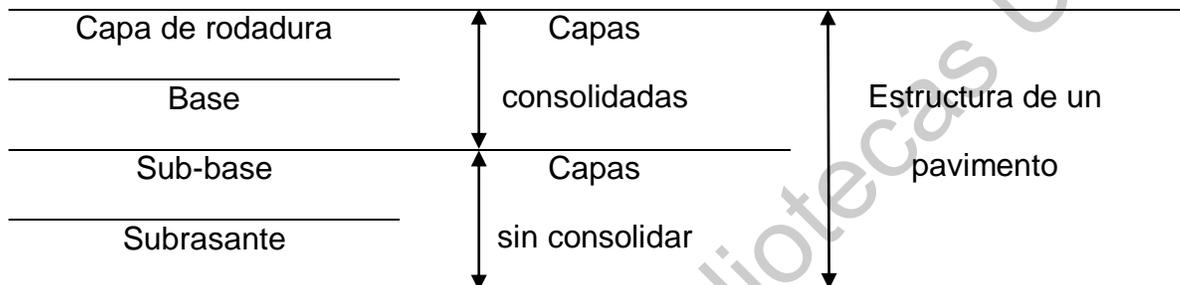


Figura 2.1 Estructura de pavimento flexible.

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

Pradeep *et al.* (2018), señalan que el objetivo principal de un pavimento es distribuir las cargas producidas por los vehículos a la subrasante. Montejo (2002) y Coronado (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 (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.

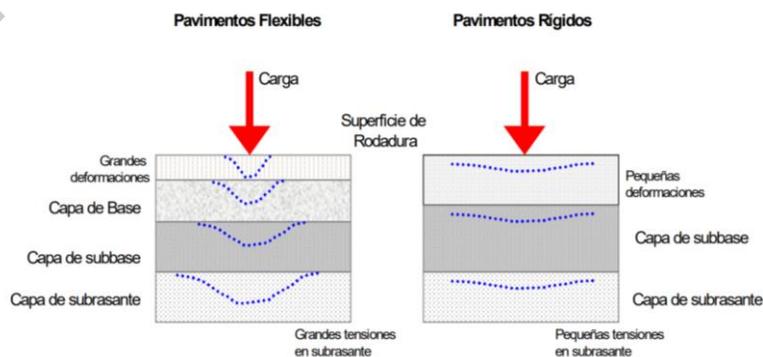


Figura 2.2 Comportamiento de pavimento flexibles y rígidos.

Fuente: Coronado (2002).

PAVIMENTO RÍGIDO

La principal característica de este tipo de pavimento radica en su superficie de rodamiento, la cual consta de concreto hidráulico, como lo mencionan Montejó (2002) y Cabrera (2013).

La sección transversal de este tipo de pavimento, en su parte superficial constará de una losa de concreto hidráulico, la cual será desplantada sobre una sub-base conformada de materiales pétreos, sin embargo, existe la posibilidad de prescindir de dicha capa, como han mencionado Yorder y Witczak (1975) y así llevar a cabo el desplante de la losa de concreto hidráulico directamente sobre la subrasante. Además otra característica en este pavimento resulta en su poca capacidad de deformación, por lo cual en caso de existir alguna deformación en una de sus capas inferiores es muy probable que presente una falla de manera abrupta en su superficie. De acuerdo con Coronado (2002) y Montejó (2002) la estructura de un pavimento rígido (Figura 2.3) consta de tres capas y las definen de la siguiente manera:

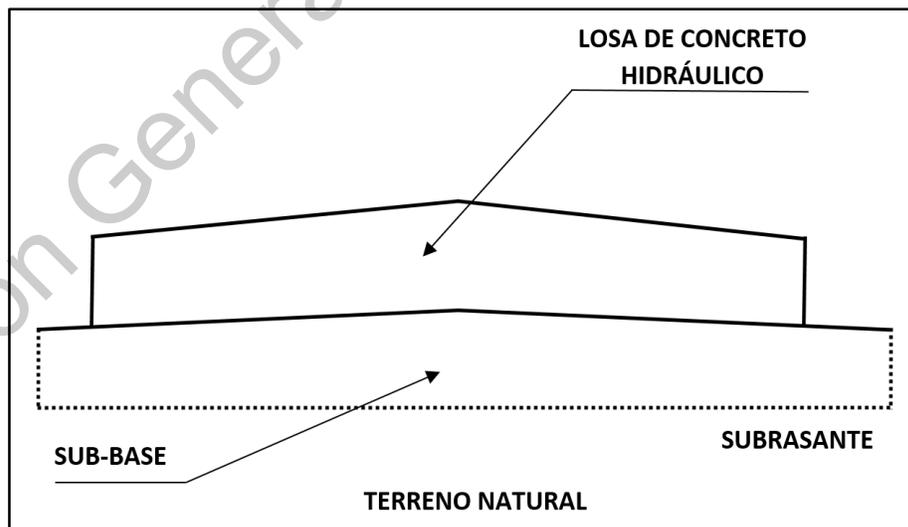


Figura 2.3 Sección típica de un pavimento rígido.

Fuente: Cabrera (2013).

- Superficie de rodadura: es la capa superficial de la estructura del pavimento, construida con concreto hidráulico, teniendo como función proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente, así como soportar y transmitir de manera adecuada los esfuerzos hacia las capas inferiores.
- Sub-base: es la capa encargada de soportar, transmitir y distribuir de manera uniforme las cargas aplicadas en la superficie de rodadura hacia la capa subrasante. Sirve como capa de transición entre la capa subrasante y superficie de rodadura al ser la responsable de controlar los posibles cambios volumétricos que se puedan generar en la subrasante. Debido a su composición por materiales granulares, sirve como capa drenante, así manteniendo libre de acumulación de agua o cualquier líquido a toda la estructura.
- Subrasante: es la capa de terreno encargada de soportar la estructura total del pavimento y con un espesor variable, el cual dependerá del diseño y del material que se encuentre debajo de ella.

PAVIMENTO FLEXIBLE

De acuerdo con Zornberg (2013), un pavimento flexible está constituido de una capa delgada de mezcla asfáltica desplazada sobre una capa de base y esta a su vez se encuentra desplazada sobre una capa de sub-base, ambas están conformadas de material granular, descansando sobre una capa de suelo compactado llamada subrasante. En la actualidad se cuenta con diferentes métodos de diseño para llevar a cabo un pavimento flexible, Yang (2004), los clasifica en 5 categorías: método emérico con o sin prueba de resistencia al suelo, método limitante de falla de corte, método de desviación limitante, método de regresión basado en el rendimiento del pavimento o tramo de prueba y método empírico mecanicista.

Rico y del Castillo (1977) hacen mención de algunas de las características fundamentales de un pavimento flexible:

- Resistencia estructural: consiste en soportar cargas impuestas por el tránsito dentro del nivel de deterioro y paulatina destrucción previstos en el proyecto.
- Deformabilidad: las deformaciones excesivas están asociadas a estados de falla. Un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente de que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural.
- Durabilidad: ligada a una serie de factores económicos y sociales del propio camino. Surgen muchas incertidumbres de carácter práctico para lograrla, por lo que juega un papel importante el sentimiento particular del especialista.
- El costo: un pavimento representa un balance entre la satisfacción de requisitos de resistencia y estabilidad en general por un lado y el costo, por otro. Un diseño correcto será el que llegue a satisfacer los requerimientos necesarios del servicio a costo mínimo.
- Requerimiento de la conservación: los factores climáticos, la intensidad del tránsito el futuro comportamiento de las terracerías, las condiciones de drenaje y subdrenaje son los criterios que están directamente relacionados con la conservación de los pavimentos. La falta de conservación tendrá como consecuencia una vida prematura del pavimento.
- La comodidad: especialmente en grandes autopistas y caminos de primer orden, los problemas y métodos del diseño de los pavimentos deben verse afectados por la comodidad que el usuario requiere para transitar a la velocidad de proyecto.

La estructura de un pavimento flexible está conformada por cuatro capas (Figura 2.4) de acuerdo con Padilha y Ghisi (2017), las cuales son definidas de la siguiente manera por Coronado (2002) y Montejó (2002):

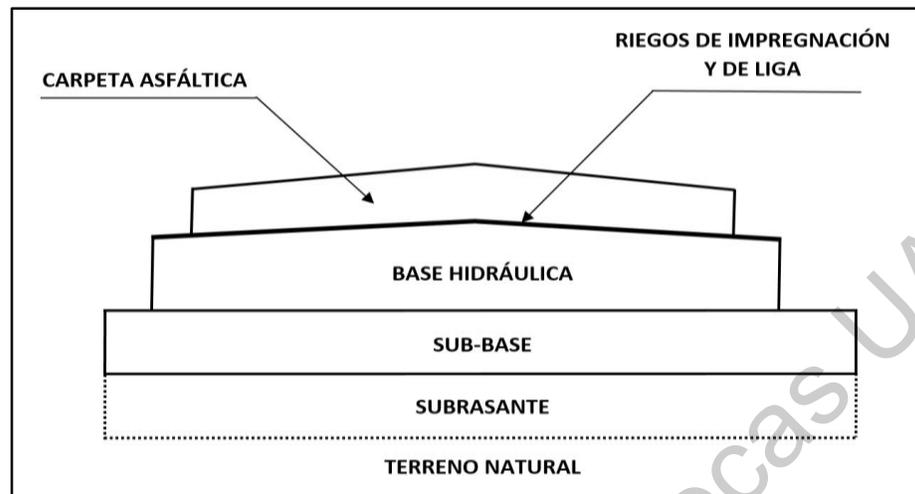


Figura 2.4 Sección típica de un pavimento flexible.

Fuente: Cabrera (2013).

- Superficie de rodadura: es la capa principal y tiene como objetivos proteger a la estructura del pavimento, a través de una superficie uniforme y estable al tránsito, al mismo tiempo de evitar filtraciones de agua que pudieran saturar las capas inferiores, provocando su deformación. Por último, es la capa encargada de darle un mayor soporte a toda la estructura del pavimento.
- Base: es la capa de pavimento que tiene como función distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito, a la sub-base. Generalmente está conformada por material constituido por piedra de Buena calidad, triturada y mezclada con material de relleno o bien por una combinación de piedra o grava, con arena y selo, en su estado natural. Su estabilidad dependerá de la graduación de las partículas, su forma, densidad relativa, fricción interna y cohesión, y todas estas propiedades dependerán de la proporción de finos respecto al agregado grueso.
- Sub-base: es la capa encargada de transmitir las cargas por tensión hacia la capa subrasante, además de drenar el agua que se introduzca a través de la carpeta o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar, ya que actúa como filtro de la base impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen y con ello deteriora su calidad. Algunos cambios volumétricos de

la capa subrasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de humedad (expansiones) o a cambios extremos de temperatura (heladas), pueden absorberse en esta capa así impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.

- Subrasante: es la capa de transición entre el terreno natural y la estructura del pavimento, la cual también es soportada en su totalidad por esta capa. En gran parte el espesor del pavimento dependerá de manera directa de esta capa, por lo que es necesario que cumpla con ciertos requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción a causa de la humedad.

CARPETA ASFÁLTICA

Como ya se mencionó antes, la superficie de rodadura contribuye a aumentar la capacidad de soporte de toda la estructura ante las cargas producidas por el tránsito que circula sobre ella, Coronado (2002) los clasificó de la siguiente manera (Figura 2.5):

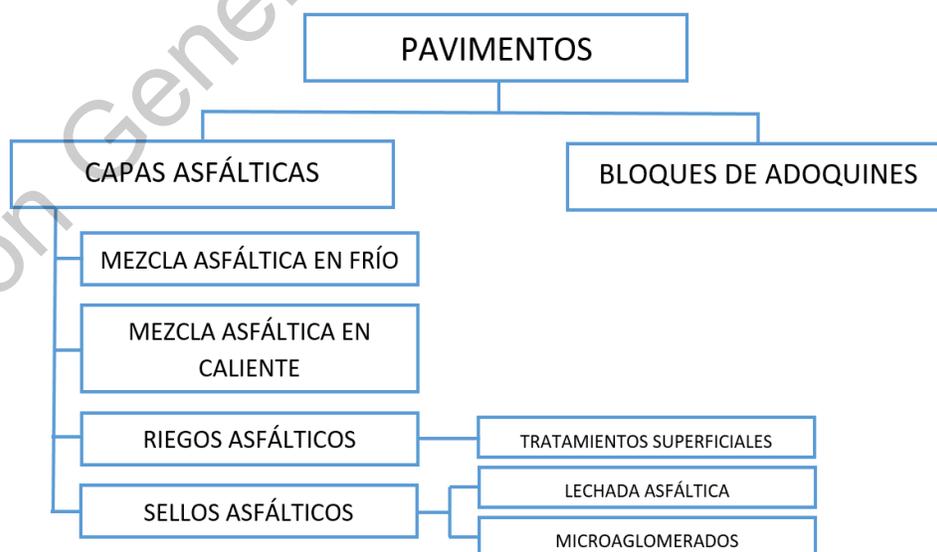


Figura 2.5 Tipos de superficie rodadura en pavimento flexible.

Fuente: Coronado (2002).

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. Bjorn (2008) comenta que los tipos de materiales utilizados y los espesores de cada carpeta que conforma la estructura del pavimento debe ser con base en la distribución y composición vehicular, en cuanto 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, aunado a este último punto Arencibia *et al.* (2013), destacan que las mezclas asfálticas tradicionales (mezclas en caliente) durante su elaboración resultan ser uno de los principales contaminantes del medio ambiente a causa de la liberación de gases efecto invernadero, como corroboran Portugal *et al.* (2017) al aludir que este tipo de mezclas tiende a requerir grandes cantidades de energéticos, durante su elaboración, para alcanzar temperaturas de entre 140 a 180 °C, que con base en lo mencionado por Bahía *et al.* (2001) son las temperaturas necesarias para que el asfalto alcance una viscosidad adecuada y así lograr el recubrimiento total del material pétreo.

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

Reyes *et al.* (2013) consideran que para llevar a cabo un buen diseño de carpeta asfáltica es necesario tomar en cuenta dos aspectos básicos, los cuales se mencionan a continuación:

- **La función resistente:** este aspecto permite determinar los tipos de materiales y los espesores con los que debe conformarse dicha capa.

- **La finalidad:** consiste en determinar las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del firme, para que resulten seguras y confortables para el usuario.

INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

Un aspecto a tomar en cuenta durante la construcción de una carpeta asfáltica son los agregados pétreos, tal cual hacen mención Gopalipour *et al.* (2012), al decir que los agregados son uno de los materiales claves utilizados en la industria de la construcción y que además conforman la mayor parte de un pavimento flexible. Por lo tanto, las características con base en la calidad del agregado tendrán un efecto de manera impresionante en el rendimiento de los pavimentos asfálticos.

El agregado mineral constituye aproximadamente el 95% de la mezcla asfáltica respecto a su peso aproximadamente. Chen *et al.* (2005) demostraron que las características de los agregados influyen de manera directa en el rendimiento y capacidad de servicio del pavimento. El conocimiento de las propiedades y la distribución granulométrica es crucial en el diseño de pavimentos ya que a partir de estos aspectos, entre otros más, dependerá su calidad, por ello Álvarez *et al.* (2008), apuntan que la distribución granulométrica en las mezclas (Figura 2.6) intervendrá en los valores de la deformación permanente, ya que esta ayuda a la transferencia de esfuerzos a las capas inferiores.

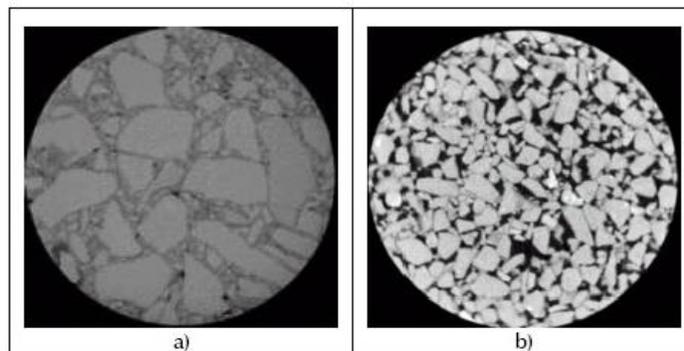


Figura 2.6 Agregado pétreo a) granulometría densa, b) granulometría abierta

Fuente: Álvarez *et al.* (2008).

2.2 ASFALTO

En el siguiente subcapítulo, se expondrá todo lo relacionado referente al asfalto partiendo desde su definición hasta la manera de obtenerlo además de explicar su composición.

GENERALIDADES

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. Estos depósitos son definidos por Varjani (2017) y Lv *et al.* (2016) 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).

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 procesado 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).

Por un lado, Xu y Wang (2016) deducen que el incremento del consumo del material asfáltico 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, mientras por el otro lado Reyes *et al.* (2013) mencionan

que este material es capaz de proporcionar una íntima unión y cohesión con los agregados, ocasionando que esta mezcla sea capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos, mejorando la capacidad portante de la estructura.

PRODUCCIÓN

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 2.7), 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.

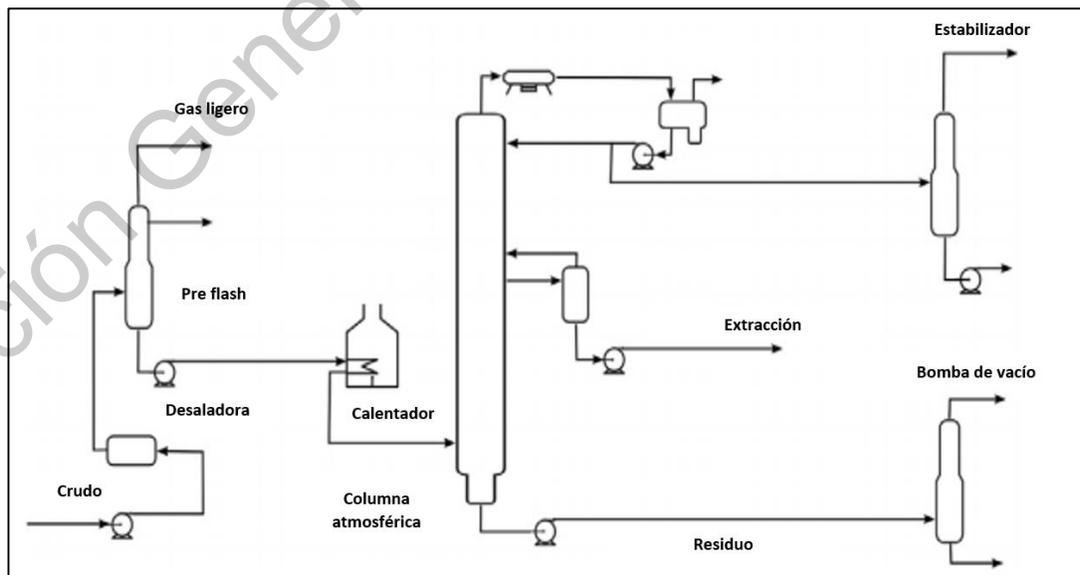


Figura 2.7 Conformación de una refinación convencional.

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).

COMPOSICIÓN QUÍMICA

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 2.8).

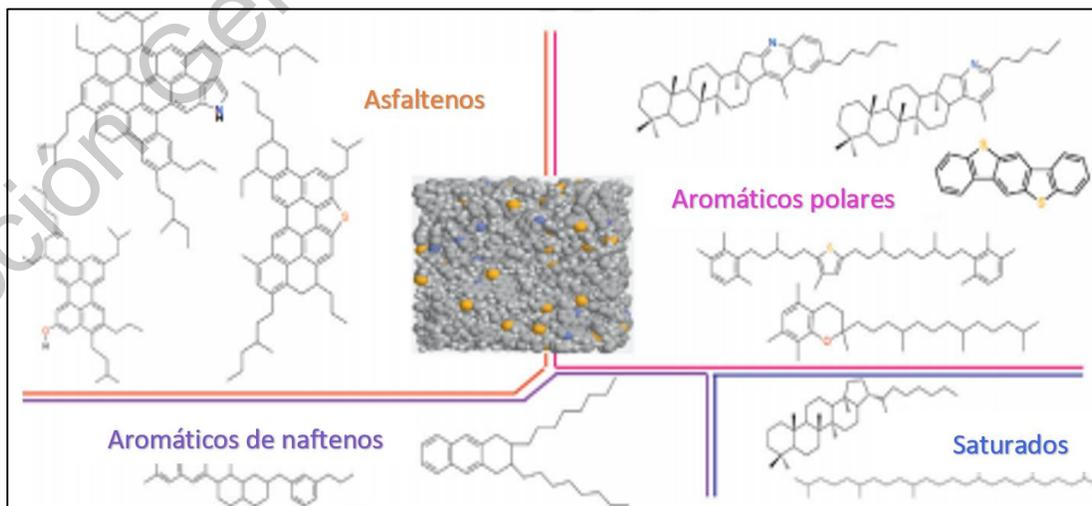


Figura 2.8 Estructura molecular de los asfaltos.

Fuente: Li y Greenfield (2013).

2.3 POLÍMEROS

En 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.

GENERALIDADES

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 han sido utilizados 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.

ESTRUCTURA DE LOS 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 2.9).

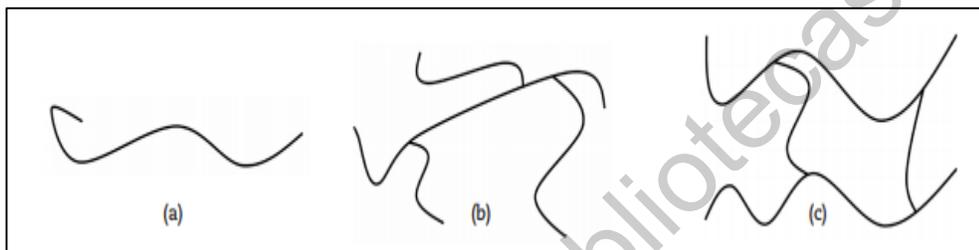


Figura 2.9 Clasificación de los polímeros a) lineal; b) ramificado y c) entrecruzado.

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.

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 (Figura 2.10):

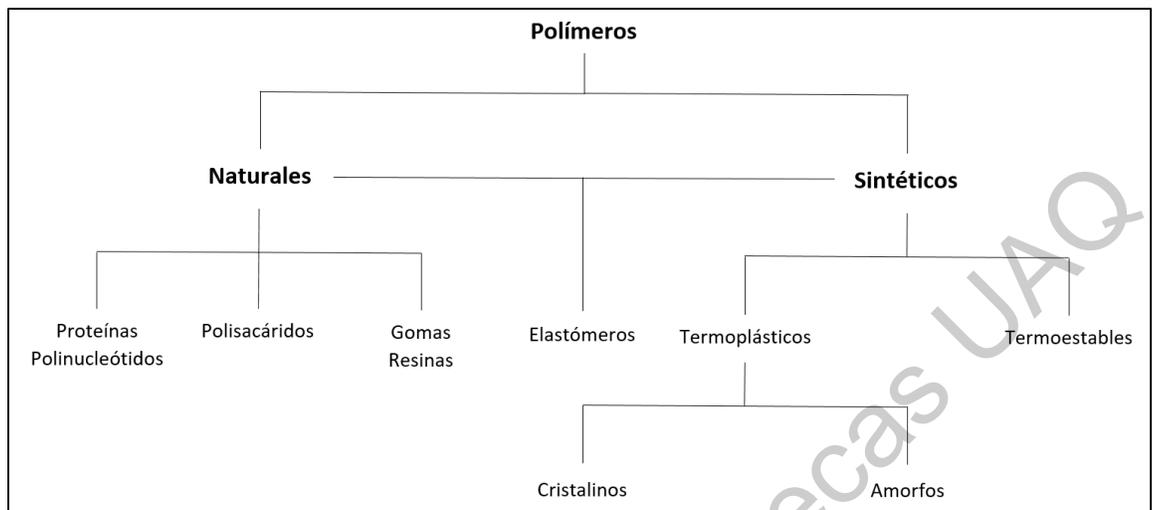


Figura 2.10 Clasificación de los polímeros a) naturales y b) sintéticos.

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 comopolímeros (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.

POLÍMEROS RECICLADOS

La sostenibilidad es un concepto evolutivo del siglo XXI que tiene como objetivo utilizar los recursos naturales de manera óptima por ello, Kuhlma *et al.* (2010) definen este concepto, 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.

POLIPROPILENO (PP)

En la actualidad los polímeros han logrado desplazar a los materiales metálicos y cerámicos (Brenner, 2000) lo cual ha incentivado su uso, tal es el caso del polipropileno que acuerdo con Market Study (2013) al día de hoy este material presenta una demanda global de alrededor de 55 millones de toneladas al año, esto

a consecuencia de su empleo para la producción de plásticos moldeados debido a su excelente combinación de propiedades que presenta, como peso ligero y resistencia al impacto (Harutun, 2003). El contenido de etileno en el polipropileno se caracteriza por su baja cristalinidad y propiedades elastoméricas, por lo cual, estos materiales suelen emplearse como mejoradores de impacto en mezcla con otros materiales (Caicedo *et al.*, 2017), por ello resulta común hoy en día realizar modificaciones sobre matrices de PP a través del desarrollo de materiales compuestos utilizando partículas a micro-escala (Thankur *et al.*, 2014), fibras (Bledzki *et al.*, 2015) y mediante mezclas o aleaciones con otros polímeros (Kang *et al.*, 2015). A continuación se muestra el proceso productivo del PP (Figura 2.11):

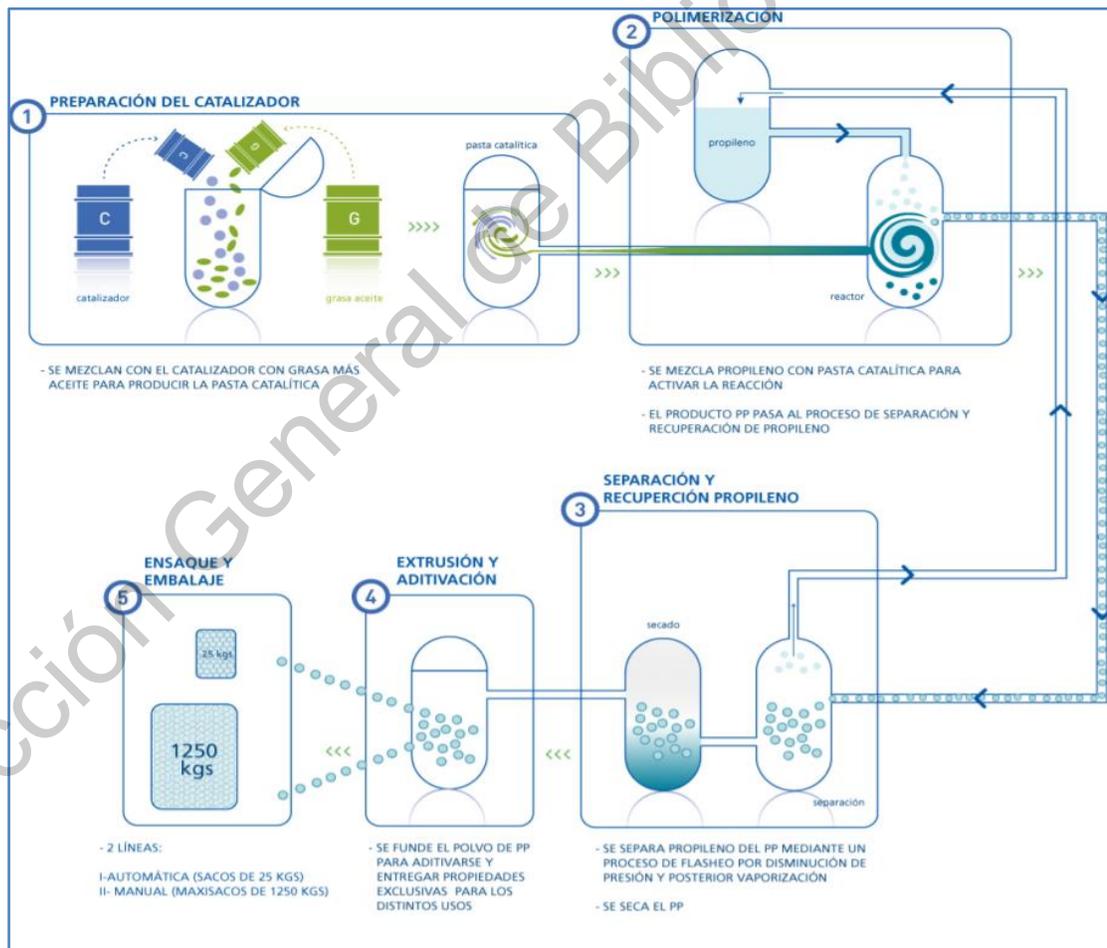


Figura 2.11 Proceso productivo del polipropileno.

Fuente: Petroquim

Algunas de las características más importantes del polipropileno son:

- Óptima relación costo / beneficio.
- Versatilidad: compatible con la mayoría de las técnicas de procesamiento existentes y usado en diferentes aplicaciones comerciales, como, industria automotriz, textiles, tuberías, etc.
- Buena procesabilidad: es el material plástico de menor peso específico ($0,9 \text{ g/cm}^3$), lo que implica que se requiere de una menor cantidad para la obtención de un product terminado.
- Barrer al vapor de agua: evita el traspaso de humedad.
- Buenas propiedades organolépticas, químicas, de resistencia y transparencia.

2.4 MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS

Huamán y Chang (2015) indicant que la defromación permanente es una de las fallas más preocupantes en el deterioro de los pavimentos, por ello es necesario desarrollar nuevas especificaciones técnicas para mezclas asfálticas, en las cuales se puedan incluir el uso de polímeros, con el objetivo que el pavimento cumpla con su etapa de servicio en condiciones óptimas para el que fue diseñado.

Gómez *et al.* (2016) nos demuestran que podemos llegar a conseguir una mayor rigidez en mezclas con el uso de materiales 100% reciclados de construcción y a un bajo costo de fabricación. Partiendo de esto, Castro *et al.* (2015) propone que una mezcla asfáltica modificada tiene la capacidad de otorgar y mejorar sus propiedades mecánicas en comparación con una tradicional provocado por la mejora a los cambios que experimenta cuando es sometida a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente.

A través del tiempo algunos autores han contribuido con investigaciones a favor del uso de polímeros en mezclas asfálticas, ya sea por mejorar alguna

propiedad mecánica en específico y/o crear alternativas que tengan un menor impacto negativo al medio ambiente, aunado a esto autores como Múera y Ossa (2014) concluyen que por sí solo el uso del asfalto en una mezcla no es suficiente para satisfacer las demandas del usuario actual. En la Tabla 2.1, se muestran algunas de las contribuciones realizadas en este ámbito:

Tabla 2.1 Estudios realizados con polímeros en mezclas asfálticas.

Autor(es)	Investigación	Material	Resultados
Figuerola <i>et al.</i> (2007)	Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente.	Poliestireno	Menores deformaciones permanentes (mejoramiento mayor al 50%), aumento de la estabilidad de la mezcla asfáltica, conservando un menor peso unitario con la inclusión de estos materiales.
Reyes (2009)	Cambios dinámicos y mecánicos de una mezcla asfáltica densa para las propiedades del asfalto y la energía de compactación.	Caucho (SBS)	El asfalto modificado presenta mejores propiedades mecánicas y presenta poca afectación por la temperatura del ensayo, generando una mayor cohesión en la mezcla en comparación con los asfaltos 60/70 y 85/100.
Baghaee <i>et al.</i> (2012)	Propiedades dinámicas de mezclas de asfalto de masilla de piedra con residuos de botellas de plástico.	Tereftalato de polietileno	Un porcentaje óptimo de PET del 1% con un módulo, de rigidez de 4500 MPa y un número de ciclos a la falla de 61981, considerablemente mayor en comparación con otros porcentajes de PET.

Reyes et al. (2013)	Comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos modificados con ceras.	Ceras naturales	Reducción en la viscosidad de los asfaltos y con ello la disminución en las temperaturas de fabricación y compactación de las mezclas. Reducción de los espesores de la capa de rodadura.
Múnero y Ossa(2014)	Estudio de mezclas binarias Asfalto-Polímero	Cera de polietileno, copolímero de estireno-butadieno y caucho molido de llanta.	Mayor capacidad de modificación de las propiedades convencionales, obteniendo asfaltos más duros y con temperaturas de ablandamiento mayores respecto al asfalto sin modificar.
Mejía (2015)	Influencia del polvo de neumático en la tensión indirecta y energía de fractura de las mezclas asfálticas tibias.	Polvo de neumático	Mezcla heterogénea a temperatura ambiente. Un mayor porcentaje de polvo provoca un aumento en los vacíos de aire, provocando una menor capacidad para disipar cargas de tránsito elevado, además de ser más susceptible al daño inducido por humedad.

Fuente: Elaboración propia

Figuroa *et al.* (2007) resumen algunos de los materiales que han servido como modificadores en mezclas asfálticas a través del tiempo como se muestra en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2 Características generales de los modificadores

Modificador	Características
Termoplásticos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se reblandecen con calor, peden ser solubles. 2. Al enfriarse se dejan de moldear sin perder propiedades. 3. Polímeros lineales. Forman pequeñas ramificaciones. 4. Polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo, poliestireno, copolímeros de etilenos-acetato de vinilo EVA, poliamidas, etc.
Termoendurecibles	<ol style="list-style-type: none"> 1. Formados por la base y el endurecedor. No se pueden transformar después de deformarse. 2. Resinas fenólicas, epoxy, de poliéster, de poliuretano.
Elastómeros	<ol style="list-style-type: none"> 1. Polímeros insaturados, amorfos y para conseguir sus propiedades elásticas se deben vulcanizar. 2. Caucho natural, caucho etileno-propileno, butadiene-estireno (SBR) de policloropeno, elastómerostermoplásticos de butadiene-estireno (SBS).

Fuente: Figuroa *et al.* (2007)

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

Este capítulo tiene como objetivo presentar las técnicas y procedimientos para desarrollar un nuevo aglutinante de polipropileno 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 polipropileno. Posteriormente, se realizaron a través de los estándares ASTM y AASTHO, estudios para caracterizar el material pétreo y ensayos para verificar las propiedades mecánicas de la mezcla.

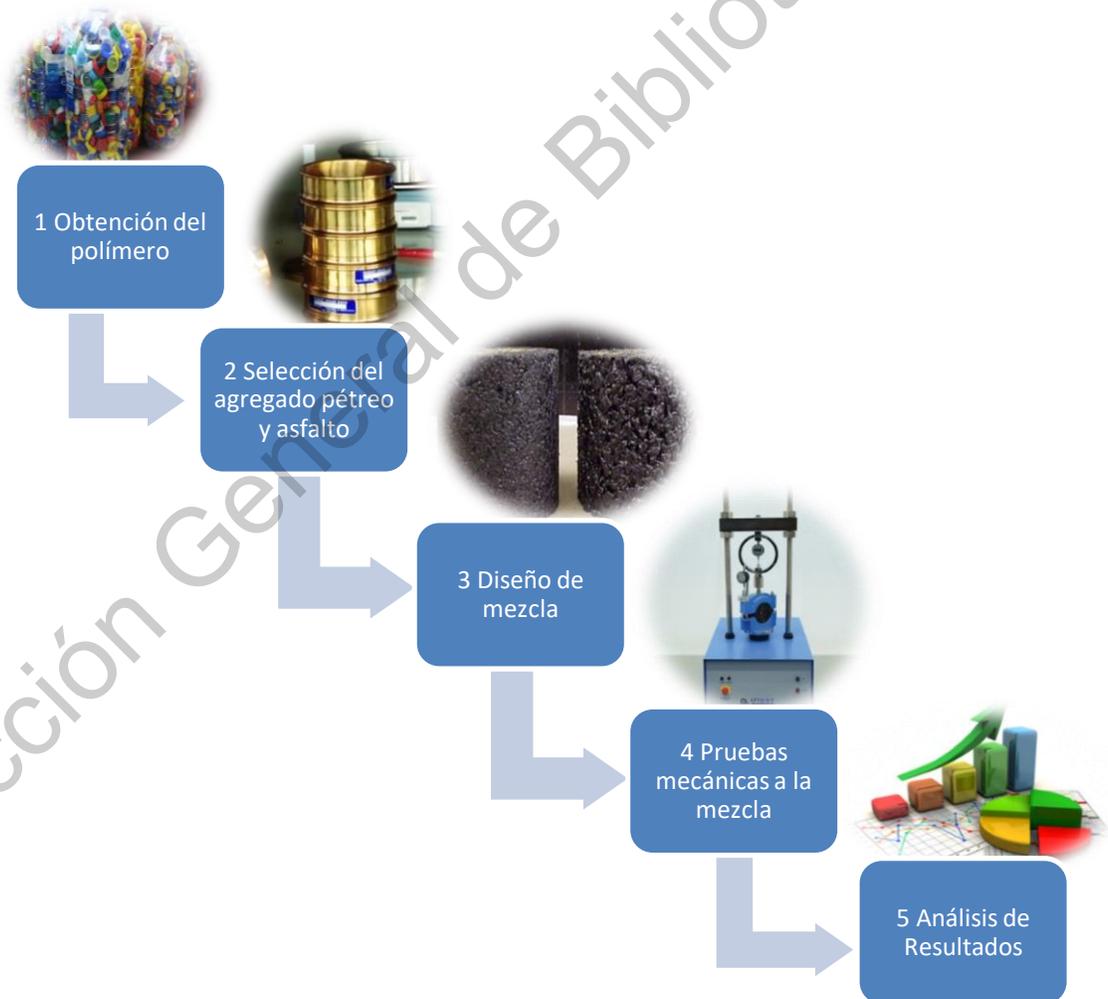


Figura 3.1 Procedimiento metodológico.

Fuente: Elaboración propia.

3.1 OBTENCIÓN DEL POLÍMERO

En esta sección se redactará el proceso por el cual se obtuvo el polímero utilizado durante esta investigación, con el propósito de impulsar la construcción de infraestructura carretera de manera sustentable.

Cadenas de reciclaje

A nivel mundial se estima, de acuerdo con Market Study (2013), que el polipropileno presenta una demanda de 55 millones toneladas al año, mientras que a nivel nacional La Asociación Nacional de Industrias del Plástico (ANIPAC), estima que el consumo nacional de plástico en nuestro país se hace uso de 125 mil toneladas aproximadamente, de manera anual, de las cuales en su mayoría son utilizadas para recipientes y envasados de alimentos.

El polipropileno utilizado en durante esta investigación, se obtuvo mediante la recolección de desechos a través de cadenas de reciclaje en la Zona Metropolitana de Querétaro, México. La materia prima obtenida, fueron: taparrosas de envases no retornables.



Figura 3.2 Taparrosas obtenidas a través de recolección.

Fuente: elaboración propia.

3.2 SELECCIÓN DEL AGREGADO PÉTREO Y ASFALTO

En su mayoría, las mezclas asfálticas están constituidas por asfalto y materiales pétreos, donde una mezcla tradicional de acuerdo con Rondón *et al.* (2007) está compuesta aproximadamente desde un 93 hasta un 95% de este tipo de materiales, por ello es de suma importancia conocer las características y propiedades de los agregados pétreos con el objetivo de proporcionar la calidad requerida par la mezcla que se vaya a realizar.



Figura 3.3 Agregado pétreo natural para usarse en mezcla asfáltica.
Fuente: Rondón (2007).

Muestreo del agregado pétreo

En primera instancia se identificó al banco de materiales en el Inventario Nacional del Banco de Materiales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Posterior a ello se obtuvieron los agregados pétreos para el desarrollo de nuestra experimentación.

Descripción del lugar de obtención de los agregados: los materiales utilizados en esta investigación son provenientes del banco de materiales conocido con el nombre de “La Cañada” ubicado sobre la autopista Querétaro – Tequisquiapan, cuya ubicación se aprecia en la Figura 3.4.

Ubicación geográfica del banco de materiales:



Figura 3.4 Localización del banco de materiales sobre la autopista Querétaro - Tequisquiapan.

Posterior a la ubicación del banco de materiales, se llevó a cabo la extracción de una muestra representativa, con el fin de evitar al máximo posibles variaciones a causa de la falta de los agregados durante el desarrollo del proceso experimental de esta investigación.

El procedimiento que se utilizó para llevar a cabo el muestreo del material es el descrito por la norma ASTM - D75, para posteriormente trasladarlo al laboratorio

de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la UAQ, lugar donde se varificaría su calidad con base en las normas vigentes.

El muestreo del material se llevó a cabo bajo la supervisión y con la ayuda del personal del banco de materiales (Figura 3.5):



Figura 3.5 Muestreo del agregado pétreo. a) Mezclado del material pétreo, b) Recolección del material pétreo.

Fuente: Elaboración propia.

Caracterización del agregado pétreo

Mohajerani *et al.* (2017) proponen diferenciar y valorar las propiedades de los materiales que conformaran las capas de la estructura con las Norms pertinentes (ASTM y AASHTO), ésto con la finalidad que los agregados tengan la capacidad de distribuir adecuadamente las cargas desde la superficie de rodamiento hasta la capa subrasante.

Para verificar que tanto las propiedades físicas y mecánicas del material pétreo cumplan con las deseadas, se efectuaron y analizaron los siguientes ensayos para cumplir con las especificaciones requeridas:

Tabla 3.1 Ensayes para caracterización del material pétreo.

Nombre del ensayo	Norma
Análisis granulométrico	ASTM C 136
Abrasión (desgaste de los ángeles)	ASTM C 131
Caras fracturadas	ASTM D 5821
Partículas planas y alargadas	ASTM D 4791
Equivalente de arena	ASTM D 2419
Densidad y absorción del agregado	ASTM C 127

Fuente: elaboración propia

Algunos de las herramientas y/o máquinas que se utilizaron para llevar a cabo los ensayos mencionados para la caracterización de los agregados son los presentados a continuación:

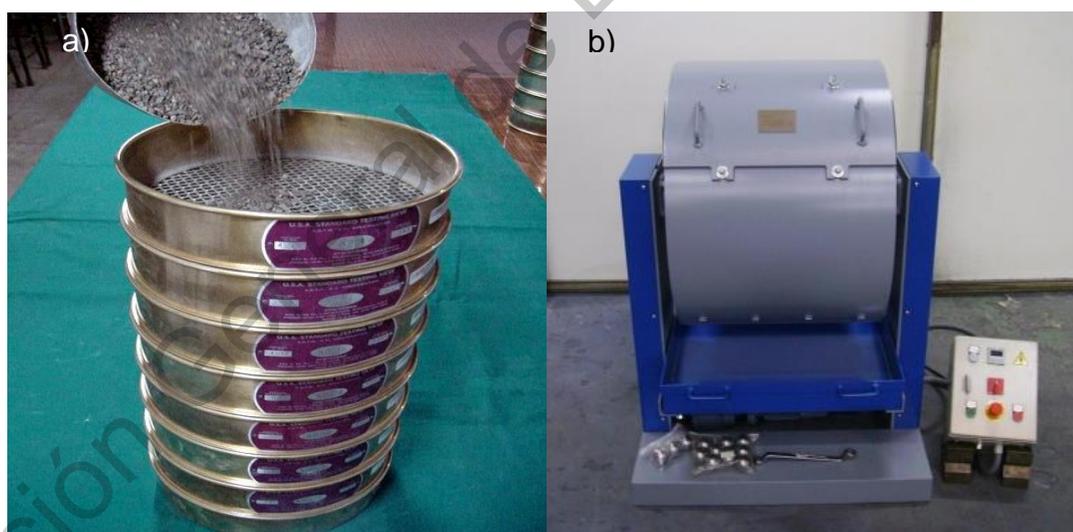


Figura 3.6 Caracterización del agregado pétreo. a) Tamices y b) Máquina de los ángeles

Fuente: Elaboración propia.

Cemento asfáltico

El asfalto utilizado fue el denominado EKBE, resultando ser el más común dentro del campo de pavimentación con mezclas asfálticas.



Figura 3.7 Cubeta de asfalto EKBE

Fuente: Elaboración propia.

Con el propósito de llevar a cabo un diseño preciso de la mezcla óptima de agregado-asfalto con la que se fabricarán los especímenes, al igual que a los agregados pétreos al asfalto se le realizó el ensaye de viscosidad rotacional de acuerdo a la norma ASTM–D-4402 con el objetivo de evaluar su “manejabilidad” a altas temperaturas sin tener un efecto negativo en sus propiedades, para dicho ensaye se usa un viscosímetro cilíndrico coaxial rotacional, como el aparato Brookfield.

Se mide la viscosidad del ligante asfáltico a alta temperatura con el objetivo de asegurar que el asfalto es suficientemente fluido para las operaciones de bombeo y mezcla. Por lo tanto la viscosidad se mide sobre el asfalto sin envejecer y no debe, de acuerdo con la especificación SUPERPAVE para ligantes, superar los 3 Pa.s para la temperatura de 135 °C.

La viscosidad rotacional se determina midiendo el torque necesario para mantener constante la velocidad rotacional de un vástago cilíndrico sumergido en la muestra a una temperatura constante (Figura 3.8).

El torque necesario para mantener el vástago rotando a una velocidad constante está directamente relacionado con la viscosidad de la muestra del ligante, la cual es determinada automáticamente por el viscosímetro.

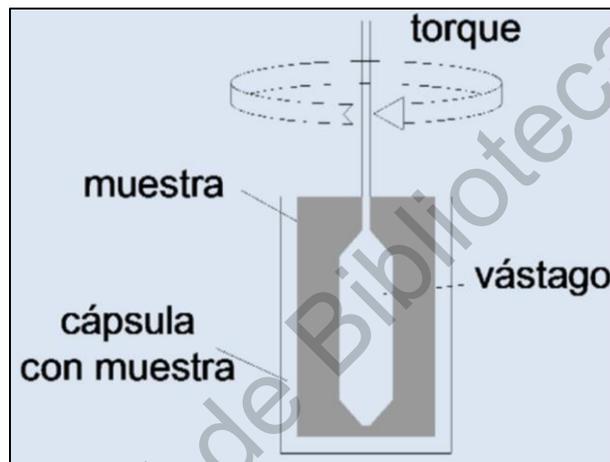


Figura 3.8 Principio de funcionamiento del viscosímetro rotacional.

Fuente: SUPERPAVE, 1994.

El empleo de esta prueba radica en obtener la viscosidad aparente de los asfaltos en las temperaturas de manipulación, mezclado y aplicación, determinadas mediante la curva Viscosidad-Temperatura, la temperatura que debe tener el asfalto en el proceso de la elaboración de la mezcla asfáltica, así como la temperatura de compactación de la mezcla en obra.

3.3 DISEÑO DE LA MEZCLA

3.3.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL ENSAYO MARSHALL

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero encargado del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. Este ensayo permite evaluar los porcentajes de vacíos (Va), porcentaje de vacíos de agregado mineral (VAM) y los vacíos ocupados por el asfalto (VFA) existentes en la mezcla asfáltica; además determina la estabilidad (carga) y flujo (deformación) que se tiene en una mezcla asfáltica cuando es sometida a carga bajo un radio constante de deformación. Con esta información se puede evaluar de manera relativa diferentes tipos de mezclas asfálticas.

Para llevar a cabo este método se utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 1/2") y 102 mm (4") de diámetro. A través de la norma ASTM-D-1559, se preparan los especímenes mediante un procedimiento específico para calentar, mezclas y compactar mezclas de asfalto-agregado. Uno de los aspectos del método de diseño consiste en la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando es ensayado. El valor de flujo es la deformación total, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

Granulometría

Este método utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, encontrando en la ordenada el porcentaje de material que pasa por cada malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm. La selección de la granulometría de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos

parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y de las líneas de control. En la Tabla 1 se presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con ASTM-D3515.

Tabla 3.2. Graduación propuesta para mezclas cerradas (densas)

Abertura de malla	Tamaño máximo nominal del agregado					
	2" (50 mm)	1 ½" (37.5 mm)	1" (25 mm)	¾" (19 mm)	½" (12.5 mm)	3/8" (9.5 mm)
2 ½" (63 mm)	100	---	---	---	---	---
2" (50 mm)	90 – 100	100	---	---	---	---
1 ½" (37.5 mm)	---	90 – 100	100	---	---	---
1" (25 mm)	60 – 80	---	90 – 100	100	---	---
¾" (19 mm)	---	56 – 80	---	90 - 100	100	---
½" (12.5 mm)	35 – 65	---	56 – 80	---	90 - 100	100
3/8" (9.5 mm)	---	---	---	56 – 80	---	90 - 100
No. 4 (4.75 mm)	17 – 47	23 - 53	29 – 59	35 – 65	44 – 74	55 – 85
No. 8 (2.36 mm)	10 – 36	15 – 41	19 – 45	23 - 49	28 – 58	32 – 67
No. 50 (300 µm)	3 – 15	4 – 16	5 - 17	5 - 19	5 - 21	7 - 23
No.200 (75 µm)	0 - 5	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10

% de asfalto	2 - 7	3 - 8	3 - 9	4 - 10	4 - 11	5 - 12
--------------	-------	-------	-------	--------	--------	--------

Fuente: ASTM-D3515

Parámetros de la metodología

Los parámetros de diseño que se consideran dentro de la metodología Marshall se definen en función del tránsito estimado que experimentará durante la fase de operación la carretera. Para este caso se realizó un diseño para un tráfico pesado, el cual corresponde a más de un millón de ejes equivalentes.

Tabla 3.3. Parámetros de diseño de mezclas Marshall

Parámetros	Tráfico liviano (ESAL < 10 ⁴)	Tráfico medio (10 ⁴ < ESAL < 10 ⁶)	Tráfico pesado (ESAL > 10 ⁶)
Compactación (número de golpes por cada lado del espécimen)	35	50	75
Estabilidad, N (kgf)	3,336 (450)	5,338 (550)	8,006 (800)
Flujo, 1/100 in (0.25 mm)	8 a 18	8 a 16	8 a 14
Vacíos de aire, %	3 a 5	3 a 5	3 a 5
Vacíos en el agregado mineral (VAM), %	En función del tamaño máximo nominal (Tabla 2)		
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %	70 a 80	65 a 78	65 a 75

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4. Porcentaje mínimo de vacíos de agregado mineral (VAM)

Tamaño máximo de partícula nominal		Porcentaje mínimo de VAM		
		Porcentaje de diseño de vacíos de aire		
mm	in	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 6	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19	3/4	12.0	13.0	14.0
25	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 ELABORACIÓN DE LAS PASTILLAS PARA EL ENSAYE MARSHALL (NORMAS DE CONSTRUCCIÓN SCT 1981 TOMO IX, 5-5.10 (ASTM D 6926))

Con el tamaño nominal obtenido en el análisis granulométrico del material pétreo y tomando como base los *Requisitos de Granulometría del Material Pétreo para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa de la norma N-CMT-4-04/2017* de la SCT (Anexo 1), se seleccionó la granulometría empleada en la elaboración de las mezclas asfálticas para las pastillas Marshall.

Con la granulometría adoptada, se procedió a realizar dosificaciones en una cantidad aproximada de 1,100 gramos, haciéndose esto por triplicado y para cada

porcentaje de asfalto. La cantidad de asfalto que se agregó a cada muestra se determinó tomando como base el contenido mínimo de asfalto de acuerdo a la Norma de Construcción SCT (1981), Tomo IX, parate primera, capítulo V, sección 5.4, como se indica en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Contenido mínimo de asfalto

Malla	% Que pasa	% Retenido	Constante de área superficial	Superficie parcial en m ² /kg	Índice asfáltico kg/m ²	Contenido parcial de asfalto kgs/kg
1 1/2" A 3/4"	0	0	0.27	0.00	0.0065	0.000000
3/4" A No. 4	44	56	0.41	18.04	0.0065	0.117260
No. 4 A No. 40	43	1	2.05	88.15	0.0065	0.572975
No. 40 A No. 200	9	34	15.38	138.42	0.0065	0.899730
PASA No. 200	4	5	53.3	213.20	0.0065	1.385800
Suma						2.975765

Fuente: Elaboración propia.

$$\% \text{ M\u00ednimo de asfalto} = (2.975765 * 1.25) = 3.70\%$$

En mezclas con asfalto modificado el contenido \u00f3ptimo de asfalto resulta mayor, por ello se se multiplica por 1.25 (factor de equivalencia), por lo cual se decidi\u00f3 adoptar como contenido m\u00ednimo de asfalto el valor de 3.70%. La Tabla 3.6 muestra los porcentajes de asfalto empleados.

Tabla 3.6. Porcentaje de asfalto utilizado en las mezclas asfálticas de diseño

Especificación	Contenido de Asfalto
Contenido mínimo calculado	2.98 %
Contenido mínimo adoptado	3.70 %
Contenido mínimo adoptado + 0.50%	4.20 %
Contenido mínimo adoptado + 1.00%	4.70%
Contenido mínimo adoptado + 1.50%	5.20 %
Contenido mínimo adoptado + 2.00%	5.70 %
Contenido mínimo adoptado + 2.50%	6.20 %

Fuente: elaboración propia

3.3.3 ELABORACIÓN DE PASTILLAS CON POLÍMERO

Una vez concluido el diseño de la mezcla de control, se llevó a cabo la fabricación de 18 especímenes; posteriormente 24 pastillas en las cuales se les sustituyó en cuatro diferentes proporciones en función del peso del contenido óptimo de asfalto. Para cada proporción se utilizaron 4 pastillas para con ello obtener los resultados Marshall, correspondientes a la estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos (VA), V.A.M. y densidad de la mezcla, además de realizar el ensayo de tensión indirecta TSR. Los porcentajes de asfalto que se sustituyeron por polipropileno fueron 5, 10, 15, 20, 25 y 30%.

Tabla 3.7 Proporciones de la mezcla con polímero

Código	Mezcla	PP (%)	Asfalto (%)
S-1	Sustitución	5	95
S-2	Sustitución	10	90
S-3	Sustitución	15	85
S-4	Sustitución	20	80
S-5	Sustitución	25	75
S-6	Sustitución	30	70

Fuente: elaboración propia.

Con los proporcionamientos realizados, se calentó el material pétreo manteniéndolo a una temperatura de 120°C al horno durante 12 horas previas a la realización de la mezcla. Por su parte el asfalto se calentó a una temperatura constante de 165°C, 15 minutos antes de realizar las mezclas. A fin de tener un equilibrio entre las temperaturas de los agregados pétreos y el asfalto, de manera subsecuente se añade el porcentaje de polipropileno correspondiente y se procede a mezclar todos materiales por un lapso de alrededor de 3 minutos o hasta observar que todo el agregado se encuentre cubierto de asfalto.



Figura 3.9 Calentado de material pétreo y asfalto en estufa.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.10 Mezcla de los agregados pétreos y asfalto con el polipropileno (PP).

Fuente: Elaboración propia.

Posterior al mezclado de los materiales, se procedió a colocar la mezcla elaborada en los moldes Marshall (base, molde, collarín) previamente calentados a una temperatura de 150°C y se inició el proceso de compactación de la mezcla para la formación de las pastillas, monitoreando que la temperatura de compactación fuera la indicada de acuerdo a la gráfica de Viscosidad-Temperatura.

El número de golpes empleado fue de 75 en cada cara, de acuerdo a la Norma *N-CMT-4-05-003/17* (Anexo 2) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para un número de ejes equivalentes entre uno y diez millones.

Finalizando la compactación de la pastilla, se retiró el molde junto con la pastilla y se dejó que se enfriara a temperatura ambiente, se retiró el espécimen del molde, se identificó y se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 24 horas (Figura 3.11).



Figura 3.11 Proceso de enfriamiento de pastillas con polipropileno (PP).

Fuente: Elaboración propia.

3.4 PRUEBAS A LA MEZCLA

3.4.1 DETERMINACIÓN DE LOS PORCENTAJES DE VACÍOS EXISTENTES EN LA MEZCLA ASFÁLTICA (ASTM-D1188)

Se determinó el peso volumétrico de cada pastilla siguiendo la metodología propuesta en la Norma *ASTM D1188 Métodos Estándar para la Determinación de la Gravedad Específica y Densidad de Mezclas Compactadas empleando Muestras*

con Parafina, midiendo el espesor de la pastilla (Figura 3.12) y se pesó al aire (Figura 3.13).



Figura 3.12 Determinación del espesor de la pastilla.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.13 Peso de la pastilla sin recubrir al aire.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se envolvió con estearato de zinc y se etiquetó, se cubrió con estearato y se pesó nuevamente (Figura 3.14) como sumergida. Finalmente, con estos valores se calculan los pesos volumétricos y vacíos existentes de la mezcla.



Figura 3.14 Peso de la pastilla cubierta con estearato al aire.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD Y FLUJO DE LOS ESPECÍMENES MARSHALL (ASTM- D6927)

Siguiendo las indicaciones de *la Norma ASTM D6927 Método Estándar para la Determinación de la Estabilidad y Flujo de Mezclas Asfálticas*, se le retira la capa de parafina a las pastillas y se procede a sumergirlas en un tanque de saturación con agua a temperatura de 60°C (baño María) durante un tiempo de 30 minutos (Figura 3.15), posterior al retiro de las pastillas del tanque con agua se secan superficialmente con una franela, y se colocan de una en una entre las dos secciones de la cabeza de prueba y se centra el conjunto en la máquina de compresión Marshall. Se coloca el medidor de flujo y el extensómetro del anillo en ceros y se comienza a aplicar la carga al espécimen a una velocidad de 50 mm por minuto hasta llevar al punto de falla a la pastilla, momento en el cual se registra la carga máxima soportada (estabilidad) y la deformación (flujo) asociada a ésta.



Figura 3.15 Pastillas en saturación a 60 °C.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 ENSAYE 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-496. La muestra a utilizar corresponde a una pastilla Marshall común, la cual debe tener las siguientes dimensiones: 100 mm de diámetro y 63.5 mm de altura (± 2.00 mm). La magnitud de la carga para llevar a cabo este ensaye será de al menos 100 kN a una velocidad de 50 mm/min.

Para llevar a cabo el cálculo se hará uso de la siguiente ecuación:

$$S_t = \frac{2000 P}{\pi t D} \quad (1)$$

Dónde:

S_t resistencia indirecta (kPa)

P la carga máxima (N)

t es el espesor o altura del espécimen (mm)

D el diámetro del espécimen (mm).

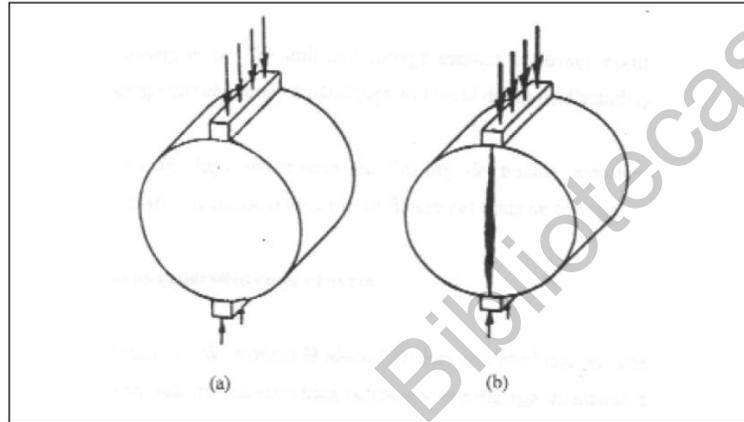


Figura 3.16 a) Configuración de la carga, b) Rotura del espécimen

Fuente: Kennedy, 1977..

Uno de los objetivos de este ensaye es comprobar, mediante una inspección visual, que no exista fractura del agregado pétreo si no que la fisuración sea a través del área aglomerante, provocando desprendimiento.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas al material los materiales utilizados: polipropileno, agregado pétreo pétreo, cemento asfáltico. Además de exponer los resultados obtenidos a través de los diferentes ensayos realizados a los especímenes (pastillas).

4.1 OBTENCIÓN DEL POLÍMERO

La obtención del polímero se hizo a través de taparrocas desechadas a partir de su recolección por medio de contenedores ubicados en diferentes zonas dentro de la Universidad y a su alrededor. Como primer punto se limpiaron de manera minuciosa las taparrocas de PP y se dejaron secar a la sombra. Ya secas se introdujeron al molino modelo Conair Martin CL 912. El proceso molienda nos dio como resultado escamas de aproximadamente 4 mm, las cuales nos servirán como sustituto de asfalto en la mezcla.

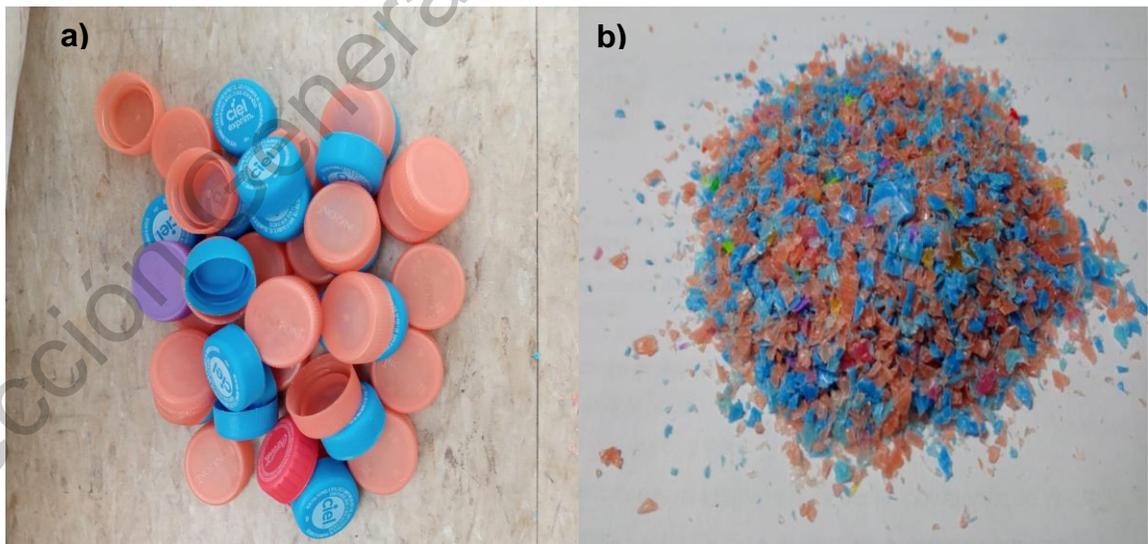


Figura 4.1 a) Taparrocas de PP recicladas, b) Hojuelas obtenidas del proceso de molienda.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 AGREGADO PÉTREO

Granulometría

La caracterización de los agregados gruesos y finos se caracterizaron de acuerdo con lo descrito por la normativa ASTM. Se obtuvieron 2 tipos de gravas denominadas como Material 1, correspondiente a una grava con un TMA de $\frac{3}{4}$ ", y Material 2, correspondiente a una grava de TMA de $\frac{3}{8}$ ", además de contar con arena triturada denominada como Material 3, esto con la finalidad de realizar una composición granulométrica distribuida de manera adecuada para el diseño mezcla asfáltica requerido.

Posterior al cribado de los diferentes materiales se obtuvieron las siguientes distribuciones granulométricas:

Tabla 4.1 Distribución granulométrica Material 1

MALLA (mm)	(% Retenido)		(% Que pasa)
	Parcial	Acumulado	
1 (25.40)	0	0	100
$\frac{3}{4}$ (19.05)	2	2	98
$\frac{1}{2}$ (12.70)	60	62	38
$\frac{3}{8}$ (9.52)	30	92	8
$\frac{1}{4}$ (6.35)	7	99	1
No. 4 (4.75)	1	100	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2 Distribución granulométrica Material 2

MALLA (mm)		(% Retenido)		(% Que pasa)
		Parcial	Acumulado	
½	(12.70)	100	0	100
3/8	(9.52)	4	4	96
¼	(6.35)	71	75	25
No. 4	(4.75)	23	98	2
Pasa No. 4	--	2	100	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3 Distribución granulométrica Material 3

MALLA (mm)		(% Retenido)		(% Que pasa)
		Parcial	Acumulado	
No. 4	(4.750)	0	0	100
No. 10	(2.000)	35	35	65
No. 20	(0.840)	28	63	37
No. 40	(0.426)	14	77	23
No. 60	(0.250)	7	84	16
No. 100	(0.149)	5	89	11
No. 200	(0.074)	4	93	7
Pasa No. 200		7	100	

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos, se realizó la combinación de los tres materiales para obtener una composición granulométrica bien distribuida, la cual cumpliera con los requisitos necesarios de acuerdo a la norma mexicana N-CMT-4-04/17. Como resultado final se obtuvo la siguiente composición granulométrica, apta para una mezcla asfáltica de granulometría densa con la cual se fabricaron cada una de las pastillas que se ensayaron durante esta investigación. En la siguiente tabla se muestra la distribución granulométrica:

Tabla 4.4 Distribución granulométrica para mezclas asfálticas de granulometría densa.

MALLA (mm)	(% Retenido)		(% Que pasa)
	Parcial	Acumulado	
1	(25.40)	0	100
$\frac{3}{4}$	(19.05)	2	98
$\frac{1}{2}$	(12.70)	10	88
3/8	(9.52)	7	81
$\frac{1}{4}$	(6.35)	20	61
No. 4	(4.750)	25	56
No. 10	(2.000)	16	36
No. 20	(0.840)	7	20
No. 40	(0.426)	4	13
No. 60	(0.250)	3	9
No. 100	(0.149)	2	6
No. 200	(0.074)	4	4

Obteniendo la siguiente gráfica:

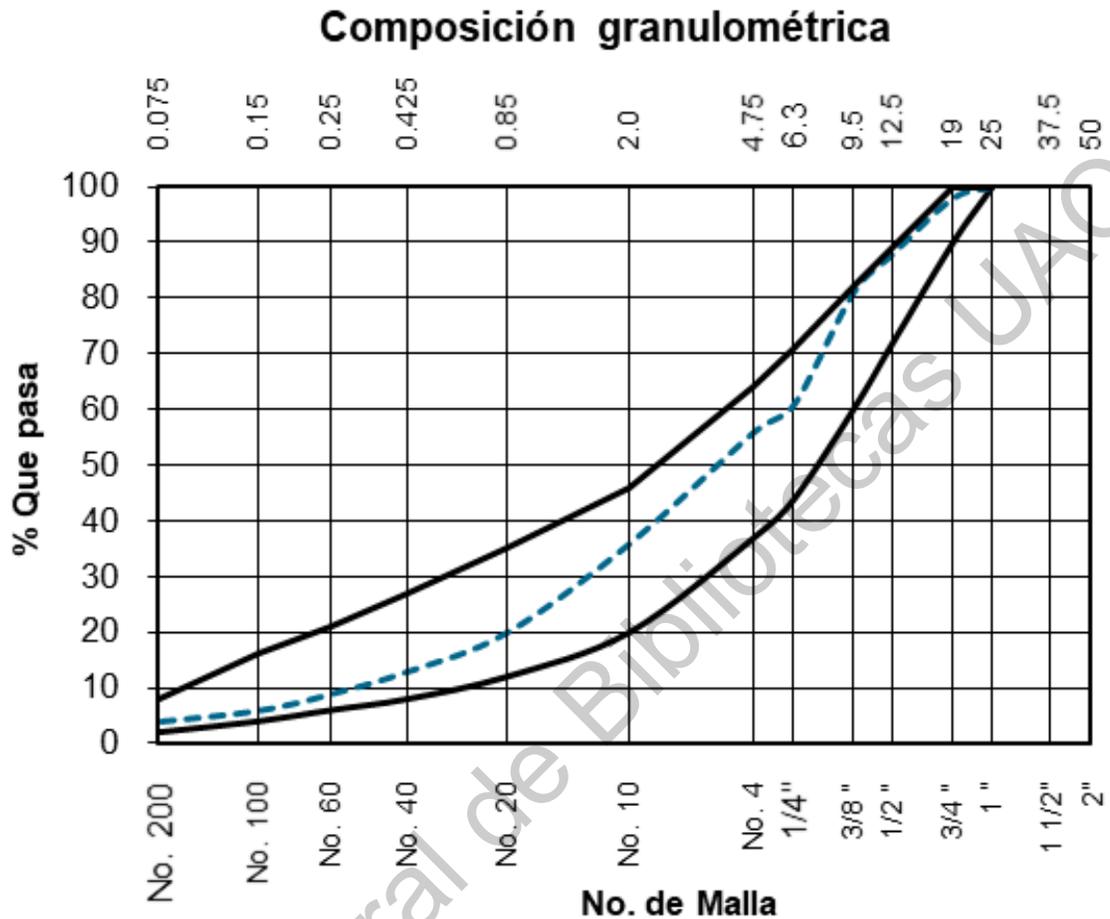


Figura 4.2 Curva granulométrica de agregados pétreos.

Fuente: Elaboración propia.

Con base en la Figura 4.1 se corrobora que la curva granulométrica obtenida se encuentra dentro de los parámetros requeridos por la norma N-CMT-4-04/17 de la SCT para una mezcla con un TMA de $\frac{3}{4}$ ", por lo que se considera adecuada.

En las Tablas 4.5 y 4.6 se muestran los resultados de las pruebas realizadas al material pétreo para su caracterización para el material grueso (gravas) como para la parte fina (arena triturada); se menciona la norma y su especificación en el que se debe de encontrar el material para ser considerado útil en la elaboración de la mezcla asfáltica:

Tabla 4.5 Caracterización de agregado grueso.

Ensaye	Norma	Valor	Especificación
Desgaste de los Ángeles, %	ASTM C131	12.00 %	30 máx.
Caras fracturadas, % (dos o más caras fracturadas)	ASTM D5821	97.00 %	90 mín.
Partículas alargadas, %	ASTM D4791	8.00 %	10 máx.
Partículas lajeadas, %	ASTM D4791	6.00 %	10 máx.
Absorción de los agregados gruesos, %	ASTM D1664	1.80 %	---

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.6 Caracterización de agregado fino.

Ensaye	Norma	Valor	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D2419	75.00 %	50 mín.

Fuente: Elaboración propia.

Derivado de las Tablas 4.5 y 4.6 se demuestra que el material pétreo a utilizar cumple con los requisitos necesarios para llevar a cabo la fabricación de la mezcla asfáltica tradicional, la cual fungirá como nuestra muestra de control (M-C), y posteriormente los especímenes de las mezclas asfálticas con diferentes proporciones de polipropileno (PP) en hojuelas.

4.3 PRUEBA DE VISCOSIDAD ROTACIONAL

La Figura 4.3 muestra la gráfica Viscosidad – Temperatura del asfalto EKBE. Por medio de la gráfica se obtienen los rangos de temperaturas que se requieren para

la elaboración y compactación de las mezclas asfálticas. La Tabla 4.7 muestra los resultados.

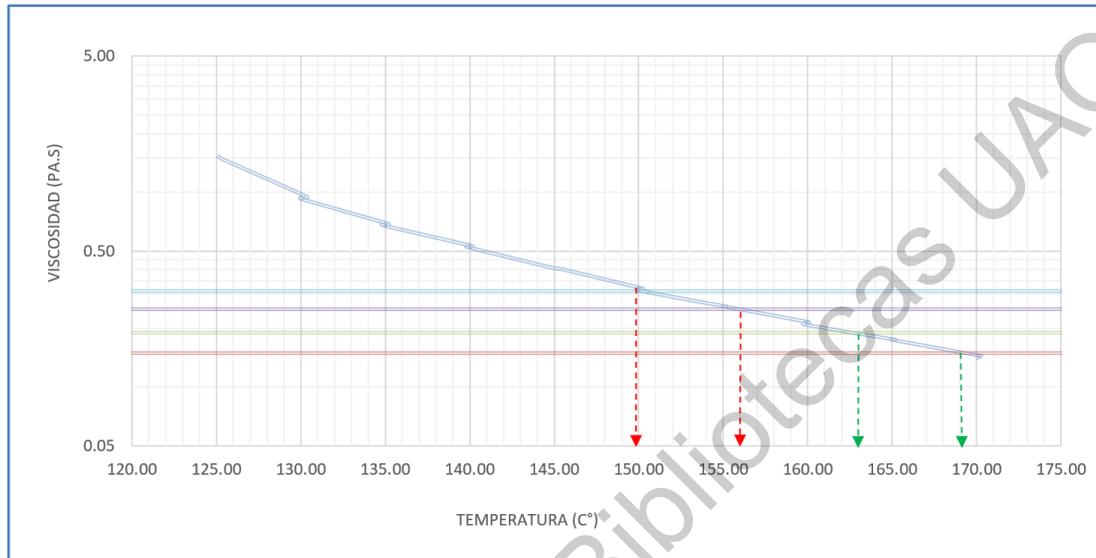


Figura 4.3 Gráfica Viscosidad - Temperatura

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.7 Temperaturas de mezclado y compactación para la elaboración de mezclas asfálticas.

Característica	Temperatura (°C)
Rango de mezclado	163 - 169
Rango de compactación	150 - 156

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.3 se visualiza que las temperaturas de trabajo para el cemento asfáltico EKBE se encuentran entre los 150 y 169 °C, rango para llevar a cabo los procesos de mezclado y compactación de los especímenes. Siendo el principal objetivo de este ensaye encontrar las temperaturas de trabajo y así evitar un envejecimiento prematuro a través de un sobrecalentamiento o caso contrario poca manejabilidad del asfalto.

4.4 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

En la Tabla 4.8 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para la muestra de control a partir de la hoja de cálculo Marshall (Anexo 3). A partir de estos resultados se realizan las gráficas de Peso Volumétrico, Vacíos de aire o simplemente vacíos, Vacíos en el Agregado Mineral (V.A.M.), Estabilidad y Flujo.

Tabla 4.8 Resumen de resultados Marshall para la determinación del contenido óptimo de asfalto.

Punto No.	% de C.A.	Peso Vol. kg/cm ³	Vacíos %	V.A.M. %	Estabilidad kg	Flujo mm
1	3.70%	2,017	13.65	20.63	623	2.29
2	4.20%	2,096	9.69	17.88	707	2.54
3	4.70%	2,160	6.38	15.79	804	2.79
4	5.20%	2,191	4.48	14.98	868	3.01
5	5.70%	2,194	3.82	15.29	908	3.48
6	6.20%	2,190	3.41	15.82	848	4.65

Fuente: Elaboración propia.

En un principio para la determinación del óptimo de asfalto, se definió seguir por la metodología expuesta por Garnica *et al.* (2004), en la cual se entra en la gráfica % de Vacíos de aire y se intercepta la curva con el valor correspondiente al 4% de vacíos, siendo este valor la media para el diseño de mezclas asfálticas, ya que la especificación sugiere un valor entre 3 y 5.

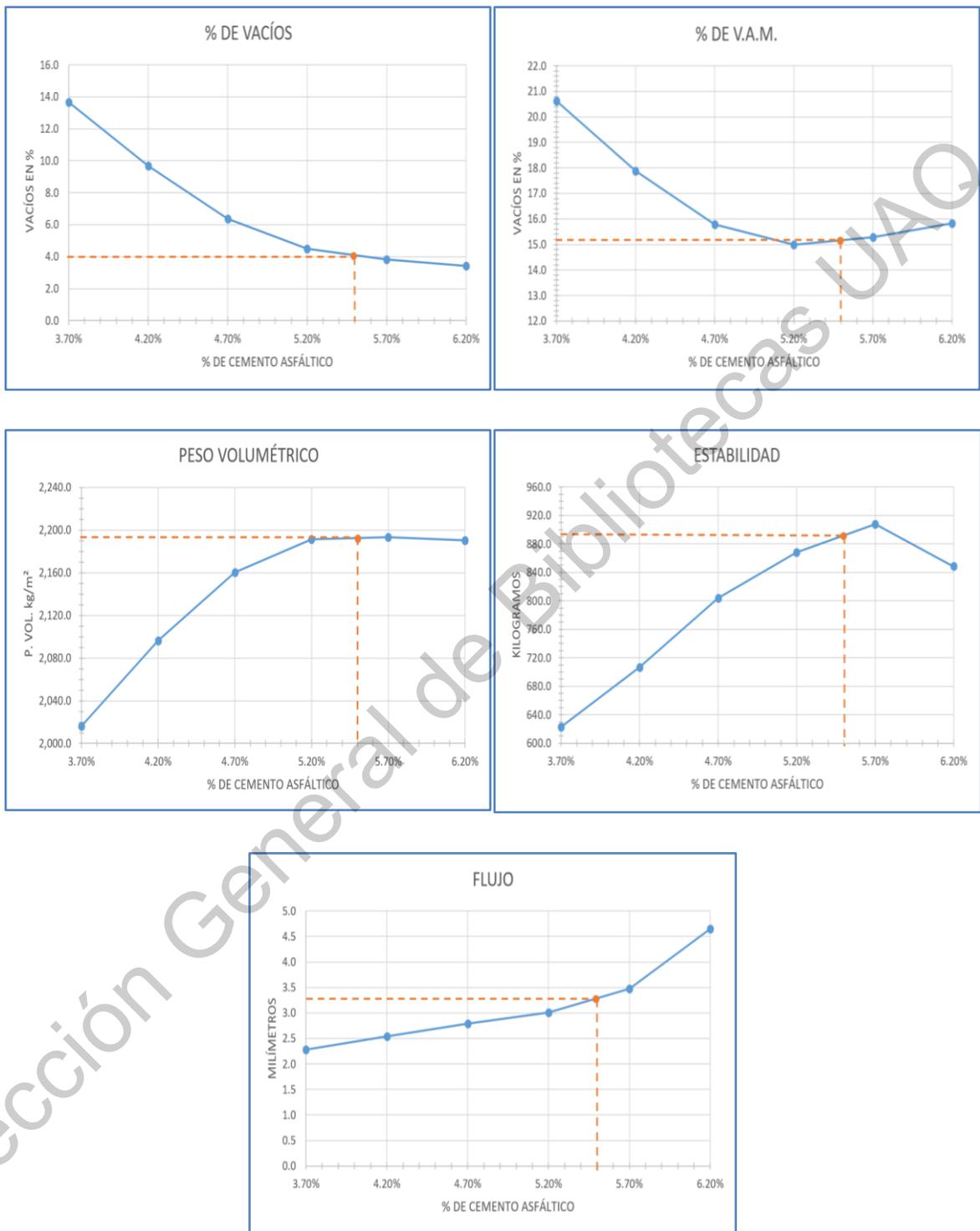


Figura 4.4 Gráficas para determinación de contenido óptimo de asfalto.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos para nuestra mezcla de control son los mostrados en la Tabla 4.9:

Tabla 4.9 Muestra de control.

% de C.A.	Peso Vol. kg/cm³	Vacíos %	V.A.M. %	Estabilidad kg	Flujo mm
5.50%	2,193	4.0	15.20	894	3.30

Fuente: Elaboración propia.

4.5 ENSAYES A LAS DIFERENTES MEZCLAS

Un punto a considerar antes de continuar con los resultados obtenidos por medio de los diferentes ensayos a las mezclas asfálticas con hojuelas de polipropileno en diferentes proporciones como susutito del asfalto, es que durante el proceso de mezclado llevado a cabo entre los 163 – 169 °C propició que las hojuelas de polipropileno introducidas alcanzaran su punto de fusión, el cual se encontrará a 160 °C aproximadamente, permitiendo su manejabilidad de forma más fácil con la intención de crear una mezcla micro-heterogenea entre polipropileno-asfalto.

A continuación se muestra la Tabla 4.10 con el resumen de resultados (Anexo 7) obtenidos a través de esta investigación y posteriormente se muestran las gráficas:

Tabla 4.10 Características obtenidas en las mezclas con diferentes proporciones de hojuelas de polipropileno.

Característica	Datos							Especificación
	M-C	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	
Muestra								Norma SCT
Sust. Asf. por								N-CMT-4-04/17
PP, %		(5%)	(10%)	(15%)	(20%)	(25%)	(30%)	

Peso Vol. (kg/cm³)	2,193	2,190	2,188	2,184	2,180	2,173	2,168	---
Vacíos (%)	4.0	4.52	4.92	5.43	5.92	6.54	7.04	3 – 5
VAM (%)	15.20	15.04	14.88	14.82	14.74	14.78	14.72	14 (Mín)
Estabilidad (kg)	894	884	831	773	724	613	509	817
Flujo (mm)	3.30	3.26	2.85	2.75	2.55	2.25	2.06	2 – 3.5

Fuente: Elaboración propia.

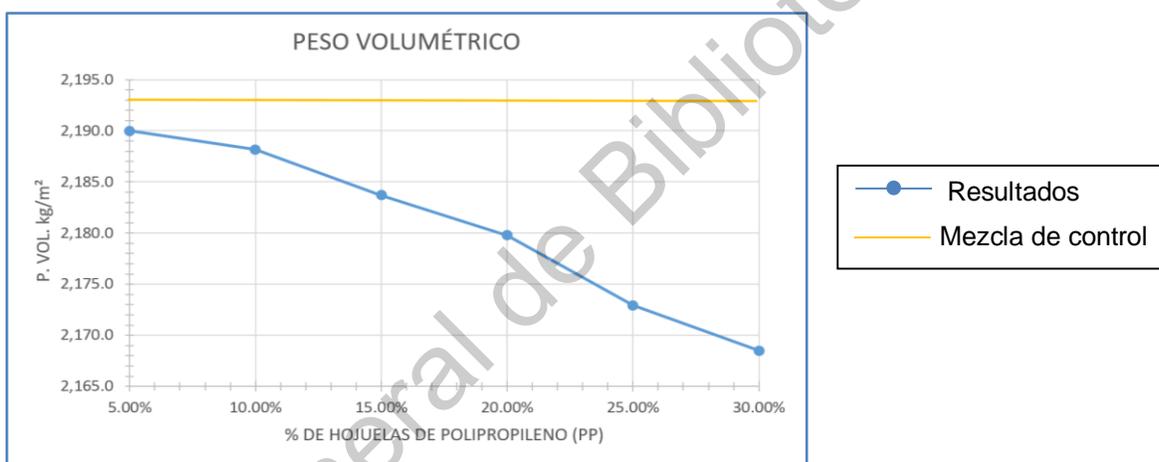


Figura 4.5 Gráfica de pesos volumétricos de las diferentes mezclas.

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del peso volumétrico solamente se procedió a evaluar únicamente respecto al peso volumétrico obtenido en la muestra de control (M-C). Esta característica resulta importante ya que un mayor peso volumétrico se relaciona a un mejor rendimiento de la capa de rodadura, sin embargo, para vialidades con un tránsito mayor a un millón de ejes equivalentes es recomendable obtener un peso volumétrico menor al de diseño puesto que durante su etapa de servicio, cada vez que el tránsito efectúe una carga sobre la capa de rodadura ayudará que esta se densifique así aumentando su peso volumétrico.

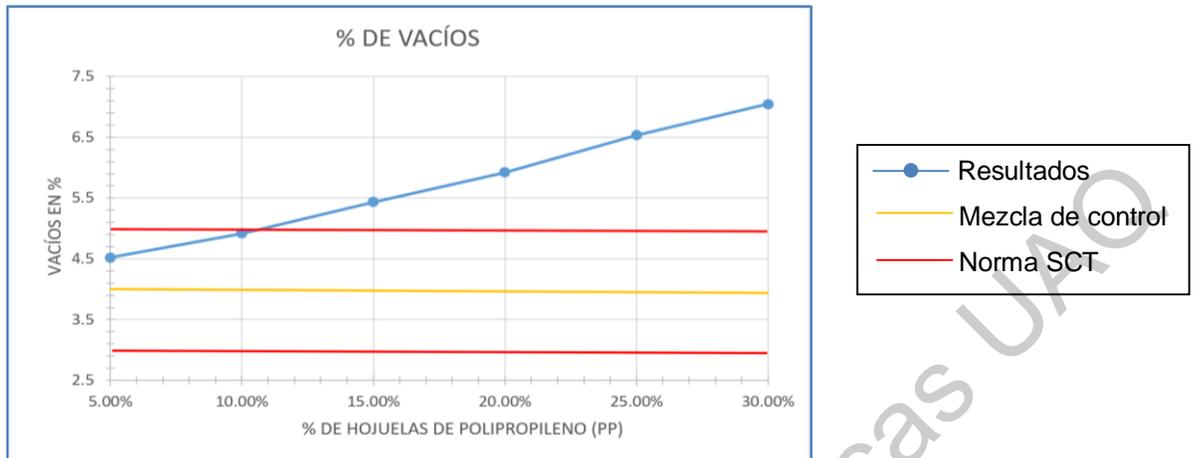


Figura 4.6 Gráfica de vacíos de las diferentes mezclas.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos en el porcentaje de vacíos se encuentran, en todas las mezclas, por arriba del obtenido en la mezcla de control, además se observa que un mayor porcentaje de hojuelas de polipropileno tiene a incrementar este valor a tal grado de sobrepasar los parámetros que estipula la norma. Como se estudia el caso se puede observar que entre el peso volumétrico y el contenido de vacíos existe una correlación. Entre más alto el peso volumétrico, menor el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa.

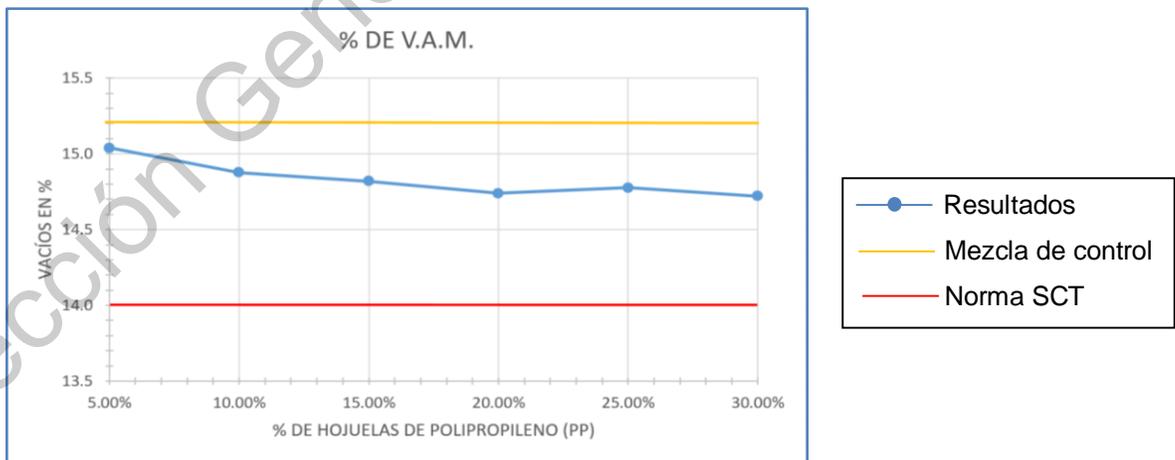


Figura 4.7 Gráfica de vacíos en el agregado mineral (V.A.M.) de las diferentes mezclas.

Fuente: Elaboración propia.

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) resultan a partir de los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado, es decir, los vacíos de aire más los vacíos llenos por cemento asfáltico. Los resultados obtenidos indican que una menor cantidad de cemento asfáltico resultará en un menor porcentaje de vacíos entre el agregado mineral, caso contrario a las mezclas tradicionales, esto se encuentra ligado al faltante de asfalto a causa de su sustitución por hojuelas de polipropileno, generando una disminución en el valor de esta característica.

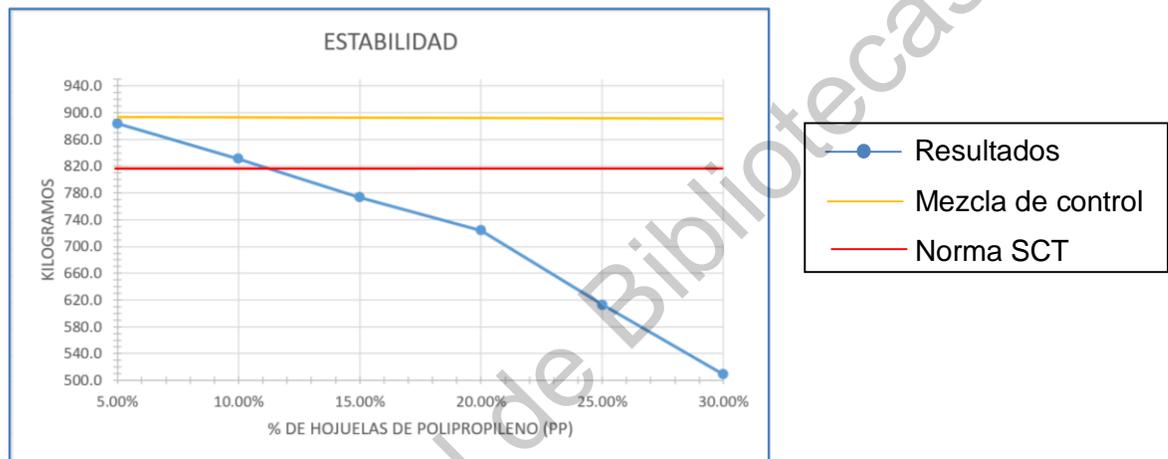


Figura 4.8 Gráfica de estabilidad de las diferentes mezclas.

Fuente: Elaboración propia.

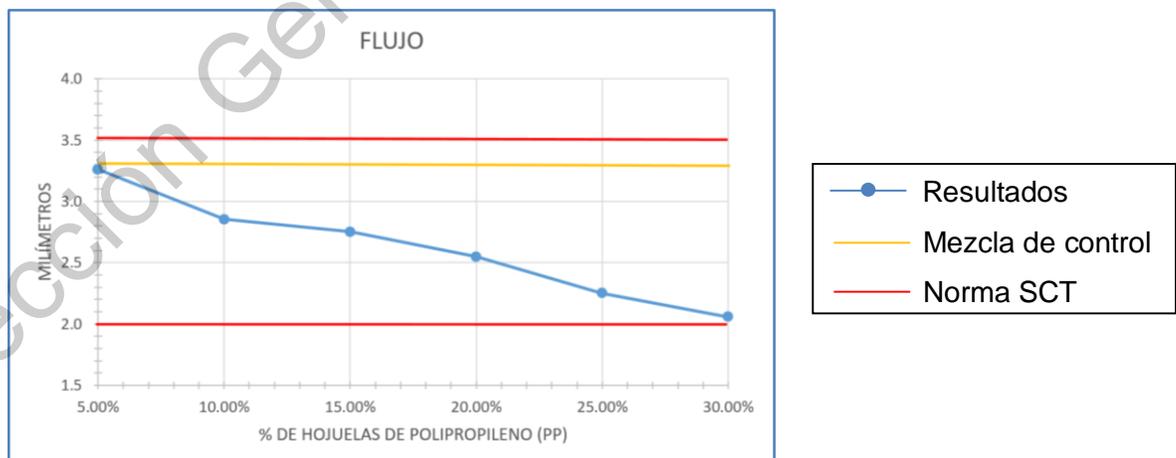


Figura 4.9 Gráfica de flujo de las diferentes mezclas.

Fuente: Elaboración propia.

De las gráficas 4.8 y 4.9 se observa que en el caso de la estabilidad se presentan resultados menores al obtenido mediante la muestra de control ocasionado por la disminución de cemento asfáltico, sin embargo, las muestras S-1 y S-2 son aceptables de acuerdo a la normativa SCT, mientras por otro lado, esta falta de cemento asfáltico provoca una mayor fricción entre las partículas de agregado pétreo ocasionando una disminución en el flujo de las mezclas con hojuelas de polipropileno, conllevando a obtener mezclas más duras.

Ensaye de tensión indirecta

Con este ensaye se observó la capacidad del cemento asfáltico para mantener unido el agregado pétreo antes de presentarse la fisuración en la pastilla. En la Tabla 4.11 se muestran datos requeridos como los datos obtenidos a partir de este ensaye:

Tabla 4.11 Resistencia a tensión indirecta con diferentes proporciones de hojuelas de polipropileno.

Muestra	M-C	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6
% de hojuelas de PP	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Diámetro (cm)	9.95	9.96	9.94	9.97	9.95	9.98	9.96
Espesor (cm)	6.38	6.31	6.33	6.34	6.27	6.31	6.33
Carga (N)	5,158	4,857	4,513	4,019	3,618	3,084	2,368
Resistencia (kPa)	517	492	457	405	369	312	239

Fuente: Elaboración propia.

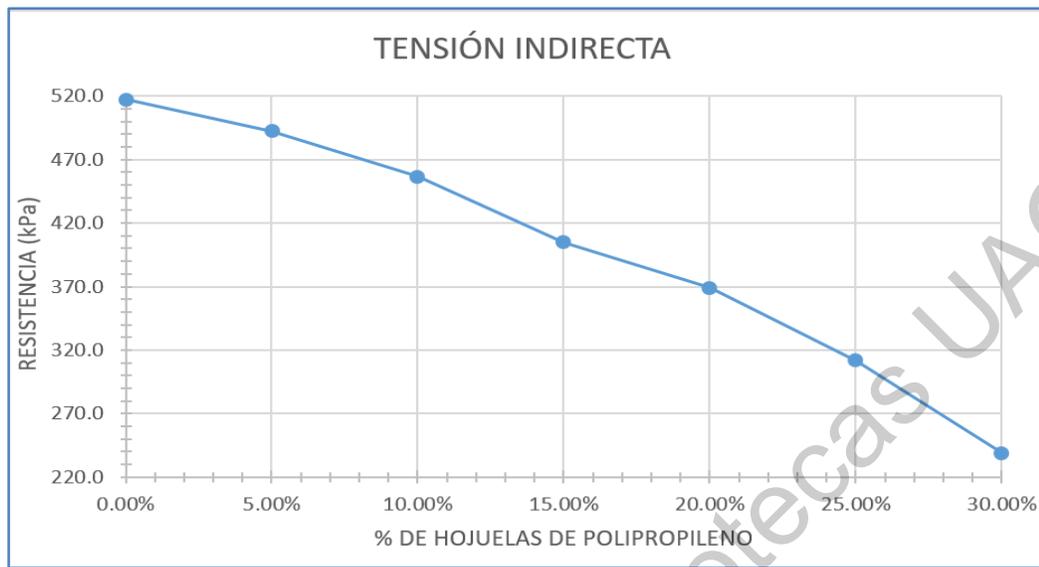


Figura 4.10 Gráfica de tensión indirecta con las diferentes mezclas.

Fuente: Elaboración propia.

Por un lado, se puede apreciar en la gráfica, la resistencia de la mezcla por tracción dependerá directamente de la cantidad sustituida de asfalto por hojuelas de PP, originando una disminución casi uniforme de acuerdo a la reducción de asfalto en la mezcla. Por otro lado, la falla en todas las pastillas ensayadas fue a través de las ligas originadas entre el asfalto y los agregados pétreos, por lo cual se infiere que el agregado utilizado resulta apto, al no presentar daños por rompimiento.

CAPÍTULO V CONCLUSIONES

Al término de la investigación, la cual consistió en la sustitución de manera parcial por hojuelas de polipropileno con tamaño de 4 mm se han llegado a las siguientes conclusiones:

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, se confirma que si bien no se lograron mantener las características de una mezcla asfáltica tradicional mediante la inclusión de hojuelas de polipropileno como sustituto parcial del asfalto, puede aún ser una alternativa viable en la industria de los pavimentos.

Se obtuvieron mezclas más livianas, ocasionado por la menor densidad del material utilizado como sustituto, lo cual provocó un mayor porcentaje de vacíos en las mezclas modificadas respecto al obtenido en la mezcla de control, sin embargo, tomando como referencia la normativa de la SCT, se consigue obtener dos mezclas (S-1 y S-2) que cumplen de manera satisfactoria con las características requeridas por la norma en cuestión y principal ente encargado de la supervisión y calidad de las carreteras del país. Con ello logrando el desarrollo de posibles mezclas que puedan fungir como capa de rodadura y que a su vez permitan un desempeño óptimo de los pavimentos para vías con una alta intensidad de tránsito por un lado, mientras por el otro se logra una disminución en el contenido de cemento asfáltico, lo cual representa una acción a favor del medio ambiente, en primer punto por la reutilización de desechos sólidos que en poca o nula cantidad son reciclados hoy en día y en segundo punto la disminución de gases efecto invernadero a causa de la producción del asfalto, lo cual no sucede con las hojuelas de polipropileno. Otro aspecto a considerar es el económico, propicio del uso de materiales reciclados.

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados obtenidos con las muestras S-1 y S-2 que resultan viables para usarse como mezcla para capas de rodadura de pavimentos flexibles en vías con una alta intensidad de tránsito:

Tabla 5.1 Mezclas con hojuelas de polipropileno (PP) aptas para vías con una alta intensidad de tránsito.

Muestra	% de PP	Peso Vol. kg/cm³	Vacíos %	V.A.M. %	Estabilidad kg	Flujo mm
S-1	5.00%	2,190	4.52	15.04	884	3.26
S-2	10.00%	2,188	4.92	14.82	831	2.85

A fin de poder contar con un conocimiento más enfocado a la aplicación del polímero, para nuestro caso las hojuelas de polipropileno, en mezclas de cemento asfáltico, se recomienda se continúe con el siguiente paso de esta investigación que es el diseño de las mezclas asfálticas, aplicando la metodología del Protocolo AMAAC con el objetivo de obtener datos mucho más completos de cómo será el comportamiento del polímero aplicado en una mezcla asfáltica a través de las llamadas pruebas de desempeño contempladas en los diferentes niveles.

Otra recomendación sería proponer que la disposición de las hojuelas de polipropileno en vez de fungir como sustituto de asfalto ahora lo hagan como agregado pétreo, realizando la molienda de este material en diferentes tamaños con la posibilidad de sustituir los materiales correspondientes a la arena.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, R.G.; 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 Lugo, Alex; Arámbula Mercado, Edith & Caro Spinel, Silvia (2008), "Tomografía computarizada con rayos-x y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados", *Revista ingeniería e investigación*, 8(2), 142-151.

Asphalt Institute (1996). *Background of superpave asphalt mixtures design and analysis*. United States of America.

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

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

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 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.

Arencibia, Edna; Hunco, Juana y Perera Manuel (2013) Análisis de la contaminación atmosférica de la planta de asfalto caliente "Abel Santamaría", de Coliseo, *Avanzada Científica*, 16 (3), pp.1-15.

Baghaee, Taher; Rehan, Mohamed y Syammaun, Tamalkhani (2012) "Dynamic properties of Stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles", *Construction and Building Materials*, 34, pp. 236-242.

Balaguera, Alejandra; Carvajal, Gloria Isabel; Alvertí, Jaume & Fullana Palmer, Pere (2018), "Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review", *Resources, Conservation & Recycling*, 132, 37-48.

Bernard E., Obi (2017), "Polymer Chemistry and Synthesis". *Polymer Science and Engineering*, 2, 17–40.

Bledski A.K., Franciszczak P., Osman Z. & Elbadawi M. (2015), "Polypropylene biocomposites reinforced with softwood, abaca, jute and kenaf fibers", *Industrial Crops and Products*, 70, pp. 91-99.

Brenner, Egon (2000), "Polypropylene an alternative?", *Kunststoffe*, 4, pp. 35.

Cabrera, Javier (2013) "Evaluación, análisis y determinación de la vida remanente del pavimento mediante la auscultación con el Ground Penetrating Radar (GPR)", Tesis de Maestría, México D.F.

Caicedo Carolina, Crespo-Delgado Lina Marcela, Dela Cruz Hever & Álvarez Norman (2017), "Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos durante el procesamiento", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15 (3), pp. 245 – 252.

Castro, William; Rondón, Hugo y Barrero, Juan (2015) "Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD", *Revista Ingeniería*, 21 (1), pp. 7-18.

Chávez Valencia, L.E.; Hernández Barriga, C. & Manzano Ramírez, A. (2011), "Modelación del envejecimiento de los pavimentos asfálticos con la metodología de la superficie de respuesta", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 12(4), 373-382.

Coreño Alonso, Juan & Méndez Bautista, María Teresa (2010), "Relación estructura-propiedades de polímeros", *Educación Química*, 21(4), 291-299.

Coronado, Jorge (2002) Manual Centroamericano para diseño de pavimentos, Guatemala.

Costa, Liliana; Fernandez, Sara; Silva, Hugo & Olivera, Joel (2017), "Study of the interaction between asphalt and recycled plastics in new polymer modified binders (PMB)", *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29(1), 192-197.

Figueroa, Ana; Reyes, Fredy, Hernández, Diana, Jiménez, Christian y Bohórquez, Natalia (2007) "Análisis de un asfalto modificado con incorpor y su incidencia de una mezcla asfáltica densa caliente", *Ingeniería e Investigación*, 27 (3), pp. 5-15.

Figueroa, Ana; Fonseca, Elsa y Reyes, Fredy (2009) "Caracterización físicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado", *Ingeniería Universidad Bogotá*, 13 (1), pp.45-70.

Garnica, Paul; Delgado, Horacio; Gómez, Antonio; Alonso, Sergio & Alarcón, Humberto (2004). "Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas", *Instituto Mexicano del Transporte*. Publicación Técnica Núm. 246.

Gómez, Breixo; Pérez, Ignacio, Rodríguez, Ana (2016) "Recycled construction and demolition waste in cold asphalt mixtures: evolutionary properties", *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 588-598.

Harutun, Karian (2003), "Handbook of Polypropylene and Polypropylene composites", 2° edition, pp. 10-29.

Hasirci, V.; Yilgor, P.; Endogan, T.; Eke, G. & Hasirci, N. (2017), "Polymer fundamentals: Polymer Synthesis", *Comprehensive Biomaterials II*, 1, 478-506.

Hickman, Robin; Givoni, Moshe; Bonilla, David & Banister, David (2015), "Transport and Development", Edited Edward Elgar 736.

Hormaeche Azumendi, Jose Ignacio; Perez Delclaux, Alvaro & Txetxu Saez, Txetxu (2016), "El Petróleo y la Energía en la Economía", *Edited IKEI Research & Consultancy*, 298.

Hoy, Menglim; Horpibulsuk, Suksun, Rachan, Runglawan, Chinkulkijniwat, Avirut Arulrajah, Arul (2016) "Recycled asphalt pavement - fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic leaching investigations". *Science of the total environment*, 573, pp. 19-26.

Huamán, Guerrero y Chang, Carlos (2015) "La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos en el Perú", *Perfiles de Ingeniería*, 2 (11), pp. 23-31.

Huaquan, Shi; Tao, Xu; Pei, Zhou and Ruiling, Jiang (2017), "Combustion properties of saturates, aromatics, resins, and asphaltenes in asphalt binder", *Construction and Building Materials*, 136, 515-523.

Ibarrola, Humberto (2008) "La importancia de la infraestructura carretera en el desarrollo económico de un país", *Rutas*, (127), pp. 3.

Jaimes N., Miguel A. (2012), "Petróleo: Historia y perspectivas geopolíticas", *Revista Aldeas del mundo*, 17(4), 65-70

Kamada, Osuma y Yamada, Masaru (2002), "Utilization of waste plastics in asphalt mixtures", *Memoirs of the Faculty of Engineering*, 43, pp. 111-118.

Kang H., Lu X. & Xu Y. (2015), "Properties of immiscible and ethylene-butyl acrylate-glycidyl methacrylate terpolymer compatibilized poly (lactic acid) and polypropylene blends", *Polymer testing*, 43, pp. 173 – 181.

Keane, Thomas (1996) "The Economic Importance of the National Highway System". *Public Road*, 59 (4).

Lastra, P. e Indacochea, I. (2014) "Reporte Técnico No. 174. Proyecto Polymix, valorización de residuos polímeros en mezclas bituminosas", *RETEMA: Especial de reciclaje*, 27 (172), pp. 1821.

Lawal, Sulaiman A. & Zhang, Jie (2016), "Fault Monitoring and Fault Tolerant Control in Distillation Columns", *Chemical Engineering and Advanced Materials*, 3 (11), 865-870.

Leiva, Francisco (2005) "Diseño de una estructura de pavimento perpetuo (Caso de estudio de una ruta nacional en Costa Rica)". Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), Costa Rica.

López, Francisco (2004) *Fundamentos de polímeros*, Universidad de los Andes, Venezuela, pp. 1.

Lv, Lei; Zhou, Lei; Wang, Li-Ying; Liu, Jin-Freng; Gu, Ji-Dong; Mu, Bo-Zhong & Yang, Shi-Zhong (2016), "Selective inhibition of methanogenesis by sulfate in enrichment culture with production water from low-temperature oil reservoir", *International Biodeterioration & Biodegradation*, 108, 133-141.

Market Study (2013), "Polypropylene", *Ceresana*, 3 edition.

Martínez, Wilfredo (2014) "Evaluación del impacto ambiental en obras viales", *Negotium*, 10 (29), pp. 5-21.

Mejía, Daniel (2015), "Influencia del polvo de neumático en la tensión indirecta y energía de fractura de las mezclas asfálticas tibias". *Tesis maestría*, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. (104 páginas).

Mohajerani, Abbas; Ashdown, Matthew; Abdihashi, Luqmaan & Nazem, Majidreza (2017), "Expanded polystyrene geofoam in pavement construction", *Construction and Building Materials*, 157, 438-448.

Monkiz, Mohamad; Banfill, Phillip y Menzies, Gillian (2009) "Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review", *Sustainability*, 1, pp. 674-701.

Montejo Fonseca, Alfonso (2002), *Ingeniería de pavimentos para carreteras*, editorial Stella Valbuena de Fierro, Bogotá, Colombia pp. 1-378. ISBN: 958-96036-2-9

Mora Atiés, David & Marbot Ramada, Rolando (2010), "Determinación de las fracciones del petróleo crudo con el empleo de la destilación simulada por cromatografía gaseosa como método alternative", *Revista CENIC*, 41 (2), 105-112.

Múnera, Juan y Ossa, Alexander (2014) “Estudio de mezclas binarias asfalto-polímero”, *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquía*, 70, pp. 18-33.

Othman, Ayman (2010) “Effect of Low-Density Polyethylene on Fracture Toughness of Asphalt Concrete Mixtures”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22 (10), pp. 1019-1024.

Oyekunle, L.O. (2006). “Certain Relationships between Chemical Composition and Properties of Petroleum Asphalts from Different Origin.” *Oil & Gas Science and Technology*, 61(3), 433-441.

Padilha Thives, Liseane & Ghisi, EneDir (2017), “Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 473-484.

Peng Ng, Choy; Hua Law, Teik; Voon Wong, Shaw & 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., Richard (2013), “Polymer structure characterization”, RSC Publishing, 60, 24-33.

Podzimek, Stepan (2017), “Synthetic polymers”, *Sciences and Chemical Engineering*, 257-266.

Polacco, Giovanni; Filippi, Sara; Merusi, Filippo & Stastna, George (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 Méndez, Juliana & Nikolaevna Afanasjeva, Natalia (2009), “Técnicas instrumentales para la evaluación del envejecimiento en los asfaltos”, *Iteckne innovación e investigación en ingeniería*, 6 (2), 1-11.

Reyes, Óscar (2009) “Cambios dinámicos y mecánicos de una mezcla asfáltica densa por las propiedades del asfalto y energía de compactación”, *Ingeniería y desarrollo*, 26, pp. 139-155.

Reyes, Óscar; Fuentes, Luis y Moreno, Óscar (2013) "Comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos modificados con ceras", *Ingeniería y desarrollo*, 31, pp. 161-178.

Rico, R. A. & Del Castillo, H.M. (1977) "La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas", Volumen 2, Limusa, Noriega Editores, México, D.F.

Romo, Daniel (2016), "Refinación de petróleo en México y perspectiva de la Reforma Energética Problemas del Desarrollo", *Revista Latinoamericana de Economía*, 47(187), 139-164.

Rondón Quintana, Hugo Alexander; Rodríguez Rincón, Edgar & Moreno Anselmi, Luis Ángel (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.

Rondón Quintana, Hugo Alexander (2019), "Estimación del uso de agua en el lavado de agregados pétreos. Caso de estudio: diseño de mezcla asfáltica", *Ciencia y Tecnología*, 11(1), 1-8.

Santos, Joao & Ferreira, Adelino (2012), "Pavement Design Optimization Considering Costs and M&R Interventions", *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 53(3), 1182-1191.

Sanz, José (1991) *Concepto de impacto ambiental y su evaluación*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.

SCT (2005) Norma Oficial Mexicana N-CMT-4-05-001/05. Calidad de materiales asfálticos. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Diario Oficial de la Federación 05 de mayo de 2005.

Sokon, Zbynek; Bliznak, Vojtech; Sedlak, Pavel; Zacharov, Petr; Pesice, Petr & Skuthan, Miroslav (2016), "Ensemble forecasts of road surface temperatures", *Construction and Building Materials*, 187, 33-41.

Solanki, Pranshoo & Zaman, Musharraf (2017), "Design of semi-rigid type of flexible pavements", *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(2), 99-111.

Sotelo, David; Favela Contreras, Antonio; Sotelo, Guillermo Jiménez & Gallegos Canales, Luis (2017), "Design and implementation of a control structure for quality products in a crude oil atmospheric distillation column", *ISA Transactions*, 71(2), 573-584.

Thankur V.K., Vennerberg D. & Kessler M.R. (2014), "Green aqueous surface modification of polypropylene for novel polymer nanocomposites", *Interfaces*, 6 (12), pp. 9349 – 9356.

Valdés, Gonzalo; Martínez, Adriana y Pérez, Félix (2008) "Estudio de variabilidad en mezclas asfálticas en caliente fabricadas con altas tasas de material asfáltico reciclable (RAP)", *Revista de la construcción*, 7, 60-71.

Valdés, Gonzalo; Pérez, Félix y Calabi, Alejandra (2012) "La fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro", *Revista Ingeniería de Obras Civiles*, 1, pp. 26-36.

Varjani, Sunita J. (2017), "Microbial degradation of petroleum hydrocarbons", *Bioresource Technology*, 223, 227-286.

Wang, Tao; Renata, Chris, Chen, Hong y Huang, Wei (2017) "Elastic Shape Memory Hybrids Programmable at Around Body-Temperature for Comfort Fitting", *Polymers*, 9, pp. 1-12.

Won, S.; Cho, S. E. & 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.

Xu, Guangji & Wang, Hao (2016), "Molecular dynamics study of interfacial mechanical behavior between asphalt binder and mineral aggregate", *Construction and Building Materials*, 121, 264-254.

Yorder, Eldon y Witczack, Matthew (1975) *Principles of pavement design*. United States of America: John Wiley & Sons, pp. 5.

Zornberg, Jorge (2013) "Geosynthetic-reinforced Pavement Systems", Proc., *Fifth European Geosynthetics Conference*. Valencia, España, pp. 49 – 61.

ANEXOS

Anexo 1. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL) (N-CMT-4-04/17)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37.5 (1 1/2)
Porcentaje que pasa						
50	2"	-	-	-	-	100
37.5	1 1/2"	-	-	-	100	90 – 100
25	1"	-	-	100	90 - 100	74 – 90
19	3/4"	-	100	90 – 100	79 – 90	62 – 79
12.5	1/2"	100	90 – 100	72 – 90	58 – 71	46 – 60
9.5	3/8"	90 – 100	76 – 90	60 – 76	47 – 60	39 – 50
6.3	1/4"	70 – 81	56 – 69	44 – 57	36 – 46	30 – 39
4.75	N° 4	56 – 69	45 – 59	37 – 48	30 – 39	25 – 34
2	N° 10	28 – 42	25 – 35	20 – 29	17 – 24	13 – 21
0.85	N° 20	18 – 27	15 – 22	12 - 19	9 – 16	6 – 13
0.425	N° 40	13 – 20	11 – 16	8 – 14	5 – 11	3 – 9
0.25	N° 60	10 – 15	8 – 13	6 – 11	4 – 9	2 – 7
0.15	N° 100	6 – 12	5 – 10	4 – 8	2 – 7	1 – 5
0.075	N° 200	2 - 7	2 - 6	2 - 5	1 - 4	0 - 3

**Anexo 2. Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa,
diseñada mediante el método Marshall (N-CMT-4-05-003/16)**

Características	Número de ejes equivalentes de diseño $\sum L$ ^[1]	
	$\sum \leq 10^6$	$10^6 < \sum L \leq 10^7$ ^[2]
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (Ib _f), mínimo	5340 (1200)	8000 (1800)
Flujo; mm (10 ¹⁰⁻² in)	2 – 4 (8 – 16)	2 – 3.5 (8 – 14)
Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC); %	3 – 5	3 - 5
Vacíos ocupados por el asfalto (VFA); %	65 - 78	65 - 75

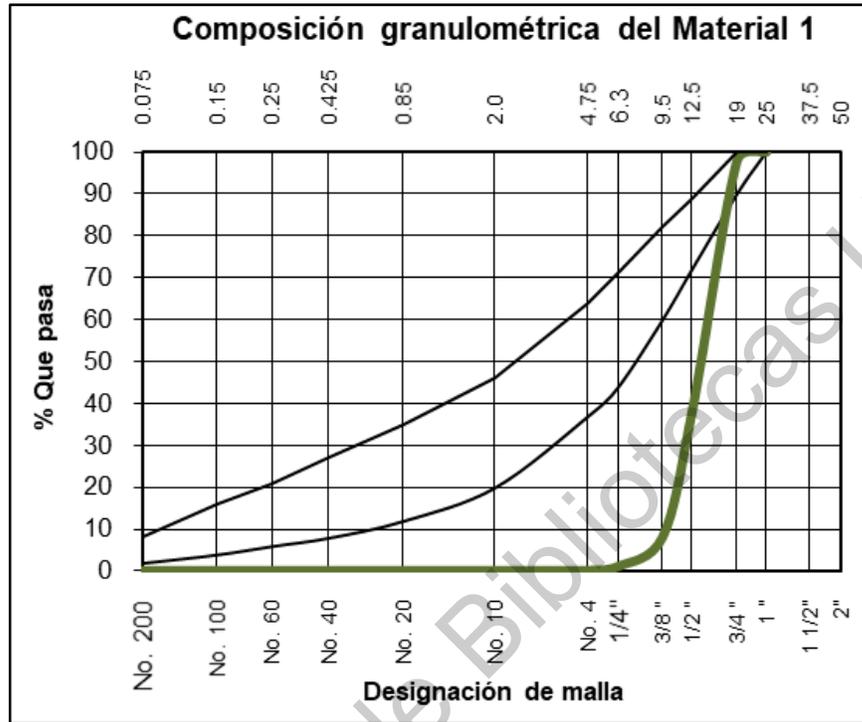
[1] $\sum L$ = Número de ejes equivalentes de 8.2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Para tránsitos mayores de 10⁷ ejes equivalentes de 8.2 t, se requiere un diseño especial de mezcla.

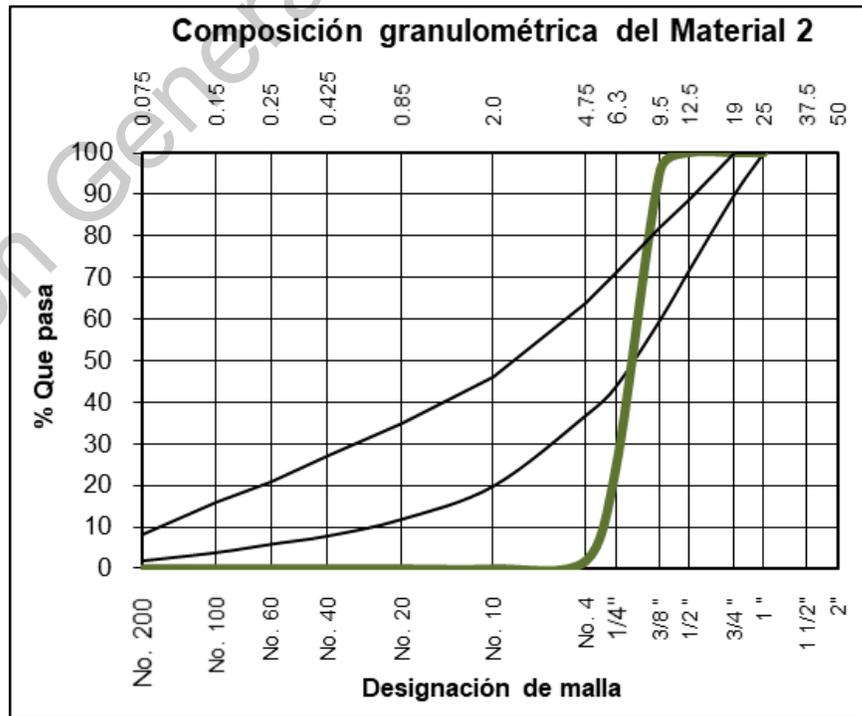
Anexo 3. Hoja de cálculo Marshall para determinar el óptimo de asfalto

ESPECÍMEN	% de C.A.		PESOS		VOL.	PESO VOL. (g/m ³)	PROPORCIONES EN VOLUMEN			PORCENTAJE DE VACÍOS			ESTABILIDAD					FLUIJO		
	AL AGREGADO PÉTREO	A LA MEZCLA	EN EL AIRE (g)	SUMER- GIDO (g)			CEMENTO ASFÁLTICO %	MATERIAL PÉTREO %	VACÍOS %	VAM	LLENOS-POR C.A.	LECT. MICROM	CONSTANTE DE ANILLO	ESTABILIDAD SIN CORRE.	ALTIMETRO (cm)	FACTOR DE CORRECCIÓN	ESTABILIDAD CORREGIDA(%)	LECT. MICRO- METRO (")	FACTOR DE CONVERSIÓN	DEFLEXIÓN mm
1	3.70%	3.57%	1107.9	559.7	548.2	2021	7.00	79.54	13.46	20.46	34.21	48	13.22	635	6.39	0.992	629	0.088	2.24	
	3.70%	3.57%	1098.9	553.7	545.2	2016	6.98	79.33	13.69	20.67	33.77	46	"	608	6.42	0.984	598	0.086	2.18	
	3.70%	3.57%	1103.9	555.5	548.4	2013	6.97	79.23	13.80	20.77	33.56	49	"	648	6.40	0.990	641	0.096	2.44	
PROMEDIO						2017			13.65	20.63								623		2.29
2	4.20%	4.03%	1109.9	579.7	530.2	2093	8.18	82.00	9.82	18.00	45.46	56	13.22	740	6.36	0.998	739	0.098	2.49	
	4.20%	4.03%	1100.0	575.0	525.0	2095	8.19	82.07	9.74	17.93	45.69	52	"	687	6.40	0.990	681	0.096	2.44	
	4.20%	4.03%	1104.7	578.8	525.9	2101	8.21	82.28	9.51	17.72	46.34	53	"	701	6.35	1.000	701	0.106	2.69	
PROMEDIO						2096			9.69	17.88								707		2.54
3	4.70%	4.49%	1110.0	592.7	517.3	2146	9.34	83.65	7.01	16.35	57.15	61	13.22	806	6.37	0.996	803	0.108	2.74	
	4.70%	4.49%	1100.4	590.2	510.2	2157	9.39	84.08	6.53	15.92	59.00	58	"	767	6.30	1.010	774	0.106	2.69	
	4.70%	4.49%	1105.2	597.8	507.4	2178	9.49	84.91	5.60	15.09	62.87	63	"	833	6.34	1.002	835	0.116	2.95	
PROMEDIO						2160			6.38	15.79								804		2.79
4	5.20%	4.94%	1110.3	602.7	507.6	2187	10.48	84.87	4.65	15.13	69.27	65	13.22	859	6.22	1.034	889	0.118	3.00	
	5.20%	4.94%	1100.6	599.4	501.2	2196	10.52	85.20	4.28	14.80	71.10	61	"	806	6.31	1.008	813	0.116	2.95	
	5.20%	4.94%	1105.5	600.8	504.7	2190	10.50	84.99	4.52	15.01	69.91	67	"	886	6.27	1.019	903	0.121	3.07	
PROMEDIO						2191			4.48	14.98								868		3.01
5	5.70%	5.39%	1116.1	609.4	506.7	2203	11.52	85.06	3.42	14.94	77.08	71	13.22	939	6.34	1.002	940	0.137	3.48	
	5.70%	5.39%	1109.7	602.7	507.0	2189	11.44	84.52	4.04	15.48	73.93	64	"	846	6.30	1.010	855	0.133	3.38	
	5.70%	5.39%	1112.0	604.1	507.9	2189	11.45	84.55	4.01	15.45	74.07	70	"	925	6.33	1.004	929	0.141	3.58	
PROMEDIO						2194			3.82	15.29								908		3.48
6	6.20%	5.84%	1119.1	610.2	508.9	2199	12.46	84.52	3.03	15.48	80.44	66	13.22	873	6.32	1.006	878	0.171	4.34	
	6.20%	5.84%	1111.9	602.7	509.2	2184	12.37	83.92	3.71	16.08	76.93	61	"	806	6.30	1.010	814	0.183	4.65	
	6.20%	5.84%	1113.8	604.8	509.0	2188	12.39	84.10	3.51	15.90	77.95	64	"	846	6.31	1.008	853	0.195	4.95	
PROMEDIO						2190			3.41	15.82								848		4.65

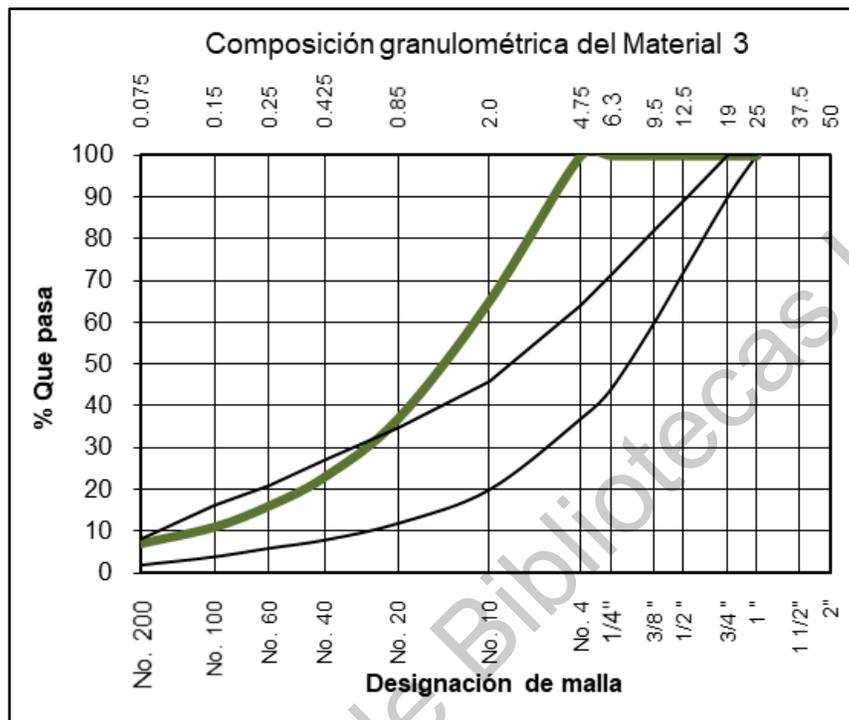
Anexo 4. Curva granulométrica Material 1



Anexo 5. Curva granulométrica Material 2



Anexo 6. Curva granulométrica Material 3



Anexo 7. Hoja de resultados Marshall de mezclas con diferentes proporciones de hojuelas de PP

ESPECIMEN	% de C.A.		PESOS		VOL.	PESO VOL. kg/m ³	PROPORCIONES ENVOLVIMEN				PORCENTAJE DE VACÍOS			ESTABILIDAD						FLUJO	
	AL AGREGADO PETREO	ALA MEZCLA	EN EL AIRE (gr)	SUMER- GIDO (gr)			CEMENTO ASFALTICO %	MATERIAL PETREO %	VACÍOS %	VAMI	LLENOS POR C.A.	LECT. MICROM	CONSTANTE DE ANILLO	ESTABILIDAD SIN CORRE.	ALTURA (cm)	FACTOR DE CORRECCIÓN	ESTABILIDAD CORREGIDA(kg)	LECT. MICRO- METRO (")	FACTOR DE CONVERSIÓN	DEFLEXIÓN mm	
5%	1	5.23%	4.95%	11140	605.7	508.3	2192	10.53	85.02	4.45	14.98	70.29	68	13.22	899	6.34	1.002	901	0.128	3.25	
	2	5.23%	4.95%	11113	604.2	507.1	2191	10.53	85.01	4.46	14.99	70.25	65	"	859	6.28	1.016	873	0.131	3.33	
	3	5.23%	4.95%	11046	599.5	505.1	2187	10.51	84.84	4.65	15.16	69.32	66	"	873	6.32	1.006	878	0.126	3.20	
PROMEDIO						2190			4.52	15.04								884		3.26	
10%	4	4.95%	4.69%	11135	604.7	508.8	2188	9.96	85.13	4.91	14.87	67.00	63	13.22	833	6.35	1.000	833	0.112	2.84	
	5	4.95%	4.69%	11069	600.9	506.0	2187	9.95	85.09	4.95	14.91	66.79	61	"	806	6.33	1.004	810	0.110	2.79	
	6	4.95%	4.69%	11087	602.1	506.6	2189	9.96	85.14	4.90	14.86	67.01	64	"	846	6.32	1.006	851	0.115	2.92	
PROMEDIO						2188			4.92	14.88								831		2.85	
15%	7	4.68%	4.43%	11153	604.8	510.5	2185	9.39	85.22	5.39	14.78	63.53	60	13.22	793	6.30	1.010	801	0.108	2.74	
	8	4.68%	4.43%	11169	605.5	511.4	2184	9.39	85.20	5.42	14.80	63.42	58	"	767	6.37	0.996	764	0.106	2.69	
	9	4.68%	4.43%	11101	601.4	508.7	2182	9.38	85.13	5.50	14.87	63.06	57	"	754	6.34	1.002	755	0.111	2.82	
PROMEDIO						2184			5.43	14.82								773		2.75	
20%	10	4.40%	4.17%	11076	598.3	509.3	2175	8.80	85.06	6.14	14.94	58.89	52	13.22	687	6.24	1.028	707	0.102	2.59	
	11	4.40%	4.17%	11142	603.5	510.7	2182	8.83	85.33	5.84	14.67	60.17	51	"	674	6.19	1.043	703	0.099	2.51	
	12	4.40%	4.17%	11094	601.2	508.2	2183	8.83	85.38	5.79	14.62	60.42	55	"	707	6.17	1.049	763	0.100	2.54	
PROMEDIO						2180			5.92	14.74								724		2.55	
25%	13	4.13%	3.91%	11154	602.7	512.7	2176	8.25	85.33	6.42	14.67	56.23	48	13.22	635	2.26	1.022	649	0.088	2.24	
	14	4.13%	3.91%	11106	599.1	511.5	2171	8.23	85.16	6.61	14.84	55.48	46	"	608	6.30	1.010	614	0.091	2.31	
	15	4.13%	3.91%	11110	599.5	511.5	2172	8.24	85.19	6.58	14.81	55.61	43	"	588	6.29	1.013	576	0.087	2.21	
PROMEDIO						2173			6.54	14.78								613		2.25	
30%	16	3.85%	3.65%	11092	597.8	511.4	2169	7.68	85.30	7.02	14.70	52.22	38	13.22	502	6.31	1.008	506	0.082	2.08	
	17	3.85%	3.65%	11118	599.2	512.6	2169	7.68	85.30	7.03	14.70	52.22	41	"	542	6.35	1.000	542	0.080	2.03	
	18	3.85%	3.65%	11085	597.1	511.4	2168	7.67	85.24	7.08	14.76	51.99	36	"	476	6.32	1.006	479	0.081	2.06	
PROMEDIO						2168			7.04	14.72								509		2.06	