

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
CAMPUS GUANAJUATO
DIVISIÓN DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“ELABORACIÓN Y PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
MODIFICADAS CON DESECHOS DE LLANTA TRATADOS QUÍMICAMENTE”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA

EDGAR FABIÁN VÁZQUEZ HERNÁNDEZ

GUANAJUATO, GTO; AGOSTO DEL 2018

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
CAMPUS GUANAJUATO
DIVISIÓN DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“ELABORACIÓN Y PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
MODIFICADAS CON DESECHOS DE LLANTA TRATADOS QUÍMICAMENTE”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA

EDGAR FABIÁN VÁZQUEZ HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS

DRA. LORENA EUGENIA SÁNCHEZ CADENA

CODIRECTOR DE TESIS

DR. ZEFERINO GAMIÑO ARROYO

GUANAJUATO, GTO; AGOSTO DEL 2018

DECLARATORIA

Por medio de la presente me responsabilizo de la autenticidad y originalidad del presente trabajo titulado:

“ELABORACIÓN Y PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON DESECHOS DE LLANTA TRATADOS QUÍMICAMENTE”



Edgar Fabián Vázquez Hernández



Dra. Lorena Eugenia Sánchez Cadena

Director de tesis



Dr. Zeferino Gamiño Arroyo

Codirector de tesis

Guanajuato, Gto; Agosto del 2018

Miembros del jurado del Examen Profesional que para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Química presenta **Edgar Fabián Vázquez Hernández**, con el trabajo titulado:

“ELABORACIÓN Y PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON DESECHOS DE LLANTA TRATADOS QUÍMICAMENTE”

Dra. Rosalba Fuentes Ramírez

Presidente

Dra. Adriana Medina Ramírez

Secretario

Dra. Beatriz Ruiz Camacho

Vocal

Guanajuato, Gto; Agosto del 2018

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una etapa llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Le agradezco a la Dra. Lorena Eugenia Sánchez Cadena y al Dr. Zeferino Gamiño Arroyo por su confianza y por permitirme formar parte de su grupo de investigación, además de su apoyo incondicional.

Y un agradecimiento a la Dra. Alexandra Ossa López, Raymundo y José Luis por todo el apoyo mostrado durante la estancia en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

DEDICATORIA

Con toda la humildad que de mi corazón puede emanar, dedico primeramente mi trabajo a Dios; por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

De igual forma, dedico esta tesis a mi abuela y a mis padres, por ser las personas que me han acompañado durante todo mi trayecto estudiantil y de vida y que han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores.

Al Pbro. Alberto Ramírez Mozqueda, por ser un ejemplo para mí de vida cristiana, por su apoyo incondicional y el don de su amistad sincera.

A mi familia, amigos y a todas las personas que compartieron conmigo esta etapa, por brindarme todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

ÍNDICE

Declaratoria	III
Miembros del Jurado	IV
Agradecimientos	V
Dedicatoria	VI
Índice	VII
Resumen	IX

Introducción	1
Objetivo	3
Hipótesis	4

Capítulos

Capítulo 1 – Marco Teórico	5
1.1 Problemática de las llantas de desecho	5
1.2 Legislación actual en México	7
1.3 Composición de las llantas	10
1.4 Reciclaje de llantas de desecho	14
1.5 Generalidades de la solvólisis	17
1.6 Asfaltos modificados con polímeros	19
1.7 Estudios preliminares	24
1.8 Técnicas instrumentales	25

1.8.1 Espectroscopia Ultravioleta – Visible (UV – Vis)	25
1.8.2 Espectroscopia Fotoelectrónica de Rayos X (XPS)	26
1.8.3 Metodología Superpave	27
1.8.4 Protocolo AMAAC	29
1.8.5 Prueba de susceptibilidad a la humedad – Norma AASHTO T283	30
1.8.6 Prueba de susceptibilidad a la deformación permanente – Norma UNE-EN 12697-22	31
Capítulo 2 – Metodología	32
2.1 Tratamiento químico de viruta de llanta	33
2.2 Elaboración de probetas asfálticas y pruebas de desempeño	35
2.2.1 Susceptibilidad a la humedad	35
2.2.2 Susceptibilidad a la deformación permanente	36
Capítulo 3 – Resultados y discusión	38
3.1 Tratamiento químico de viruta de llanta	38
3.2 Elaboración de probetas asfálticas y pruebas de desempeño	43
3.2.1 Susceptibilidad a la humedad	43
3.2.2 Susceptibilidad a la deformación permanente	44
Conclusiones	45
Referencias	47

RESUMEN

La inadecuada disposición final de llantas de desecho se ha convertido en una problemática ambiental y de salud pública en México; el manejo de este tipo de desechos ha sido uno de los temas más debatidos en materia ambiental. La contaminación ambiental y los problemas de salud de la población causados por la incorrecta disposición de desechos de llanta han impulsado la investigación sobre nuevos métodos para la recuperación de neumáticos y la destrucción de sus componentes peligrosos.

En este trabajo se presenta el estudio para evaluar el desempeño de mezclas asfálticas modificadas con desechos de llanta tratados químicamente por solvólisis; mediante pruebas de susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente, en conformidad con la norma AASHTO T283 Resistencia de mezclas bituminosas compactadas al daño inducido por humedad y la norma UNE-EN 12697-22 Mezclas bituminosas - Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente.

El análisis comprende dos etapas, la primera consiste en llevar a cabo el tratamiento químico por solvólisis de la viruta de llanta y la caracterización de los productos de reacción mediante espectroscopia Ultravioleta – Visible (UV – Vis) y espectroscopia Foelectrónica de Rayos X (XPS) y la segunda, en integrar esta viruta a una matriz asfáltica y evaluar su efecto en términos de las pruebas mencionadas con anterioridad.

Los resultados mostraron que en el tratamiento químico por solvólisis, los enlaces C-S que generan el entrecruzamiento en la viruta de llanta son atacados, con lo que se provocan cambios estructurales en el polímero. De igual manera se observó que la incorporación de viruta de llanta tratada químicamente en la elaboración de mezclas asfálticas destinadas a la construcción de carreteras urbanas, es viable desde el punto de vista de susceptibilidad a la deformación permanente; sin embargo, para el caso de susceptibilidad a la humedad, los resultados sugieren que no existe una buena interacción entre el asfalto, la viruta tratada y el agregado mineral en condiciones representativas de capas asfálticas construidas en zonas lluviosas y/o inundables.

INTRODUCCIÓN

Las llantas de desecho se han convertido en un problema técnico, económico, ambiental y de salud pública mundial; la falta de una disposición final adecuada trae consigo varios problemas ambientales y de salud a la población. Hasta el momento no se tiene un estudio específico acerca de las enfermedades derivadas de las llantas depositadas fuera del centro de acopio, sin embargo, está demostrado que ocasionan paludismo, dengue y virus del Nilo, a través del mosquito que se aloja en las que están abandonadas, y constituyen un hábitat idóneo para su reproducción. También son criaderos de fauna nociva como roedores, portadores de rabia y leptospirosis; mismos que coexisten con cucarachas, que provocan enfermedades del aparato digestivo principalmente, además de víboras, arañas, alacranes y viudas negras, que pueden inducir envenenamiento por mordedura o picadura. De igual manera, provocan daños al medio ambiente ya que en caso de producirse incendios se contamina el aire, y también los mantos freáticos del subsuelo. Asimismo, sus implicaciones son obvias en el deterioro de la imagen urbana.

La generación, manejo y disposición final de los desechos ha sido uno de los temas más controvertidos en materia ambiental, y en el caso de la llanta la principal preocupación radica en qué hacer con el neumático de desecho, para muchos usuarios lo más económico es dejarlo en el patio trasero del hogar, para otros en la vía pública, para algunos más pagar disposición final en centros de servicios. Sin embargo, ninguna de esas opciones es una solución.

En la actualidad se pueden utilizar diversos métodos para la recuperación de neumáticos y la destrucción de sus componentes peligrosos. Las operaciones de reutilización, recauchutado y reciclado de neumáticos usados representan una importante oportunidad para la creación de industria y tecnología, así como un importante yacimiento de nuevos empleos.

Los bitúmenes modificados con polímeros son materiales nuevos que se emplean ampliamente en la pavimentación de carreteras con tráfico intenso o con temperaturas extremas. En términos generales, los asfaltos modificados con polímeros mejoran sus propiedades, como menor susceptibilidad a la temperatura,

mayor intervalo de plasticidad, mayor cohesión, mejor respuesta elástica, al igual que mayor resistencia al agua y al envejecimiento.

Estudios preliminares del departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Guanajuato muestran que al incorporar viruta de llanta en una proporción de 0 (pastilla modelo), 1, 2 y 3% y posteriormente caracterizar sus propiedades mecánicas de acuerdo a la Técnica Marshall se obtienen resultados no satisfactorios.

En 2017, investigadores de la Universidad de Guanajuato desarrollaron una metodología experimental para la solvólisis de caucho sintético, con lo cual se realizó el tratamiento químico de viruta de llanta y su posterior incorporación a una mezcla asfáltica; demostrando que, de acuerdo al método Marshall, se mejoran ciertas propiedades mecánicas. Sin embargo, se observó que la humedad es un factor crítico para el desempeño del asfalto modificado; es por ello que en este trabajo se estudiará el desempeño de mezclas asfálticas modificadas con desechos de llanta tratados químicamente por solvólisis, en términos de susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente.

La presente tesis se divide en cuatro capítulos. En el capítulo I se presenta el marco teórico, donde se menciona la problemática actual con los desechos de llanta, la legislación actual en México en esta materia, la composición de las llantas, los tipos de reciclaje para estos materiales, las generalidades sobre la solvólisis y los avances más recientes sobre asfaltos modificados con polímeros. En el capítulo II se muestra la metodología, cabe mencionar que, como el procedimiento para efectuar la solvólisis de viruta de llanta se encuentra en proceso de solicitud de patente, sólo se mostrarán rangos de operación. En el capítulo III se discuten los resultados obtenidos de la caracterización de los productos de la reacción de solvólisis, así como los valores medidos en el estudio de susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente para las mezclas asfálticas modificadas con viruta de llanta tratada químicamente. Finalmente se enuncian las conclusiones y el trabajo a futuro.

OBJETIVO

Evaluar el desempeño de mezclas asfálticas modificadas con desechos de llanta tratados químicamente por solvólisis; mediante pruebas de susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente, en conformidad con la norma AASHTO T283 (Resistencia de mezclas bituminosas compactadas al daño inducido por humedad) y la norma UNE-EN 12697-22 (Mezclas bituminosas - Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente).

HIPÓTESIS

Una mezcla asfáltica modificada con viruta de llanta tratada químicamente puede cumplir con los estándares, en términos de susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente, de la norma AASHTO T283 (Resistencia de mezclas bituminosas compactadas al daño inducido por humedad) y la norma UNE-EN 12697-22 (Mezclas bituminosas - Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente).

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Problemática de las llantas de desecho

Uno de los residuos que más generan las sociedades modernas, tan dependientes del automóvil, son los neumáticos fuera de uso. Es cierto que en principio los neumáticos usados no generan ningún peligro inmediato, pero su eliminación de manera inapropiada o su producción en grandes cantidades, puede contaminar gravemente el medioambiente u ocasionar problemas a la hora de eliminarlos. Los neumáticos han sido diseñados para resistir condiciones mecánicas y meteorológicas extremas (resistencia al calor, frío, ozono, luz y bacterias) lo que los hace prácticamente indestructibles por el paso del tiempo y presentan una alta capacidad calorífica, que dificulta su extinción en caso de incendio. Además, los neumáticos enteros limitan, por su forma y tamaño, la rehabilitación del relleno sanitario al ser difícilmente compactables.

La fabricación de neumáticos es un proceso complejo que engloba el consumo de materias primas procedentes de fuentes no renovables, caucho sintético, acero, agua y que requiere elevadas cantidades de energía en su fabricación. En el proceso productivo se producen elevadas cantidades de emisiones y se requiere de fuertes inversiones en medidas preventivas y correctoras a fin de disminuirlas. [1]

Las llantas de desecho se han convertido en un problema técnico, económico, ambiental y de salud pública mundial; en América Latina es común encontrarlas en la vía pública, en talleres mecánicos de automóviles, en casas, cauces de arroyos y ríos. En las ciudades fronterizas del norte de México esta situación se agudiza, debido a que es muy alta la disponibilidad de llantas para su reutilización, ya que cada año, ingresan millones procedentes de Estados Unidos. Se estima que en dicho país se consumen más de 300 millones, una por habitante por año y una buena parte de las que se desechan se introduce a México afectando a ciudades como Ciudad Juárez y Tijuana. Se calcula que en la frontera norte cada año se comercializan alrededor de 4.5 millones de llantas de desecho, y que en la vía pública o en centros de acopio hay más de 10 millones de ellas.

Una vez ingresada al país, la llanta se reutiliza, previo proceso de reencauchamiento o vulcanización, conocido como "gallito", y es 80 por ciento más económica que una nueva, por lo que tiene una gran demanda por parte de los residentes de ciudades mexicanas. Esta demanda es una motivación fuerte para la existencia de un mercado ilegal entre la frontera México–Estados Unidos. Y aunque son mucho más baratas, no cumplen con las condiciones de seguridad necesarias para el tránsito (causa de numerosos accidentes), su vida útil es muy corta y se desechan con rapidez en basureros irregulares, en la vía pública o en predios baldíos.

En el estado de Chihuahua se generan alrededor de 1.5 millones de llantas de desecho por año, sin que haya una disposición final adecuada para todas. Al contabilizar los municipios sobre los que se tienen datos (Juárez, Chihuahua, Ojinaga y Ascensión), el volumen acumulado para 2010 sumó 11 090 000 unidades. Esto se ha convertido en un problema ambiental grave, con pocas iniciativas para abatirlo. En Juárez se ha desarrollado un proceso de gestión más amplio para atender el manejo y disposición final de la llanta de desecho; el cual comenzó formalmente en el año 2000, con la compra de una trituradora por parte del municipio, con el apoyo de la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF) y con fondos del Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN), sin embargo, este proyecto no prosperó.

Existen muchas llantas en los centros de acopio y en los tiraderos clandestinos, lo que trae consigo varios problemas ambientales y de salud a la población fronteriza. Hasta el momento no se tiene un estudio específico acerca de las enfermedades derivadas de las llantas depositadas fuera del centro de acopio, sin embargo, está demostrado que ocasionan paludismo, dengue y virus del Nilo, a través del mosquito que se aloja en las que están abandonadas, y constituyen un hábitat idóneo para su reproducción. También son criaderos de fauna nociva como roedores, portadores de rabia y leptospirosis; mismos que coexisten con cucarachas, que provocan enfermedades del aparato digestivo principalmente, además de víboras, arañas, alacranes y viudas negras, que pueden inducir envenenamiento por mordedura o picadura. De igual manera, provocan daños al medio ambiente ya que en caso de

producirse incendios se contamina el aire, lo vuelve tóxico, y también los mantos freáticos del subsuelo. Asimismo, sus implicaciones son obvias en el deterioro de la imagen urbana. [2]

1.2 Legislación actual en México

En cuanto a la normatividad vigente que regula la producción, manejo, aprovechamiento y disposición final de residuos sólidos se tiene el antecedente de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) que fue publicada en 1988. En esta ley se identificaban a los residuos como los principales agentes de contaminación del suelo, por lo que establecía las bases para controlar la generación, manejo y disposición de residuos sólidos. La publicación de la LGEEPA es el parteaguas de la legislación ambiental, que si bien antes se habían publicado otras leyes que incluían consideraciones ambientales, esta es la primera en presentar una estructura comprensiva e integral de la protección ambiental.

En materia de residuos, la referencia actual es la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, 2003) y su Reglamento (Reglamento de LGPGIR, 2006), los que establecen las definiciones actualizadas de los diferentes tipos de residuos y las formas en que deben ser manejados. La gestión integral implica un manejo sustentable de los residuos, así como una serie de procedimientos y acciones que buscan minimizar la producción de residuos; incentivar el aprovechamiento, valorización, reciclaje de los residuos evitando que terminen enterrados en sitios de disposición final y evitar la contaminación ambiental derivada de la disposición final de los residuos sólidos.

Una normatividad clave en el manejo de residuos es la norma oficial NOM-083-SEMARNAT-2003 que establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU) y de manejo especial. Esta norma es de suma importancia porque su cumplimiento garantizaría que la disposición final de RSU se lleve a cabo bajo procedimientos ambientalmente seguros desde la selección de un sitio que se acondicionará como relleno sanitario, la forma de operar el sitio de forma cotidiana, así como las acciones

post clausura. Esta norma establece los mecanismos para la operación eficiente de los sitios de disposición final, define la infraestructura necesaria para la seguridad ambiental y el control de los vectores de contaminación que generan los entierros de RSU. Los principales vectores son: las emisiones de gases efecto invernadero como lo es el metano; los lixiviados sin tratamiento que pueden contener residuos peligrosos; así como los impactos al suelo y a los ecosistemas en la zona donde se ubica el sitio.

Se tienen dos normas que contribuyen a definir y diferenciar los diversos tipos de residuos. La NOM-052-SEMARNAT- 2005 que se refiere a los Residuos Peligrosos y la norma NOM-161-SEMARNAT-2011 que define cuales son los Residuos de Manejo Especial y los criterios para elaborar Planes de Manejo de este tipo de residuos. Estas normas son importantes ya que algunos tipos de residuos peligrosos y residuos de manejo especial se pueden mezclar con la corriente de los RSU y se incorporan a los sistemas de recolección municipal de RSU aumentando los costos de operación de la recolección y aumentando el riesgo de contaminación con una disposición no adecuada en los rellenos sanitarios municipales.

El Artículo 10 de la LGPGIR establece que el manejo apropiado de los RSU es responsabilidad de los ayuntamientos, quienes deben proveer los servicios públicos de recolección, traslado, tratamiento y disposición final de los RSU (Artículo 10 LGPGIR); para cumplir con la responsabilidad deben:

Formular, por sí o en coordinación con las entidades federativas, y con la participación de representantes de los distintos sectores sociales, los Programas Municipales para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos, los cuales deberán observar lo dispuesto en el Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos correspondiente.

Los Programas Municipales para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (PMPGIRSU) son planes de manejo que se fundamentan en un diagnóstico de la situación de los residuos en un municipio, para después plantear una estrategia para su manejo, tratamiento y aprovechamiento. Como último recurso queda la disposición final en rellenos sanitarios que debe ser la opción

última para el manejo de RSU. Estos programas deben ser elaborados por los ayuntamientos en colaboración con el gobierno del estado y el sector social, después deben ser presentados y aprobados por la instancia estatal correspondiente y por último se publican para que tengan un carácter oficial. [3]

El Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de Residuos de Guanajuato (PEPGIRG), es el principal instrumento de planeación y política ambiental del Gobierno de Guanajuato en materia de residuos sólidos urbanos, de manejo especial y peligrosos, gestionados en el Estado, en cumplimiento con las competencias establecidas en la Constitución Política de Estados Unidos Mexicanos y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

Este instrumento normativo tiene como principales ejes de actuación jerárquica en materia de gestión y manejo de residuos:

1. Prevención. Fomentando la minimización de residuos como herramienta básica de prevención. Motivando la reducción en la generación de residuos innecesarios a través del uso de tecnologías limpias. Incentivando la producción de productos limpios que produzcan el mínimo posible de impacto negativo sobre el ambiente, enfocando hacia el desarrollo de productos de larga duración.

2. Recuperación. Canalizando los residuos generados a procesos de valorización con el objetivo de volverlos a introducir nuevamente en el ciclo productivo. Para ello se fomentará la recolección selectiva, la reutilización, el reciclaje y la recuperación de materias primas o energía. Promocionando y creando condiciones de mercado que aceleran el desarrollo de las técnicas de reutilización y reciclaje, optimizando estos procesos, permitiendo la reducción de los costos externos y, por último, dando salida a los productos reutilizados y reciclados.

3. Eliminación segura. Aplicando al máximo óptimo los ejes de prevención y recuperación, los residuos que no se hayan podido aprovechar deberán ser depositados en sitios de disposición final que cumplan la legislación de la materia.

El PEPGIRG se elabora en cumplimiento del Artículo 13 de la Ley para la Gestión Integral de Residuos del Estado y los Municipios de Guanajuato (LEGIREMG) en el

que se establece que: El Ejecutivo del Estado establecerá el programa estatal para la prevención y gestión integral de los residuos, de conformidad con la LEGIREMG, con el diagnóstico básico para la gestión integral de residuos sólidos urbanos y de manejo especial y demás disposiciones aplicables. [4]

La generación de neumáticos fuera de uso (NFU) en el estado de Guanajuato se estimó, para el año 2013, en un volumen diario de más de 33 toneladas. Los municipios que tienen más generación de NFU son León, Celaya e Irapuato, que suman casi la mitad de la generación total del estado, debido a que son las ciudades que presentan mayor concentración de población y flujo vehicular.

Solamente se acopia para tratamiento 23.75% de los NFU generados. La recolección logra que 23.24% de los NFU generados se lleven a procesamiento en otras entidades, pues el estado no cuenta con empresas con capacidad de hacerlo. La reutilización de los NFU no es significativa, mientras que 3.71% se destina al reciclaje. En cuanto a la disposición final se estima que 37.94% terminan en sitios no controlados de disposición de residuos sólidos urbanos y 11.81% tienen destino desconocido. El estado tiene capacidad instalada autorizada para reciclar 103 toneladas mensuales de NFU.

Por lo anterior, el Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato puso en marcha el Plan de Manejo de Neumáticos fuera de uso, que tiene como objetivo promover la prevención de la generación e incentivar la valorización de los neumáticos fuera de uso en el estado de Guanajuato, a través de un modelo de manejo económicamente viable, técnicamente factible y ambientalmente sostenible. Para tales fines, propone dos estrategias: incrementar la vida útil de los neumáticos e incrementar la valorización de los NFU. [5]

1.3 Composición de las llantas

Los neumáticos están compuestos principalmente de un material llamado caucho el cual es una sustancia que se extrae de árboles de zonas tropicales. Este material se extrae al sangrar el árbol, luego se recoge este líquido lechoso llamado látex que en parte está compuesto por partículas de goma pura.

El neumático es un conjunto de hule natural proveniente en su mayoría del árbol *Hevea brasiliensis* y hule sintético producido a partir del petróleo. Ambas materias primas son mezcladas con otros componentes para darles resistencia, flexibilidad y varias características deseables.

Cada neumático es fabricado de acuerdo a las especificaciones, exigencias y holguras de los modelos de automóviles para los cuales será útil. De esa cuenta, en la pared o perfil de la llanta se indica desde el tamaño (ancho, alto y dimensión interna) hasta cuándo fue fabricada. [6]

Las llantas se componen esencialmente de caucho sintético o natural, negro de carbono, óxido de Zinc, azufre, acero, material textil y otros aditivos. La tabla 1.1 proporciona un listado de las sustancias contenidas en las llantas y su contenido porcentual.

Tabla 1.1 - Composición porcentual de llantas

Material	Porcentaje
Caucho o elastómero	48
Negro de carbono	22
Acero	15
Textil	5
Óxido de zinc	1
Azufre	1
Aditivos	8

El caucho es el principal componente de las llantas, seguido del negro de carbono, entre estos 2 compuestos conforman el 70% de las llantas. A continuación, se describen brevemente las características de estos componentes.

Negro de carbono

El negro de carbono es un material resultante de la combustión incompleta de los productos derivados del petróleo. Es usado como relleno para el caucho en las llantas, lo que puede reducir el coste del caucho como producto y aumentar considerablemente su resistencia. Generalmente, cuanto más pequeño es el

tamaño de las partículas de negro de carbono, mayor es su dureza, su resistencia mecánica y su resistencia a la abrasión.

Caucho

El caucho constituye el principal componente de las llantas, éste es un elastómero compuesto por hidrocarburos que surge de como una emulsión lechosa de la savia de algunas plantas, pero también puede ser producido sintéticamente. Los elastómeros son aquellos polímeros que muestran un comportamiento elástico, son polímeros amorfos que se encuentran sobre su temperatura de transición vítrea (T_g), de ahí esa considerable capacidad de deformación.

Las principales características de los elastómeros son:

- **Dureza:** La dureza de los cauchos blandos se mide sobre una escala arbitraria, por medio de un indentador de carga de resorte, que emplea un durómetro. Las lecturas de 30 a 50 son típicas del caucho blando, de 60 a 80 del caucho rígido, de 85 a 95 del caucho duro, y más de 98 para el caucho duro inflexible.
- **Compresión:** La propiedad más importante del caucho sujeta a cargas de compresión, es el módulo de elasticidad. Para el caucho blando varía entre 1 y 10 MPa, mientras que para el caucho duro se encuentra alrededor de 1000MPa. El módulo de elasticidad depende de la temperatura del caucho, el tiempo que el caucho haya estado a la temperatura de prueba, el grado de deformación, y la composición y curado del caucho.
- **Resiliencia elástica:** La capacidad del elastómero para absorber energía elásticamente se conoce como resiliencia elástica. Energía acumulada hasta el límite elástico. La buena resiliencia de los elastómeros justifica su uso como medio para absorber las cargas de choque. Los elastómeros tienen alrededor de 3 veces la resiliencia de un acero de alta resistencia.
- **Fluencia:** La fluencia se incrementa con el aumento de la temperatura. Las cargas vibratorias producen más fluencia que las estáticas, y cuanto mayores sean las vibraciones, tanto mayor será el efecto.

- **Histéresis:** Se denomina también fricción interna del elastómero, significa la conversión de energía mecánica en térmica, cuando se carga y se descarga el mismo. Cuanto más blando sea el elastómero, menor será su eficiencia para absorber energía mecánica, mediante su conversión en energía térmica. La conversión de energía mecánica en energía térmica es menos eficiente a temperaturas elevadas.
- **Fatiga:** La carga estática requerida para que se produzca una ruptura en el elastómero, es menor cuanto más prolongado sea el tiempo de su aplicación. La vida dinámica de fatiga se acorta apreciablemente por las temperaturas muy por encima de los 40°C o muy por debajo de -7°C.

Según las fichas técnicas de los fabricantes de llantas, donde se reporta su composición, los tipos de caucho más utilizados son: Estireno butadieno (SBR), Polibutadieno y el caucho natural, en la tabla 1.2 se pueden observar las principales características de estos elastómeros. [7]

Tabla 1.2 – Propiedades del caucho empleado en la elaboración de llantas

Elastómero	Propiedades
Caucho natural (Poliisopreno)	Excelentes propiedades mecánicas, tracción, flexión y compresión. Excelente aislante eléctrico, muy buena resistencia a los ácidos diluidos y detergentes. Buena adhesión a tejidos y metales
Polibutadieno	
Butadieno - Estireno	Muy buenas propiedades mecánicas. Resistente al envejecimiento por calor y oxidación. Buena resistencia a los ácidos diluidos.

1.4 Reciclaje de llantas de desecho

El reciclaje de algunos residuos se ha considerado como la alternativa más viable. En la jerarquía del manejo final de residuos, esta actividad se sitúa en primer lugar ya que se considera que hay que buscar en primera instancia reciclar los residuos antes que cualquier otra forma de manejo final (disposición en basurero, incineración, etc.).

Reciclar significa separar o extraer materiales del flujo de desechos y acondicionarlos para su comercialización de modo que puedan ser usados como materias primas en sustitución de materiales vírgenes. El reciclaje es ampliamente considerado como una opción a incentivar debido a sus beneficios ambientales ya que mitiga la escasez de recursos naturales vírgenes, disminuye los riesgos de enfermedades y de alteración de ecosistemas, reduce la demanda de espacio en tiraderos y generalmente involucra ahorros en el consumo de energía. Por otra parte, contribuye a reducir el impacto ambiental de la disposición de desechos sólidos, las emisiones a la atmósfera, la generación de lixiviados y los malos olores. Sin embargo, esta actividad tiene también efectos negativos sobre el ambiente, principalmente por la energía usada en la recolección y la clasificación de los residuos, además de que el reprocesamiento y utilización de estos materiales conlleva impactos en el entorno. [8]

En la actualidad se pueden utilizar diversos métodos para la recuperación de neumáticos y la destrucción de sus componentes peligrosos, anulando las características elásticas de los desperdicios del caucho, dotándoles nuevamente de propiedades plásticas como las del caucho no vulcanizado. Las operaciones de reciclado de neumáticos usados representan una importante oportunidad para la creación de industria y tecnología, así como un importante yacimiento de nuevos empleos. A continuación, se exponen algunas de ellas.

- **Regeneración:** Este proceso se basa en tratar los desechos de caucho para obtener una materia prima que, aunque dista mucho de la original, podría volver a vulcanizarse y fabricar de nuevo el caucho. El caucho regenerado en teoría podría ser utilizado en la fabricación de neumáticos, pero cada día

las mezclas utilizadas en la fabricación de los neumáticos, a los que se exigen altísimas prestaciones, tienen que cumplir con unas especificaciones tan estrictas que hacen difícil, por el momento, la utilización generalizada de caucho regenerado. En cualquier caso, puede aplicarse a la fabricación de otros productos de caucho, o cubiertas macizas para otro tipo de vehículos.

- **Pirolisis:** Descompone térmicamente los residuos en ausencia total o casi total de oxígeno. Las condiciones de operación varían de acuerdo con los productos que se desee obtener. Entre estos se encuentran gas de síntesis, productos líquidos (aceites de pirolisis y ácidos piro-leñosos) y un sólido carbonoso que puede ser convertido en carbón vegetal o carbón activado. Ocurre a temperaturas entre 200- 1100°C, lo que deriva en un alto costo de operación; además de que se pueden obtener productos no deseados.
- **Incineración:** Proceso por el que se produce la combustión de los materiales orgánicos del neumático a altas temperaturas en hornos con materiales refractarios de alta calidad. Es un proceso costoso y además presenta el inconveniente de la diferente velocidad de combustión de los diferentes componentes y la necesidad de depuración de los residuos por lo que no resulta fácil de controlar y además es contaminante. Genera calor que puede ser usado como energía, ya que se trata de un proceso exotérmico. Con este método, los productos contaminantes que se producen en la combustión son muy perjudiciales para la salud humana, entre ellos el Monóxido de carbono, Xileno, Hollín, Óxidos de nitrógeno, Dióxido de carbono, Óxidos de zinc, Benceno, Fenoles, Dióxido de azufre, Óxidos de plomo, Tolueno. Además, el hollín contiene cantidades importantes de hidrocarburos aromáticos policíclicos, altamente cancerígenos.
- **Trituración criogénica:** Este método necesita unas instalaciones muy complejas lo que hace que tampoco sean rentables económicamente y el mantenimiento de la maquinaria y del proceso es difícil. La baja calidad de los productos obtenidos, la dificultad material y económica para purificar y separar el caucho y el metal entre sí y de los materiales textiles que forman el neumático, provoca que este sistema sea poco recomendable.

- Trituración mecánica (reciclaje físico): Es un proceso puramente mecánico y por tanto los productos resultantes son de alta calidad limpios de todo tipo de impurezas, lo que facilita la utilización de estos materiales en nuevos procesos y aplicaciones. La trituración con sistemas mecánicos es, casi siempre, el paso previo en los diferentes métodos de recuperación y rentabilización de los residuos de neumáticos. Este concepto incluye la fragmentación del neumático en gránulos y separación de componentes (acero y fibras). Ejemplos de uso son: materiales de relleno en productos de caucho, modificadores de asfalto, superficies de atletismo y deportes, y productos moldeados y calandrados. Lo que se pretende es incrementar la calidad y consistencia del caucho de ruedas granulado, y ello conducirá a un reciclado del material mucho más extenso.
- Neumáticos convertidos en energía eléctrica: Los residuos de neumáticos una vez preparados, puede convertirse también en energía eléctrica utilizable en la propia planta de reciclaje o conducirse a otras instalaciones distribuidoras. Los residuos se introducen en una caldera donde se realiza su combustión. El calor liberado provoca que el agua existente en la caldera se convierta en vapor de alta temperatura y alta presión que se conduce hasta una turbina. Al expandirse mueve la turbina y el generador acoplado a ella produce la electricidad, que tendrá que ser transformada posteriormente para su uso directo. Este procedimiento presenta la desventaja de no poder recuperar los materiales valorizables que componen el neumático; además de desincentivar el reciclaje.
- Termólisis en solución (solvólisis): Se trata de un sistema en el que se somete a los materiales de residuos de neumáticos a un calentamiento usando un solvente en un medio en el que no existe oxígeno. Las altas temperaturas y la presencia del solvente tienen el efecto de destruir los enlaces químicos. Aparecen entonces cadenas de hidrocarburos. Es la forma de obtener, de nuevo, algunos de los compuestos originales del neumático, por lo que es el método que consigue la recuperación parcial de los componentes del neumático. Se obtienen metales, carbones e hidrocarburos gaseosos, que

pueden volver a las cadenas industriales, ya sea de producción de neumáticos u a otras actividades. Este proceso se lleva a cabo en condiciones menos severas que la pirolisis, lo que reduce los costos económicos. [9]

1.5 Generalidades de la solvólisis

La solvólisis se denomina como un tratamiento químico mediante un solvente y un catalizador, el cual se hace reaccionar con un polímero para obtener productos de des-polimerización, es decir a través de la solvólisis los enlaces de tipo C–A (donde A puede ser O, N, P, S, Si, o un halógeno) pueden “romperse” para dar lugar a una mezcla de productos generalmente solubles. La solvólisis, o descomposición química es la ruta más desarrollada industrialmente, es aplicable solamente a polímeros de condensación (poliésteres, nylon, poliuretanos, policarbonatos, poliésteres insaturados y poliacetales), los cuales tienen grupos funcionales unidos por enlaces débiles que son susceptibles de disociación por ataque con determinados agentes químicos. Según el agente utilizado las vías de tratamiento son: glicólisis, hidrólisis, metanólisis, aminólisis, transesterificación (intercambio éster), alcoholólisis, acidólisis y transamidación (intercambio de amidas). [10]

Los siguientes son ejemplos de procesos solvolíticos descritos en la bibliografía de patentes:

- Glicólisis: Una patente concedida a DuPont describe el uso de NaOH acuoso en etilenglicol (EG) a 90–150 °C, a presión atmosférica para descomponer el politereftalato de etileno (PET) en una sal disódica (95.7% de rendimiento) y luego a temperatura y presión ambiente. [11] En una patente anterior también a DuPont, la fibra de desecho PET se hace reaccionar con EG y un catalizador de bencenosulfonato para dar tereftalato de bis-hidroxietilo (BHET). Un polímero final hecho con 45% de monómero recuperado dio propiedades de fibra equivalentes a las de virgen. [12] En otra patente expedida a Fiber Industries se describe un proceso continuo de glicolisis para PET de desecho para la formación de fibras usando EG en condiciones de presión atmosférica y obtener una mezcla de oligómeros de PET de bajo

peso molecular, que puede emplearse directamente como material de alimentación para hacer un PET de alta viscosidad el cual es adecuado para la elaboración de películas y fibras. [13]

- Metanólisis: Eastman Kodak Co. patentó un proceso de metanólisis por lotes para recuperar EG y dimetil tereftalato (DMT) de botellas de PET desechadas, incluyendo contaminantes tales como copas de fondo de poliolefina, tapas de botellas de aluminio, etiquetas y adhesivo disolviendo el PET de desecho en oligómeros del mismo monómero y pasando por una solución de metanol sobrecalentado. [14]
- Hidrólisis: Celanese (México) patentó un proceso de hidrólisis neutral continua en un extrusor de doble tornillo para despolimerizar residuos de PET con vapor de alta presión a 200–300 °C y ~15 atm de presión. [15]
- Transesterificación: En una patente asignada a DuPont, la reacción de transesterificación desgrana los gránulos de PET con 2-etilhexanol (20% de exceso) a 220 °C usando un catalizador de estaño durante 4–6 horas, los resultados muestran una producción rentable de tereftalato de dioctilo (DOTP) y un plastificante para policloro de vinilo (PVC) flexible. En otra patente, Texaco, Inc. ha descrito la preparación de mezclas de polioles aromáticos que contiene un éster adecuado para su uso en espumas rígidas haciendo reaccionar una corriente residual de tereftalato de dimetilo, que contiene *p*-formilbenzoato de metilo sobre un catalizador de óxido metálico y posteriormente transesterificando el producto con polialquilenglicol en presencia de calor. [16]
- En una patente asignada a BASF, se ha descrito un procedimiento para la recuperación continua de caprolactama a partir de fibras de nailon 6 que contienen residuos de alfombra. El trozo de fibra de nylon 6 obtenido de la separación de la alfombra se alimenta a un reactor de despolimerización a una temperatura de al menos el punto de fusión del nylon 6 en presencia de catalizador y vapor supercalentado para producir un destilado que contiene caprolactama que se separa de otros volátiles y se purifica. [17]

- Zimmer AG, ha desarrollado un proceso que convierte el nylon 6 de alfombras gastadas que contienen 40–80% de nilón a caprolactama. El proceso Zimmer utiliza una reacción catalizada por ácido a 280–400 °C para producir un producto de caprolactama que se filtra y purifica mediante tratamiento químico y destilación. Mediante la adición de un triturado apropiado Zimmer ha demostrado la viabilidad del proceso en el laboratorio. Además, se planificó una planta semicomercial con capacidad de 10–20000 toneladas métricas/año. [18]

Existen estudios para la solvólisis de diversos polímeros, sin embargo, para el caucho vulcanizado actualmente no se encuentra información disponible. En 2017, investigadores de la Universidad de Guanajuato desarrollaron una metodología experimental para la solvólisis de caucho sintético; demostrando que, en la solvólisis de viruta de llanta, ésta es atacada por el solvente, produciéndose la ruptura de ciertos enlaces carbono – azufre (C-S) responsables de la estructura entrecruzada de la llanta. [10]

1.6 Asfaltos modificados con polímeros

El asfalto o bitumen es una compleja mezcla de diferentes hidrocarburos, obtenido como un producto derivado del petróleo o en depósitos naturales. El asfalto es de los materiales de ingeniería más antiguos utilizados por el hombre, las aplicaciones en el sector de la construcción datan de fechas prehistóricas, cerca del 5.000 AC. Aún en el presente, debido a sus buenas propiedades adhesivas e hidrofóbicas es ampliamente utilizado en diferentes aplicaciones, concentradas principalmente en la fabricación de vías. También en una menor proporción es destinado para funciones como: impermeabilización, adhesivos, control de erosión, en la industria automotriz y eléctrica. El desempeño de los asfaltos en sus diferentes aplicaciones ha sido satisfactorio durante varios decenios. No obstante, día a día desde las últimas décadas se han presentado múltiples factores que ponen de manifiesto la necesidad de emplear nuevos materiales para el diseño de mezclas asfálticas. Entre estos factores se encuentran el incremento de los niveles de tráfico, la producción de vehículos cada vez más grandes y pesados, el incremento en las presiones de

los neumáticos, la innovación de nuevos productos asfálticos, y la permanente obtención de asfaltos provenientes de nuevas fuentes, que en algunos casos, por su naturaleza no poseen propiedades aptas para resistir por sí solos solicitaciones con ciertos requerimientos, por ejemplo: temperaturas ambientales extremas o cargas de trabajo excesivas. Suma de acontecimientos que originaron investigaciones sobre nuevas tecnologías que permitiesen el desarrollo de asfaltos con mejores características, en general que fueran más resistentes y duraderos que el asfalto por sí solo. Uno de los efectos de las investigaciones encaminadas a optimizar las propiedades del asfalto, fue que estimuló la búsqueda de materiales con características idóneas para su modificación en estado natural o crudo, creando un nuevo panorama donde sobresalieron los polímeros como una interesante opción. Desde sus comienzos en los años 70's, la práctica de adicionar polímeros al asfalto ha permitido modificar sus propiedades en general, logrando aumentar su rendimiento en servicio.

Los aumentos en el rendimiento del asfalto modificado son evidenciados en los cambios que experimentan sus propiedades cuando se le adicionan polímeros. Así lo establecieron numerosos estudios, lo que llevó a que existan acercamientos expresados en modelos teóricos, los cuales han permitido describir diferentes características como las termo-mecánicas del asfalto crudo y modificado. No obstante, los modelos existentes en muchas ocasiones no se acoplan a asfaltos distintos a los utilizados específicamente en cada estudio, evidenciando de manera general la existencia de fenómenos que aún no se comprenden completamente. Uno de estos fenómenos es la interacción entre las macro moléculas poliméricas y los componentes del asfalto, y su influencia en las propiedades finales de la mezcla. Este interrogante se debe en parte a la complejidad de la composición del asfalto, constituido por una gran variedad de compuestos orgánicos de diferente peso molecular, cuyas propiedades termodinámicas dependen de la naturaleza del crudo del cual se obtenga el asfalto, haciendo que asfaltos de diferentes orígenes presenten comportamientos heterogéneos. Los componentes del asfalto generalmente son agrupados en cuatro categorías genéricas, que representan grupos con propiedades químicas similares, procedimiento conocido como

fraccionamiento SARA, haciendo referencia al nombre de cada grupo: Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos. Siendo estos últimos los componentes de mayor peso molecular y generalmente son sólidos, los otros tres grupos juntos son denominados maltenos. El asfalto, dependiendo si se encuentra a altas, intermedias, o bajas temperaturas, tiene un comportamiento viscoso, viscoelástico, o sólido frágil respectivamente. Algunos estudios han sugerido que éstos comportamientos se deben a fenómenos como las transiciones vítreas características de cada fracción o de interacciones que ocurren entre los constituyentes del asfalto (SARA), como separación de fases que pueden ser del caso líquido-líquido o líquido-sólido. De manera general las propiedades y estructura del asfalto dependen altamente de la temperatura, naturaleza y proporción de sus constituyentes. El papel de cada fracción en su estructura y por consiguiente en sus propiedades no se ha entendido completamente, existiendo diferentes teorías que describen la estructura del asfalto a partir de sus componentes. [19]

Con el fin de mejorar la calidad de los pavimentos asfálticos, la industria del asfalto ha incorporado polímeros al asfalto como una forma de mitigar las principales causas de las fallas del pavimento asfáltico, incluida la deformación permanente a altas temperaturas y el agrietamiento a bajas temperaturas. Cuando se mezclan un polímero y asfalto virgen, las cadenas de polímero absorben parte de la fracción de aceite de bajo peso molecular del asfalto virgen y se hinchan.

De los modificadores de polímeros, el estireno butadieno estireno (SBS) desarrollado originalmente por Shell Chemical Co. es ampliamente utilizado en la mayoría de la industria de aglutinantes de asfalto. SBS crea un sistema tridimensional red dentro de la fase de asfalto virgen resultando en una excelente fuerza de unión a los agregados que conduce a un pavimento duradero. SBS es el polímero más apropiado y utilizado para la modificación de asfalto, seguido por el caucho recuperado. Es la formación de una red crítica entre el aglutinante y el SBS que aumenta el módulo complejo (suma de las contribuciones de los módulos elástico y viscoso), lo que resulta en un aumento de la resistencia a la rodadura.

En 2004, el Departamento de Transporte de Florida y la FHWA reportó que SBS benefició la resistencia al agrietamiento al reducir la tasa de acumulación de microdaños.

Debido a la alta viscosidad y al revestimiento aglutinante mejorado, los pavimentos de asfalto modificado con polímeros (PMA) tienen un mejor rendimiento en aplicaciones de alto tránsito. Las modificaciones de polímeros se están convirtiendo en factores importantes en la industria de la pavimentación debido a sus efectos comprobados, como una mejor resistencia a la formación de surcos, daños por fatiga, desprendimiento y grietas térmicas en pavimentos de asfalto. Sin embargo, ha habido dificultades en la trabajabilidad del PMA debido a la alta viscosidad de los aglutinantes modificados y la preocupación por los problemas de salud debido al alto nivel de gases tóxicos y la exposición continua de los trabajadores a altas temperaturas durante las operaciones de pavimentación. Además, la alta temperatura puede degradar térmicamente el polímero y causar un alto costo económico debido al mayor consumo de combustible. [20]

Idealmente hablando, los polímeros modificadores de asfaltos deberían seleccionarse para el diseño de PMA en función de las características que se quieren alcanzar; como lo recomienda la Tabla 1.3, que en la columna derecha muestra las propiedades del polímero modificador a emplearse si se quiere alcanzar en el PMA la característica correspondiente mostrada en la columna izquierda. Después de mezclarse con el asfalto, se supone que los modificadores de polímero interactúan física o químicamente con el asfalto en un grado apropiado para formar una estructura bifásica estable con dos fases continuas interconectadas. Un bajo grado de interacción entre el polímero y el asfalto podría causar un problema de separación; mientras que un alto grado puede conducir al problema de gelificación y altos costos. La interacción entre dos moléculas de polímero tampoco debe ser ni demasiado baja ni demasiado alta. Los polímeros con una estructura bifásica de una fase rígida dispersa en una fase continua flexible pueden ser útiles para obtener mejores propiedades de PMA. Con la modificación de estos polímeros, las propiedades del asfalto se mejorarán en gran medida. Sin embargo, actualmente es

un desafío lograr todas las propiedades esperadas al mismo tiempo. Para ser prácticos, siempre es importante decidir las características dominantes que más se necesitan al diseñar PMA. Como se muestra en la figura 1.1, los diseños se pueden hacer de dos maneras: mejorando en gran medida las propiedades con un costo aceptablemente alto o reduciendo significativamente el costo con propiedades relativamente pobres.

Tabla 1.3 Propiedades de polímeros modificadores para diseño de PMA

Características deseadas de PMA	Propiedades de polímeros modificadores
Rígido a altas temperaturas y suave a bajas temperaturas	Sensibilidad a baja temperatura
Adhesivo a los agregados	Contribuciones sobresalientes a la adhesión de PMA resultante con agregados
Viable	Excelente dispersabilidad (o solubilidad apropiada) en el asfalto
Estable en almacenamiento	Compatibilidad apropiada con el asfalto
Duradero (envejecimiento y fatiga)	Alta estabilidad térmica y respuesta estable en el tiempo
Reciclable	Reciclabilidad de los productos finales en la PMA
Rentable	Bajo costo
Amigable con el medio ambiente	Bajo impacto ambiental durante la producción y aplicación

En el caso de propiedades mejoradas, el costo definitivamente aumentará. Por lo tanto, al permitir que el grado de mejora de las propiedades sea lo suficientemente alto como para cubrir el costo adicional, se obtendrá un PMA más rentable.

Para reducir el costo, algunos materiales poliméricos baratos, especialmente los desechos y subproductos (por ejemplo, caucho residual, plásticos residuales y subproductos de biomasa polimérica), podrían tener aplicaciones potenciales con mayor éxito en el futuro. A pesar de la buena compatibilidad con el medio ambiente,

estos desechos o subproductos generalmente hacen que algunas propiedades del PMA sean relativamente pobres. Por lo tanto, sus costos de ciclo de vida deben analizarse y demostrar que son efectivos antes de su aplicación. [21]

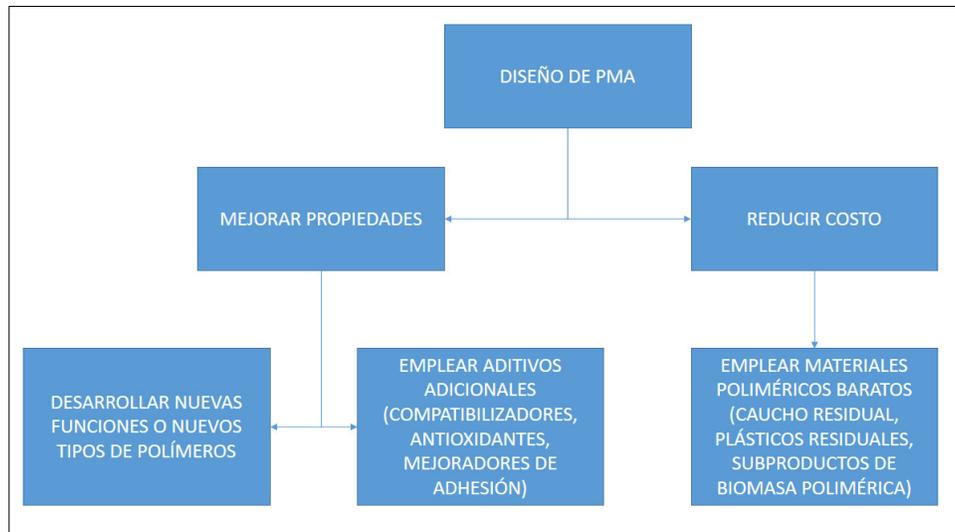


Figura 1.1 – Alternativas para el diseño de PMA

1.7 Estudios preliminares

En estudios preliminares del departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Guanajuato; se incorporó a una mezcla asfáltica viruta proveniente de llantas de desecho, sin tratamiento químico previo, en una proporción de 0 (pastilla modelo), 1, 2 y 3% y posteriormente se evaluaron sus propiedades mecánicas (resistencia, flujo y vacíos) de acuerdo a la Técnica Marshall, obteniendo resultados no satisfactorios de acuerdo a la norma N·CMT·4·05·003 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en México. [22]

En 2017, investigadores de la Universidad de Guanajuato desarrollaron una metodología experimental para la solvólisis de caucho sintético, con lo cual se realizó el tratamiento químico de viruta de llanta y su posterior incorporación a una mezcla asfáltica; demostrando que, de acuerdo al método Marshall, se mejoran ciertas propiedades mecánicas. Sin embargo, se observó que la humedad es un factor crítico para el desempeño del asfalto modificado. [10]

1.8 Técnicas instrumentales

1.8.1 Espectroscopia Ultravioleta – Visible (UV – Vis)

La espectroscopia visible es una de las técnicas más ampliamente y más frecuentemente empleadas en el análisis químico.

Para que una sustancia sea activa en el visible debe ser colorida: el que una sustancia tenga color, es debido a que absorbe ciertas frecuencias o longitudes de onda del espectro visible y transmite otras más.

El espectro Visible y Ultravioleta, tienen amplia aplicación y son técnicas que se emplean continuamente. El rango visible se considera de los 380 a los 750 nm. El rango del Ultravioleta cercano o del Cuarzo es de 190 a 380 nm.

La base de la espectroscopia Visible y Ultravioleta consiste en medir la intensidad del color (o de la radiación absorbida en UV) a una longitud de onda específica comparándola con otras soluciones de concentración conocida (soluciones estándar) que contengan la misma especie absorbente. Para tener esta relación se emplea la Ley de Beer, que establece que, para una misma especie absorbente en una celda de espesor constante, la absorbancia es directamente proporcional a la concentración.

La coloración de la solución se debe a la especie absorbente y esta coloración puede ser natural o inducida. La coloración natural puede ser la base de la cuantificación de una especie. Más frecuentemente, se induce a la formación de un complejo colorido que absorba en el visible, y que sea específico para el elemento o compuesto que se desea cuantificar colorimétricamente.

Las técnicas analíticas UV-Visible han recibido gran aceptación debido, entre otras a las siguientes razones:

- Amplio campo de aplicación: Como ya se ha mencionado, las técnicas espectroscópicas UV-Vis., son ampliamente empleadas ya que son muchas las especies que son activas en el Visible, y muchas más las que con un

tratamiento adecuado son capaces de formar especies coloridas. Lo mismo puede decirse de la espectroscopia UV.

- Selectividad adecuada: Aunque no es muy común si es posible tener interferencias en UV-Visible. Cuando esto ocurre, es posible emplear los métodos para análisis de multicomponentes. Otra alternativa es aislar el analito de la interferencia, o separar la interferencia misma.
- Buena Exactitud y Precisión: En estas técnicas espectroscópicas es normal tener errores relativos del 1 al 3 %, por lo cual se puede considerar que se tendrán resultados analíticos con un mínimo de incertidumbre si se procede en la forma correcta.
- Facilidad y Conveniencia: Aunque existen instrumentos altamente sofisticados acoplados a computadoras y con sistemas ópticos y electrónicos de alta precisión, es posible obtener resultados muy aceptables para análisis de rutina, con instrumentos o espectrofotómetros de los más sencillos en el mercado, a un costo muy accesible.

El espectro Ultravioleta y Visible de las moléculas está asociado a transiciones electrónicas entre los diferentes niveles energéticos en ciertos grupos o átomos de la molécula y no caracterizan a la molécula como entidad, por lo cual esta técnica es la más limitada para la información de compuestos. [23]

1.8.2 Espectroscopia Fotoelectrónica de Rayos X (XPS)

Los rayos-X son muy útiles para caracterizar los sólidos y sus estructuras, pues también son absorbidos por la materia (interacción inelástica) y producen consecuencias como transiciones electrónicas de los niveles internos de los átomos.

La técnica XPS también es conocida por el acrónimo ESCA “electron spectroscopy for chemical analysis” que indica claramente el uso de esta herramienta para análisis químico. Como fuentes de excitación se usa las líneas $K_{\alpha_{1,2}}$ de Mg o Al que tienen energías de 1253.6 y 1486 eV, respectivamente. Se utiliza un tubo de rayos-X. Hay que medir la energía cinética de los fotoelectrones una vez que salen de la superficie de la muestra. Hay varias técnicas para este análisis, aunque el más

común es el cambio de dirección de los electrones mediante analizadores electrostáticos o magnéticos. Los electrostáticos son los más utilizados para el análisis de energías cinéticas de electrones del orden de 1 keV que es lo común.

Las aplicaciones más importantes de la técnica XPS se basan en el hecho de que la interacción de los electrones con la materia es muy fuerte y las energías de los electrones emitidos son relativamente bajas (≤ 1.5 keV) por lo que son detenidos muy fácilmente. Solo electrones emitidos o que han interaccionado en la superficie de la muestra pueden alcanzar el detector para ser analizados. Por esto, la técnica XPS es superficial (informa sobre tres o cuatro capas de átomos en la superficie de la muestra). La preparación de la muestra es fundamental para que lo que se mida sea representativo de la muestra bajo estudio. Las superficies se pueden contaminar o modificar por reacciones con el entorno y el resultado de un estudio XPS puede originar confusión.

Este estudio permite detectar los elementos presentes en la superficie, cuantificarlos y en casos particulares con los estudios adecuados se puede obtener los estados de oxidación y entornos de coordinación de los elementos presentes en esas superficies. [24]

1.8.3 Metodología Superpave

En 1987, el SHRP (Strategic Highway Research Program) comenzó el desarrollo de un nuevo sistema para especificación de materiales asfálticos. El producto final del programa de investigación sobre asfaltos de SHRP es un nuevo sistema conocido como SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement). El software de Superpave es un programa de computación que auxilia a los ingenieros en la selección de materiales asfálticos y el diseño de la mezcla. No obstante, Superpave es más que un programa de computación. Fundamentalmente, representa un sistema más avanzado de especificación de los materiales componentes, diseño de mezclas asfálticas y su análisis, y la predicción del desempeño de los pavimentos, incluyendo equipos de ensayo, métodos de ensayo y criterios.

El sistema Superpave proporciona un medio completo y muy amplio para diseñar mezclas con base en los requerimientos específicos de comportamientos definidos por el tránsito, el clima y la selección estructural del pavimento en una cierta localización. Se facilita con este sistema, la selección y combinación de asfalto agregado y, de ser necesario, de un aditivo, para alcanzar el nivel requerido de comportamiento en el pavimento.

Dos aspectos claves en el sistema Superpave son la compactación en el laboratorio y los ensayos de desempeño. La compactación en el laboratorio se realizó con el compactador giratorio Superpave (Superpave Gyrotory Compactor, SGC). Su principal función es compactar las probetas de ensayo. El SGC puede usarse para diseñar mezclas que no exhiban un comportamiento débil.

El desempeño de mezcla inmediatamente después de la construcción es influida por las propiedades de la mezcla resultantes del mezclado en caliente y de la compactación. Consecuentemente, un protocolo para envejecimiento a corto plazo fue incorporado al sistema Superpave: la mezcla suelta, antes de ser compactada por el SGC, debe ser envejecida en horno a 135 °C, durante 4 hrs.

Ya que el diseño de mezclas Superpave y análisis depende del nivel de tránsito o de la clasificación funcional del pavimento para el cual se hace el diseño, se han desarrollado tres niveles de diseños de las mezclas del Superpave:

- El diseño volumétrico, único requerimiento para diseño de mezclas del nivel 1, implica la fabricación de los especímenes de ensayo usando el SGC y la selección del contenido de asfalto basado en los vacíos de aire, vacíos de agregado mineral, vacíos llenados con asfalto y la relación polvo llenante/contenido de asfalto efectivo. Las propiedades de consenso y las propiedades de fuente de origen deben ser cumplidas.
- En el nivel 2 de diseño de mezclas se parte del diseño volumétrico. Una batería de ensayos es realizada para arribar a una serie de predicciones de desempeño con lo cual la mezcla se acepta o no se acepta.
- El nivel 3 de diseño de mezcla abarca muchas de las facetas de los niveles 1 y 2. Ensayos adicionales se realizan en una amplia variedad de

temperaturas. Debido a que abarca un gran rango de ensayos y resultados, el diseño del nivel 3 ofrece un detallado y seguro nivel de predicción del desempeño.

El sistema Superpave empalma las propiedades de los materiales con las propiedades de la estructura del pavimento para predecir el desempeño real del pavimento. De este modo, las ventajas o desventajas de nuevos materiales, el diseño de una mezcla diferentes, asfaltos modificados y otros productos pueden ser cuantificadas en términos de costo contra desempeño. [25]

1.8.4 Protocolo AMAAC

La Asociación Mexicana del Asfalto A. C. define el Protocolo AMAAC como una metodología para diseñar una mezcla asfáltica que se utilice en la construcción de pavimentos para carreteras, donde se desee obtener altos niveles de desempeño (resistentes a las deformaciones plásticas, al fenómeno de fatiga y al daño por humedad).

Para el correcto diseño de una mezcla asfáltica se asegurará que tanto la mezcla como sus componentes sean de buena calidad y cumplan con las especificaciones establecidas en el protocolo AMAAC. Para esto se realizará el diseño de la mezcla asfáltica verificando lo siguiente:

- Calidad del material asfálticos, calidad del material pétreo, ensayos para mezclas asfálticas.
- Estructura granular de la mezcla asfáltica.
- Estimación de las propiedades volumétricas.
- Determinación del contenido óptimo de asfalto.
- Evaluación del desempeño de la mezcla asfáltica.
- Ejemplo de diseño de mezcla asfáltica.

El método de diseño propuesto por AMAAC, establece diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa en función de la importancia de la carretera determinada por el nivel de tránsito o el desempeño deseado para la infraestructura que se requiere. [26]

1.8.5 Prueba de susceptibilidad a la humedad – Norma AASHTO T283

Un aspecto de suma importancia y que normalmente no toman en cuenta los métodos de diseño de pavimentos, es el daño por humedad de las capas asfálticas, que no necesariamente es causado por la acumulación de esfuerzos en dichas las capas, sino por la mala interacción química de los agregados con los cementos asfálticos bajo condiciones de humedad. Este tipo de daño es el de mayor incidencia en México, siendo notoria después de la temporada de lluvias la aparición de baches sobre pavimentos asfálticos construidos con mezclas susceptibles a la humedad.

La susceptibilidad a la humedad es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través de la mezcla asfáltica. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, y por tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento. [27]

La susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas se evalúa a través de la prueba TSR (Tensile Strength Ratio) conforme a la norma AASHTO T283 que consiste en determinar la relación entre la resistencia a la tensión indirecta S_t (ver ecuación 1.1) de especímenes acondicionados y especímenes secos.

$$S_t = \frac{2P_{ult}}{\pi\phi H} \quad (1.1)$$

Donde, P_{ult} es la carga máxima de rotura, ϕ es el diámetro de la probeta y H es la altura de la probeta.

Con los valores de la resistencia a la tensión indirecta de los especímenes acondicionados y no acondicionados S_1 y S_2 respectivamente, se calculan los valores de TSR tal como lo indica la ecuación 1.2.

$$\%TSR = \frac{S_2}{S_1} * 100 \quad (1.2)$$

Los valores porcentuales de TSR deben exhibir valores mayores o iguales a 80% para considerarse que la mezcla asfáltica puede ser empleada en la construcción de carreteras urbanas. [28]

1.8.6 Prueba de susceptibilidad a la deformación permanente – Norma UNE-EN 12697-22

Una forma de evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas con respecto a la deformación permanente, consiste en analizar la respuesta del material bajo condiciones desfavorables, es decir, cuando presenta una rigidez baja (situación que se presenta generalmente a elevadas temperaturas) bajo una carga de tránsito elevada.

Para esta prueba, la Norma UNE-EN 12697-22 especifica que se ensayen dos especímenes o placas por cada tipo de mezcla asfáltica a evaluar, las cuales deben tener 40 cm y 30 cm de largo y ancho respectivamente y un espesor medio de 6 cm.

Existe una gran variedad de ensayos de rodadura que son ampliamente utilizados para determinar la resistencia a las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas en caliente. En estos ensayos se mide la profundidad de la rodera que se forma en una probeta o placa prismática sometida al paso repetido de una rueda cargada bajo una determinada temperatura de ensayo. Las roderas en el espécimen de ensayo se correlacionan con respecto a las roderas del pavimento en servicio.

Uno de los equipos usados para este tipo de ensayo es la rueda de pista de laboratorio el cual es designado como dispositivo pequeño por la norma, el cual se muestra en la figura 1.2. [28]

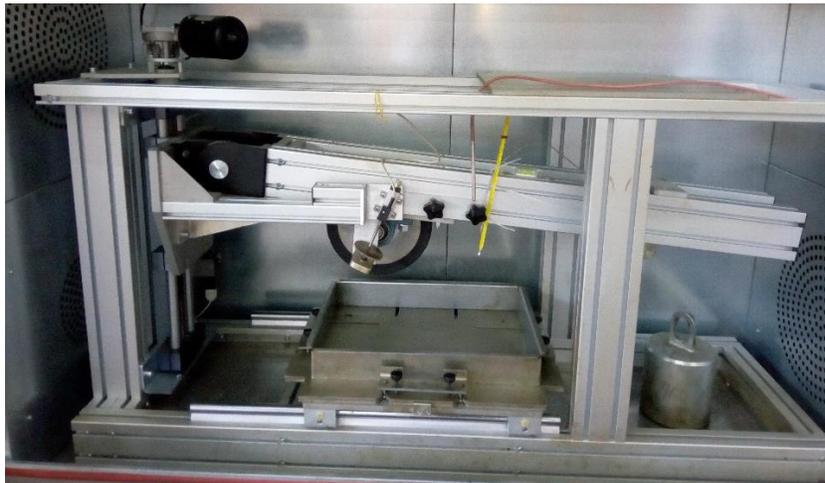


Figura 1.2 – Equipo de rueda de pista

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología empleada, la cual se dividirá en dos secciones. En la primera parte se estudia el tratamiento químico de la viruta de llanta, mediante la caracterización de los productos de reacción, los cuales son el solvente después de la reacción (al que llamaremos solvolizato) y la viruta de llanta solvolizada. Este análisis se llevó a cabo por medio de espectroscopia ultravioleta – visible (UV – Vis) y espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS).

En la segunda parte se analiza la elaboración de mezclas asfálticas modificadas con viruta de llanta tratada químicamente, tomando en cuenta en cuenta los criterios de diseño definidos por la SHRP (Strategic Highway Research Program) conocidos como metodología Superpave (Asphalt Institute, 2001) y las recomendaciones del protocolo AMAAC para el diseño de mezclas asfálticas densas de alto desempeño (Asociación Mexicana del Asfalto, 2008). El desempeño mecánico de las mezclas elaboradas se efectuó mediante dos ensayos: 1.- la prueba de susceptibilidad a la humedad conforme a la norma AASHTO T283 (Resistencia de mezclas bituminosas compactadas al daño inducido por humedad) y 2.- la prueba de susceptibilidad a la deformación permanente, de acuerdo con la norma UNE-EN 12697-22 (Mezclas bituminosas - Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente).

El diagrama de flujo de la metodología se muestra en la figura 2.1.

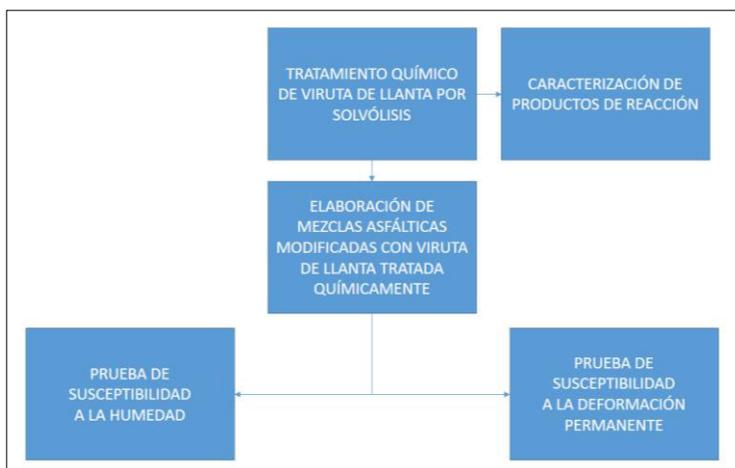


Figura 2.1 – Metodología empleada

2.1 Tratamiento químico de viruta de llanta

Para llevar a cabo el tratamiento químico de viruta de llanta por solvólisis se empleó el siguiente protocolo experimental. Se procedió a cribar viruta de llanta con la finalidad de homogeneizar el tamaño del material (ver figura 2.2), dicha viruta se colocó en un reactor de vidrio de 2 L con cuatro cuellos en el cual se efectuó la reacción de solvólisis empleando como solvente un glicol y un álcali como catalizador; la reacción se llevó a cabo en ausencia de oxígeno a una temperatura entre los 120 °C y los 350 °C, empleando agua de enfriamiento como refrigerante, y a una velocidad de agitación entre 250 rpm y 600 rpm, durante un tiempo de entre 8 y 15 horas (ver figura 2.3). Al término de la reacción, la viruta tratada químicamente se separó del solvolizato (ver figura 2.4) y fue lavada con etanol y acetona.



Figura 2.2 – Clasificación por tamaño de viruta de llanta

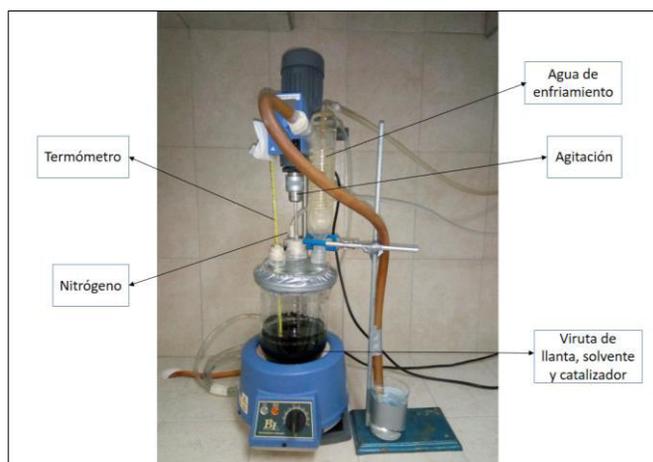


Figura 2.3 – Montaje para la reacción de solvólisis en un reactor de tanque agitado



Figura 2.4 – Separación por filtración de productos de reacción

Estudio UV – Vis

Para evidenciar la ocurrencia de la reacción de solvólisis, se hizo un estudio de espectroscopia UV–Vis, a fin de identificar algunas especies que pudieran haber pasado de la llanta vulcanizada al solvente; para ello se tomó una muestra de 0.1 g de solvolizato que se diluyó con 10 mL de glicol para ser analizado en un espectrofotómetro de UV–Vis Perkin–Elmer Lambda 35. Los datos para el barrido del espectro de absorción se recogieron en el rango de longitud de onda de 250 a 400 nm.

Estudio XPS

A fin de probar si la matriz polimérica había sido fragmentada en la reacción de solvólisis, la composición química de la viruta de llanta, antes y después de la reacción, se estudió con un analizador de superficies Thermo Scientific K Alpha con una fuente de rayos X de Mg K_{α} de 1253.6 eV de energía; para lo cual se fijaron ambas muestras sobre un portamuestra de acero inoxidable. En el análisis los elementos se determinaron con el espectro amplio registrando de 0 a 1200 eV. La señal del pico C 1s con energía de enlace de 285.0 eV se usó para la corrección de los cambios en las muestras.

2.2 Elaboración de probetas asfálticas y pruebas de desempeño

2.2.1 Susceptibilidad a la humedad

Con el fin de evaluar la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas modificadas con viruta de llanta tratada químicamente por solvólisis, se elaboraron probetas de concreto asfáltico de 150 mm de diámetro y 100 mm de altura aproximadamente, empleando un compactador giratorio (ver figura 2.5); las combinaciones empleadas de agregado pétreo, asfalto y viruta de llanta para elaborar las probetas se muestran en la tabla 2.1. Las mezclas se realizaron a una temperatura de 155°C y se fabricaron seis especímenes por cada tipo de mezcla.

Tabla 2.1 Combinaciones empleadas para elaboración de probetas

Mezcla No.	Cantidad de agregado pétreo (g)	Cantidad de asfalto* (%)	Cantidad de agregado reemplazado por viruta de llanta* (%)
1	3190	6	0 (Modelo)
2	3190	6.23	1
3	3190	6.61	2

*Respecto a la cantidad de agregado pétreo en la mezcla.

Cabe mencionar que se diseñó la combinación con 3% de viruta de llanta respecto a la masa de agregado pétreo, sin embargo, no se tomó en cuenta para los ensayos al requerir una cantidad muy elevada de asfalto (7.2% respecto a la masa de agregado pétreo) para conformar la mezcla. Una mezcla asfáltica demasiado rica, es decir, con mucha cantidad de asfalto, provoca la salida hacia la superficie del material ligante en el pavimento asfáltico.



Figura 2.5 – Compactador giratorio para elaboración de probetas

El acondicionamiento de tres de los seis especímenes elaborados para cada tipo de mezcla, consistió, conforme a la norma, de tres etapas: un proceso de congelamiento a $-18^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por un periodo de 16 horas, baño maría a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ por un periodo de 24 horas y un segundo baño maría a $25^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ por un periodo de 2 horas.

Los especímenes fueron ensayados aplicando una carga a velocidad de deformación constante de 50.8 mm por minuto, registrándose así la carga máxima de fractura P_{ult} , esto es cuando el espécimen llega a su falla y exhibe una grieta vertical a lo largo de su diámetro.

2.2.2 Susceptibilidad a la deformación permanente

Para las pruebas de susceptibilidad a la deformación permanente, se elaboraron dos grupos de placas de concreto asfáltico, el primero con un porcentaje de vacíos de aire de 4% (condición de diseño) y el segundo con un porcentaje de vacíos de aire de 6 a 7% (condición común en obra) empleando las combinaciones de agregado pétreo, asfalto y viruta de llanta mostradas en la tabla 2.2 y tomando en cuenta las especificaciones de la la norma UNE-EN 12697-22. Cabe mencionar que

dichos especímenes fueron elaborados mediante el compactador de placa mostrado en la figura 2.6.

Tabla 2.2 Combinaciones empleadas para elaboración de placas

Mezcla No.	Cantidad de agregado pétreo (g)	Cantidad de asfalto* (%)	Cantidad de agregado reemplazado por viruta de llanta* (%)
1	15000	6	0 (Modelo)
2	15000	6.23	1
3	15000	6.61	2

*Respecto a la cantidad de agregado pétreo en la mezcla.



Figura 2.6 – Compactador de placa empleado

Para fines de esta investigación, se realizó la prueba de pista tipo B de acuerdo con la normatividad UNE antes mencionada, la cual determina que se apliquen diez mil pasadas de una rueda cargada con 16.4 kg a placas de concreto asfáltico a una temperatura de 60 °C.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la presentación de resultados este capítulo se dividirá en dos partes, la primera, relativa al tratamiento químico por solvólisis de la viruta de llanta y la segunda, referente a la elaboración de mezclas asfálticas modificadas y el análisis de su desempeño mecánico a través de las pruebas de susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente.

3.1 Tratamiento químico de viruta de llanta

Estudio UV

Como se había mencionado anteriormente, un estudio de UV – Vis se realizó con el fin de identificar especies que migran de la matriz polimérica de la llanta vulcanizada al solvente, y con esto poner en evidencia que la reacción de solvólisis se lleva a cabo.

En la figura 3.1 se muestra el espectro de UV–Vis del solvolizato, en el que se puede observar una señal ubicada en 309.73 nm, la cual puede atribuirse a enlaces de tipo C=S, pues éstos dan bandas intensas entre 250 y 320 nm, que son probablemente de transiciones $\pi \rightarrow \pi^*$ y $n \rightarrow \sigma^*$ en el grupo C=S. [29] Esto sugiere que, al llevarse a cabo la reacción de solvólisis, los enlaces C-S que generan el entrecruzamiento en la viruta de llanta son atacados químicamente y el azufre eliminado de la viruta aparece en el solvente en la forma de compuestos que contienen el grupo C=S.

Cabe mencionar que el solvente empleado en la reacción no absorbe en el rango de longitud de onda en el que se realizó este estudio; por lo que la señal obtenida proviene de compuestos presentes en la viruta de llanta, que después de la reacción de solvólisis, se encuentran en el solvolizato.

Lo mencionado anteriormente es consistente con los estudios preliminares de espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) realizados a la viruta de llanta a diferentes tiempos de reacción. El espectro de FT-IR se muestra en la figura 3.2, en el que se observa que al aumentar el tiempo de reacción de 30 minutos a 4 horas aparece una vibración en la región de 1640 cm^{-1} , la cual

corresponde a un enlace C=C, lo que se sugiere que, al aumentar el tiempo de reacción la solvólisis va rompiendo los enlaces C-S generando enlaces C=C en la matriz polimérica de la viruta de llanta. [10]

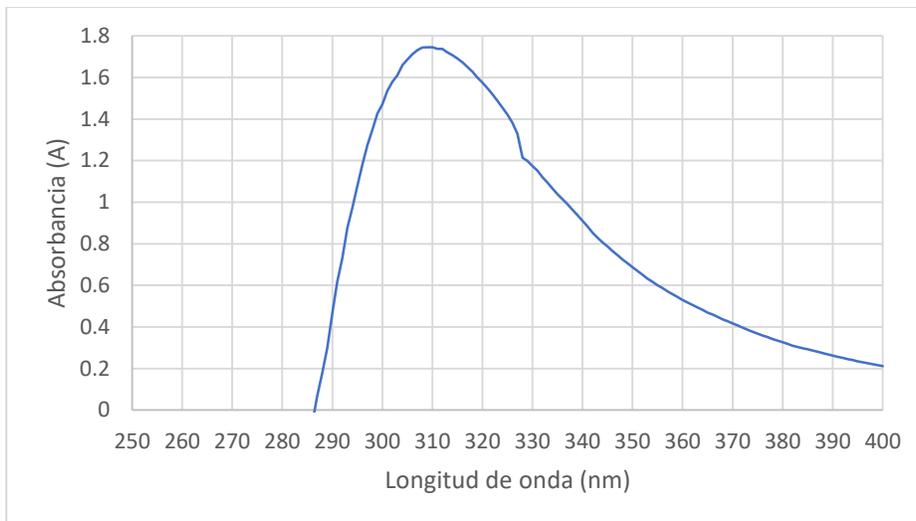


Figura 3.1 – Espectro de UV-Vis del solvolizado

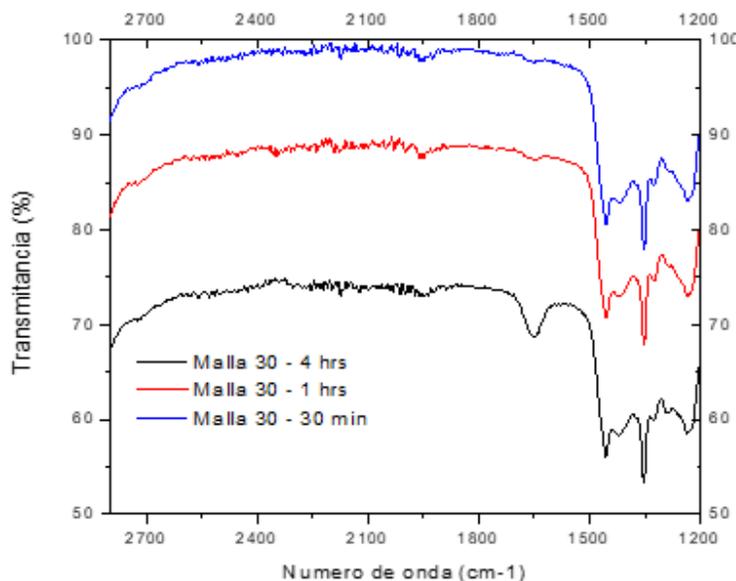


Figura 3.2 – Espectro de FT-IR de viruta de llanta a diferentes tiempos de reacción
Fuente: Preciado R. Y. (2017). Reciclaje físico-químico de llanta mediante la formación de asfaltos modificados (Tesis de Maestría). Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.

Estudio XPS

Un estudio XPS se llevó a cabo con la finalidad de probar si la matriz polimérica había sido fragmentada en la reacción de solvólisis.

En la tabla 3.1 se muestran los resultados del análisis cuantitativo XPS sobre la superficie de la viruta de llanta antes y después de la reacción de solvólisis; se observa la presencia de silicio, carbono, calcio y oxígeno prácticamente en la misma proporción para la viruta sin tratamiento químico y la viruta tratada químicamente.

De acuerdo con los datos obtenidos, el carbono tiene una composición mayor al 80% de la composición total de la viruta en ambos casos; por lo que se analizaron los picos de este elemento a fin de dilucidar cambios estructurales en la viruta de llanta, provocados por la reacción de solvólisis. En este análisis se encontró que en la muestra de viruta de llanta tratada químicamente existen un mayor número de especies diferentes de carbono, con respecto a los de la muestra de viruta de llanta sin tratar, lo que indica que la solvólisis ha modificado químicamente la matriz polimérica de la llanta.

Tabla 3.1 Composición elemental en porcentaje atómico obtenido por XPS

	Viruta de llanta sin tratamiento químico	Viruta de llanta tratada químicamente
Elemento	Porcentaje atómico	
Silicio	3.94	2.86
Carbono	86.17	87.51
Calcio	1.32	1.21
Oxígeno	8.58	8.43

En la figura 3.3 se muestra el espectro XPS del C 1s de la viruta de llanta sin tratamiento químico, para deconvolucionar este espectro fueron necesarios dos picos; el pico I está centrado en 284.68 eV y el pico II está centrado en 288.7 eV; la primera contribución corresponde a los enlaces C-C y C-H característicos de los polímeros, mientras que la segunda contribución corresponde a los enlaces C=O.

El pico que corresponde a la vibración del enlace C-S (285.4 eV), que genera el entrecruzamiento en la llanta, se encuentra enmascarado por la señal fuerte del C-C. [30]

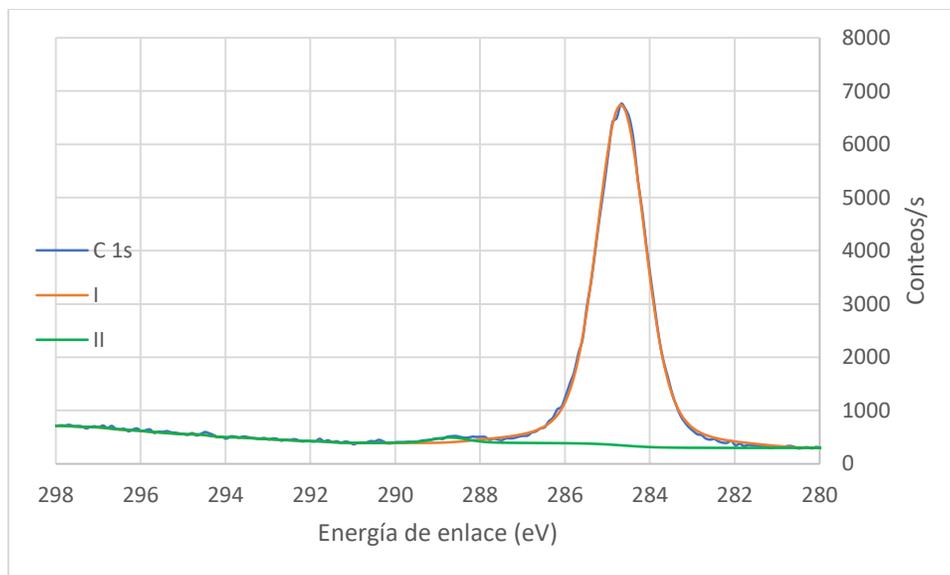


Figura 3.3 – Espectro XPS C 1s de viruta de llanta sin tratamiento químico

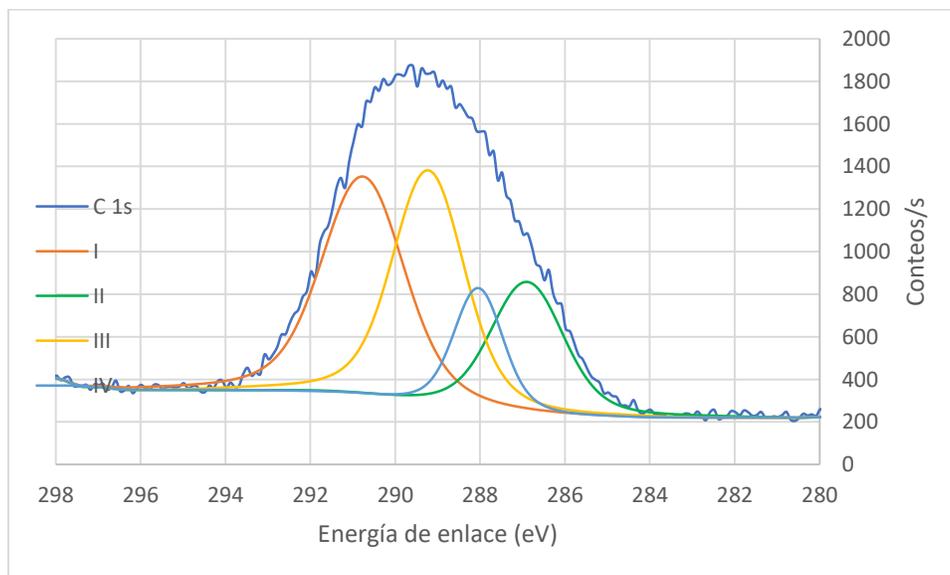


Figura 3.4 – Espectro XPS C 1s de viruta de llanta tratada químicamente

En la figura 3.4 se muestra el espectro XPS del C 1s de la viruta de llanta tratada químicamente por solvólisis, para deconvolucionar este espectro fueron necesarios cuatro picos; el pico I está centrado en 290.76 eV, el pico II en 286.89 eV, el pico III

en 289.22 eV y el pico IV en 288.04 eV. Cada uno de estos picos puede ser asociado con diferentes enlaces químicos del carbono en la muestra, mismos que difieren con las contribuciones necesarias para deconvolucionar el espectro de la viruta previo a la reacción; esto sugiere que existen cambios en la estructura química de la matriz polimérica de la llanta, con lo que se evidencia que la reacción de solvólisis se llevó a cabo.

Lo anteriormente expuesto es congruente con lo mostrado en la figura 3.5, en la cual se observan las imágenes obtenidas en estudios anteriores mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) de la viruta de llanta sin y con tratamiento, donde se puede apreciar que al efectuarse la reacción de solvólisis la morfología de la llanta cambia desde una estructura poco granular hasta una estructura del tipo láminas como consecuencia de las modificaciones estructurales en la matriz polimérica. [10]

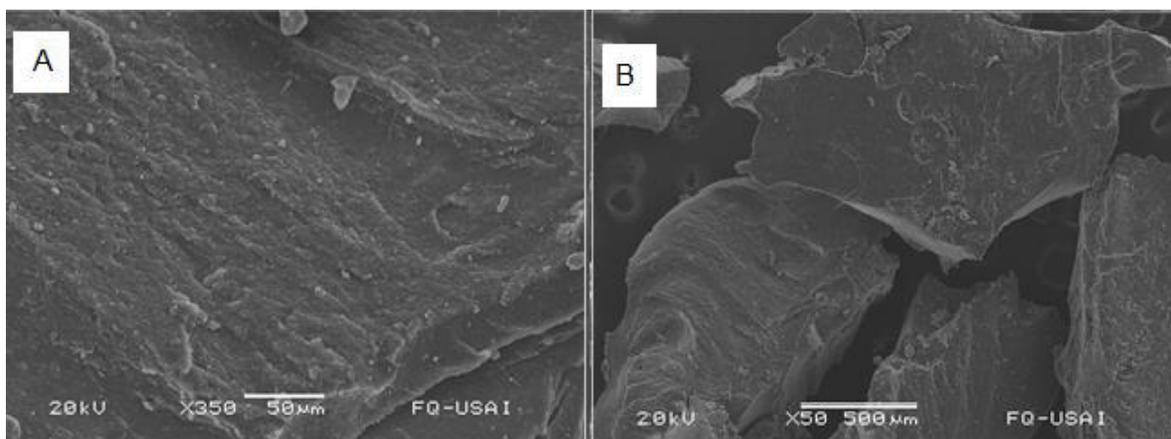


Figura 3.5 Imágenes de microscopía electrónica de barrido (MEB): A) Viruta sin solvolizar y B) Viruta solvolizada

Fuente: Preciado R. Y. (2017). Reciclaje físico-químico de llanta mediante la formación de asfaltos modificados (Tesis de Maestría). Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.

3.2 Elaboración de probetas asfálticas y pruebas de desempeño

3.2.1 Susceptibilidad a la humedad

En las figuras 3.6 y 3.7 se muestran los resultados de las pruebas de susceptibilidad a la humedad de las mezclas evaluadas, en ellas se observa que la resistencia a la tensión indirecta en estado seco aumenta ligeramente con la presencia de la viruta de llanta tratada químicamente. Sin embargo, bajo condiciones de humedad esta tiende a disminuir significativamente a medida que se adiciona la viruta.

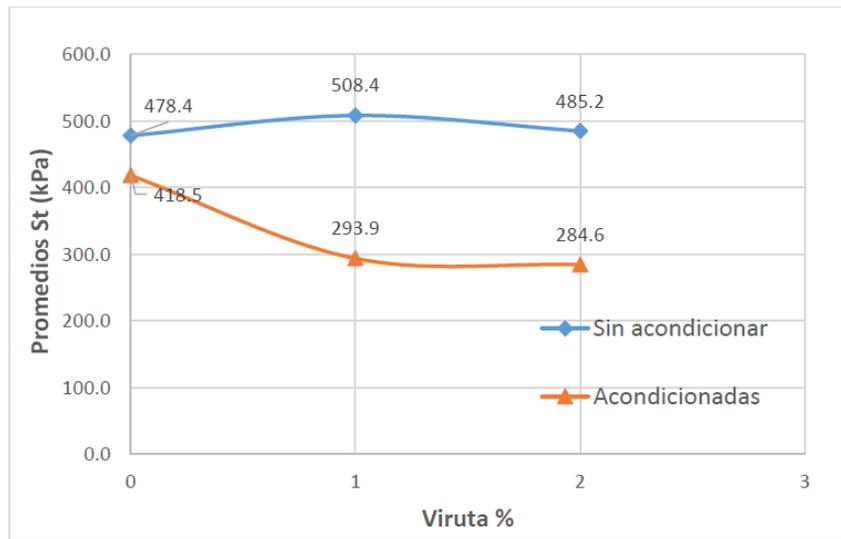


Figura 3.6 – Influencia de la viruta de llanta en la tensión indirecta

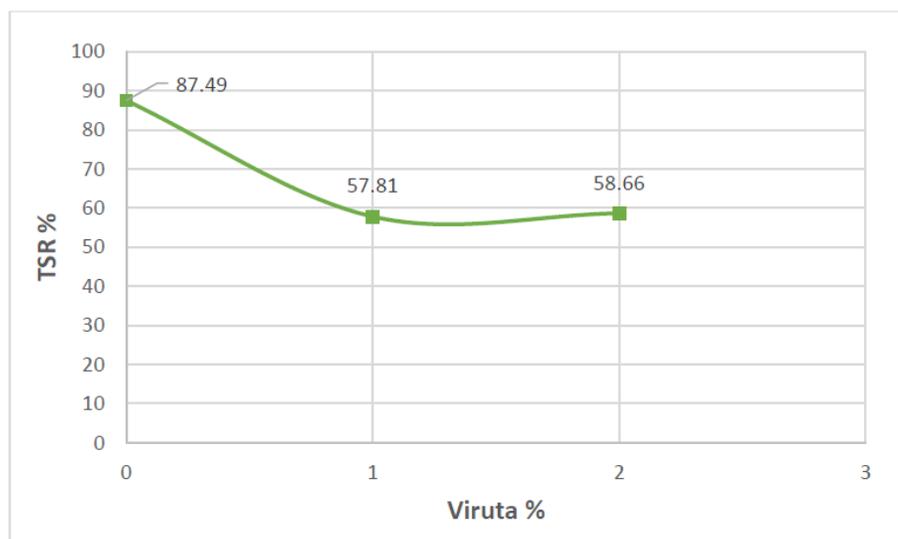


Figura 3.7 – Influencia de la viruta de llanta en la relación TSR

Por otra parte, las relaciones de resistencia TSR disminuyen notablemente con la presencia de la viruta y sólo la mezcla modelo es la que alcanza valores mayores al 80%, cifra definida por la norma como criterio de aceptación de este parámetro; por lo que, en términos de susceptibilidad a la humedad, esta mezcla asfáltica no puede ser empleada en la construcción de carreteras urbanas.

3.2.2 Susceptibilidad a la deformación permanente

En la figura 3.8 se presentan los resultados de las pruebas de susceptibilidad a la deformación permanente de las placas de concreto asfáltico ensayadas. Se observa que el aumento de los vacíos de aire incrementa la resistencia a la deformación permanente de las mezclas, lo cual era de esperarse. Se observa además que en las placas con 4% de vacíos de aire la presencia de viruta de llanta tratada químicamente no influye significativamente en la tendencia a la formación de roderas. Sin embargo, en las placas con 6 a 7% de vacíos de aire la presencia de la viruta produce mayores roderas. Cabe mencionar, que en ninguno de los casos se alcanzan valores de la deformación por rodera mayores a 20 mm, que es la condición de rechazo de la prueba establecida por la norma; por lo que, desde el punto de vista de susceptibilidad a la deformación permanente, esta mezcla podría utilizarse en la construcción de carreteras urbanas.

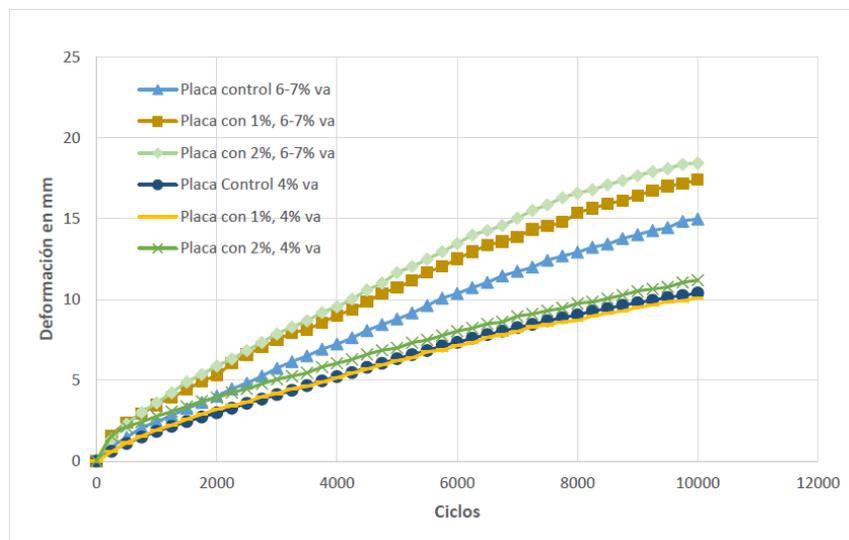


Figura 3.8 – Evaluación de la profundidad de las roderas en las placas ensayadas

CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes obtenidas a lo largo de la presente tesis para la elaboración y pruebas de desempeño de mezclas asfálticas modificadas con desechos de llanta tratados químicamente.

Los resultados muestran que en el tratamiento químico por solvólisis, la viruta de llanta es atacada produciéndose la ruptura de ciertos enlaces de azufre responsables de la estructura entrecruzada de la llanta. La presencia de especies de azufre en el espectro UV-Vis del solvolizato, corrobora que la reacción de solvólisis se llevó a cabo. El estudio de UV – Vis del solvolizato ratifica los resultados obtenidos con anterioridad en el análisis FT-IR de la llanta solvolizada.

Los estudios de XPS del C 1s muestran que la estructura química de la viruta de llanta es modificada en la reacción de solvólisis. La deconvolución en dos picos del espectro de la viruta sin tratamiento químico, y en cuatro picos del espectro de la viruta tratada químicamente, confirma que existen cambios estructurales en la matriz polimérica provocados por la reacción. Los resultados del estudio XPS explican las transformaciones en la morfología de la viruta de llanta observadas en estudios previos mediante la técnica de MEB.

La incorporación de viruta de llanta tratada químicamente en la elaboración de mezclas asfálticas destinadas a la construcción de carreteras urbanas, es viable desde el punto de vista de susceptibilidad a la deformación permanente, pues, aunque no se disminuye la formación de roderas, se cumplen las especificaciones de la norma UNE-EN 12697-22. Desde esta perspectiva, el reciclaje de llanta mediante la formación de asfaltos modificados es una buena alternativa para las llantas de desecho.

Sin embargo, para el caso de susceptibilidad a la humedad, los resultados sugieren que no existe una buena interacción entre el asfalto, la viruta tratada y el agregado mineral de los especímenes húmedos, condición representativa de las capas asfálticas construidas en zonas lluviosas y/o inundables. Por esta razón, se deberán realizar estudios adicionales que permitan identificar los porcentajes adecuados a utilizar de viruta de llanta tratada químicamente en función de las características y

propiedades del asfalto y agregado pétreo empleados en la elaboración de la mezcla.

Trabajo a futuro

Siguiendo con la línea de la propuesta de reciclaje de desechos de llanta mediante la elaboración de mezclas asfálticas modificadas con viruta de llanta tratada químicamente, algunos de los aspectos interesantes que se pueden estudiar a futuro son:

- Realizar un análisis hidrodinámico y de transferencia de calor y masa en el reactor empleado en la reacción de solvólisis de viruta de llanta, a fin de identificar parámetros que influyen en la reacción y que permitan reducir los costos de operación y/o aumentar la productividad.
- Profundizar en el estudio de las interacciones químicas entre los componentes de una mezcla asfáltica modificada con viruta de llanta tratada por solvólisis, con la finalidad de poder asociarlas con su desempeño mecánico.
- Emplear diferentes formulaciones en la elaboración de la mezcla asfáltica, a fin de encontrar las proporciones de viruta de llanta tratada, asfalto y agregado mineral que satisfagan simultáneamente las especificaciones de las normas UNE-EN 12697-22 y AASHTO T283.

REFERENCIAS

- [1] Sánchez J. R. (2012). Segunda vida de los neumáticos usados. *Química viva*, 11 (1). Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/863/86323612003.pdf>.
- [2] Bojórquez C. G. y Romo A. L. (2012). Gestión pública para solucionar un problema ambiental: manejo de llantas de desecho en Ciudad Juárez. *Región y sociedad*, 24 (53). Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252012000100004.
- [3] Bernache P. G. (2015). La gestión de los residuos sólidos: un reto para los gobiernos locales. *Sociedad y ambiente*, 1 (7). Recuperado de: https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/808/1/0000427181_documento.pdf.
- [4] Universidad Nacional Autónoma de México. (2014). Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de Residuos del estado de Guanajuato. Guanajuato. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197030/PEPGIR-Guanajuato_UNAM-PUMA.pdf.
- [5] Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato. Plan de manejo de neumáticos fuera de uso. Recuperado de: <http://ecologia.guanajuato.gob.mx/sitio/manejo-integral-de-residuos/162/Plan-de-Manejo-de-Neum%C3%A1ticos>.
- [6] Bravo F. M. et. Al. (2015). Reutilización de llantas para la elaboración de muebles. *Universidad, Ciencia y Sociedad*, 1 (15). Recuperado de: http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S8888-88882015000200009&script=sci_arttext.
- [7] Cardona G. L. y Sánchez M. L. (2011). *Aprovechamiento de llantas usadas para la fabricación de pisos decorativos*. Especialización en PML. Universidad de Medellín.

- [8] González M. A. (2001). Costos y beneficios ambientales del reciclaje en México. *Gaceta Ecológica*, 1 (58). Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/539/53905802.pdf>.
- [9] Castro G. (2007). Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos. Documento publicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FIUBA), archivado en: http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Reutilizacion_Reciclado_y_Disposicion_final_de_Neumatico.pdf.
- [10] Preciado R. Y. (2017). *Reciclaje físico-químico de llanta mediante la formación de asfaltos modificados* (Tesis de Maestría). Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.
- [11] R.J. England (1970). US Patent 3544622, E.I. DuPont.
- [12] J.T. MacDowell (1965). US Patent 3222299, E.I. Dupont.
- [13] H.S. Ostrowski (1975). US Patent 3884850, Fiber industries.
- [14] A.A. Neujokas and K. Ryan (1991). US Patent 5051528, Eastman Kodak.
- [15] J.W. Mandoki (1986). US Patent 4605762, Celanese, Mexicana.
- [16] M.E. Brennan (1984). US Patent 4444920, Texaco Inc.
- [17] T.F. Corbin et al. (1992). US Patent 5169870, BASF Corp.
- [18] S.K. Shelly et al., *Chemical Engineering Journal*. (1992).
- [19] Múnera J. C. y Ossa E. A. (2014). Estudio de mezclas binarias Asfalto - Polímero. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquía*, 70 (1). Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n70/n70a03.pdf>.
- [20] Mazumder M. et. Al. (2016). Performance properties of polymer modified asphalt binders containing wax additives. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9 (1). Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681416300074>.

- [21] Jiqing Z. et. Al. (2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 54 (1). Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305714000597>.
- [22] Sánchez Cadena L. E. Physical recycling of crumb rubber through the formation of modified asphalt. *Memorias del Congreso Macromex S.P.M.* 2008.
- [23] Skoog, D.A.; Leary J.J., Holler F. James; "Principios de Análisis Instrumental", 5° ed.; Ed. McGraw-Hill (1998), págs. 353-367.
- [24] Ampliación de Química Inorgánica. Parte II: Técnicas estructurales, 5° curso, 2004/2005. Recuperado de: http://webdeptos.uma.es/qicm/Doc_docencia/Tema16_ee.pdf.
- [25] Cáceres M. C. Diseño de mezclas asfálticas. Universidad de las Américas Puebla. Recuperado de: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/caceres_m_ca/capitulo1.pdf (Consulta: Junio 2018).
- [26] Venegas S. J. (2015). *Manual de Diseño de Mezclas Asfálticas en caliente de granulometría densa de alto desempeño con protocolo AMAAC* (Tesis de Licenciatura). Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.
- [27] Garnica A. et. Al. (2005) "Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas," *Publicación No. 267*. Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Queretaro.
- [28] Ossa A. et. Al. (2016). Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 135 (1). Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261630765X>.
- [29] Silverstein, Basler, Morill; "Identification Spectrométrique de Composés Organiques", 5° ed.; Ed. De Boeck (1998). ISBN 2-8041-2463-0.
- [30] Beamson G., Briggs D., High Resolution XPS of Organic Polymers, Wiley and Sons Ltd, London, 1992.