Análisis de las propiedades físicas y eléctricas en compuestos a base de emulsiones asfálticas con elastómeros y partículas conductoras

Marisela de la Flor Chi Cob[1,2], Jorge Bernardo Tuyub Sánchez[1]

Fecha de recepción: 3 de junio de 2015 - Fecha de aprobación: 7 de diciembre de 2015

RESUMEN

En la actualidad existe la necesidad de realizar esfuerzos por construir mejores carreteras. Un objetivo importante a la hora de utilizar materiales asfálticos consiste en diseñar un sistema que permita una fácil aplicación del asfalto, así como obtener una mejor adhesión entre el asfalto y el material pétreo que sirve de substrato para el asfalto. Dadas las condiciones actuales del planeta, donde se presentan problemas energéticos y ambientales, unido al aumento constante de los precios de los productos derivados del petróleo y la materia prima para la construcción de vías, es necesario desarrollar nuevas tecnologías sustentables, es aquí donde se centra éste trabajo, buscando una alternativa para la pavimentación mediante la creación de un material compuesto a base de una emulsión asfáltica mezclada con un material elastómero y material conductor. La presente investigación tiene como objetivo elaborar un material compuesto a base de emulsión asfáltica con elastómeros reciclados de llantas y determinar si sus propiedades físicas cumplen con las normas mexicanas (SCT) y las normas internacionales de la ASHTO y ASTM para superficie de rodamiento. Además se le incluirá a dicho material partículas conductoras, escoria de hierro, con el propósito de analizar la presencia de conductividad eléctrica en el mismo. Se efectúa la elaboración de muestras de diferentes emulsiones asfálticas: sin mezclar con algún material, mezcladas con el elastómero, mezcladas con el elastómero y partículas conductoras.

Palabras clave: Emulsión asfáltica, elastómeros, material conductor, pavimentos, material compuesto.

Analysis of the physical and electrical properties of compounds of asphalt emulsions mixed with elastomeric and conductive particles

ABSTRACT

At present there is a need for efforts to build better roads. An important objective in using asphalt materials is to design a system that allows easy application and get a better adhesion between the asphalt and the stone material that serves as substrate for it. Given the current conditions of the world where energy and environmental problems are presented, together with the constant rise in prices of petroleum products and raw materials for the construction of roads, it is necessary to develop new sustainable technologies, it is here that focuses this work, looking for an alternative to the paving by creating a compound based on an asphalt emulsion mixed with a conductive and elastomer materials. This research aims to develop a compound based on an asphalt emulsion mixed with elastomers from recycled tires and determine if their physical properties observe the Mexican standards (SCT) and international standards (ASTM & ASHTO) for rolling surface materials. In addition this material will be added with conductive materials (iron dross), for the purpose of analyzing the presence of electrical conductivity in it. Preparation of samples of different asphalt emulsions is performed: with no materials, mixture with only the elastomer and mixture with the elastomer and the conductive particles.

Keywords: Asphalt emulsions, elastomers, conductive material, flooring, composite materials.

[1] Laboratorio de geotecnia y vías terrestres, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.

[2] Correo electrónico: marisela.chi@correo.uady.mx

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1° de mayo de 2016. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No.3, 2015, ISSN1665-529-X.

INTRODUCCIÓN

Para poder mejorar las propiedades de los asfaltos se ha intentado modificarlos añadiéndoles algún nuevo material que sirva como ligante y que pueda brindarle estas mejoras en sus propiedades y así adquirir una vida útil mayor en comparación con los asfaltos convencionales. Un objetivo importante a la hora de utilizar materiales asfálticos consiste en diseñar un sistema que permita una fácil aplicación del asfalto, así como obtener una mejor adhesión entre el asfalto y el material pétreo que sirve de substrato para el asfalto**.**

La mayor parte de los ligantes asfálticos que se emplean en la construcción y conservación de carreteras, son productos semi-sólidos y viscosos a las temperaturas ambientes normales. Para tratamientos superficiales, deben ser por lo tanto fluidificados por calentamiento antes de ser aplicados en películas delgadas sobre la superficie de las carreteras; análogamente, en la elaboración de concreto asfáltico tanto el aglutinante como el material pétreo requieren calentarse para que la piedra tenga un buen cubrimiento. Otra desventaja que tienen es que deben ser aplicados solamente a superficies secas.

Las emulsiones asfálticas se definen como aquellos materiales asfálticos líquidos estables, constituidos por dos fases no miscibles, en los que la fase continua de la emulsión está formada por agua y un agente emulsificante, y la fase discontinua por pequeños glóbulos de cemento asfáltico (figura 1) (SCT, Norma: N-CMT-4-05-001/06, 2006).

Las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo de emulgente usado. En este caso podemos hablar de dos tipos, aniónicas y catiónicas: se denominan emulsiones asfálticas aniónicas cuando el agente emulsificante confiere polaridad electronegativa a los glóbulos y emulsiones asfálticas catiónicas, cuando les confiere polaridad electropositiva. Al principio, tales emulsiones se usaron únicamente en la construcción de tratamientos superficiales, como riego de liga y de sello. Al reconocerse la ventaja de las emulsiones catiónicas sobre las aniónicas y los rebajados, se inició la búsqueda de un emulsificante que produjera una emulsión de rompimiento lento, capaz de mezclarse con una granulometría para base o para carpeta.

Hoy en día, existen técnicas que modifican el asfalto con polímeros, las cuales mejoran su rendimiento. Éstas técnicas pueden ser usadas para investigar con la emulsión asfáltica y poder fabricar así una mezcla que cumpla con las exigencias actuales. Uno de los polímeros que se usan frecuentemente en el estudio de mezclas asfálticas es el elastómero llamado caucho o hule. Rodríguez Talavera (2001) indica que el hule o caucho SBR (estireno butadieno) es el tipo de polímero elastómero más comúnmente usado para la modificación de asfalto, mezclado con asfalto hace que éste tenga mejor resistencia. El hule SBR es el material principalmente usado en neumáticos en desuso, aunque algunos plásticos y hules de desperdicio se han usado para modificar asfaltos, pero más bien han servido como cargas, no tanto como generadores de la adecuada morfología requerida para que el compósito tenga un buen desempeño; pero que sin embargo, es posible que en un futuro cercano sea posible usar hule de llanta (ya reticulado) para otorgarle al asfalto buenas propiedades mecánicas; reduciendo considerablemente los costos ya que el hule de llanta es un material de desecho que produce bastante contaminación; obteniendo así además de mejorar significativamente al asfalto, una ganancia ecológica al re-utilizar las llantas ya usadas (Rodríguez Talavera, 2001).

Las propiedades típicas de los compuestos del hule de llanta son: resistencia a cambios bruscos de temperatura, al intemperismo, al envejecimiento, al torque, al ozono, a la luz solar, al desgarre, a la abrasión, a la humedad, al aislamiento térmico otras características que lo confiere, viscosidad constante, es un aislante eléctrico, efecto Joule-Thompson resiliencia, absorción de cargas y esfuerzos, baja permeabilidad.

Hace años la solución era tirar estas llantas a la basura las cuales eran llevadas a los rellenos sanitarios para ser enterradas. Cuando empezó un poco la conciencia ecológica se encontró que las llantas se convierten en un desecho no biodegradable y de larga vida. Por otro lado, las llantas secretan aceites y otros materiales tóxicos que se filtran al subsuelo encontrando salida hacia los mantos acuíferos y por el drenaje, contaminando corrientes de agua y pozos. Por si esto fuera poco un millón de mosquitos se desarrollan en el interior de una llanta que contenga agua estancada. Las ratas y los mosquitos transmiten enfermedades altamente contagiosas y peligrosas como son: rabia, paludismo, hepatitis viral (tipo B), fiebre del dengue, fiebre amarilla, malaria, entre otros.

Para esta propuesta hablamos únicamente de llantas comerciales; es decir, las desechadas por automóviles, camiones y autobuses. El reciclado de llantas consiste en separar y pulverizar el hule, acero y fibras sintéticas que contiene la llanta. De esta forma se desarrolló la idea de la inclusión de materiales elastómeros en la estructura del pavimento en el proceso de mezclado de la emulsión asfáltica con el hule de llanta y material conductor. Éste último sería escoria de hierro, la cual se agrega a ésta mezcla para analizar si es posible la conductividad eléctrica en la mezcla de emulsión

asfáltica – elastómero; además de otorgarle un poco más de estabilidad a la mezcla.

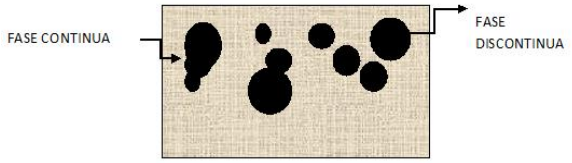


Figura 1.- Diagrama de fases de una emulsión.

El autor (Pérez, 2008) estudió la escoria producida en la planta Siderúrgica de Guatemala (SIDEGUA). Caracterizó tanto la escoria como el agregado tradicional y se evaluaron tres mezclas asfálticas con diferentes combinaciones de escoria-agregado tradicional (100%, 0%), (70%, 30%), (0%, 100%). La mezcla con 100% agregado tradicional se utilizó como parámetro de comparación. De esta manera concluyó que:

- La estabilidad que presentaron las mezclas con escoria fue más alta que en las mezclas con agregado tradicional, contribuyendo a la durabilidad del pavimento, volviéndolo más resistente a la deformación causada por el tráfico.
- Al combinar la escoria con agregados tradicionales se consigue compensar el bajo porcentaje de finos en la misma y disminuir así el porcentaje de asfalto en la mezcla.

Liu et al. (2010) comentan que es teóricamente factible para las grietas en concreto asfáltico mediante la adición de fibras conductoras y sustancias de relleno, mejorar su conductividad y calefacción con energía de inducción para aumentar su tasa de auto-sanación.

El demostrar que la emulsión es capaz de conducir electricidad, puede dar pie a realizar una emulsión con la que sea posible detectar fallas estructurales en el pavimento, creando de esta manera una emulsión inteligente, teniendo la posibilidad de monitorear in situ y en tiempo real la iniciación, propagación y posible fractura de una superficie asfáltica a través del cambio de conductividad eléctrica con propiedades que mejore la calidad de los pavimentos, teniendo así una opción alterna a reparar un pavimento con asfalto.

METODOLOGÍA

El elastómero que se usó para realizar el material compuesto se molió antes de ser incorporados a la emulsión asfáltica. A fin de obtener el tamaño óptimo de modificación de los polímeros utilizados, se emplearon métodos como el esmerilado y la trituración industrial para la llanta. El tamaño de las hojuelas que se usó serán aquellas que pasen por el tamiz No. 10 y se retengan en el tamiz No. 40, según normas mexicanas(SCT, Norma: N-CMT-4-05-002/06, 2006). Como material conductor se utilizó limadura de hierro, la cual se obtiene reciclada de talleres de herrería.

Se observó que la limadura de hierro en su mayoría posee partículas finas, lo que nos podría ayudar para homogeneizar nuestras muestras de emulsión modificada ya que, como se mencionó anteriormente, se usó solamente material elastómero que se retengan en la malla número 20 y 40. Cabe señalar que para las partículas conductoras no existe una especificación con respecto a su tamaño y porcentaje. En éste trabajo se proponen las proporciones a criterio del autor.
De acuerdo a la tabla 1se usó como contenido mínimo de hule en el asfalto en masa el 17% por lo que se procedió a la realización de las muestras. Además de utilizar las emulsiones sin alterar sus componentes, se elaboraron muestras de emulsiones con diferentes proporciones de elastómero (0, 17, 18, 19 y 20%) y de material conductor (0%, 5% y 10%); realizando con ellos combinaciones para cada tipo de emulsión que se utilizaron para las diferentes pruebas (véase figura 2). Se estandarizaron las condiciones experimentales que producen el material compuesto de mejor desempeño, de acuerdo con la compatibilidad y la estabilidad asfalto-polímero, así como con sus características morfológicas y su variación de la viscosidad respecto a la temperatura.

Tabla 1. Contenido mínimo de hule en el asfalto. Imagen capturada de la normativa de la SCT (SCT, Norma: N-CMT-4-05-002/06, 2006).

Malla		Tamaño nominal		
Abertura mm	Designación	H 20 % que pasa	H 40 % que pasa	H 80 % que pasa
2	N°10	100	---	---
1,18	N°16	75 – 100	---	---
0,85	N°20	59 – 90	100	---
0,6	N°30	25 – 60	75 – 100	100
0,425	N°40	10 – 40	55 – 90	80 – 100
0,3	N°50	0 – 20	25 – 60	60 – 100
0,15	N°100	0 – 10	0 – 30	4 – 70
0,075	N°200	0 – 5	0 – 10	0 – 20
Contenido mínimo de hule en el asfalto en masa; %		17	15	12

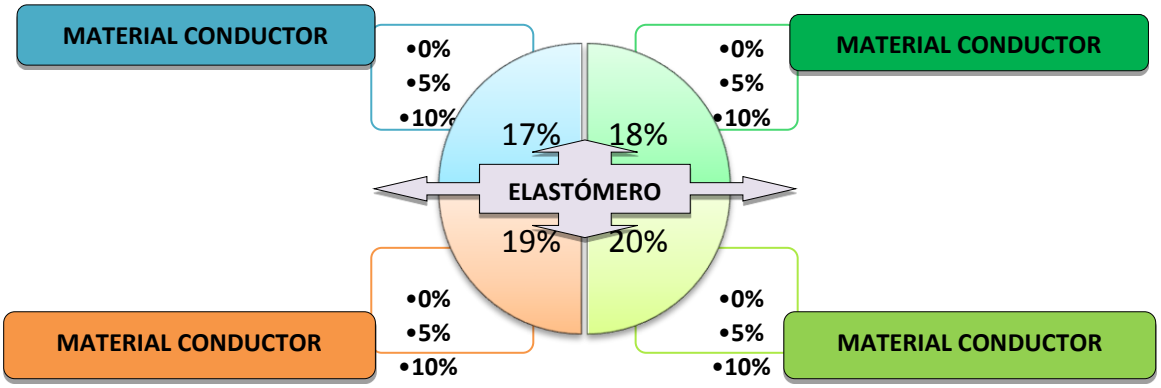


Figura 2. Proporciones de material elastómero y conductor para las diferentes muestras de emulsión modificadas.

Siguiendo las normas mexicanas (SCT, Norma: N-CMT-4-05-002/06, 2006) para asfaltos modificados con polímeros, el material compuesto debe cumplir con las características establecidas en la tabla 2.

Contenido de Cemento Asfáltico en masa. Esta prueba consiste esencialmente en efectuar la destilación de una muestra de emulsión asfáltica, hasta una temperatura máxima de 260°C, para separarla en residuo asfáltico, agua y disolventes(SCT, Norma: M-MMP-4-05-012/00, 2000).Con el residuo asfáltico obtenido se realizó pruebas de penetración y de recuperación elástica, las cuales se explicarán más adelante.

El residuo asfáltico de la destilación se calcula con la ayuda de la ecuación 1.

$$R = \frac{200-(W_i-W_f)}{200} \times 100 \qquad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

R= Contenido de residuo asfáltico por destilación, respecto a la masa inicial de la muestra de prueba, (%).

W_i= Masa del alambique y sus accesorios más la masa inicial de la muestra de prueba, (g).

W_f= Masa del alambique y sus accesorios calientes, más la corrección por temperatura, (g).

Viscosidad Saybolt-Furol

Esta prueba permite conocer la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura de 50°C para las emulsiones, con el propósito de estudiar la susceptibilidad al calor de los materiales asfálticos y determinar las viscosidades apropiadas para su utilización (SCT, Norma: M-MMP-4-05-004/00, 2000).

La prueba consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 60cm^3 del material a probar a través de un orificio Furol, instalado en un tubo de viscosidad Saybolt, bajo condiciones de carga y temperatura prestablecidas.

Tabla 2. Requisitos de Calidad para emulsiones asfálticas modificadas. Imagen obtenida de la normativa de la SCT (SCT, Norma: N-CMT-4-05-002/06, 2006)

Características	Valor
De la emulsión:	
Contenido de cemento asfáltico en masa; %, mínimo	60
Viscosidad Saybolt - Furol a 50°C; s	50-200
Asentamiento en 5 días; diferencia en %, máximo	3
Retenido de peso en malla N°20 en la prueba del tamiz; %, máximo	0,1
Carga eléctrica de las partículas	(+)
Disolvente en volumen; %, máximo	3
Demulsibilidad; %, mínimo	60
Índice de ruptura; %	80-140
Del residuo de la destilación:	
Penetración [1] a 25°C, en 100 g y 5 s; 10^{-1} mm	100-200
Recuperación elástica en ductilómetro a 25°C, 20 cm, 5 min; %, mínimo	40

Demulsibilidad

Esta prueba permite estimar la facilidad con que rompen las emulsiones asfálticas, con el propósito de determinar en el tiempo disponible para incorporar la emulsión durante la elaboración de las mezclas asfálticas. El procedimiento consiste en determinar el porcentaje de material asfáltico de la emulsión diluida con una solución de dioctilsulfosuccinato de sodio que se retiene en una malla de 1,4 mm de abertura, respecto al residuo asfáltico de la emulsión(SCT, Norma: M-MMP-4-05-018/07, 2007).

Se reporta la demulsibilidad en por ciento respecto a la masa del residuo asfáltico por destilación, de 100g de emulsión, calculada con la ecuación 2.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{3}(W_{fi} - W_{ti})}{3R} \times 100 \qquad \text{Ecuación 2.}$$

Dónde:

D= Demulsibilidad de la emulsión asfáltica (%).

$\mathbf{W_{fi}}$= Masa del vaso, accesorios y material asfáltico de cada conjunto (g).

$\mathbf{W_{ti}}$= Masa del vaso y accesorios de cada conjunto (g).

R= residuo asfáltico por destilación (%).

Índice de Ruptura

Esta prueba permite determinar la cantidad de material finosílico, necesario para hacer romper 100 g de emulsión asfáltica catiónica (SCT, Norma: M-MMP-4-05-019/02, 2002).

El material debe cumplir con la granulometría establecida en la normativa para esta prueba mostrada en la tabla 4.

Tabla 1. Características granulométricas para el material fino sílico (SCT, Norma: M-MMP-4-05-019/02, 2002).

Abertura de la malla mm	Retenido parcial %
0,1	1 - 5
0,08	5 - 10
0,063	15 - 25
0,05	10 - 20
0,04	25 - 35

Se determina la masa de la emulsión asfáltica añadida utilizando la ecuación 3.

$$E = m_2 - m_1 \qquad \text{Ecuación 3.}$$

Dónde:

E = Masa de la emulsión asfáltica (g).

$\boldsymbol{m_1}$= Masa del plato esmaltado y la espátula (g).

$\boldsymbol{m_2}$ = Masa del plato esmaltado, la espátula y la emulsión (g).

Se determina la masa del material fino sílico añadido utilizando la ecuación 4.

$$P = m_3 - m_2 \qquad \text{Ecuación 4.}$$

Dónde:

P = Masa del material fino sílico (g).

$\boldsymbol{m_2}$ = Masa del plato esmaltado, la espátula y la emulsión (g).

$\boldsymbol{m_3}$ = Masa del plato esmaltado, la espátula, la emulsión y el material fino sílico (g).

Se calcula el índice de ruptura utilizado la ecuación 5.

$$i = \left(\frac{P}{E}\right) \times 100 \qquad \text{Ecuación 5.}$$

Dónde:

i es el índice de ruptura de la muestra de emulsión asfáltica (%).

Penetración a 25°C. Esta prueba permite determinar la consistencia de los residuos por destilación de las emulsiones asfálticas, mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra de prueba de dicho material bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura(SCT, Norma: M-MMP-4-05-006/00, 2000). Se reporta como resultado de la prueba el promedio de las profundidades a las que haya entrado la aguja.

Recuperación Elástica en ductilómetro. Esta prueba permite determinar la recuperación elástica de los residuos asfálticos obtenidos por destilación de emulsiones. La prueba consiste en mantener una muestra de prueba estirada en un ductilómetro durante un tiempo determinado, después de la cual se corta a la mitad, se deja reposar y finalmente se observa cuánto se recupera de la deformación(SCT, Norma: M-MMP-4-05-026/02, 2002).

Se reporta como recuperación elástica el porcentaje de deformación recuperado respecto a la deformación total, de acuerdo a la ecuación 6.

$$R = \frac{20 - x}{20} \times 100 \qquad \text{Ecuación 6.}$$

Dónde:

R= Recuperación elástica en ductilómetro, (%)

X= Lectura del desplazamiento de la mordaza al unir los extremos cortados del espécimen, (cm).

Análisis de Resistencia Eléctrica. Esta prueba tiene por objetivo determinar si en una probeta conteniendo una muestra modificada con elastómero y un material conductor se produce un cambio en la resistencia eléctrica y su resistividad. Ésta prueba no se encuentra dentro de la normativa mexicana de y su realización es simplemente de observación, ya que no se espera un resultado cuantitativo en específico.

Esta prueba consiste en medir con la ayuda de un multímetro digital la resistencia de ciertas probetas

seleccionadas para obtener la resistividad de cada una de ellas mediante la segunda ley de Ohm.

$$\rho = \frac{RS}{L}$$ Ecuación 7.

Dónde:

R es el valor de la resistencia eléctrica calculada en Ohmios (Ω).

ρ (rho) es la resistividad eléctrica, obtenida en Ohmios-metro (Ω*m).

S es el área de la sección transversal del material en m^2

L la longitud de la material en m.

Las probetas contienen la emulsión, como se muestra en la figura 3, junto con su porcentaje elastómero-material conductor, que mejor responda a las pruebas mencionadas anteriormente. Se seleccionarán las que tengan dimensiones similares para una mejor comparación; se cubrirá con pintura de plata la sección transversal de éstas por dónde se colocarán los electrodos con los que se medirá, con la ayuda de un multímetro digital, su resistencia.

RESULTADOS

Prueba de Contenido de cemento asfáltico en masa. Para esta prueba se tomaron únicamente las muestras de emulsión sin modificar, esto debido a que lo que se pretende es saber si las emulsiones cumplen con el porcentaje de cemento asfáltico indicado en su nomenclatura. El realizar los cálculos con las muestras con emulsiones modificadas nos arrojaría datos alterados, esto debido al material elastómero y conductor presente; sin embargo, se realizaron las pruebas de destilación en ellos para obtener el residuo que se utilizó para las pruebas de demulsibilidad y penetración.

Para éstas muestras con emulsiones sin modificar podemos observar en la figura 4 que el porcentaje de residuo obtenido es aproximadamente el valor del porcentaje de material asfáltico que se indica de acuerdo a sus respectivas descripciones. Sin embargo, la emulsión ECR-60 está ligeramente por debajo de su porcentaje, esto se debe a que al solicitar las muestras se otorgó el sobrante que se encontraba en el tanque de almacenamiento, ya que dicha emulsión se encontraba escasa.

Figura 3. Una de las probetas utilizadas para la prueba de análisis de resistencia eléctrica.

Viscocidad Saybolt-Furol. En la figura 5 se observa que para la prueba de viscosidad la emulsión ECR-60 es la que mejor ha respondido comparado con las otras emulsiones, ya que no ha presentado ninguna anomalía fuera de lo estipulado en la misma. Se percibe únicamente que tanto dicha emulsión sin modificar, como con la modificada con los menores porcentajes de elastómero y material conductor no llegan al rango mínimo que estipula la norma, esto ya que la emulsión se presenta muy líquida sin tanta viscosidad.

Así como sucede con la Emulsión anterior, la ECR-65 presenta un incremento en el tiempo conforme se aumenta el porcentaje de elastómero; sin embargo, al agregarle el material conductor observamos que la cantidad saliente no sobrepasa los 15 ml de los 60 ml que deberían salir para la prueba. Lo anterior puede deberse a que la cantidad de emulsión utilizada disminuya considerablemente al agregarle el porcentaje correspondiente del material extra, haciendo que la muestra resulte más densa; esto se puede observar al momento de pasar la muestra por la malla número 20, ya que se observa que más de la mitad del material se queda retenida en ella.

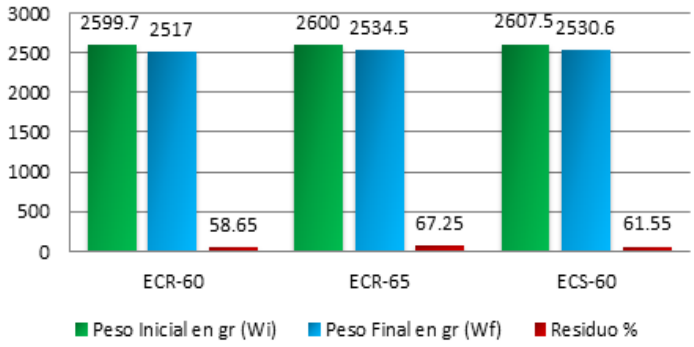


Figura 4. Resultados de la prueba de destilación para emulsiones sin modificar.

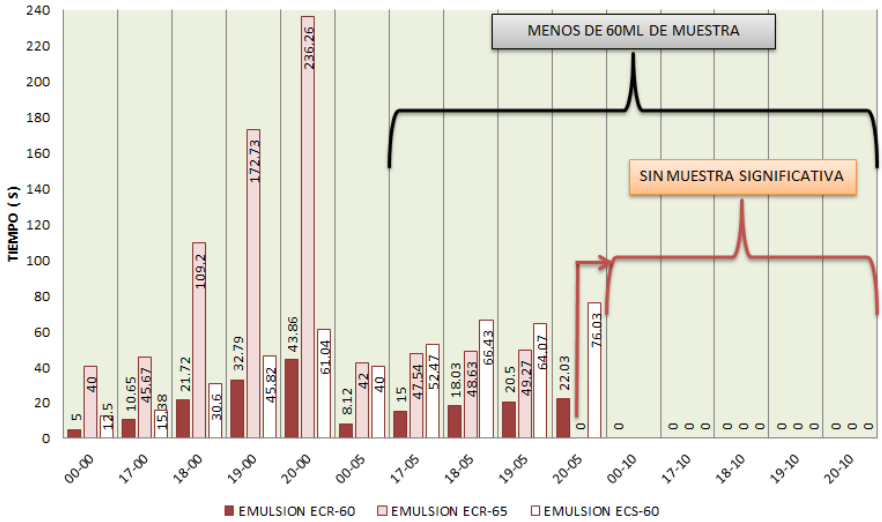


Figura 5. Resultados de la prueba de Viscosidad.

Este comportamiento sucede también con la emulsión ECS-60, es más notable conforme se aumentan los porcentajes tanto de elastómero como material conductor a tal grado que en las últimas pruebas no se obtenía resultado alguno ya que la cantidad de emulsión que pasaba la malla número 20 era casi insignificante. En la figura 6 se muestra un ejemplo de lo que sucede con el residuo retenido en la malla.

Figura 6. Residuo de la muestra modificada.

Demulsibilidad. En la figura 7 se muestra que las emulsiones poseen un valor congruente a su valor obtenido en las pruebas de destilación, todas ellas, a excepción de la ECR-60, cumplen con la normativa al tener un valor mayor a 60%; sin embargo, es un valor muy aproximado al mínimo, lo que hace que lo tomemos como aceptable.

El mínimo de error de la muestra de emulsión ECR-60 puede deberse al manejo y tiempo en el que ha estado reposando la emulsión, e incluso el cambio de clima que se ha presenciado durante las pruebas. Para las emulsiones modificadas no se realizaron pruebas de demulsibilidad, ya que éstas necesitan que utilicemos el valor del porcentaje de residuo asfáltico obtenido en la prueba de destilación; sin embargo, debido a que los materiales elastómero y conductor alteraban éste dato, se es imposible trabajar con él.

Los resultados que nos arroja la figura 8 para emulsiones y según norma (SCT, Norma: N-CMT-4-05-002/06, 2006), la emulsión súper estable (ECS-60) fue la única que permaneció dentro de los rangos de valores establecidos.

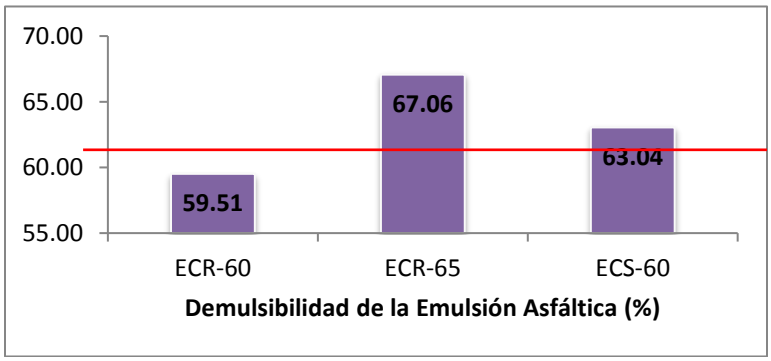
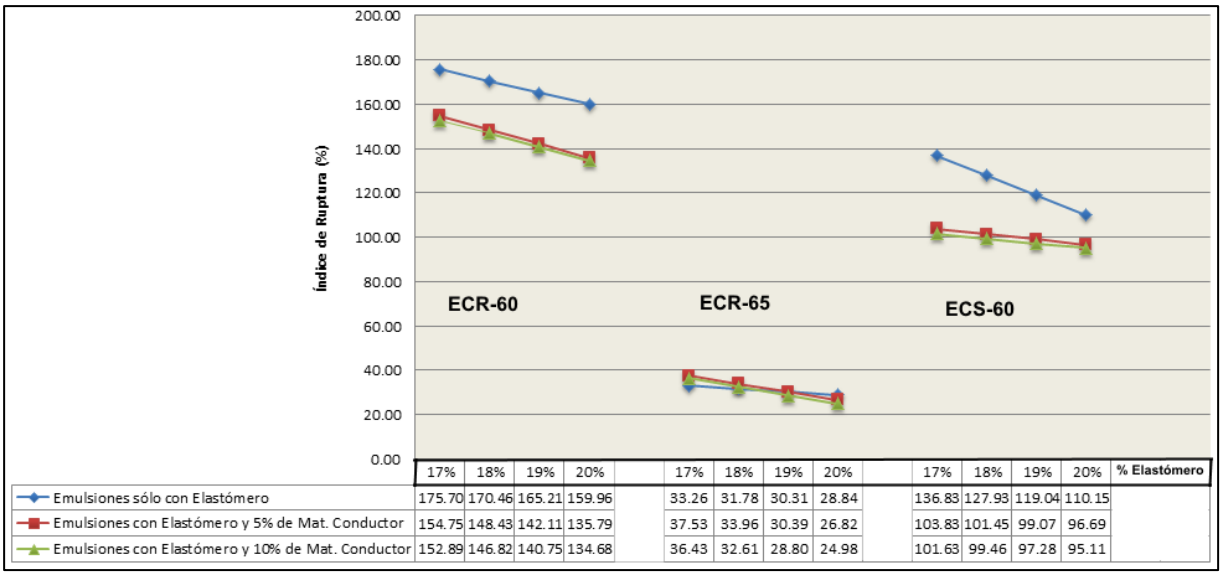
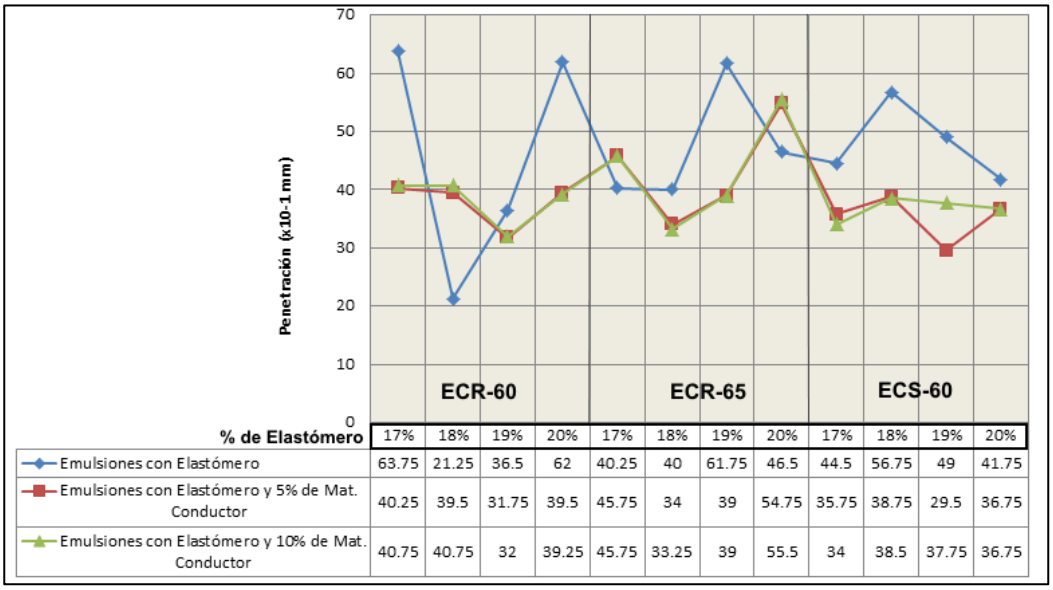


Figura 7. Resultados de la prueba de demulsibilidad para las emulsiones sin modificar.



	17%	18%	19%	20%	17%	18%	19%	20%	17%	18%	19%	20%	% Elastómero
Emulsiones sólo con Elastómero	175.70	170.46	165.21	159.96	33.26	31.78	30.31	28.84	136.83	127.93	119.04	110.15	
Emulsiones con Elastómero y 5% de Mat. Conductor	154.75	148.43	142.11	135.79	37.53	33.96	30.39	26.82	103.83	101.45	99.07	96.69	
Emulsiones con Elastómero y 10% de Mat. Conductor	152.89	146.82	140.75	134.68	36.43	32.61	28.80	24.98	101.63	99.46	97.28	95.11	

Figura 8. Resultados de la prueba de índice de ruptura



% de Elastómero	17%	18%	19%	20%	17%	18%	19%	20%	17%	18%	19%	20%
Emulsiones con Elastómero	63.75	21.25	36.5	62	40.25	40	61.75	46.5	44.5	56.75	49	41.75
Emulsiones con Elastómero y 5% de Mat. Conductor	40.25	39.5	31.75	39.5	45.75	34	39	54.75	35.75	38.75	29.5	36.75
Emulsiones con Elastómero y 10% de Mat. Conductor	40.75	40.75	32	39.25	45.75	33.25	39	55.5	34	38.5	37.75	36.75

Figura 9. Resultados de las pruebas de penetración para emulsiones modificadas.

Se observa en la figura 9 que las emulsiones modificadas tienen un valor mucho menor en su penetración comparado con las emulsiones sin modificar, lo que nos indica que los materiales elastómeros y conductores hacen que la estructura del material sea más resistente. En la figura se observa que la emulsión ECR-60 es la que presenta los mayores valores en todos los porcentajes de elastómero, pero que va disminuyendo dichos valores conforme el porcentaje de elastómero es mayor. Por el contrario, la emulsión ECR-65 su valor de penetración va en aumento conforme el porcentaje de elastómero se vuelve mayor, pasando de tener el valor más bajo al agregar 17% de elastómero, a tener un valor mayor que la emulsión ECS-60 con los demás porcentajes de elastómero.

Recuperación elástica en ductilómetro. Los resultados obtenidos para las muestras de emulsión sin modificar nos arrojan resultados esperados. El valor de la recuperación elástica es muy aproximado al valor de las fichas de especificación de las emulsiones (40% de recuperación elástica), solo ligeramente inferiores pero aceptables (véase figura10).

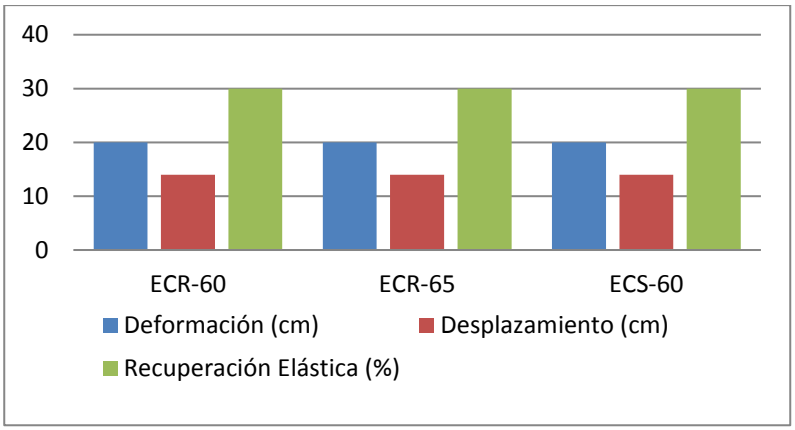


Figura10. Resultados de las pruebas de ductilidad en emulsiones sin modificar.

En comparación con los resultados anteriores, las pruebas de ductilidad con emulsiones modificadas no fue lo esperado, ya que las muestras se rompían antes de llegar a la distancia de 20 centímetros requeridos por norma para realizar los cálculos correspondientes de la recuperación elástica. El agregarle el material elastómero, sin importar el porcentaje agregado de éste, altera considerablemente las propiedades dúctiles de las emulsiones (figura 11).

Análisis de Resistencia Eléctrica. La emulsión seleccionada para ésta prueba es la ECR-60, ya que según los resultados de las pruebas realizadas en éste trabajo dicha emulsión es la que mejor reacciona de entre las tres propuestas. Se realizan así tres muestras con porcentaje de partículas conductoras de 0, 5 y 10%, todas ellas con porcentajes de elastómero de 17%, esto es ya que es el porcentaje de dicho material es el más óptimo. Se realiza la prueba con tres probetas, una de cada muestra, las cuales serán aproximadamente semejantes en dimensiones.

a) **b)**

Figura11. Comparación de pruebas de ductilidad en emulsiones sin modificar y modificadas (a y b respectivamente).

Tabla 5. Valores obtenidos de la resistencia eléctrica de cada probeta y resultado de la resistividad de cada una de ellas.

Muestra (Elastómero-M. Conductor)	Resistencia "R" (Ohm)	Área de superficie de contacto "S" (cm^2)	Longitud de Muestra "L" (cm)	Resistividad (Ohm*cm)	Resistividad (Ohm*m)
a) 17%-00%	$3.90x10^8$	0.899268	1.76	199269614	1992696.14
b) 17%-05%	$4x10^6$	1.00688	1.574	2558780.18	25587.8
c) 17%-10%	$3.14x10^6$	1.055161	1.832	1808518.31	18085.18

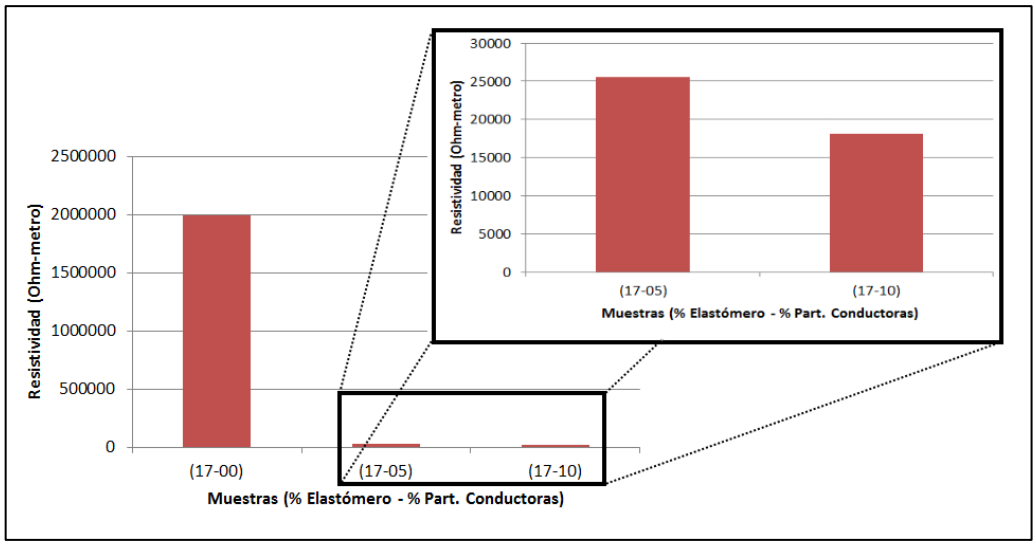


Figura 12. Resultados de la Resistividad de las tres probetas.

Se puede observar en la tabla 5 que la probeta que no contiene partículas conductoras presenta una mayor resistencia eléctrica comparada con las que sí contienen dichas partículas; esto se debe a que la escoria de hierro mejora el paso de la corriente eléctrica. Además entre éstas probetas se ve una disminución de su resistencia conforme se aumenta el porcentaje de partículas conductoras, lo que nos indica que hay un mejor paso de corriente al aumentar el porcentaje de dicho material. Éste mismo comportamiento ocurre con la resistividad obtenida (figura 12), ya que, al igual que la resistencia eléctrica, existe una disminución en su valor conforme el porcentaje de partículas conductoras va aumentando. Tanto en la tabla 5, como en la figura 12 observamos que los valores de resistencia y resistividad son elevados, esto se debe a que las partículas conductoras, las cuales son escoria de hierro, no tiene una buena resistividad en comparación a otros conductores como la plata, además de que con el paso del tiempo, éste material tiende a oxidarse, disminuyendo aún más, su resistividad.

CONCLUSIONES

De las pruebas realizadas se comprueba que las emulsiones ECR-65 (modificada y sin modificar), no cumple con la gran mayoría de las normas de calidad estipuladas por la SCT para emulsiones modificadas; esto debido al espesor de dicho material por su contenido de cemento asfáltico mucho mayor que el de las demás emulsiones, con lo que se corrobora que las pruebas no son recomendables para dicho tipo de emulsión. Por otro lado, las emulsiones ECR-60 y ECS-60 sin modificar cumplen con dicha normativa de las pruebas; pero las muestras modificadas de estas mismas emulsiones alguna de ellas no cumplen, debido a que el agregarle y mezclar el material elastómero, con o sin el material conductor, ocasionamos el rompimiento rápido de dichas emulsiones además se observa un incremento en las viscosidad de las muestras ocasionado por el aumento de partículas sólidas de los materiales elastómero y conductor; lo que hace que no se pueda seguir correctamente la normativa.

También se concluye que aumentamos la resistencia a penetración de estas emulsiones al agregarle el material elastómero y la escoria de hierro, pero a cambio de esto pierden ductilidad. Esto podría afectarnos en zonas donde la temperatura desciende considerablemente en diversas épocas del año; sin embargo, en la península de Yucatán la temperatura mínima no afecta debido a nuestro clima subtropical. Por lo que esta mezcla puede ser usada para pavimentar calles rurales o aquellas que no presenten un elevado tránsito.

Se sugiere que en un futuro al realizar estos tipos de emulsiones modificadas, el material elastómero se agregue separado de la emulsión y junto al agregado pétreo, para evitar así el rompimiento temprano de dicha emulsión por el tipo de material a agregar. No así el del material conductor que se observa una buena adherencia entre la emulsión y el material.

Éstas emulsiones modificadas con elastómero y partículas conductoras tienden a modificar la resistencia eléctrica y su resistividad conforme se le agrega más de éste último material; por lo que es posible la circulación de una señal de energía eléctrica en ellas, dando pie a la posibilidad de la realización de un pavimento inteligente para futuras investigaciones.

La realización de estas pruebas nos ha hecho ver que el utilizar hule de llanta para modificar las emulsiones puede cambiar ciertas propiedades del mismo, y que su costo al agregar los materiales es mínimo, con lo que finalmente se puede decir que pudimos concluir con nuestro objetivo de encontrar un destino final ecológico a las llantas de desecho, eliminando éstas y mejorando el pavimento con un método económico.

BIBLIOGRAFÍA

Liu, Q., Schlangen, E., García, Á., & van de Ven, M. (2010). Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete. Construction and Building Materials, 24(7), 1207-1213.

Liu, X., Wu, S., Ye, Q., Qiu, J., & Li, B. (2008). Properties evaluation of asphalt-based composites with graphite and mine powders. *Construction and Building Materials 22* , 121-126.

Pérez, E. (2008). Evaluación de la escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Rodríguez Talavera, R. C. (2001). *Emulsiones Asfálticas (Documento Técnico No. 23).* Sanfandila, Querétaro: Secretaría de Comunicaciones y Transportes: Instituto Mexicano del Transporte.

M-MMP-4-05-004/00. (2000). *Viscosidad Saybolt-Furol en Materiales Asfálticos*. Norma SCT. México.

M-MMP-4-05-006/00. (2000). *Penetración en Cementos y Residuos Asfálticos*. Norma SCT. México.

M-MMP-4-05-012/00. (2000). *Destilación de Emulsiones Asfálticas*. Norma SCT. México.

M-MMP-4-05-013/02. (2002). *Asentamiento de Emulsiones Asfálticas*. Norma SCT. México.

M-MMP-4-05-014/02. (2002). *Retenido en las Mallas N°20 y N°60 en Emulsiones Asfálticas*. Norma SCT. México.

M-MMP-4-05-017/00. (2000). Norma: *Carga Eléctrica de las Partículas de Emulsiones Asfálticas*. Norma SCT. México.

M-MMP-4-05-018/07. (2007). *Demulsibilidad de Emulsiones Asfálticas*. Norma SCT. México.

M-MMP-4-05-019/02. (2002). *Índice de Rupturade Emulsiones Asfálticas Catiónicas*. Norma SCT. México.

M-MMP-4-05-026/02. (2002). *Recuperación Elástica en Ductilómetro* . 9, Norma SCT. México.

N-CMT-4-05-001/06. (2006). *Calidad de Materiales Asfálticos* . Norma SCT. México.

N-CMT-4-05-002/06. (2006). *Calidad de los Materiales Asfálticos Modificados* . Norma SCT. México.

Este documento debe citarse como: Chi Cob M. F., Tuyub Sánchez J. B. (2015). Análisis de las propiedades físicas y eléctricas en compuestos a base de emulsiones asfálticas con elastómeros y partículas conductoras. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 19-3, pp. 157-167, ISSN 1665-529-X.