

Ing. Israel González  
Fernández

“Emulsiones asfálticas funcionalizadas, la nueva alternativa para  
proyectos de pavimentación de baja inversión”.

2019



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

“Emulsiones asfálticas funcionalizadas, la nueva alternativa para proyectos de  
pavimentación de baja inversión”.

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en:

Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Ing. Israel González Fernández

Dirigido por:

Dr. José Antonio Romero Navarrete



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

“Emulsiones asfálticas funcionalizadas, la nueva alternativa para proyectos de pavimentación de baja inversión”.

Opción de titulación:  
Tesis

Que como parte para obtener el Grado de  
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad.

Presenta  
Ing. Israel González Fernández

Dirigido por:  
Dr. José Antonio Romero Navarrete

Dr. José Antonio Romero Navarrete  
Presidente

Dr. Jorge Alarcón Ibarra  
Secretario

Dra. María de la Luz Pérez Rea  
Vocal

M.I. Rey Omar Adame Hernández  
Suplente

Dr. Omar Chávez Alegría  
Suplente



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

“Emulsiones asfálticas funcionalizadas, la nueva alternativa para proyectos de pavimentación de baja inversión”.

Opción de titulación  
**Tesis o Publicación de artículos**

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

**Presenta:**  
Israel González Fernández

Dirigido por:  
Dr. José Antonio Romero Navarrete

Dr. José Antonio Romero Navarrete  
Presidente

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. Jorge Alarcón Ibarra  
Secretario

\_\_\_\_\_

Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea  
Vocal

\_\_\_\_\_

Firma

M.I. Rey Omar Adame Hernández  
Suplente

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. Omar Chávez Alegría  
Suplente

\_\_\_\_\_

Firma

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Noviembre 2019

## RESUMEN

Las mezclas asfálticas en frío son la manera menos contaminante de aplicar asfalto en pavimentos, derivado de los ahorros energéticos y la reducción de agentes contaminantes. El término funcionalizado en este trabajo de investigación se refiere a obtener largos periodos de almacenamiento, mejorar la trabajabilidad, además de tener un comportamiento adecuado bajo los factores que afectan al asfalto una vez puesto en servicio, principalmente la susceptibilidad térmica, el envejecimiento y la susceptibilidad a la humedad. En esta tesis se presenta una comparativa del comportamiento de una emulsión funcionalizada con una emulsión superestable, esto a través del Método Universal de Clasificación de Ligantes UCL®, en el cual se obtuvo un mejor desempeño de las emulsiones funcionalizadas, disminuyendo las pérdidas al Cántabro por envejecimiento desde un 23% en envejecimiento temprano y hasta en un 10% en envejecimiento a largo plazo, y teniendo una mejora aún mayor en el comportamiento ante la susceptibilidad a la humedad, disminuyendo las pérdidas al Cántabro en una exposición a la humedad temprana en un 46% y en una exposición más prolongada hasta en un 23%.

Después de la experimentación y análisis, este estudio concluye que las emulsiones funcionalizadas, son una alternativa sustentable y económica para la construcción de pavimentos para intensidades de tránsito medias y bajas, permitiendo una producción de mezcla sencilla, con bajos presupuestos, personal poco capacitado y maquinaria sencilla. Lo anterior dando como resultado una mezcla asfáltica en frío con comportamiento adecuado, mejorando respecto a emulsiones asfálticas convencionales la adhesión del aglutinante con los agregados pétreos, en condiciones de envejecimiento, susceptibilidad térmica y por los efectos del agua.

**(Palabras clave:** mezclas asfálticas en frío, emulsiones asfálticas funcionalizadas, susceptibilidad térmica, envejecimiento, susceptibilidad a la humedad)

## SUMMARY

Cold asphalt mixtures are the least polluting way to apply asphalt on pavements, derived from energy savings and the reduction of pollutants. The functionalized term used in this research refers to obtaining long storage periods, improving workability, in addition to having an adequate behavior under the factors that affect the asphalt once put into service, mainly thermal susceptibility, aging and susceptibility to moisture. This thesis presents a comparison of the behavior of a functionalized emulsion with a superstable emulsion through the Universal UCL® Classification of Binder Method, in which a better performance of functionalized emulsions was obtained, reducing losses to the Cantabrian by aging from 23% in early aging and up to 10% in long-term aging, and having an even greater improvement in behavior facing susceptibility to moisture, reducing losses to the Cantabrian in an exposure to early humidity in a 46% and in a longer exposure up to 23%.

After experimentation and analysis, this research concludes that functionalized emulsions are a sustainable and economical alternative for the construction of pavements for medium and low traffic intensities, allowing a simple mix production, with low budgets, poorly trained personnel and simple machinery. All the above resulting in a cold asphalt mixture with adequate behavior, improving the adhesion of the binder with stone aggregates comparing to conventional asphalt emulsions, under aging conditions, thermal susceptibility and water effects.

**(Key words:** asphalt mixtures, functionalized emulsions, adhesion, aging, thermal susceptibility, effects of water)

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Israel y Lorena, siendo este proceso resultado de su esfuerzo y constancia como padres. A mi hermana Lore, pues tu ejemplo siempre ha sido una motivación, Sebastián, siempre presente y a Em por tener una palabra de aliento y alegrar los días.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por ser soporte económico, ya que con su apoyo fue viable cubrir gran parte de los gastos en el transcurso del estudio de posgrado y a la Universidad Autónoma de Querétaro por permitirme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado, brindando el espacio, los medios, pero sobre todo, profesores comprometidos en la enseñanza y desarrollo de los alumnos.

Al Dr. José Antonio Romero Navarrete, por tener la confianza en mi proyecto, y querer ser partícipe a distancia, por su apoyo, orientación y consejo en el desarrollo de este trabajo de investigación. Al Dr. Jorge Alarcón Ibarra, por su apoyo, conocimiento y confianza, por dedicar parte de su tiempo a guiar este proyecto de investigación, pero sobre todo por ser una guía a lo largo de todo mi proceso de formación. De igual modo agradezco a la Dra. María de la Luz Pérez Rea, por ser parte fundamental en todo este proceso, como asesora y como coordinadora del posgrado. Al Dr. Omar Chávez Alegría, por confiar y aportar su punto de vista a este proyecto, además de su excelente cátedra, quedándome con un ejemplo de disciplina y constancia.

A Grupo Surfax, que me abrieron las puertas de su laboratorio LASFALTO, para poder realizar mi estancia de investigación y desarrollar la experimentación necesaria para este proyecto de investigación, enormemente agradecido con todo el equipo, Ing. Ignacio Cremades, M.I. Omar Adame, Ing. Israel Sandoval, Ing. Enrique Villa, y todo el personal que me hizo sentir en casa en esta etapa.

A AGACEL, por permitirme comenzar a aplicar los conocimientos aprendidos en mi trayecto como estudiante, y apoyarme en la etapa final de la maestría.

A mis compañeros de generación, con los cuales compartí momentos de crecimiento académico y personal, haciendo una mención especial para Alberto Cortés, David López cuya amistad fue muy importante en esta etapa.

A Marian, Paula, Carlos, Juan Pablo, Gerardo, David, Daniel, Javier, Salvador, Jorge Arturo, Gustavo, Alejandro, por siempre brindarme su amistad y apoyó incondicional.

A AGACEL, por su apoyo en la parte final de la maestría, permitiéndome ampliar los conocimientos y poner en práctica lo aprendido a lo largo de mi preparación.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	14
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	19
1.3 DESCRIPCION DEL PROBLEMA .....	22
1.4 HIPOTESIS .....	23
1.5 OBJETIVO GENERAL .....	23
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>24</b>
2.1 PAVIMENTOS .....	24
2.2 PAVIMENTOS FLEXIBLES .....	24
2.3 EMULSIONES ASFALTICAS.....	30
2.3.1 <i>Características de las emulsiones asfálticas.....</i>	<i>40</i>
2.3.2 <i>Pruebas para Emulsiones Asfálticas.....</i>	<i>47</i>
2.3.3 <i>Emulsiones asfálticas y el Medio Ambiente .....</i>	<i>50</i>
2.3.4 <i>Uso de emulsiones asfálticas.....</i>	<i>52</i>
2.4 MODIFICACION DE ASFALTOS.....	56
2.5 EMULSIÓN ASFALTICA FUNCIONALIZADA .....	58
2.6 METODOLOGÍAS DE CARACTERIZACIÓN DE ASFALTOS .....	60
2.6.1 <i>METODOLOGÍA SUPERPAVE.....</i>	<i>61</i>
2.6.2 <i>METODOLOGÍA QUALAGON.....</i>	<i>63</i>
2.6.3 <i>METODOLOGÍA UCL® .....</i>	<i>65</i>
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>69</b>
3.1 LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO.....	70
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	70
3.2.1 <i>Caracterización del agregado .....</i>	<i>70</i>
3.2.2 <i>Evaluación de la emulsión .....</i>	<i>70</i>
3.3 METODOLOGÍA UCL® .....	71
3.3.1 <i>Susceptibilidad térmica .....</i>	<i>71</i>
3.3.2 <i>Envejecimiento .....</i>	<i>71</i>
3.3.3 <i>Susceptibilidad al efecto del agua.....</i>	<i>71</i>

3.3.4	<i>Ensayo Cántabro</i> .....	72
3.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	75
3.4.1	<i>Análisis de comportamiento</i> .....	75
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>76</b>
4.1	LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO.....	76
4.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	77
4.2.1	<i>Caracterización del agregado de Michoacán “M”</i> .....	77
4.2.2	<i>Caracterización del ligante</i> .....	84
4.3	METODOLOGÍA UCL® .....	89
4.3.1	<i>Fabricación de probetas</i> .....	89
4.3.2	<i>Ensayo Cántabro</i> .....	90
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	101
4.4.1	<i>Análisis de comportamiento ante la Susceptibilidad térmica</i> .....	101
4.4.2	<i>Análisis de comportamiento ante Envejecimiento</i> .....	103
4.4.3	<i>Análisis de comportamiento ante Susceptibilidad a la humedad</i> .....	104
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>106</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>110</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparativa General de las mezclas en frío realizadas con emulsiones funcionalizadas, mezclas asfálticas en caliente y concreto hidráulico. ....	18
Continuación Tabla 1 Comparativa General de las mezclas en frío realizadas con emulsiones funcionalizadas, mezclas asfálticas en caliente y concreto hidráulico. ....	19
Tabla 2 Niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes de 8.2 t y el tipo de carretera.....	29
Tabla 3 Granulometría propuesta por VIAKER, para emulsiones funcionalizadas. ....	60
Tabla 4 Ensayos propuestos por SUPERPAVE.....	62
Tabla 5 Probetas a evaluar.....	72
Tabla 6 Granulometría del grueso, Banco de triturado AGC .....	77
Tabla 7 Granulometría del fino, Banco de triturado AGC.....	78
Tabla 8 Desgaste de los ángeles ,Banco de triturado AGC.....	79
Tabla 9 Densidad y absorción del grueso Banco de triturado AGC.....	80
Tabla 10 Densidad y absorción del fino, Banco de triturado AGC.....	81
Tabla 11 Equivalente de arena, Banco de triturado AGC .....	82
Tabla 12 Caracterización del agregado Banco de triturado AGC .....	83
Tabla 13 Contenido de asfalto .....	85
Tabla 14 Asentamiento a 5 días .....	86
Tabla 15 Índice de ruptura .....	87

Tabla 16 Viscosidad.....	87
Tabla 17 Resumen de propiedades .....	88
Tabla 18 Resultados con emulsión funcionalizada de 1 año de fabricación .....	92
Continuación Tabla 18 Resultados con emulsión funcionalizada de 1 año de fabricación .....	93
Continuación Tabla 18 Resultados con emulsión funcionalizada de 1 año de fabricación .....	94
Tabla 19 Resultados obtenidos con emulsión superestable.....	95
Continuación Tabla 19 Resultados obtenidos con emulsión superestable .....	96
Continuación Tabla 19 Resultados obtenidos con emulsión superestable .....	97
Tabla 20 Resultados obtenidos con emulsión funcionalizada.....	98
Continuación Tabla 20 Resultados obtenidos con emulsión funcionalizada .....	99
Continuación Tabla 20 Resultados obtenidos con emulsión funcionalizada .....	100

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Torre de destilación del petróleo.....	25
Figura 2 Criterio de Selección de ensayos para la evaluación del diseño de mezclas asfálticas.....	28
Figura 3 Fases de una emulsión.....	31
Figura 4 Molécula de emulsificante catiónico.....	33
Figura 5 Emulsiones aniónicas y catiónicas .....	35
Figura 6 Rompimiento de una emulsión .....	36
Figura 7 Mecanismo de rompimiento de la emulsión por contacto con el agregado. ....	36
Figura 8 Etapas de ciclo de vida de una emulsión.....	38
Figura 9 Evolución de la sedimentación en el asentamiento. ....	42
Figura 10 Adhesividad activa y pasiva.....	46
Figura 11 Objetivos de un pavimento sostenible .....	51
Figura 12 Producción de emulsiones asfálticas.....	53
Figura 13 Consumo de emulsiones asfálticas.....	54
Figura 14 Método QUALAGON.....	63
Figura 15 Metodología Universal de Clasificación de Ligantes.....	67
Figura 16 Curva de estado de un ligante .....	68
Figura 17 Representación esquemática de la metodología .....	69
Figura 18 Ubicación de Banco de triturado AGC .....	76

Figura 19. Muestra de las probetas fabricadas .....	89
Figura 20. Acondicionamiento para susceptibilidad a la humedad y envejecimiento .....	90
Figura 21 Probetas ensayadas al Cántabro.....	91
Figura 22 Curva de estado, Susceptibilidad térmica.....	101
Figura 23 Pérdidas al Cántabro por susceptibilidad térmica.....	102
Figura 24 Curva de envejecimiento .....	103
Figura 25 Pérdidas al Cántabro por envejecimiento .....	104
Figura 26 Curva de susceptibilidad a la humedad .....	104
Figura 27 Pérdidas al Cántabro por susceptibilidad a la humedad .....	105

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 .....	34
Ecuación 2 .....	34
Ecuación 3 .....	34
Ecuación 4 .....	34
Ecuación 5 .....	65
Ecuación 6 .....	74

Dirección General de Bibliotecas UAO

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

El Instituto del asfalto (1995) define un pavimento como “La estructura integrada de capas superpuestas, denominadas subrasante, subbase, base y carpeta, destinadas a permitir el tránsito vehicular”. Los pavimentos son la parte estructural de una carretera, las cuales para Martínez (2014) forman parte indispensable en la vida cotidiana de la humanidad, pues de ellas y sus condiciones depende la movilidad de personas y mercancías, concluyendo que son parte de la economía de un país y del desarrollo del mismo. Múnera y Ossa (2014), mencionan que el asfalto es un elemento formado por un conjunto de diversos hidrocarburos de origen natural, cuyas características aglutinantes lo convierten en un material idóneo para su uso en la construcción de carreteras. Reyes (2009), menciona que la mayoría de las carreteras pueden encontrarse hechas con mezclas en las que el asfalto es uno de sus principales componentes, motivo por el cual deben realizarse pruebas de sus propiedades físicas, con la finalidad de conocer si cumplen con los estándares de calidad respectivos. De acuerdo con Tomás y Rincón (2000) la construcción y conservación de carreteras se realiza principalmente con asfalto, mencionando que, por su estado físico, el asfalto obliga a calentarlo a temperaturas elevadas de aproximadamente 120°C para que alcance la fluidez necesaria para su correcta aplicación, lo anterior, ocasiona costos energéticos y económicos.

Para solucionar los problemas económicos y de impacto ambiental, se comenzó a utilizar la técnica de las emulsiones asfálticas, siendo éstas, la forma más económica, menos contaminante y de menor consumo energético existente para aplicar asfalto en una carretera según Aquino (2015). Tales emulsiones están siendo consideradas a nivel mundial para diseñar, desde tratamientos de conservación, hasta mezclas de altas especificaciones. Por ello se hace necesario entender el significado de emulsiones asfálticas. Como lo plantea Kramer (2004), las emulsiones asfálticas son unas dispersiones coloidales de cemento asfáltico en

agua. Por tanto, son productos líquidos a temperatura ambiente con una viscosidad tan reducida que no necesitan ningún calentamiento.

Por otra parte, uno de los principales inconvenientes que presentan las mezclas con emulsiones asfálticas, como lo afirma Arya (2007), es que tanto el procedimiento de diseño de mezclas asfálticas con emulsiones en frío, así como en su aplicación práctica, se observan algunos problemas, siendo los principales el tiempo de rompimiento, el cual es variable para las emulsiones, así como el desprendimiento del agregado pétreo una vez puesto en servicio (ravelling o stripping). En la actualidad, no existe un método de diseño de mezcla universalmente aceptado para mezclas asfálticas en frío. Reyes *et al.* (2013) mencionan que son muchos los productos y las aplicaciones derivadas de las mezclas a base de emulsiones asfálticas, y que esta variedad existente implica que no existe una metodología única. Por su parte, James (2006) señala que las mezclas en frío aplicadas en campo, permiten realizar ajustes en cuanto a las granulometrías que se utilizan y los contenidos de agua y emulsión asfáltica, reduciendo un poco la importancia de un diseño de laboratorio, sin embargo, menciona que existen factores en común que deben de ser tomados en cuenta para la elaboración de una mezcla en frío, principalmente enfocándose en el tipo de emulsión, el contenido de agua y el contenido de asfalto.

En relación a lo anterior, es largo el trayecto que han tenido las mezclas con emulsiones asfálticas, y son muchos los autores que han dedicado sus investigaciones a concretar avances en las tecnologías en frío. Méndez y Duarte (2002) concluyen que la colocación en obra de mezclas asfálticas en frío con emulsiones ofrece ventajas sobre las mezclas asfálticas en caliente, pues logran permanecer almacenadas sin perder características; el ligante es más adaptable a los agregados pétreos; y pueden ser mezclados durante un tiempo más prolongado siempre que exista presencia de agua en la mezcla, lo que se traduce a mayor trabajabilidad. En cambio, el mezclado en caliente es una operación que se ve limitada, ya que se debe evitar que la mezcla se enfríe antes de su tendido y

compactación. Tomás y Rincón (2000) añaden a las ventajas que, dentro de las emulsiones, encontramos emulsiones de alta viscosidad, que pueden garantizar espesores de película suficientes para fijar los agregados, evitar riesgos de escurrimiento, transportar menos agua y obtener cohesiones de tratamiento más rápido, lo cual garantiza cubrir con emulsión el agregado grueso y fino, así como utilizar emulgentes, lo cual favorece emplear cantidades mínimas de agua, por consecuencia, se obtiene una mayor estabilidad inicial, lo cual hace que las mezclas en frío, sean consideradas para la construcción de vialidades a nivel mundial. Reyes *et al.* (2013) mencionan que este tipo de mezclas presenta una gran versatilidad, pues permite utilizar una gran variedad de agregados y tipos de emulsiones; además, pueden ser utilizadas en condiciones ambientales diversas. Cuando se trata de capas de rodamiento, las mezclas frías de graduación densa se utilizan típicamente para tránsitos medios y livianos, pero las de graduación abierta se han utilizado con éxito para tránsitos pesados. Para la reparación de deterioros, como roturas de la superficie, se podrán utilizar las mezclas en frío, seleccionando la que más se adapte a las características del deterioro.

Actualmente, en nuestro país, para el diseño de mezclas asfálticas se utilizan principalmente los métodos Marshall y se ha comenzado a diseñar a través de la metodología que desarrolló la Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC) denominada "Protocolo AMAAC". Las dos metodologías están enfocadas para diseño de mezclas en caliente, sin embargo, no existe una metodología establecida para el diseño de mezclas asfálticas en frío y los diseñadores han tomado parámetros de diseño de las metodologías mencionadas; tales como la granulometría, estabilidad y flujo para el diseño de mezclas asfálticas en frío. Por su parte, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) tiene normado los parámetros para carpetas asfálticas realizadas con mezcla en frío en la NOM-CTR-CAR-1-04-007-15 y la AMAAC en su Protocolo AMAAC PA-EA 03/2011 "Procedimientos de fabricación, aplicación y control de calidad de las emulsiones asfálticas" donde propone y recomienda estándares de control de calidad de las emulsiones asfálticas, incluyendo manuales y recomendaciones sobre las

aplicaciones, con la finalidad de obtener mejores resultados en los trabajos de construcción y mantenimiento de pavimentos con el uso de emulsiones asfálticas. En cuanto a las normativas a seguir, podemos encontrar en la Normativa Oficial Mexicana la N-CTR-CAR-1-04-007-15, que se refiere a la construcción de carreteras con mezclas asfálticas en frío, sin embargo, se considera que esta normativa no es aplicable a todos los casos prácticos, dada la gran variedad de emulsiones que existen y los múltiples usos que se tienen. Por lo tanto, como parte de este trabajo, se buscarán las condiciones más adecuadas para la emulsión con la que se trabajará.

Grupo SURFAX, a través de VIAKER (2017) ofertan la primera “emulsión asfáltica funcionalizada”, en un producto denominado ECOBIT, cuya patente se encuentra en trámite. Entre sus características, destaca su capacidad de almacenamiento prolongada, un alto contenido de asfalto, una gran capacidad para incorporarse en la mezcla y cubrir los agregados, logrando esto por un costo bastante competitivo.

En la Tabla 1 se enlista una serie de comentarios para conocer la situación existente de ECOBIT en comparativa de las mezclas asfálticas en caliente, concreto hidráulico y una emulsión funcionalizada. La funcionalización consiste en que la emulsión será compatible con cualquier tipo de agregado pétreo, su viscosidad es menor respecto a las demás emulsiones y su alto contenido de asfalto facilitarán la trabajabilidad pudiendo realizar un mezclado a mano con pala, fomentando la versatilidad de que podrá ser utilizada para cualquier tipo de proyecto.

**Tabla 1 Comparativa General de las mezclas en frío realizadas con emulsiones funcionalizadas, mezclas asfálticas en caliente y concreto hidráulico.**

PARÁMETRO	CONCRETO HIDRÁULICO	MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	EMULSIONES ASFÁLTICAS FUNCIONALIZADAS
<b>TEMPERATURA DE MEZCLADO</b>	Temperatura Ambiente	150°C-180 °C	Temperatura Ambiente
<b>MAQUINARIA REQUERIDA PARA EL MEZCLADO</b>	Costos de traslado de planta para fabricar concreto hidráulico y costo de mantenimiento de la misma.	Costos de traslado de planta Asfáltica en caliente y costo de mantenimiento de la misma, retroexcavadora para abastecer las tolvas de producción. Además de la necesidad de generar una fosa para los residuos y elementos producto de la maquila. Consumo elevado de combustible para precalentar o secar el agregado pétreo, calentar el asfalto, echar a andar la planta de producción y mezclado de los elementos.	Mezclado manual o con revolovedora.
<b>COSTOS ENERGÉTICOS PARA EL MEZCLADO</b>	Consumos elevados de combustible para el encendido de la planta, y fabricación del concreto		No requiere ningún tipo de calentamiento, generando un ahorro en costo energético, derivado en ahorro económico
<b>COSTO POR METRO CÚBICO DE MEZCLA APROXIMADO : (Calculado a Octubre de 2019)</b>	Concreto MR42 \$ 1,420.00	Mezcla asfáltica densa \$ 1,850.00	Mezcla asfáltica densa \$ 1,350.00
<b>NOTA :</b>	El metro cúbico de concreto rinde para superficies menores derivado de los espesores mínimos que se deben manejar al utilizar este tipo de mezcla	Los espesores son mucho menores que los utilizados en el concreto, por lo que en cuanto al rendimiento por superficie son más económicos.	Costo aproximado

**Continuación Tabla 2 Comparativa General de las mezclas en frío realizadas con emulsiones funcionalizadas, mezclas asfálticas en caliente y concreto hidráulico.**

<b>MAQUINARÍA REQUERIDA PARA EL TENDIDO</b>	Extendedora de concreto, reglas vibratorias.	Petrolizadora, Finisher, Compactador Neumático, Vibrocompactador	Tendido rudimentario, con equipos y personal no capacitado, derivado de su trabajabilidad.
---	---	--	---

Fuente: Elaboración propia, Costos a octubre del 2019.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Es sabido que uno de los principales detonantes del desarrollo económico y social de cualquier país o región, es tener una buena accesibilidad, tal como lo menciona Obregón (1997). Las comunidades rurales, se ven favorecidas cuando comienzan a construirse obras de infraestructura, ya sean servicios básicos o caminos que interconecten las poblaciones, agilizando y economizando la distribución de los productos, fomentando de este modo el desarrollo económico y generando de esta manera, una mejor calidad de vida para los habitantes de estas comunidades. Motivo por el cual, es necesario desarrollar nuevas tecnologías y materiales, que favorezcan la construcción de infraestructura de calidad.

La Asociación Mexicana del Asfalto en su libro “Emulsiones asfálticas” (2010) hace referencia que, en la Conferencia de las Naciones Unidas en Río en el año de 1992, sobre el medio ambiente y desarrollo sostenible, se marcó el inicio de una conciencia global de que el medio ambiente terrestre se encuentra en peligro. El agotamiento de recursos naturales y el calentamiento global son las principales causas del deterioro y alteración de los ecosistemas. La industria, agricultura y el transporte son las principales causas. El tratado de Kyoto en 1997 es un documento en el cual, los estados firmantes se comprometen a reducir sus niveles de emisiones de gases de efecto invernadero respecto a los que tenían en 1990. Las emisiones

de contaminantes al año por vehículos, y procesos industriales son muy elevados, y la producción de carpetas asfálticas en caliente, se suma a las estadísticas. Una de las soluciones para seguir utilizando las propiedades del asfalto es la producción de mezclas en frío, disminuyendo tanto la energía a la hora de su producción, como los agentes contaminantes y generando un ahorro económico.

Como se ha mencionado anteriormente, el asfalto es un material idóneo para su uso en la construcción de carreteras, que, por su estado físico, obliga a calentarlo a temperaturas elevadas, ocasionando costos energéticos y económicos, además de producir cantidades considerables de gases de efecto invernadero, así como otros contaminantes químicos, afectando la calidad del aire. Otro material utilizado para la construcción de pavimentos es el cemento portland, CEMEX (2001), declara que el uso de concreto, a partir de la década de 1990, ha aumentado exponencialmente en el uso desde banquetas, patios, canchas y pavimentos, siendo una opción que en la actualidad es considerada en la mayoría de las obras como la principal, sin embargo, Kumar *et al.* (2018) y Vatopoulus y Tzimas (2012) afirman que la producción del cemento portland tiene muchos impactos ambientales que causan daños a la tierra. En 2009, la industria del cemento en la Unión Europea fue responsable de 38.5% del total europeo de emisiones de CO<sub>2</sub>. En la actualidad, derivado del uso del concreto, el impacto ambiental de la fabricación de cemento se está convirtiendo en un problema cada vez más importante, concluyen Kumar *et al.* (2018) pues, aunque se busque utilizar combustibles o fuentes energéticas sustentables en la producción del cemento, la piedra caliza (CaCO<sub>3</sub>), como lo explican Huntzinger y Eatmon (2009), al fundirse parcialmente forma el óxido de calcio (CaO), liberando dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), siendo éstas aproximadamente el 60% de las emisiones totales. Visto desde el punto de vista económico, en muchas ocasiones resulta muy costoso y las obras se convierten en proyectos inviables, motivo por el cual, el uso de emulsiones asfálticas funcionalizadas es una alternativa en la sustitución del concreto en las obras de baja inversión, donde la construcción no justifica el traslado de alguna planta de mezclas

asfálticas en caliente, o el movimiento de camiones mezcladores de concreto hidráulico.

De acuerdo con los trabajos que han realizado diferentes autores, Blankendaal *et al.* (2013), Reyes *et al.* (2013), James (2006), Méndez y Duarte (2002), Tomás y Rincón (2000), se concluye que el uso de mezclas asfálticas en frío, elaboradas con emulsiones asfálticas, para la construcción de pavimentos reduce los costos en la producción y tendido, genera menos emisiones de contaminantes, disminuye el consumo energético y la explotación de los bancos de materiales se realiza a una escala mucho menor; motivos por los cuales es considerado conveniente el uso de mezclas con emulsiones asfálticas. Además, se han ampliado los campos de aplicación y las prestaciones de los tratamientos con emulsión, dando de esta manera, espacio a la implementación de emulsiones asfálticas y el desarrollo de las tecnologías en frío.

Rodríguez *et al.* (2001) mencionan que en México las emulsiones asfálticas fueron utilizadas para la construcción de carreteras desde 1930, pero tenían el inconveniente de que los tiempos de rompimiento de la emulsión no se podían controlar, por lo que provocaban demoras a la hora de su aplicación. Por este motivo fueron dejadas de lado, y su uso ha venido hasta a la actualidad a la baja en los últimos años. A pesar de lo anterior, México siguió produciendo emulsiones asfálticas para mezclas en frío ya que éstas, aunque aún no reúnen las condiciones de resistencia en mezclas, son más económicas, más manejables, al tiempo que se pueden almacenar; tienen menor huella de carbono y son más seguras para su aplicación. Tomás y Rincón (2000) afirman que México es uno de los principales productores de emulsiones asfálticas a nivel mundial, pero no se ha desarrollado ni metodologías de diseño, ni tecnologías adecuadas para su aplicación, lo cual coloca al país en desventaja con respecto a otros países.

Las emulsiones funcionalizadas tienen la capacidad de ser compatibles químicamente con cualquier tipo de agregado pétreo, a diferencia de las emulsiones en general que se clasifican entre catiónicas y aniónicas, la decantación que presentan en relación con el resto de las emulsiones es menor, generando mayores periodos de almacenamiento, además de tener un costo competitivo.

### 1.3 DESCRIPCION DEL PROBLEMA

El uso y aplicaciones de concreto hidráulico y mezclas asfálticas en caliente ha ido en aumento para la construcción de pavimentos de alto desempeño. En lo referente al concreto hidráulico, se está utilizando para la construcción de casi todo tipo de elementos, tales como canchas deportivas y explanadas, patios de servicio, banquetas, andadores y pavimentos, sin embargo, el suministro de concreto hidráulico puede ser muy costoso dependiendo de los volúmenes de obra a ejecutar resultando que el proyecto por su monto de inversión se convierte en una obra con poca factibilidad de ejecución. Por otra parte, para la fabricación del cemento es necesario un gasto energético elevado al obtener el Clinker, base del cemento portland. Respecto a las mezclas asfálticas en caliente, ellas se han elegido para la mayoría de las pavimentaciones; pero éstas pueden ser una opción inviable derivado de los tiempos de itinerario, al trasladarse desde la planta hasta la ubicación de la obra. Estas situaciones, provocan que muchas comunidades no tengan caminos adecuados, pues las relaciones costo-beneficio no justificarían su construcción, sin embargo, la construcción de los mismos generaría el desarrollo antes mencionado.

Los estudios realizados por Ponce (2016) permiten conocer que las mezclas asfálticas fabricadas en frío diseñadas de manera correcta pueden presentar niveles de desempeño satisfactorios, sin embargo, no existe una metodología para el diseño de mezclas asfálticas en frío, derivado de esto, todavía existen puntos que se pueden mejorar cuando se diseñan mezclas asfálticas en frío. Uno de ellos se

refiere a mejorar el cubrimiento del agregado con la emulsión asfáltica en el proceso de mezclado, lo cual reduciría el desprendimiento, por fricción, del agregado y la susceptibilidad a la humedad; principales indicadores de un buen diseño de mezcla asfáltica.

Con esta tesis se busca comprobar que las emulsiones asfálticas funcionalizadas, logran tener una cohesión y adhesividad igual o mayor que el resto de las emulsiones bajo condiciones de susceptibilidad térmica, susceptibilidad a la humedad y envejecimiento, considerando que, por sus características, ofrece mejoras en el periodo de almacenamiento, contenido de asfalto y viscosidad, otorgando beneficios como ahorro económico y mejor trabajabilidad.

#### 1.4 HIPOTESIS

Las emulsiones asfálticas funcionalizadas logran presentar un mejor comportamiento ante la susceptibilidad térmica, envejecimiento y efecto del agua que una emulsión asfáltica convencional.

#### 1.5 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento de las emulsiones asfálticas funcionalizadas en diferentes condiciones de temperatura, envejecimiento y susceptibilidad a la humedad para validar su posible implementación, siendo una alternativa sustentable, mucho más económica, y con una factibilidad de aplicación para cualquier proyecto, como vialidades de tránsitos menores a 10 millones de ejes equivalentes, banquetas, ciclovías, canchas deportivas, patios escolares, entre otras aplicaciones.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 PAVIMENTOS

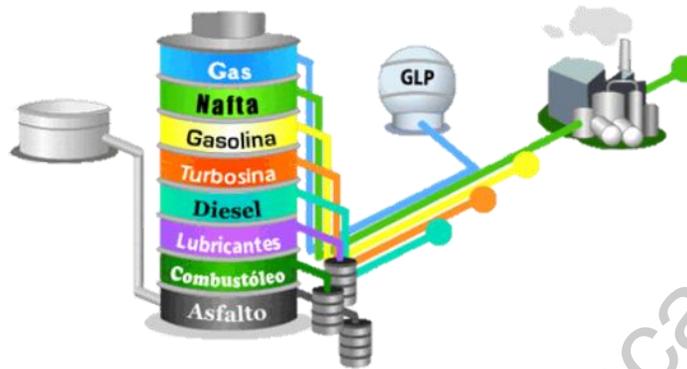
El Instituto del Asfalto (1995) menciona que el pavimento es la estructura integrada de capas superpuestas, denominadas subrasante, subbase, base y carpeta, destinadas a permitir el tránsito vehicular. El *Highway Research Board* (HRB) (1970) los clasifica de acuerdo a la mecánica de su función como: i) Pavimentos flexibles, ii) Pavimentos semi – rígidos, iii) Pavimentos rígidos, iv) Pavimentos articulados. De igual manera la HRB (1970) menciona que un pavimento debe reunir los siguientes requisitos: debe ser resistente a las cargas provocadas por el tránsito, capacitado para las circunstancias impuestas por el medio ambiente y la exposición a los agentes climatológicos, especialmente la lluvia y variaciones de temperatura; debe presentar una relación que combine la textura superficial, el desgaste provocado por la abrasión de las llantas, maximizando el adecuado nivel de seguridad de los vehículos. Superficie + textura = seguridad, al tiempo de minimizar las afectaciones del drenaje, y proporcionar una sensación agradable cuando se conduzca sobre él, minimizando para el conductor aspectos de ruido, impacto visual, y maximizando la comodidad a los usuarios.

### 2.2 PAVIMENTOS FLEXIBLES

Dentro de la clasificación de pavimentos, encontramos los pavimentos flexibles, los cuales una de sus características más importantes es que su superficie de rodamiento está constituida por una carpeta de mezcla asfáltica, que, a diferencia de los pavimentos rígidos, la superficie está construida por concreto hidráulico.

Antes de comenzar a clasificar los pavimentos flexibles es necesario hablar del componente principal de este tipo de pavimentos, el asfalto, el cual la AMAAC (2013) lo define como un sistema coloidal, residuo de la destilación del petróleo, cuya fase dispersa es polar y compuesta por asfaltenos y resinas mientras que la fase continua son moléculas no polares compuestas de saturados y aromáticos. El asfalto es ampliamente usado en pavimentos debido a sus propiedades adhesivas

y cohesivas. En la figura 1 podemos observar la torre de destilación del petróleo, del cual se obtienen diversos productos, el asfalto es uno de ellos.



**Figura 1 Torre de destilación del petróleo.**

Fuente: Cuéntame INEGI (2018)

De acuerdo a la normativa vigente por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (N-CMT-4-05-003/02), las mezclas asfálticas se pueden clasificar de acuerdo a la temperatura de mezclado, de las cuales se derivan las mezclas en caliente (elaboradas entre 140 y 180°C) y en frío (elaboradas entre 4 y 40°C), aunque también se encuentran dos tipos intermedias a las mencionadas anteriormente, las cuales son, las mezclas tibias (elaboradas entre 110 y 140°C) y las semi calientes (elaboradas entre 50 y 100°C); Al respecto, Kramer (2004) las clasifica de acuerdo a sus características granulométricas, mezclas de granulometría densa, discontinua, abierta y los morteros asfálticos. Las mezclas asfálticas, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado, de manera que aquéllos quedan cubiertos por una película continua de éste. Se fabrican de forma mecánica en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. Actualmente se emplean no sólo en los pavimentos de carreteras y calles, sino también es otro tipo de infraestructuras con tráfico: aeropuertos, superficies industriales, pistas deportivas. Se emplean también a menudo en las capas inferiores de los firmes para tráficos pesados intensos.

Kramer (2004) define una mezcla asfáltica “en caliente”, cuando en su elaboración se utiliza un cemento asfáltico y se efectúa la mezcla en una planta de mezclado, en donde se elevan las temperaturas de los materiales por encima de 120°C, que se definen con la viscosidad del asfalto utilizado, para ser tendida y compactada con una temperatura elevada. Reyes *et al.* (2013) y Acuña *et al.* (2009) coinciden con Tomás y Rincón (2000) en que las fabricaciones de mezclas asfálticas en caliente necesitan de altas temperaturas para su construcción y compactación (150°C-180°C), energía que especialmente se usa para evaporar el agua del granular y crear una viscosidad adecuada en el asfalto, de tal manera que sea suficientemente manejable y fluido. Este proceso conlleva a un gran consumo de combustibles fósiles, que se ve reflejado en el aumento de los costos de fabricación y un elevado porcentaje de contaminantes a la atmósfera. Por lo anterior, Tomás y Rincón hacen referencia a las emulsiones asfálticas como la solución que está captando la atención a nivel mundial. Acuña menciona que las mezclas asfálticas en frío se vuelven atractivas, como una alternativa en contraposición con el uso de las mezclas asfálticas en caliente, debido a la creciente necesidad de encontrar soluciones que representen una economía en las inversiones, y que al mismo tiempo permitan un desarrollo sostenible y mantengan las condiciones mecánicas y dinámicas de las mezclas asfálticas. Kramer (2004) define una mezcla asfáltica “en frío”, como la mezcla que en su elaboración utiliza un asfalto rebajado o una emulsión asfáltica, y se efectúa en una planta de mezclado o bien in situ, en donde la mezcla de los materiales se efectúa a la temperatura ambiente o en algunos casos el material asfáltico se mezcla con una temperatura máxima de 60°C, para ser tendida y compactada a la temperatura ambiente, pero no menor de 4°C.

En México, las metodologías de diseño de mezclas asfálticas más aceptadas son el diseño Marshall y el protocolo AMAAC. Tales metodologías, están enfocadas para el diseño de mezclas en caliente, pero por la falta de una metodología para diseño de mezclas en frío, se toman como referencia para diseño de mezclas en frío aun cuando es conocido que el desempeño y sus características son diferentes.

La metodología Marshall propuesta por Bruce Marshall está enfocada únicamente en mezclas asfálticas en caliente, formando un criterio que abarca la densidad de la mezcla, la estabilidad y el flujo. A diferencia del Protocolo AMAAC, el método Marshall no especifica pruebas para la calidad del agregado pétreo ni de los cementos asfálticos. Enfocándose en encontrar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados, el método Marshall ha sido utilizado para diseñar la gran mayoría de las carreteras existentes en la red carretera nacional.

La Asociación Mexicana del Asfalto en el 2008 desarrolló una metodología denominada Protocolo AMAAC basándose principalmente en la metodología norteamericana denominada SUPERPAVE, y nace bajo la necesidad creciente de diseñar mezclas de alto desempeño, que se comporten de manera adecuada a las condiciones actuales de tráfico, cargas, durabilidad, entre otras. Para ello se requiere evaluar mediante pruebas especializadas, las mezclas diseñadas, estableciendo cuatro niveles de diseño, para determinar con mayor certeza el posible comportamiento que tendrán las mezclas asfálticas durante su vida útil. Este Protocolo define qué pruebas realizar tanto a los agregados pétreos, al asfalto y/o emulsión, así como a la mezcla. En la figura 2 se muestra el criterio de selección de acuerdo a los niveles de desempeño de mezclas asfálticas que abarca protocolo AMAAC.



**Figura 2 Criterio de Selección de ensayos para la evaluación del diseño de mezclas asfálticas**

Fuente: AMAAC (2013)

Siguiendo las recomendaciones que establece el protocolo AMAAC, en la tabla 2 se presenta la recomendación para la selección del nivel de diseño de las mezclas asfálticas de granulometría densa en función del tránsito vehicular.

**Tabla 3 Niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes de 8.2 t y el tipo de carretera.**

<b>Designación del nivel de tránsito</b>	<b>Número de ejes equivalentes</b>	<b>Tipo de carreteras usuales</b>	<b>Ensayes recomendados</b>
Nivel I Tránsito bajo	Menor a 1'000,000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carreteras federales tipo D</li> <li>• Carreteras alimentadoras</li> <li>• Carreteras estatales y municipales</li> <li>• Calles urbanas</li> <li>• Carreteras estatales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad</li> </ul>
Nivel II Tránsito medio	De 1'000,000 a 10'000,000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carreteras federales tipo B y C</li> <li>• Vialidades urbanas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad</li> <li>• Susceptibilidad a la deformación permanente</li> </ul>
Nivel III Tránsito alto	De 10'000,000 a 30'000,000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carreteras federales tipo A</li> <li>• Autopistas de cuota</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad</li> <li>• Susceptibilidad a la deformación permanente</li> <li>• Módulo dinámico</li> </ul>
Nivel IV Tránsito muy alto	Más de 30'000,000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carreteras federales troncales</li> <li>• Autopistas de cuota</li> <li>• Vialidades suburbanas en ciudades muy grandes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad</li> <li>• Susceptibilidad a la deformación permanente</li> <li>• Módulo dinámico</li> <li>• Fatiga</li> </ul>

Fuente: Protocolo AMAAC (2013)

### 2.3 EMULSIONES ASFALTICAS

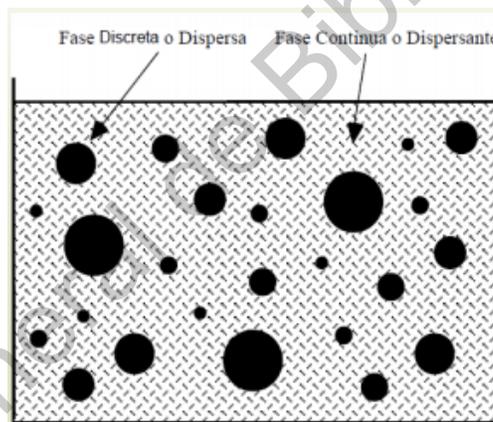
Es complicado definir la fecha del descubrimiento, investigador o primer aplicación de una emulsión asfáltica, como lo es para cualquier producto industrial. Sin embargo, Cyna *et al.* (2006) mencionan de manera cronológica la evolución de las emulsiones asfálticas, afirmando que los primeros ligantes utilizados en carretera fueron alquitranes en el año 1854 en Francia, por su parte la fecha de realización de la primera emulsión asfalto-agua, se desconoce con seguridad el primer hallazgo. Se puede decir con seguridad que este tipo de aplicaciones cobró un auge mayor bajo el impulso de Ernest Guglielminetti, quien, en 1902, basándose en las experiencias realizadas en Mónaco, logró un desarrollo con emulsiones a base de alquitrán. Para el año 1904 en Francia la superficie alquitranada en carreteras era de 360,000m<sup>2</sup>. En 1908 se llevó acabo el primer Congreso Internacional de la Carretera, donde las experiencias de carreteras a base de alquitrán eran las más importantes. Fue hasta el año 1922 cuando el químico inglés Hugh Alan Mackay presentó una patente, N°. 202.021, referente a una emulsión asfalto-agua, siendo un parteaguas en las generaciones de ligantes utilizados para carreteras, comenzando cambios en la técnica de los tratamientos y aplicaciones de las emulsiones en las carreteras.

La SCT (2015) (N-CTR-CAR-1-04-007-15) define las carpetas asfálticas con mezcla en frío como “aquellas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos de granulometría densa y cemento asfáltico en emulsión”. Derivado de lo anterior se considera importante hablar de una parte medular de las carpetas asfálticas en frío, las emulsiones asfálticas.

Una emulsión se define según el Estándar Francés NF EN ISO 862 (NF T73-000) de octubre de 1995 como: “Sistema heterogéneo con dos o más fases líquidas consistiendo de una fase líquida continua y al menos una segunda fase líquida dispersa en la primera en la forma de gotas finas”. Esta definición es basta para

aplicar a muchos productos de la vida cotidiana, como lo es la leche, mayonesa, cremas de belleza, pinturas o emulsiones asfálticas.

Rodríguez *et al.* (2001) definen una emulsión como una dispersión fina estabilizada de un líquido en otro líquido, los cuales son no miscibles entre sí y están unidos por un emulsificante. En la figura 3 podemos observar una esquematización de una emulsión. Ahora, partiendo de la definición de emulsión, podemos definir una emulsión asfáltica como una mezcla de asfalto como fase discreta y agua como fase continua, mediante un compuesto químico llamado emulsificante el cual actúa como estabilizador del sistema, otorgándole una polaridad, lo anterior con la aplicación de energía mecánica.



**Figura 3 Fases de una emulsión**  
Fuente: Rodríguez *et al.* (2001)

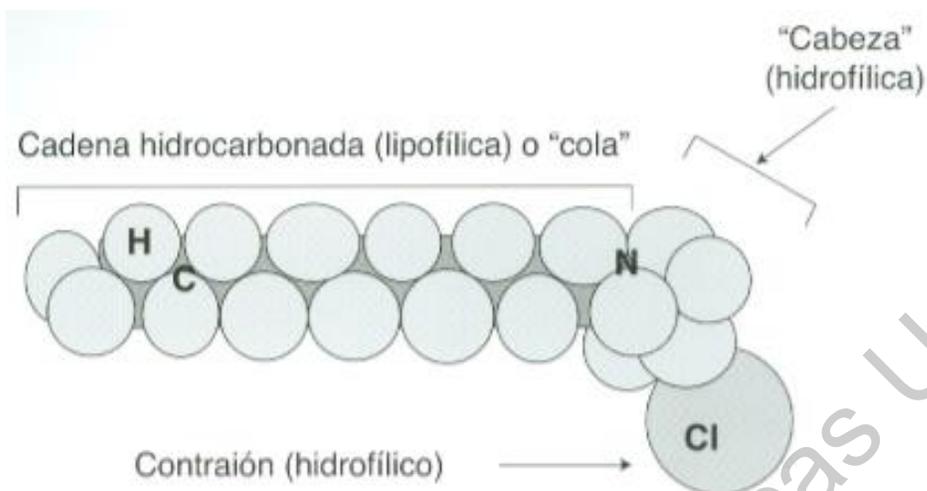
Las emulsiones asfálticas han sufrido una continua evolución desde su invención, esto acompañado de las nuevas tecnologías, desde su fórmula química, la base ligante, entre muchos otros cambios buscando mejorar su comportamiento.

Para fabricar una emulsión son necesarios dos tipos de energía, una mecánica y otra fisicoquímica. La energía mecánica, fracciona el asfalto en partículas, y la energía fisicoquímica, que es aportada por el emulsificante debe crear una película protectora alrededor de las partículas de asfalto.

La Federación de Productores de Emulsiones Asfálticas para Caminos (SFERB) de la unión francesa, en su libro “Les émulsions de bitume” menciona que, en una emulsión, todas las fuerzas naturales tienden a separar completamente los dos líquidos que formarían el estado estable, pero las escalas de tiempo pueden variar en periodos tan cortos como segundos, o periodos tan largos como años. Derivado de lo anterior, para lograr una emulsión se debe aplicar una fuerza externa, refiriéndonos a que primero se debe fragmentar el líquido que será dispersado en gotas finas, ya sea por energía mecánica o fisicoquímica, y después estabilizar las gotas formadas así con uno o más componentes, los cuales se conocen como emulsificante.

Los emulsificantes, como lo sugiere AMAAC (2011), son materiales cuya estructura química en su molécula, contiene una parte lipofílica afín al asfalto y otra parte hidrofílica afín al agua. Al respecto, en la figura 4 se pueden observar estas partes. Esta doble característica le permite situarse en la interface asfalto-agua y de esta manera mantener estable la emulsión asfáltica. Los tipos de emulsificantes más usados para asfalto son: aminas, amidoaminas, imidozalinias y sales cuaternarias.

Los emulsificantes otorgan la estabilidad en el tiempo a la emulsión, lo cual es un requisito para poder utilizarla, tal como lo mencionan Ramond y Giger (1974), dichos emulsificantes actúan como agentes tensoactivos, los cuales se pueden definir como un compuesto químico con actividad superficial, que, disueltos en un líquido, especialmente en agua, disminuyen su tensión superficial por adsorción. Complementando la definición anterior, las moléculas de estos emulsificantes, tienen dos afinidades en conflicto, una consiste en un grupo polar con propiedades hidrofílicas y otra parte con un radical no polar con propiedades lipofílicas, mostrando una dualidad bastante importante en su comportamiento dando lugar a las emulsiones.



**Figura 4 Molécula de emulsificante catiónico.**

Fuente: AMAAC (2011)

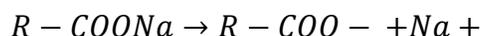
La AMAAC (2013) menciona que una emulsión se realiza mediante el proceso conocido por emulsificación, el cual consiste en mezclar agua, asfalto y emulsificante, esto requiere de utilizar la suficiente energía mecánica para fragmentar el asfalto en partículas, en presencia de emulsificantes químicos que mantienen a las partículas de asfalto dispersas en el agua. Una vez conceptualizado lo que es una emulsión asfáltica, podemos mencionar que las propiedades físico-químicas de la emulsión dependen por el tamaño de las partículas del asfalto que están dispersas, refiriéndonos principalmente a la viscosidad y la estabilidad. Ahora, otra parte medular de los emulsificantes, que son los encargados de mantener estas partículas dispersas de manera homogénea en la fase acuosa, es la solución jabonosa, la cual disuelve el emulsificante previamente calentado entre 30°C y 60°C, y mediante agitación vigorosa, se adiciona la cantidad requerida de emulsificante, consecuentemente, las cargas iónicas juegan un papel medular, pues generalmente se agrega un ácido para obtener un emulsificante catiónico o un álcali para obtener un emulsificante aniónico.

El tipo de emulsificante define el tipo de emulsión. Los emulsificantes aniónicos, tienen grupos ácidos en su parte hidrofílica, con carga eléctrica negativa; éstos tienen como fórmula general



**Ecuación 1**

Cuando este tipo de emulsificantes se encuentra en un medio acuoso se disocia resultando:



**Ecuación 2**

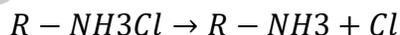
El grupo carboxilato COO<sup>-</sup> se va a la parte hidrofílica, mientras que el radical alquilo R se queda en la parte hidrofóbica.

Los emulsificantes catiónicos son generalmente grupos aminos con carga eléctrica positiva y con fórmula general



**Ecuación 3**

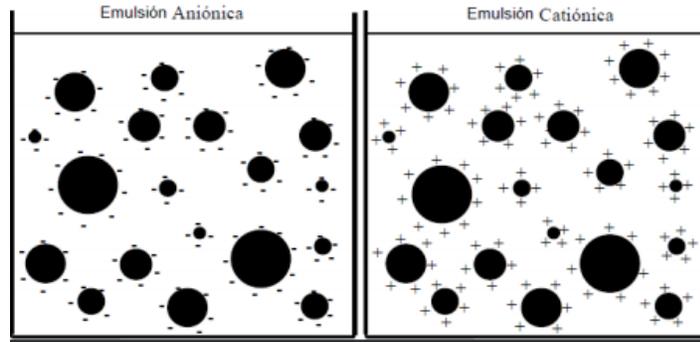
Cuando este tipo de emulsificantes actúa en un medio acuoso se disocia resultando:



**Ecuación 4**

El grupo amino NH<sub>3</sub> se va a la parte hidrofílica, mientras que el radical alquilo R se queda en la parte hidrofóbica.

Por su parte, Kramer (2004) concluye que existen notables diferencias de comportamiento entre ambos tipos, en términos generales, las emulsiones aniónicas tienen buena adhesividad con los agregados calizos y las catiónicas con los silíceos, en la figura 5 podemos observar la diferencia entre una emulsión aniónica y una emulsión catiónica.



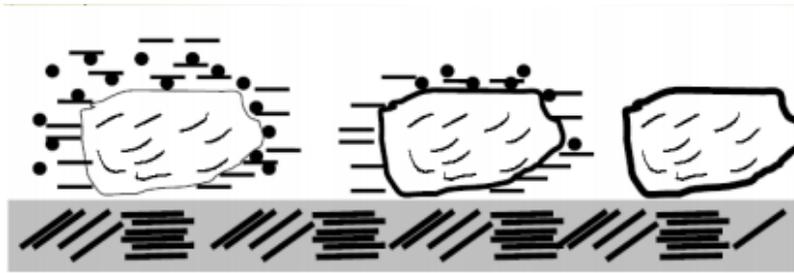
**Figura 5 Emulsiones aniónicas y catiónicas**

Fuente: Rodríguez et al. (2001)

El rompimiento de una emulsión asfáltica consiste en la separación del agua del asfalto, esta separación está controlada por el emulsificante, con esta separación del agua y el asfalto, comienza el proceso de curado, el cual sucede en la aplicación de una emulsión, donde se elimina totalmente la presencia de humedad una vez que la emulsión rompe.

Para comprender el fenómeno de rompimiento de una emulsión se explicarán los procesos que intervienen, y como es que cada uno de ellos interviene en la velocidad, la cual es la segunda manera de clasificar una emulsión asfáltica.

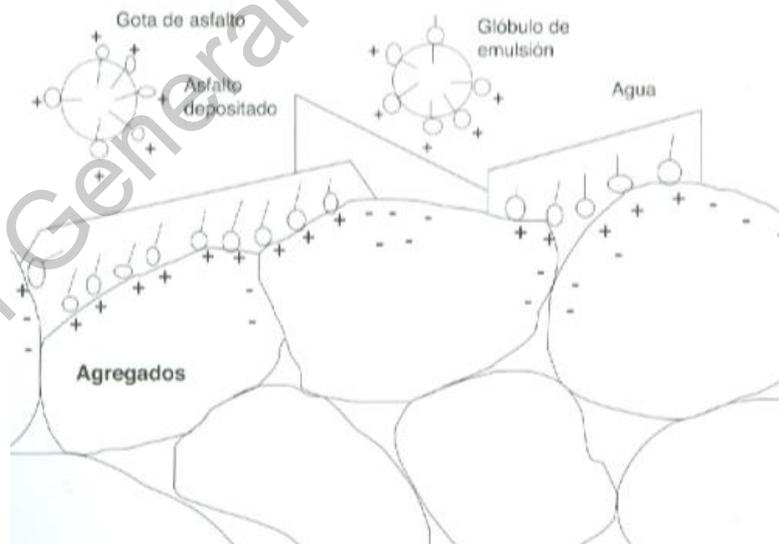
Cyna *et al.* (2006) describen el rompimiento como una serie de procesos, siendo el primero de estos la floculación, la cual es un fenómeno de segregación durante el cual las partículas se acercan a una distancia mínima entre ellas. La coagulación o coalescencia es la etapa que corresponde a la fusión irreversible de las partículas del cemento asfáltico. La emulsión comienza a tornarse de color café marrón a negro. Las emulsiones se conservan y manejan en estado acuoso y al ponerlas en contacto con la superficie de los agregados pétreos, por reacción química neutralizan la carga de las partículas de asfalto en la emulsión o por evaporación del agua, las partículas de asfalto se vuelven a juntar formando una película continua deseada que envuelve al agregado. Este proceso es un factor decisivo para su aplicación en obra. Para ilustrar lo anterior se muestra la figura 6.



**Figura 6 Rompimiento de una emulsión**

Fuente: Rodríguez *et al.* (2001)

Las fases del rompimiento comienzan cuando existe contacto entre la emulsión asfáltica con el agregado pétreo. En la primera fase se produce una absorción parcial del agua y emulsificante libre por el agregado, lo que origina una mayor concentración de glóbulos en las proximidades de éste y una desestabilización de la emulsión. Posteriormente, éste proceso da como resultado la floculación y a la aproximación de las partículas de asfalto a la superficie del agregado, lo cual se aprecia en la figura 7.



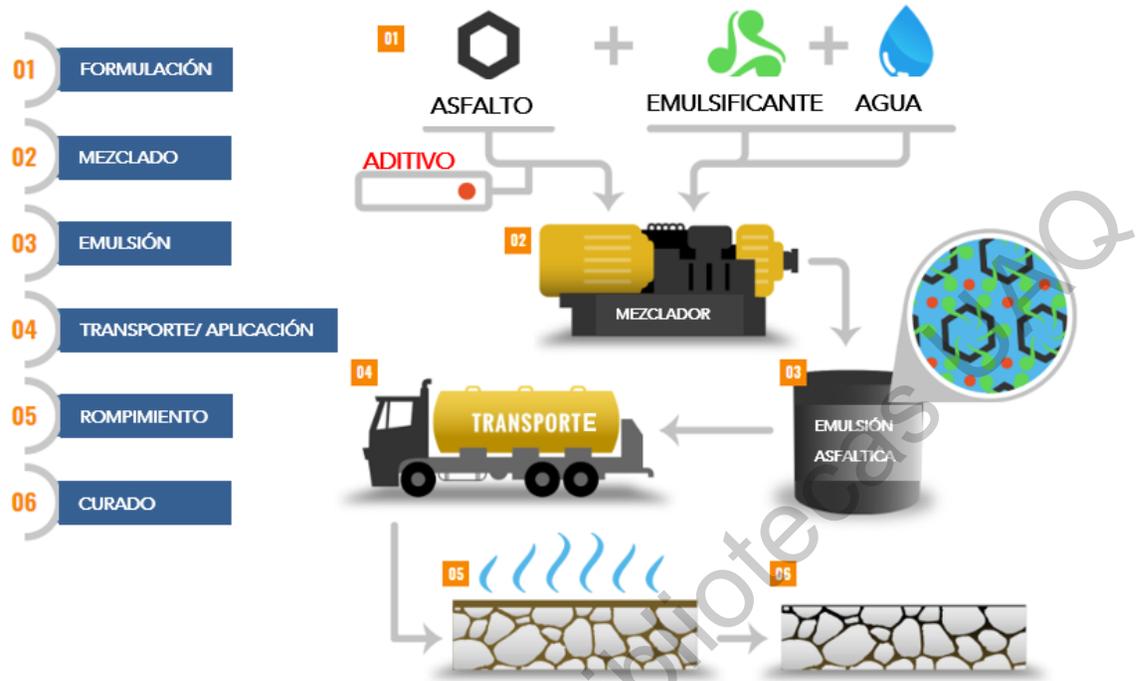
**Figura 7 Mecanismo de rompimiento de la emulsión por contacto con el agregado.**

Fuente: AMAAC (2011)

En la segunda fase comienza la coalescencia donde se produce la formación de coágulos de asfalto, lo que implica la separación irreversible de las fases. Al final de este proceso se produce el rompimiento de la emulsión en sentido estricto, las dos fases, asfalto y agua se separan completamente.

Paralelamente se produce también un aumento en el pH de la emulsión por la neutralización del emulsificante, lo que contribuye a la desestabilización de la misma. Dependiendo de la naturaleza del agregado este cambio de pH es más o menos rápido. A partir de este momento comienza la pérdida de agua del sistema, lo cual produce un incremento rápido en la cohesión y se aprecia visualmente por el paso de un color marrón oscuro a un color negro típico del asfalto.

Posteriormente se produce la pérdida de los aditivos diluyentes añadidos, al asfalto si los hubiera, proceso llamado curado. En las mezclas, se le llama maduración a la eliminación del agua que permanece en los huecos de estas. Estos procesos son de naturaleza física y dependen de la evaporación, así como del espesor de la mezcla.



**Figura 8 Etapas de ciclo de vida de una emulsión**

Fuente: PPRA (2019)

Las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas basándonos en la normativa de la SCT (N-CMT-4-05-001-00) de acuerdo al tipo de emulgente usado. En este caso podemos hablar de dos tipos, aniónicas y catiónicas. Las emulsiones aniónicas poseen una polaridad negativa, por su parte las catiónicas, le confieren a los glóbulos propiedades positivas. Acorde al tiempo de rompimiento, existen las emulsiones de rompimiento rápido, utilizadas para riegos de liga y carpetas por sistemas de riegos; las emulsiones de rompimiento medio, utilizadas normalmente para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas; y las emulsiones de rompimiento lento, utilizadas para carpetas de mezcla en frío y estabilizaciones asfálticas. Además, existen las emulsiones para impregnación, utilizadas para impregnaciones de sub bases o de bases hidráulicas, las emulsiones súper estables, empleadas en la estabilización de materiales y recuperación de pavimentos.

Las emulsiones poseen características que se consideran para la elaboración de mezclas asfálticas en frío, tales como lo es la viscosidad, una propiedad fundamental para la aplicación de la emulsión, mientras más alto sea el grado de viscosidad, la película será más espesa y se proporcionara una retención mayor de emulsión sobre los agregados; la estabilidad de almacenamiento o sedimentación, derivado de que es necesario que pueda durar en almacenamiento periodos de tiempo prolongados; la velocidad de rompimiento, por las propiedades químicas, el rompimiento de la emulsión comienza a partir del contacto con el agregado pétreo, produciéndose una absorción parcial del agua contenida en la emulsión y posteriormente se lleva un proceso de floculación y las partículas de asfalto van a la superficie del agregado, posteriormente se lleva una coalescencia donde se producen los coágulos de asfalto, lo que lleva a la separación de las fases, refiriéndonos a que el agua se separa finalmente del asfalto; otra característica es la adhesividad, que se da cuando el glóbulo de la emulsión entra en contacto con una superficie mineral por medio de reacciones químicas o atracciones eléctricas, provocando que los agregados se adhieran unos con otros, tal como lo describen Cyna *et al.* (2006). Por su parte las emulsiones funcionalizadas, pretenden ser una emulsión universal, siendo funcionales para todo tipo de agregado y proyecto.

Las emulsiones asfálticas se pueden clasificar ya sea por la carga de su partícula o por la velocidad de rompimiento.

A) Carga de la partícula

- a. Aniónicas (glóbulos de asfalto con carga negativa)
- b. Catiónicas (glóbulos de asfalto con carga positiva)
- c. No iónicas (Sin carga)
- d. Anfotéricas (Sin carga, pero pueden ser activadas positiva o negativamente)

B) Velocidad de rompimiento

- a. Rápidas
- b. Medias

- c. Lentas
- d. Superestables

Recordando que las emulsiones se establecen mediante el acomodo de moléculas de tensoactivos en la superficie de las gotas, podemos entender que la cantidad de emulsificante necesaria para conseguir una emulsión estabilizada es lo más importante. Una emulsión para ser aplicada en la ingeniería de caminos debe tener una vida de servicio que exceda el tiempo previsible de uso antes de su aplicación, tener propiedades que permanezcan constantes durante su vida útil y pasar por una ruptura homogénea cuando entre en contacto con los agregados.

### 2.3.1 Características de las emulsiones asfálticas

Dentro de las propiedades y características que poseen las emulsiones asfálticas podemos mencionar las siguientes:

El potencial de Hidrogeno (pH) tal como lo describe Sauterey *et al.* (1974), determina el grado de acidez o alcalinidad de una solución. El valor del pH afecta tanto a la velocidad de rompimiento como su estabilidad. Esta característica se controla en la fase acuosa, por lo general el pH de las emulsiones permanecerá igual que el de las aguas jabonosas inicial de la emulsión. Adicionalmente, el agregado pétreo tiene un pH propio que influye en la actividad de los sitios de la superficie, responsable entre otras cosas de la adsorción del emulsificante. Todo esto muestra que el pH es un parámetro importante en la caracterización y formulación de las emulsiones. es una característica de la fase acuosa, cuando no hay migración de los compuestos químicos de una fase a la otra, el pH de las emulsiones permanecerá igual que el del jabón inicial de la emulsión. Por su parte, los agregados tienen un pH que influencia la actividad de los sitios de superficie, responsable de la adsorción del emulsificante. Lo anterior muestra que el pH es un parámetro importante en la caracterización y formulación de emulsiones.

## Papel y estado del emulsificante

El tensoactivo provee una carga eléctrica superficial, Sauterey *et al.* (1974) mencionan que esta carga desarrolla un potencial electrocinético responsable en parte de la estabilidad de las emulsiones. En la actualidad las investigaciones se orientan al estudio de las propiedades de la película interfacial para entender cómo es que el emulsificante protege las gotas de la coagulación. Sin embargo, la teoría más aceptada, se refiere a la participación de la energía de repulsión electrostática.

La viscosidad es una característica fundamental en la aplicación de la emulsión. Cyna *et al.* (2006) hacen referencia que las emulsiones destinadas a tratamientos superficiales, requieren una viscosidad alta, permitiendo una película más espesa que proporcione una mejor retención de los agregados, además un menor escurrimiento del cemento asfáltico; por el contrario, en emulsiones asfálticas una viscosidad menor permite mejor la dispersión de la emulsión del agregado.

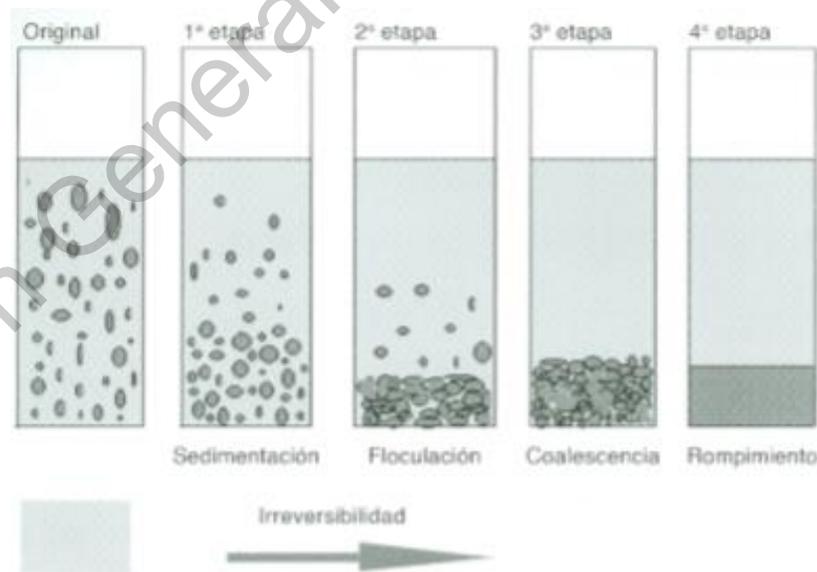
La viscosidad es uno de los parámetros más importantes de una emulsión, pues ésta al ser usada, debe ser lo suficientemente fluida para permitir su bombeo y aspersión, lo suficientemente viscosa para no fluir fuera de la superficie del camino o escurrir por la pendiente. La viscosidad depende de varios factores, tales como el emulsificante, el contenido de asfalto, y la viscosidad de su fase acuosa y fase dispersa.

## Velocidad de ruptura y curado

Cuando se habla de la ruptura de la emulsión, es referido al proceso cuando las gotas de emulsión existen separadamente como individuos. Por otra parte, el curado es la combinación de fenómenos que provocan la remoción de agua del material asfáltico, esto es después de que el proceso de ruptura ha concluido, tal como lo describe Cyna *et al.* (2006). La condición ideal, es aquella que permite controlar el inicio de la ruptura, incluyendo el lapso de tiempo existente entre la manufactura, posible almacenamiento y transporte al lugar donde será puesto en servicio.

La velocidad de ruptura es importante para determinar cuál es el uso que se le dará a la emulsión, ya sea un revestimiento superficial, impregnación o, uso en mezcla asfáltica. Esta velocidad es expresada por el índice de ruptura, el cual es medido con un filler convencional.

Otra propiedad importante es la estabilidad en almacenamiento. *Cyna et al. (2006)* mencionan que durante el almacenamiento de las emulsiones en una primera etapa se produce la flotación o la sedimentación. Como flotación se conoce a la concentración del asfalto en la parte superior y a la sedimentación a la concentración en la parte inferior. Posteriormente aparece la floculación, caracterizada porque los glóbulos se ponen en contacto, pero aún están protegidas parcialmente por el emulsificante y mantienen su forma; de esta etapa aparece la coalescencia que ya es un proceso irreversible. Tras las primeras coalescencias estos fenómenos se aceleran dando lugar al rompimiento y separación de los componentes de la emulsión. Factores determinantes en la estabilidad al almacenamiento son: Viscosidad, densidad de las fases y tamaño de la partícula de asfalto. La estabilidad queda ejemplificada en la figura 9.



**Figura 9 Evolución de la sedimentación en el asentamiento.**

Fuente: AMAAC (2011)

## Estabilidad durante el almacenamiento

La estabilidad tiene una importancia mayor, como lo menciona la AMAAC (2011) pues se debe asegurar que el resto de las propiedades de la emulsión permanezcan constantes mientras ésta, se encuentre en almacenamiento y hasta que sea puesta en obra.

La floculación no es un fenómeno de peligro para los usuarios de la emulsión, siempre y cuando no esté acompañada de sedimentación o coagulación. Por su parte, la sedimentación puede causar problemas a los usuarios, ya que, dentro del tanque de almacenamiento, tendremos diferentes contenidos de agua, y por consecuencia, tendremos viscosidades diferentes y problemas a la hora de bombear o querer aplicar la emulsión. La coalescencia es un fenómeno que es irreversible, y una vez que sucede, implica la pérdida de la emulsión, lo cual no es favorable si sucede cuando se encuentra dentro del tanque de almacenamiento.

## Estabilidad en almacenamiento y pH

La AMAAC (2011) menciona que las emulsiones más estables se dan con valores bajos de pH, aunque estos valores bajos pueden traer mayores fuerzas iónicas. Desde otra perspectiva, la velocidad de ruptura, aumentará con el pH. Los mejores valores de adhesión se considera que se obtienen con valores de pH entre 3 y 5. Sin embargo, el pH no es el único parámetro, el emulsificante juega un papel importante en la estabilidad de la emulsión y el periodo de ruptura, pudiendo lograrse emulsiones estables con pH altos.

## Estabilidad y concentración de emulsificante

Mientras más emulsificante tenga una emulsión, mayor será su estabilidad. Sin embargo, existe un contenido óptimo de emulsificante tal como lo mencionan Sauterey *et al.* (1974). La estabilidad de las emulsiones puede crearse por dos tipos

de estabilización, la estabilización por carga eléctrica y la estabilización estérica. La estabilización por carga eléctrica se obtiene colocando una carga eléctrica neta en la superficie de las partículas y por pura repulsión electrostática se estabiliza la dispersión. En cambio, la estabilización estérica se obtiene absorbiendo moléculas de polímero en la superficie de las partículas, ya que cuando dos partículas con polímero colocadas en su superficie se aproximan una a otra, éstas se repelen mutuamente debido a un aumento en la concentración de monómero en la región de traslape; este aumento en la concentración produce una presión osmótica que hace que se separen las cadenas poliméricas.

#### Incidencias en el almacenamiento

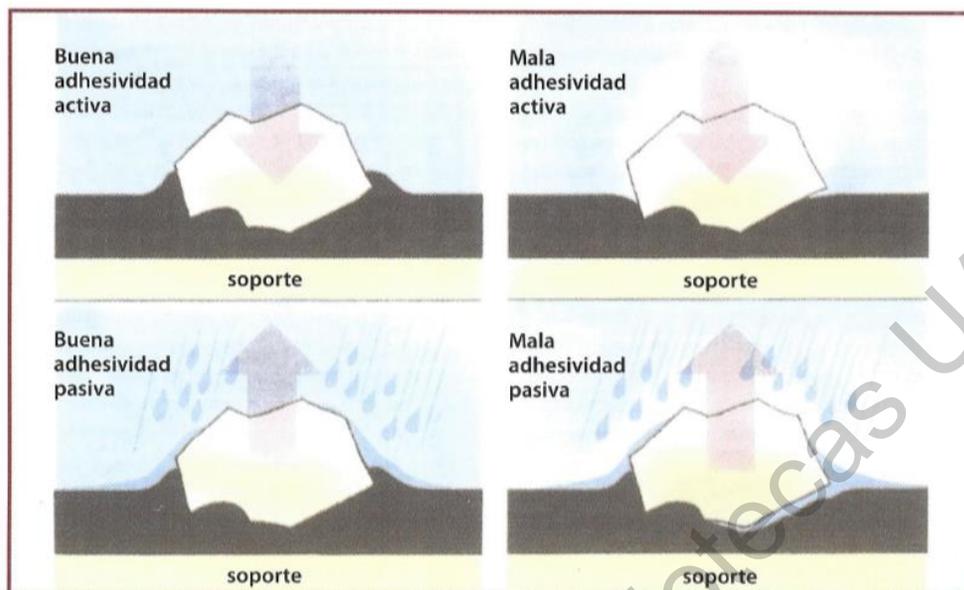
Cyna *et al.* (2006) describen que cuando una emulsión es almacenada por periodos largos, en la superficie que se encuentra en contacto con el aire, se forma una película de asfalto que se denomina "nata". Esta nata, sirve como protección superficial de la emulsión y no representa peligro. Otro fenómeno que ocurre mientras la emulsión está almacenada es la sedimentación, la sedimentación es la reducción del contenido de asfalto en la superficie. Existe un fenómeno inverso, implicando aumento del contenido de asfalto en la superficie, denominado cremado. La sedimentación puede evitarse con procesos de agitación, siempre y cuando esto no derive en la floculación de la emulsión.

En el periodo de almacenamiento, la viscosidad de una emulsión podrá aumentar, mostrando un espesamiento progresivo. Es importante que cuando se presenta el espesamiento, no añadir agua a la emulsión, pues como lo comenta la AMAAC (2011) se corre peligro de provocar la rotura total o parcial de la emulsión. Una posible solución para el espesamiento es calentar ligeramente la emulsión, en el momento en el que será utilizada. Otra de las precauciones que se deben tomar en cuenta, a la hora de almacenar emulsiones es el no mezclar emulsiones diferentes, pues esto puede provocar la floculación o pérdida de las emulsiones. Por su parte, el limpiar perfectamente los tanques antes de llenarlos con una emulsión diferente es sumamente importante.

Algunas de las circunstancias que pueden ameritar que una emulsión sea calentada son la prevención a las heladas, cuando se vaya a bombear una emulsión con contenido asfáltico mayor al 65% o con asfaltos modificados. Este calentamiento recomienda la AMAAC (2011) que puede realizarse en los depósitos de almacenamiento o en las cisternas de transporte, mediante los quemadores a flama, o las resistencias eléctricas dispuestas en el fondo de los depósitos de almacenamiento. Las emulsiones asfálticas, no son consideradas productos inflamables, por lo que no figuran como un material peligroso.

La adhesividad como la definen Sauterey *et al.* (1974) es la capacidad de un cemento asfáltico para permanecer fijo a un agregado recubriéndolo y dándole resistencia al desplazamiento aún en presencia de agua o tránsito. Los agregados pétreos utilizados para tratamientos superficiales, se encuentran sometidos a esfuerzos muy importantes provocados por las fuerzas de arranque de los vehículos. Para poder soportar los agregados estos esfuerzos es necesario que el ligante logre mantener la unión entre los agregados, que el ligante se mantenga adherido al agregado, que el ligante no se desprege del soporte, y que el ligante no se rompa a causa de las fuerzas tractoras.

Considerando lo anterior es importante definir lo que es la adhesión, la cual es una característica muy importante en las emulsiones asfálticas. Cuando hablamos de adhesión debemos asegurar dos cuestiones, la primera de ellas es que el ligante pueda entrar en contacto con los agregados pétreos y con el sustrato o soporte, la segunda cuestión es que el ligante deberá cubrir los agregados y el sustrato. De esta manera, los componentes deben enlazarse, el ligante con los agregados y estos a su vez con el sustrato, a esta condición la llamaremos adhesividad activa. Una vez teniendo la adhesividad activa, el enlace formado no deberá romperse bajo acciones de agentes como el agua, partículas finas que se incrustan bajo acción de tránsito o cualquier agente perturbador, a esta adhesión se le denomina adhesividad pasiva. En la figura 10 se ilustra la adhesividad activa y adhesividad pasiva.



**Figura 10 Adhesividad activa y pasiva**

Fuente: AMAAC (2011)

Por otra parte, tenemos la cohesión, otra característica del comportamiento del ligante que es sumamente importante, la cual Sauterey *et al.* (1974) la definen como la capacidad del ligante a soportar el esfuerzo cortante. La cohesión depende de muchos factores, siendo uno de los más importantes la viscosidad, la cual a su vez depende de la temperatura, conociendo que el ligante tiene un comportamiento que debajo de cierta temperatura se hace duro y quebradizo, y a altas temperaturas el ligante se puede volver demasiado fluido o blando para resistir los esfuerzos.

Se podría decir que para garantizar que el ligante entre en contacto con los agregados y el soporte, bastaría con bajar la viscosidad para hacerlo más fluido, sin embargo, al tomar esta acción, estaríamos reduciendo la cohesión en condiciones de temperaturas altas. Este tipo de problemáticas son las que se han venido intentando solucionar a lo largo del desarrollo de las emulsiones asfálticas, lo cual ha llevado a la utilización de solventes, polímeros, para cumplir los requerimientos de adhesión y cohesión.

Las emulsiones desde el punto de vista químico, el ligante además de asegurar la adhesividad al soporte o superficie sobre la cual se aplicará y la adhesividad al agregado pétreo a largo plazo, como lo menciona la AMAAC (2011), deberá obtener tras el rompimiento de la emulsión, una viscosidad que permita que la película de asfalto cubra la superficie de los agregados y moje la superficie sobre la que se aplica, y sea un ligante lo suficientemente rígido para resistir las sollicitaciones dinámicas que genera el tránsito.

### 2.3.2 Pruebas para Emulsiones Asfálticas

#### Residuo de tamiz y estabilidad de almacenamiento

Guimberteau y Leal (1999) nos mencionan que este ensaye sirve para determinar el porcentaje de partículas con diámetros que exceden los 0.4mm y aquellas entre 0.15 y 0.5mm. Después de siete días de almacenamiento, indicar cualquier incremento que pueda haber ocurrido en el porcentaje de partículas que exceden los 0.5mm. La prueba consiste en pasar una emulsión a través de mallas con aperturas de 0.15 y 0.5mm y luego determinar la masa retenida en cada malla. Como finalidad la prueba indica la finura de la dispersión asfáltica y en algunos casos indica la tendencia de la emulsión a romperse después de un almacenamiento de siete días.

#### Carga de la partícula

El ensaye de la carga de la partícula, como lo mencionan Guimberteau y Leal (1999) nos indica la polaridad eléctrica de la fase dispersa. El procedimiento se realiza bajo el principio de electroforesis, colocando dos electrodos en la emulsión y generando una corriente eléctrica directa débil. Esta prueba es útil solo cuando hay incertidumbre con respecto a la carga de la emulsión.

#### Viscosidad

La viscosidad se mide por medio de un viscosímetro de afluencia, para lo cual, se registra el tiempo requerido para que una cantidad de 50ml de emulsión asfáltica pasen a través de un orificio de 2, 4 o 10mm de diámetro, a 40°C dependiendo la especificación.

#### Sedimentación

Para evaluar la tendencia a la sedimentación de una emulsión asfáltica, Cyna *et al.* (2006). mencionan que es necesario almacenar durante 5 días en un cilindro graduado en forma vertical, una emulsión asfáltica. Pasados el periodo de almacenamiento, se procede a determinar el contenido de agua en la superficie y en el fondo del cilindro. La tendencia a la sedimentación se calcula con la diferencia en el contenido asfáltico.

#### Estabilidad al mezclado

Este ensaye como mencionan Guimberteau y Leal (1999), se usa para determinar, si una emulsión asfáltica es superestable. La metodología se basa en mezclar 100 ml de emulsión con 50g de cemento asfáltico. Después de mezclar por un minuto, se diluye con 150 ml de agua. Se hace pasar por una malla de 2mm y se pesa el material retenido. Si el resultado es menos de 2 g, se considera que la emulsión es superestable.

#### Penetración

Guimberteau y Leal (1999) describen que esta prueba evalúa la habilidad de una emulsión para penetrar la estructura mineral. Se colocan 10 g de emulsión en un recipiente que contiene 100g de finos de referencia. Se registra en minutos, el tiempo requerido para que la estructura del material aparezca en la superficie del material después de una penetración total.

## pH

Para medir el pH Guimberteau y Leal (1999) comentan que es necesario usar un potenciómetro electrónico, comparando el pH de una emulsión medida en comparación de una solución estándar. El valor del pH no es un requisito de especificación, pero es una característica intrínseca con otras propiedades como la velocidad de ruptura o adhesión.

## Índice de ruptura

El índice de ruptura, Guimberteau y Leal (1999) lo definen como un ensaye que permite evaluar la estabilidad de la emulsión en presencia de materiales silíceos finos. Los finos son adicionados a 100 g de emulsión asfáltica mientras se agita hasta que sucede la ruptura de la emulsión. El resultado es un número adimensional, pero mientras mayor sea la cantidad de finos, mayor es la estabilidad de la emulsión.

### 2.3.3 Emulsiones asfálticas y el Medio Ambiente

La Conferencia de las Naciones Unidas en Río en el año de 1992, sobre el medio ambiente y desarrollo sostenible marcó el inicio de una conciencia global de que el medio ambiente terrestre se encuentra en peligro. El agotamiento de recursos naturales y el calentamiento global son las principales causas del deterioro y alteración de los ecosistemas. La industria, agricultura y el transporte son las principales causas. El tratado de Kyoto en 1997 es un documento en el cual, los estados firmantes se comprometen a reducir sus niveles de gases de invernadero respecto a los que tenían en 1990.

La comisión mundial de desarrollo y medio ambiente (1987) describe que “El desarrollo que cumple las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras a cumplir sus propias necesidades”. Si esta premisa la trasladamos a los pavimentos, el resultado sería “Un pavimento seguro y ambientalmente amigable que cumple con las necesidades del presente sin comprometer aquellas de las futuras generaciones”. En la figura 11 se esquematiza los objetivos de un pavimento sostenible.



**Figura 11 Objetivos de un pavimento sostenible**

Fuente: Elaboración propia

Las técnicas para emulsiones asfálticas, son comparadas con base en dos criterios, el consumo de energía, y las emisiones de efecto invernadero.

Para poder considerar un análisis del daño que provoca la construcción de vías terrestres, es necesario analizar desde la extracción y producción de materia prima, refiriéndonos a los minerales, petróleo, entre otros. Posteriormente analizar los materiales constituyentes, como lo es el cemento y el asfalto. Para concluir, se deberá analizar las etapas de producción, extracción, manufactura, transporte, depósito y todas las fases que involucran la construcción de un pavimento con un nivel aceptable de servicio.

#### 2.3.4 Uso de emulsiones asfálticas

Utilizar emulsiones asfálticas con fines estructurales, ha dado excelentes resultados técnicos y económicos, que determinan soluciones viables en la infraestructura de varios países. Como ejemplo de lo anterior, diversos son los investigadores que cuentan experiencias y éxitos en el empleo de emulsiones asfálticas para la fabricación de mezclas en frío, algunos de ellos Méndez y Duarte (2000) y Mora (2002), la pavimentación del aeropuerto de Puerto Inirida, Guainia, el aeropuerto de Ocaña, Norte de Santander, aeropuerto de Nazca en Perú, la carretera La Alpujarra-Delicias en Tolima, la pista circunvalar de la Isla de San Andrés en Colombia, entre muchos otros, son algunos ejemplos de lo expuesto anteriormente, en los cuales se ha demostrado que las mezclas con emulsiones al ser aplicadas adecuadamente son una alternativa potencial para la pavimentación de vías de cualquier orden y en cualquier lugar.

El empleo de las mezclas con emulsiones asfálticas busca sustituir la aplicación de mezclas asfálticas en caliente, especialmente en casos donde es difícil producirlas por razones climáticas, medio ambientales, dificultades de transporte de materias primas, por ser zonas remotas y la instalación de una planta de mezcla en caliente compromete en gran parte el presupuesto de la obra. El éxito de este tipo de mezcla depende básicamente del agregado pétreo a utilizar, que cumpla con las especificaciones y normativas; y de la emulsión asfáltica, que exista compatibilidad entre el agregado y la emulsión, y que la emulsión pueda proporcionar las mejores propiedades de cubrimiento, adhesividad y cohesión. Finalmente, el éxito también depende de la planta de producción de la mezcla, y el equipo de colocación y compactación, debiendo contar con sistemas de autocontrol de calidad.

Derivado de lo anterior, para Reyes (2009) una de las partes fundamentales para garantizar el éxito en este tipo de mezclas es garantizar que la elección de la emulsión asfáltica es la adecuada, motivo por el cual deben realizarse pruebas de sus propiedades físicas, con la finalidad de conocer sus estándares de calidad y minimizar las fallas que los ligantes asfálticos presentan en el transcurso de su vida

útil, las cuales se derivan de la pérdida del ligante asfáltico o de sus propiedades al verse sometidos al tránsito o por agentes atmosféricos, las cuales, en caso de mezclas asfálticas en caliente comienzan un envejecimiento y oxidación desde su producción y procedimiento constructivo.

Las emulsiones asfálticas, por sus diferentes características, pueden utilizarse en diferentes etapas de la construcción de vías terrestres, para todo tipo de tránsito, ofrecen una solución, siendo usadas para revestimientos superficiales, microcarpetas, mezclas asfálticas en frío, capas ligantes, lechadas, reciclaje y rehabilitación de pavimentos por mencionar algunos usos. Por lo anterior, es que el uso de emulsiones asfálticas se ha incrementado consistentemente durante los últimos años. Según Tomás y Rincón (2000) los principales países productores de emulsiones son los que se muestran en la figura 12.



**Figura 12 Producción de emulsiones asfálticas**

Fuente: Tomás y Rincón (2000)

Las emulsiones de rompimiento rápido que equivalen a un 65% de la utilización total de emulsiones, se utilizan principalmente para riegos auxiliares y tratamientos superficiales, las de rompimiento medio equivalen a un 25 % del total

de utilización de emulsiones empleadas en mezclas abiertas, gravas-emulsión, y mezclas para bacheo. Finalmente, las emulsiones de rompimiento lento generalmente usadas para lechadas equivalen a un 10% del total de las emulsiones empleadas. En la figura 13 podemos encontrar los países con mayor consumo de emulsiones asfálticas en relación con número de habitantes, es importante observar, que a pesar de México ser uno de los principales productores, no figura dentro de los países con mayor consumo de emulsiones.



**Figura 13 Consumo de emulsiones asfálticas**

Fuente: Tomás y Rincón (2000)

Pero no es solo por la gran diversidad de soluciones que ofrecen las emulsiones asfálticas que han tenido gran relevancia, esto también se debe a que cumplen con cuatro requisitos importantes para cualquier autoridad a cargo de la infraestructura vial, que son la seguridad, el cuidado del medio ambiente, mantenimiento y ahorro en costo.

En lo referente a seguridad, podemos abordarla desde el personal de construcción hasta el usuario. Lo anterior es derivado a que el personal no debe manejar las emulsiones a temperaturas elevadas, y las emulsiones se aplican a temperatura ambiente, eliminando el riesgo de quemaduras u otros, además de no

ser considerados productos inflamables, no generan olores o humos, en el sitio de aplicación, reduciendo peligros en el transporte de igual modo. Por su parte, la posibilidad de cambiar la textura y color del pavimento permite la demarcación de superficies y una mayor percepción para el usuario de los carriles de tránsito, así como para pistas para ciclistas, carriles de autobús, cruces peatonales. Mejora la comodidad y visibilidad del camino, siendo estos factores esenciales en la seguridad de una carretera.

Si hablamos del medio ambiente, las técnicas utilizadas con emulsiones asfálticas consumen pequeñas cantidades de agregado, preservando los recursos naturales. Por su parte, los tratamientos superficiales son rentables en su uso de materiales pétreos y ligantes. Si nos referimos al reciclaje, con emulsión es viable, ya que permite que los materiales del pavimento puedan ser reutilizados en el lugar, evitando tener que transportar agregados nuevos y retirar los existentes.

Las emulsiones, al ser empleadas a temperatura ambiente, no tienen la necesidad de calentar los agregados, por consecuencia, ahorran energía durante etapas de transporte, almacenamiento, manufactura y aplicación.

Las emulsiones tienen como resultado, superficies muy durables, limitando molestias causadas por múltiples trabajos que los usuarios no aprecian en lo particular.

La diversidad de técnicas que existen para emplear las emulsiones asfálticas, ofrecen un sin número de soluciones óptimas para los problemas de mantenimiento, ya sea mantenimiento correctivo, aplicando bacheo profundo o rejuvenecimiento de la carpeta de rodamiento, o mantenimiento preventivo, sirviendo como una protección a la carpeta o superficie de rodamiento, teniendo funciones de impermeabilización, de refuerzo a la estructura o un reperfilado del camino. Los materiales emulsionados, son soluciones ideales derivado de la flexibilidad con la que pueden ser manufacturados y tendidos.

Las emulsiones dan la ventaja de poder trabajar producciones pequeñas, en sitios de trabajo reducidos, grupos de trabajo pequeños, aprovechar la maquinaria o equipo local, sin necesidad de realizar tareas preliminares, sumando al hecho de que se pueden abrir nuevamente los carriles al tránsito son los principales factores para ser tomadas en cuenta.

Los ahorros económicos son significativos, principalmente cuando nos referimos a costos por mantenimiento. Existen ahorros en la energía por su naturaleza de no requerir calentamiento, el costo de los materiales y transportes es menor derivado a que las capas utilizadas son delgadas, requiriendo poca cantidad de agregado, y el reciclaje de los agregados el camino desgastado, generan un ahorro en costos de transporte. La maquinaria y mano de obra para el tendido son relativamente bajos, las carpetas al ser delgadas, permiten que la maquinaria ya lista en el sitio de obra, se mantenga en uso y mejore rendimientos, limitando los trabajos auxiliares. Finalmente, las emulsiones y mezclas asfálticas con emulsiones se pueden almacenar fácilmente, permitiendo un control del consumo, sin gastar de manera excesiva.

#### 2.4 MODIFICACION DE ASFALTOS

Las obras de infraestructura vial sufren una mayor exigencia cada día, derivado de las mayores cargas que deben soportar y las altas presiones de los neumáticos, provocando daños más rápido en los pavimentos, tales como la deformación plástica, deformación por fatiga, diferencias de temperatura, provocando desprendimiento de agregado pétreo. Ali (2002) menciona que en la actualidad el asfalto en su estado natural, no es adecuado para constituir un pavimento moderno, esta situación ha obligado a investigadores e ingenieros a modificar el asfalto para mejorar los rendimientos de las mezclas durante su vida útil. Por su parte Nurul (2002) hace referencia de que los asfaltos modificados tienen mejores características como lo son ser más estables bajo cargas pesadas, fuerzas

de frenado-aceleración y ser más resistentes a la deformación permanente en climas cálidos, presentar mayor resistencia a la fatiga y una mejor adhesión con los agregados pétreos.

Existen dos tipos de procedimientos para modificar asfalto, los métodos físicos y los métodos químicos, siendo los métodos físicos más sencillos y económicos, pues la estructura química no debe cambiarse, cambiando únicamente su composición y rendimientos, dando la responsabilidad a los polímeros de ser compatibles y de absorber y/o adsorber algunos constituyentes del asfalto. Durante la preparación de las soluciones jabonosas se pueden introducir aditivos, los cuales son productos químicos o minerales que modificarán una o más propiedades de los componentes de una emulsión, ya sea con la finalidad de ser espesantes, mejoradores de flujo, reductores de viscosidad entre otros. Por otra parte, existen los polímeros, los cuales son materiales orgánicos de naturaleza plástica o elastomérica, que van a modificar las propiedades reológicas del asfalto base.

Existen muchos polímeros que se emplean para modificar asfaltos, dentro de estos polímeros, Ali (2002) menciona que los cauchos son los más atractivos, además de tener un costo económico, mantienen las propiedades físicas y reológicas del asfalto constantes a diferentes temperaturas de servicio y condiciones de carga. Por lo tanto, se introdujeron muchos tipos de cauchos en asfalto como lo son PBR, SBR y SBS.

Takamura *et al.* (2008) concluyen que con SBR (látex) , se pueden reducir los problemas antes mencionados, mezclando SBR con el asfalto mediante una dispersión acuosa en dosificaciones del 1 al 3 % respecto al contenido de asfalto, creando una red elastomérica que mejorara las características de viscosidad del ligante sin volverlo rígido, resistencias a la deformación permanente, flexibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia al agua, proporcionando una mayor adhesión y generando menor pérdida de agregados pétreos, logrando de esta manera una mejora en la calidad y la durabilidad de la infraestructura vial.

El látex SBR se fabrica mediante la copolimerización del monómero de estireno duro y el monómero de butadieno blando. El butadieno contribuye a la elasticidad y hace que el ligante sea más flexible, mientras que el estireno proporciona rigidez y resistencia al material. La academia del asfalto (2007) menciona que los polímeros SBR mejoran la adhesión del aglutinante con el agregado. También proporciona una mejora en la elasticidad y flexibilidad del aglutinante y previene la entrada de agua en el pavimento.

## 2.5 EMULSIÓN ASFALTICA FUNCIONALIZADA

Ronald y Funes (2016) dice que las propiedades de las emulsiones asfálticas dependen de la formulación y el proceso de fabricación, y esta formulación de la emulsión depende a su vez de la aplicación final. Motivo por el cual, en la actualidad, se han desarrollado emulsiones con un propósito en particular, a estas emulsiones se les denomina emulsiones funcionalizadas, las cuales como se mencionó anteriormente, tienen una función específica. Por otra parte, una funcionalización desde el punto de vista químico es la modificación selectiva de la química superficial de los materiales, modificando su comportamiento físico-químico, viéndose alterada su reactividad, estabilidad y su estructura, por consiguiente, las aplicaciones para las que puede ser utilizado. En este trabajo de investigación, se pretende que la funcionalización sea respecto a largos periodos de almacenamiento, mejorar la trabajabilidad, además de tener un comportamiento adecuado bajo los factores que afectan al asfalto una vez puesto en servicio, la susceptibilidad térmica, el envejecimiento y la susceptibilidad a la humedad.

En búsqueda de tener nuevos materiales para la construcción, la industria ha ofertado una gran cantidad de nuevos productos, siendo el objetivo de esta investigación comprobar que las emulsiones asfálticas funcionalizadas, logran tener una cohesión y adhesividad igual o mayor que el resto de las emulsiones bajo condiciones de susceptibilidad térmica, susceptibilidad a la humedad y envejecimiento, considerando que, por sus características, ofrece mejoras en el

periodo de almacenamiento, contenido de asfalto y viscosidad, otorgando beneficios como ahorro económico y mejor trabajabilidad.

Derivado del desarrollo en la industria de los polímeros, se estableció el concepto de funcionalización de polímeros, Martinelli *et al.* (2003) lo definen como el proceso químico mediante el cual, se incorporan grupos funcionales reactivos a una cadena polimérica, los cuales otorgan a los polímeros diferente reactividad frente a distintos agentes e introducen nuevas propiedades o potencializan las ya existentes. Lo anterior, hace que materiales inertes, puedan ser funcionalizados adecuadamente y ser utilizados como adhesivos, la introducción de grupos funcionales puede servir como punto de anclaje de diferentes moléculas.

Una emulsión asfáltica funcionalizada según VIAKER (2017) se puede definir como un ligante asfáltico para producción de mezclas asfálticas en frío, con capacidad de almacenamiento de periodos prolongados y facilidad de producción a cualquier escala, siendo apta para cualquier tipo de proyecto. Por su parte las obras de baja inversión son aquellas obras en las cuales no es adecuado el acarreo de materiales o el traslado de plantas de producción de mezcla asfáltica en caliente, originado por la ubicación del proyecto y las distancias que pueden representar distancias grandes para acarreo de materiales. Viaker propone una granulometría para mezclas en frío la cual se ilustra en la tabla 3.

**Tabla 4 Granulometría propuesta por VIAKER, para emulsiones funcionalizadas.**

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura (mm)	Designación (plg)	
19	3/4	---
12.5	1/2	100
9.5	3/8	95-100
4.75	N°4	28-35
2.36	N°8	13-18
1.18	N°16	8-12
0.6	N°30	3-7
0.3	N°50	3
0.15	N°100	0
0.075	N°200	0-2

Fuente: VIAKER (2017).

## 2.6 METODOLOGÍAS DE CARACTERIZACIÓN DE ASFALTOS

Las últimas décadas, en México se ha apostado por invertir en el desarrollo y producción de tecnologías aplicadas al asfalto. Dentro de este desarrollo, las vías terrestres se han visto favorecidas con nuevos productos y materiales aplicables para la construcción de pavimentos, principalmente nuevos cementos asfálticos, productos modificadores y demás productos aplicables. Motivo por el cual, encontramos que es necesario tener una buena caracterización de los mismos, para emplearlos adecuadamente acorde a las condiciones particulares de cada uno de los proyectos en los cuales son requeridos.

Existen diferentes metodologías de diseño para mezclas asfálticas, tales como la metodología SUPERPAVE o la metodología Marshall, sin embargo, una gran diferencia entre estas metodologías es que el método propuesto por Bruce Marshall está enfocado únicamente en diseño de mezclas asfálticas en caliente, formando un criterio que abarca la densidad de la mezcla, la estabilidad y el flujo, pero no incluye nada respecto a las propiedades de los agregados pétreos, ni de las propiedades de los ligantes, siendo este último parámetro la finalidad de este capítulo, a diferencia de las metodologías que a continuación se mencionan. Por su parte, los ensayos que comúnmente se realizan para determinar las propiedades de los asfaltos, son el ensayo de viscosidad y el ensayo de penetración, siendo estos insuficientes para determinar el comportamiento que tendrá un ligante asfáltico, lo anterior conociendo que la viscosidad es un indicador del flujo, sin embargo, no nos proporciona información del comportamiento a bajas temperaturas, sólo del comportamiento viscoso a altas temperaturas. Por su parte la penetración describe la consistencia a temperatura media, refiriéndonos a 25°C, quedando muchas interrogantes sobre el comportamiento en la vida útil de los ligantes.

#### 2.6.1 METODOLOGÍA SUPERPAVE

El programa SUPERPAVE, del Instituto del Asfalto (1994) presenta un sistema cuyo objetivo es desarrollar nuevos criterios y mecanismos para evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas, siendo parámetros las roderas o deformaciones permanentes, fisuración por fatiga, fisuración térmica y envejecimiento, correlacionando con los distintos tipos de falla con el comportamiento de la mezcla. Esta metodología evalúa los componentes de las mezclas asfálticas de manera individual y su interacción cuando constituyen la mezcla asfáltica.

SUPERPAVE propuso ensayos para para la caracterización de los ligantes, midiendo las propiedades físicas que se pueden relacionar con el desempeño puesto en servicio. De igual manera las pruebas determinadas, demandan que el ligante sea llevado a temperaturas a las que se encontrará expuesto. Uno de los

principios de la metodología es que los ligantes son sometidos a tres etapas que representan la vida de un ligante. La primera etapa se centra en la transportación, almacenamiento y manejo del ligante, la segunda etapa busca evaluar los efectos que sufre el ligante durante la producción de la mezcla y el procedimiento constructivo; y la tercera etapa evalúa el envejecimiento del ligante desde que es colocado en servicio hasta el fin de su vida útil.

Las etapas descritas anteriormente son consideradas en los ensayos que se muestran en la tabla 4.

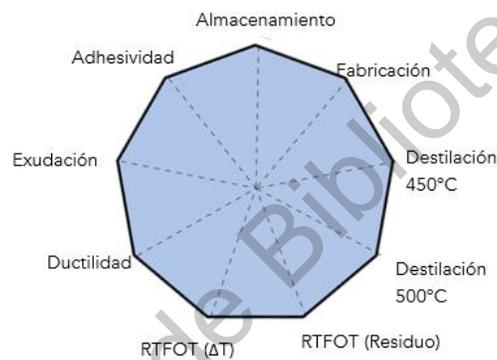
**Tabla 5 Ensayos propuestos por SUPERPAVE**

Procedimiento	Objetivo
Reómetro de Corte Directo (DSR)	Medir propiedades a temperaturas altas e intermedias
Viscosímetro Rotativo (VR)	Medir propiedades a altas temperaturas
Reómetro de Viga a Flexión (BBR) Ensayo de Tracción Directa (DDT)	Medir propiedades a bajas temperaturas
Horno Rotativo de Película Delgada (RTFO)	Simular el endurecimiento durante la etapa constructiva
Cámara de Envejecimiento a Presión (PAV)	Simular el envejecimiento durante la vida útil

Fuente: Elaboración propia

## 2.6.2 METODOLOGÍA QUALAGON

La compañía SHELL propone un método basado en seis ensayos a los cementos asfálticos y tres ensayos a la mezcla asfáltica. Harrison (1990) y Giorgetti y Simoncelli (1990) describen que estas nueve pruebas conforman un polígono de nueve lados, en los cuales se indica la escala para cada uno de los ensayos. El procedimiento es simple, si el ligante tiene propiedades que queden por fuera del polígono, el cemento asfáltico es catalogado que presentará fallas cuando sea utilizado y puesto en servicio. En la figura 14 observamos el polígono propuesto por el método QUALAGON para caracterizar los cementos asfálticos.



**Figura 14 Método QUALAGON.**

Fuente: Elaboración propia

Esta metodología de caracterización de ligantes, considera pruebas para la mezcla, pretendiendo evaluar la cohesión mediante una prueba Marshall antes y después de inmersión al agua, almacenamiento de mezcla en caliente, y trabajabilidad de la misma. Para los ligantes considera evaluar la evaporación a través de la destilación a 450°C y la destilación a 500°C. La durabilidad plantea evaluarla a través de RTFOT del residuo asfáltico y con incremento de temperatura. La homogeneidad se caracteriza por la exudación y por la ductilidad a baja temperatura. Si analizamos lo anterior, observamos que tiene un planteamiento a altas y bajas temperaturas. Además de buscar representar las propiedades que considera esenciales como es la homogeneidad, cohesión, adhesividad y durabilidad.

La exudación tal como lo menciona Miro (1994) es un indicador representativo del estado y condición química de un ligante, para lo cual Shell desarrollo un ensayo denominado EDT, “Exudation Droplet Test” especificado en la SMS2697 o bien conocido como ensayo de exudación, en el cual en la mezcla asfáltica se considera la separación y migración de aceites ligeros de los agregados. Mientras menor sea la exudación, mayor cohesión y adhesividad presentará la mezcla. Otra medida para medir la cohesión de un ligante propuesta por Shell es el ensayo de ductilidad a baja temperatura, el cual denomina LTD “Low Temperature Ductility” normado en la ASTM D 113. Esta metodología, hace referencia que, a una cohesión pobre, la ductilidad a baja temperatura será débil.

La metodología Qualagon hace referencia a la adhesión como una propiedad importante, Harrison (1990) menciona que esta es la capacidad de un ligante a agarrarse a los agregados, inclusive a acciones de desenvuelta por agua. Para esto se propuso el procedimiento de ensayo Marshall RMT “Retained Marshall Test” el cual se especifica en la ASTM D 1559. Analizando probetas por estabilidad antes y posterior a inmersión.

El envejecimiento es medido a través del ensayo RTFOT “Rolling Thin Film Oven Test” que se indica en la ASTM D 2872. De igual modo la destilación simulada la evalúa con una variante del RTFOT, siendo una variación en la masa de envejecimiento, denominando al ensaye TBP-GLC “True Boiling Point Chromatography” en el cual se verifican las pérdidas de masa producidas durante el mezclado y la formación eventual de un “humo azul” durante la operación, previendo el envejecimiento resultante por volatización de fracciones ligeras. Posterior a lo anterior Harrison (1990) comenta que para caracterizar la curva de volatización se deben considerar las fracciones de masa evaluadas a 450 y 500°C.

### 2.6.3 METODOLOGÍA UCL®

El laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, propone un método directo y sencillo, evaluando las propiedades de un ligante asfáltico, lo anterior en un punto de vista de su utilización en carreteras, dejando de lado la composición química y viscosidad, tomando en cuenta el poder aglomerante que presente el ligante ante la susceptibilidad térmica, adhesividad en presencia de agua y envejecimiento producido por oxidación provocada por el calor, aire y acción de rayos ultravioleta, tal como lo describe Miró (1994). Alarcón *et al.* (2017) y Fonseca *et al.* (1999) coinciden que este método tiene como ventaja que el equipo necesario, comparado con la metodología Superpave, es mínima, pues solo será necesario contar con equipo para realizar el ensayo Cántabro, acondicionando bajo ciertas características las probetas, acorde al parámetro que deseamos evaluar.

El ensayo Cántabro de pérdida por desgaste, consiste en introducir una probeta Marshall a la máquina, y ensayarla sin ninguna carga abrasiva. Lo anterior ocasiona que se desprendan por impacto y abrasión los agregados pétreos más superficiales de la probeta, siendo factible determinar la pérdida de peso de la probeta al final de las revoluciones. Este ensayo no determina propiedades fundamentales de la mezcla, pues no es el objetivo, pero si determina la capacidad del ligante para mantener unidos los agregados pétreos que conforman la mezcla. Sometiéndolos en un procedimiento que varía la temperatura, la acción del agua y el envejecimiento del ligante, tomando como parámetro principal, la cohesión del mismo. Dicho parámetro es calculado mediante las pérdidas al Cántabro, cuya ecuación se ilustra a continuación en la ecuación 1.

$$P_c = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

**Ecuación 5**

Dónde:

Pc: Pérdidas al Cántabro

Pi: Peso inicial (gramos)

Pf: Peso final (gramos)

El ensayo Cántabro de pérdida por desgaste fue desarrollado como un procedimiento para valorar la cohesión de mezclas abiertas. Esta cohesión es proporcionada a la mezcla principalmente por la capa continua del ligante, que envuelve todas las partículas. No obstante, se sabe que hay otros factores y propiedades que influyen en la pérdida por desgaste, los cuales son: 1. Porcentaje de agregado fino 2. Granulometría del agregado fino 3. Tipo y naturaleza del agregado fino 4. Porcentaje de filler 5. Tipo y naturaleza de filler 6. Granulometría del agregado grueso 7. Tipo y naturaleza del agregado grueso 8. Porcentaje del ligante 9. Tipo y naturaleza del ligante 10. Temperatura del ensayo.

Si las probetas a evaluar se fabrican únicamente con agregado grueso y ligante, se pueden restar los primeros 5 puntos, siendo los referentes a la fracción fina y filler. Por su parte, si ese agregado grueso, se mantiene constante en su granulometría, tipo y naturaleza, y mantenemos constante el porcentaje de ligante en la fabricación de las probetas restamos los puntos 6, 7 y 8 de la lista de propiedades y factores que influyen en la pérdida por desgaste. Finalmente, la temperatura a la que se ensayarán todas las probetas será constante, quedando como la única variable, el tipo y naturaleza del ligante. De este modo, si comparamos los resultados obtenidos, en medida de la resistencia por desgaste de probetas fabricadas con el mismo tipo de mezcla, pero utilizando ligantes diferentes, la diferencia en los resultados será únicamente por las diferentes características de los ligantes.

Para realizar las probetas, se determina una mezcla patrón, son necesarios agregados pétreos sanos y limpios, con un desgaste de Los Ángeles inferior a 25%,

absorción inicial inferior a 1.5%. Las granulometrías establecidas y siguiendo el procedimiento Marshall empleando para su compactación 50 golpes por cara. Los agregados pétreos empleados para la fabricación de las probetas son 1000 gramos con un porcentaje de asfalto del 4.5% sobre el agregado.

En la figura 15 podemos observar los principales parámetros que evalúa el método Universal de Clasificación de Ligantes.

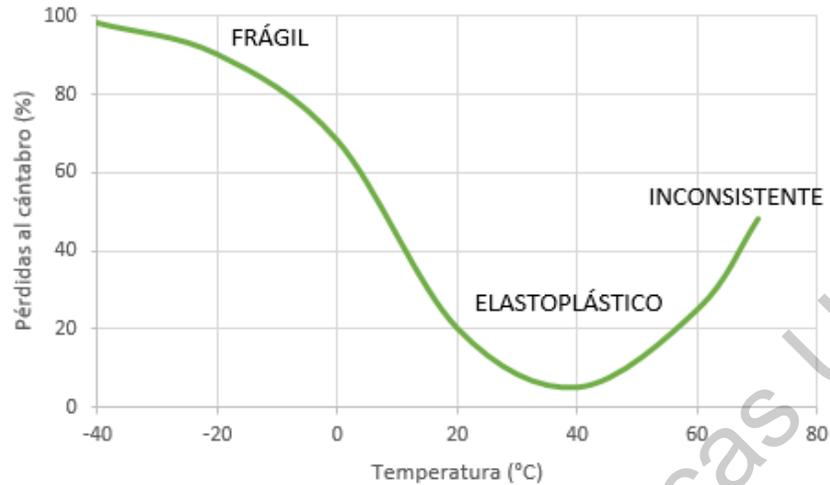


**Figura 15 Metodología Universal de Clasificación de Ligantes**

Fuente: Elaboración propia

La cohesión que un ligante proporciona, se puede determinar mediante las pérdidas por desgaste a una temperatura determinada. Cuanto mayor sea la cohesión, es mayor la resistencia a la disgregación y serán menores las pérdidas por desgaste.

La curva de estado del ligante, figura 16, nos permite valorar la variación del comportamiento de los ligantes con la temperatura, como lo exponen Pérez y Miró (2002, C), los ligantes ponen en manifiesto su comportamiento frágil a temperaturas bajas, presentando altas pérdidas por desgaste, su comportamiento visco-elástico a temperaturas medias, presentando bajas pérdidas por desgaste y su comportamiento inconsistente a altas temperaturas, presentando un incremento en las pérdidas por desgaste. Mientras más tendida sea la curva de estado, el ligante será menos susceptible a la temperatura, por el contrario, será más susceptible mientras la curva sea más cóncava.



**Figura 16 Curva de estado de un ligante**

Fuente: Elaboración propia

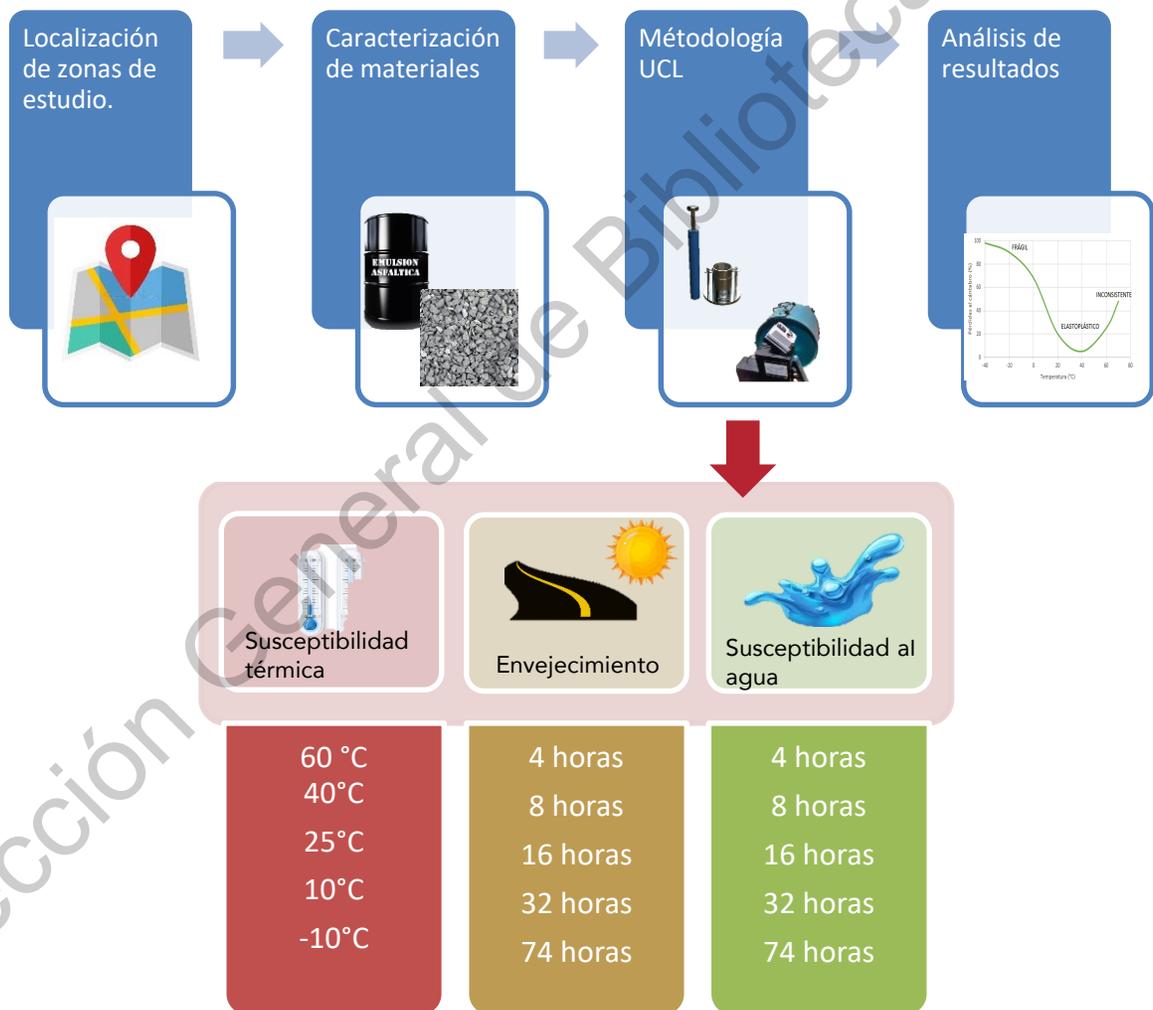
Lo referente a la adhesividad, es necesario mencionar que es una relación entre el ligante y el agregado, así como lo describen Pérez y Miró (2002, A), la cual se ve expuesta por el fenómeno de desenvuelta por agua, donde el ligante se separa del agregado pétreo, disminuyendo la cohesión que el ligante proporciona a la mezcla. Esto se puede determinar, al someter al ensayo Cántabro probetas en seco y tras inmersión de la mezcla en agua, relacionando las pérdidas directamente con la adhesividad del ligante con el agregado. Mientras las pérdidas por desgaste se incrementen, la adhesividad será mala, y viceversa.

El fenómeno de envejecimiento Pérez y Miró (2002, B) afirman que se puede simular y acelerar en laboratorio, evaporando los compuestos volátiles y sometiendo las probetas a reacciones de oxidación, provocando endurecimiento del ligante, volviéndolo más frágil. A mayor envejecimiento mayores serán las pérdidas por desgaste. La resistencia al envejecimiento por acción de rayos ultravioleta y agentes atmosféricos como aire, calor, agua, es una propiedad relacionada directamente con su durabilidad.

### 3. METODOLOGÍA

El desarrollo de la investigación es para demostrar que las emulsiones asfálticas funcionalizadas, son una alternativa económica y amigable con el medio ambiente, que superarán las propiedades de adhesión y cohesión de una emulsión asfáltica convencional, bajo efectos de susceptibilidad térmica, susceptibilidad a la humedad y envejecimiento.

Para lograr el objetivo planteado, a continuación, en la figura 17, se enlistan los pasos siguiendo un proceso lógico de las actividades a seguir:



**Figura 17 Representación esquemática de la metodología**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1 Localización de las zonas de estudio.

La finalidad de localizar las zonas de estudio desde un inicio, fue caracterizar el material con el que se trabajó, realizando las probetas de mezcla asfáltica con materiales representativos y caracterizados previamente.

### 3.2 Caracterización de los materiales.

En esta parte de la metodología se analizaron y caracterizaron tanto los agregados pétreos con los que se realizará la mezcla asfáltica en frío, así como la emulsión asfáltica funcionalizada, emulsión asfáltica funcionalizada con un año de almacenamiento y emulsión superestable. Dejando en claro que los agregados pétreos se mantendrán constantes y no son una variable en la experimentación.

#### 3.2.1 Caracterización del agregado

Teniendo una muestra de los agregados pétreos que van a ser utilizados para este trabajo de investigación se determinaron características como su granulometría, densidades relativas y absorción de los materiales, equivalente de arena, por mencionar algunas pruebas para su caracterización, verificando que estén dentro de los parámetros establecidos por la normativa N-CMT-4-04/17 Características de los materiales pétreos para mezclas asfálticas, además de tomar en cuenta las consideraciones establecidas en el Protocolo AMAAC 2013, así como en la normativa ASTM y AASHTO.

#### 3.2.2 Evaluación de la emulsión

Se realizaron pruebas a la emulsión funcionalizada para determinar sus propiedades, para lo cual se realizaron las siguientes pruebas: Contenido de cemento asfáltico 204°C, Viscosidad Saybolt Furol 25°C, Asentamiento a 5 días, tomando en cuenta la normativa N-CMT-4-05-002/06 Calidad de materiales

asfálticos modificados. De igual manera se considerará lo establecido en el Protocolo AMAAC 2013 y los parámetros que establece la ASTM.

### 3.3 Metodología UCL®

Como se mencionó anteriormente la metodología UCL® sirve para caracterizar ligantes asfálticos. Motivo por el cual se empleó en este proyecto de investigación con la finalidad de tener una comparativa de una emulsión funcionalizada con otra emulsión convencional.

Se evaluaron las propiedades del ligante, a través de la cohesión, proporcionando a una mezcla patrón variaciones, por efecto de la temperatura y analizando los esfuerzos abrasivos del tráfico. En la tabla 5 se describen las probetas a ensayar por cada uno de los fenómenos y sus variables, indicando el acondicionamiento que se les dio a las probetas para simular los fenómenos de envejecimiento, susceptibilidad térmica y susceptibilidad a la humedad. Teniendo 3 probetas para cada una de las distintas variables, siendo esto para cada uno de los distintos ligantes evaluados.

#### 3.3.1 Susceptibilidad térmica

Las bajas temperaturas proporcionan uniones por el ligante frágiles, y la mezcla pierde tenacidad, por otra parte, las altas temperaturas debilitan las uniones.

#### 3.3.2 Envejecimiento

La acción de aire y calor, rayos ultravioletas, provocan que el ligante se oxide y envejece, siendo más duro y frágil.

#### 3.3.3 Susceptibilidad al efecto del agua

La presencia de agua, hace necesario medir la resistencia a la desenvuelta de los agregados pétreos por los efectos que provoca.

**Tabla 6 Probetas a evaluar.**

<b>Fenómeno</b>	<b>Variables</b>					<b>Probetas</b>
Susceptibilidad térmica	-10°C	10°C	25°C	40°C	60°C	15
	3	3	3	3	3	
Susceptibilidad a la humedad	4 hora	8 horas	16 horas	32 horas	74 horas	15
	3	3	3	3	3	
Envejecimiento	4 hora	8 horas	16 horas	32 horas	74 horas	15
	3	3	3	3	3	
Respaldo						5
					Total de probetas	50

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.3.4 Ensayo Cántabro

Consiste en colocar la probeta en la máquina de Los Ángeles aplicarles 300 giros, el valor de desgaste es la diferencia en masa de las muestras. Apegado a la normativa NLT – 352, la cual describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación del valor de la pérdida por desgaste de las mezclas asfálticas empleando la máquina de Los Ángeles. El procedimiento puede emplearse tanto en el proyecto de mezclas en laboratorio como para su control en obra.

El ensayo permite valorar empíricamente la resistencia a la disgregación de la mezcla, ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tráfico.

#### Equipo

Equipo de compactación. Formado por el molde, collar, placa de base y pisón de compactación, empleados en la norma NLT-159, "Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall".

Máquina de Los Ángeles. La máquina para el ensayo de desgaste de Los Ángeles tendrá las características indicadas en la norma NLT-149 "Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina de Los Ángeles".

Balanzas. Una balanza de 2 kg de campo de pesada y 0,1 g de sensibilidad para pesar las probetas y otra de 5 kg de campo de pesada y 1 g de sensibilidad para la preparación de las mezclas.

Cámara termostática. Para mantener constante la temperatura durante el ensayo, se deberá disponer de una cámara o recinto capaz de alojar la máquina de Los Ángeles, y en la que la temperatura de ensayo pueda regularse con un error máximo de  $\pm 1$  °C.

Material general. Bandejas, cazos, espátulas, guantes termoaislantes, lápices grasos, cogedores curvos, discos de papel de filtro, etc.

#### Procedimiento

##### Preparación de las probetas

Número de probetas. Se prepara un mínimo de tres probetas para cada variante a acondicionar dentro de los parámetros establecidos a ensayar.

Preparación de los agregados. Las distintas fracciones de agregados pétreos que componen la mezcla se secan en estufa hasta masa constante a una temperatura de 105 a 110 °C.

Temperaturas de mezcla y compactación. Las temperaturas de la emulsión asfáltica en la mezcla y compactación de las probetas, serán las adecuadas para hacer compatible una buena dispersión y cubrimiento, sin que se produzca escurrimiento.

Preparación de mezclas. Se pesan sucesivamente en una charola de tara conocida las cantidades de cada fracción de los agregados necesarias para la fabricación de una probeta, de tal modo que la cantidad total de áridos sea de unos 1,000 g. El

resto del proceso de preparación coincide con el indicado en la norma NLT-159 para la fabricación de las probetas Marshall.

Compactación de las mezclas. La energía de compactación será de 50 golpes por cada cara, empleando el equipo y procedimiento de compactación descritos en la norma NLT-159.

#### Realización del ensayo Cántabro

En general, la temperatura de ensayo estará comprendida entre 15 y 30 °C, con una tolerancia máxima de  $\pm 1$  °C.

Se determina la masa de cada probeta con aproximación de 0,1 g y se anota este valor, P Antes de ensayarlas, las probetas se mantienen a la temperatura de ensayo un mínimo de seis horas.

Se introduce a continuación una probeta en el tambor rotatorio de la máquina de Los Ángeles y, sin la carga abrasiva de las bolas, se hace girar el tambor a la misma velocidad normalizada en la NLT-149 de 3,1 a 3,5 rad/s (30 a 33 rpm), durante 300 vueltas.

Al final del ensayo, se saca la probeta y se pesa de nuevo con la misma aproximación de 0,1 g, anotando este valor como P2.

El ensayo se repite de forma idéntica con cada una de las probetas análogas preparadas según 3.1.

#### Resultados

Se calcula el resultado del ensayo de pérdida por desgaste para cada probeta ensayada, mediante la ecuación 1 cuya expresión es la siguiente:

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} 100$$

**Ecuación 6**

Donde:

P: valor de la pérdida por desgaste, en %.

P1: masa inicial de la probeta, en gramos.

P2: masa final de la probeta, en gramos.

Se calcula el valor medio de todas las probetas análogas ensayadas. En el resultado se incluirá la pérdida media por desgaste y la temperatura de ensayo.

### 3.4 Análisis de resultados

En esta parte de la investigación, se analizaron los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados.

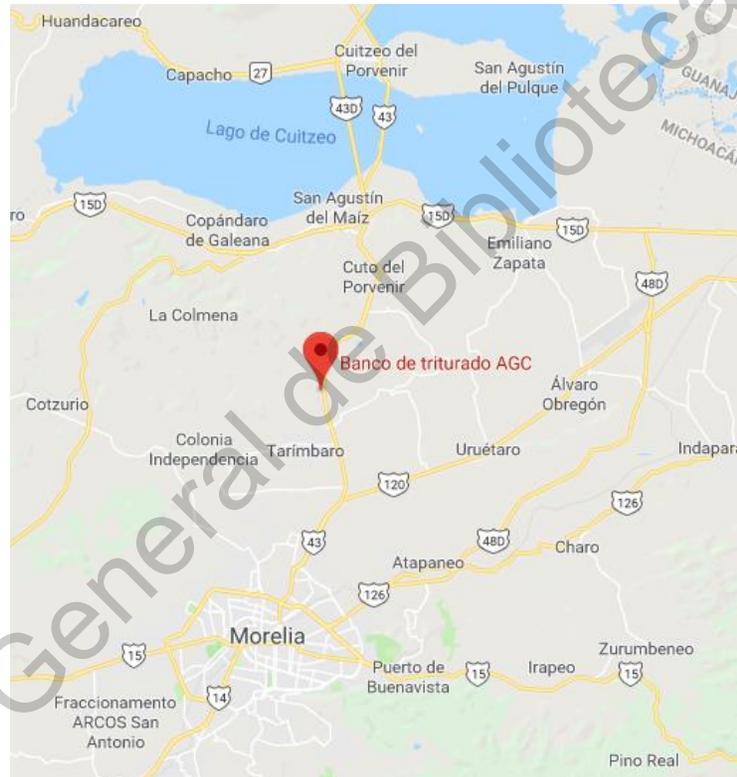
#### 3.4.1 Análisis de comportamiento

Se realizaron las comparativas de los ligantes o emulsiones asfálticas respecto al desempeño que mostraron bajo las condiciones planteadas, tales como susceptibilidad térmica, envejecimiento y susceptibilidad a la humedad. Obteniendo conclusiones del comportamiento para cada uno de estos casos y las diferencias entre ellos.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Localización de las zonas de estudio

Para este proyecto de investigación se utilizaron agregados pétreos del banco de nombre “Banco de triturado AGC”. Ubicado en la carretera Morelia Salamanca carretera Federal 43 en el municipio de Mesón Nuevo, Michoacán. Entre los municipios de Cuto del Porvenir y Tarímbaro. La anterior ubicación se ilustra en la figura 18.



**Figura 18 Ubicación de Banco de triturado AGC**

Fuente: Google Maps

## 4.2 Caracterización de los materiales

### 4.2.1 Caracterización del agregado de Michoacán "M"

Granulometría gruesa, en la tabla 6 se ilustran los resultados obtenidos en la prueba de granulometría de la fracción gruesa del agregado pétreo, desde los  $\frac{3}{4}$ " a la malla N°4.

**Tabla 7 Granulometría del grueso, Banco de triturado AGC**

Malla	Prueba No. 1			Prueba No.2			Media de las Pruebas	Desviación estándar
	Retenido parcial (g)	Total (g)	% Que pasa	Retenido parcial (g)	Total (g)	% Que pasa		
3/4"	963.1	2125	68.8%	963.1	2125	68.81%	68.8%	0.0000
1/2"	1441.9	683.1	22.1%	1441.9	683.1	22.1%	22.1%	0.0000
3/8"	617.4	65.7	2.1%	617.4	65.7	2.1%	2.1%	0.0000
1/4"	52.2			52.2				
No. 4	1.6	64.1	2.1%	1.6	64.1	2.1%	2.1%	0.0000
Pasa No. 4	11.4			11.4				
SUMA:	3088.1			3088.1				
Error:	0.5			0.5				
No. 8	11.4	0	0.0%	11.4	0	0.0%	0.0%	0.0000
No. 16	0	0	0.0%	0	0	0.0%	0.0%	0.0000
No. 30	0	0	0.0%	0	0	0.0%	0.0%	0.0000
No. 50	0	0	0.0%	0	0	0.0%	0.0%	0.0000
No. 100	0	0	0.0%	0	0	0.0%	0.0%	0.0000
No. 200	0	0	0.0%	0	0	0.0%	0.0%	0.0000
Pasa No. 200	0			0				
SUMA:	11.4			11.4				
ERROR:	0			0				
Error permisible:	2.2			2.2				

Fuente: Elaboración propia.

Granulometría del fino, en la tabla 7 se muestran los resultados de la granulometría de la fracción fina del agregado pétreo, obteniendo desde la malla N°4 a la malla N°200.

**Tabla 8 Granulometría del fino, Banco de triturado AGC**

Malla	Prueba No. 1			Prueba No.2			Media de	
	Retenido parcial (g)	Total (g)	% Que pasa	Retenido parcial (g)	Total (g)	% Que pasa	las Pruebas	Desviación estándar
No. 4	2.9	403.4	99.3%	2.9	403.4	99.29%	99.3%	0.0000
No. 8	131.6	271.8	66.9%	131.6	271.8	66.9%	66.9%	0.0000
No. 16	175	96.8	23.8%	175	96.8	23.8%	23.8%	0.0000
No. 30	61.5	35.3	8.7%	61.5	35.3	8.7%	8.7%	0.0000
No. 50	18.1	17.2	4.23%	18.1	17.2	4.23%	4.2%	0.0000
No. 100	9.7	7.5	1.85%	9.7	7.5	1.85%	1.8%	0.0000
No. 200	7	0.5	0.12%	7	0.5	0.12%	0.1%	0.0000
Pasa No. 200	0.1			0.1				
SUMA:	406.3			406.3				
ERROR:	0.4			0.4				
Error permisible:	1.6			1.8				

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados anteriores y respecto a la normativa M-MMP-4-04-002/02 “Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas” y respecto al Protocolo AMAAC 2013, se concluye que el agregado cumple con los requisitos planteados acorde a la calidad del agregado pétreo por granulometría. Lo cual se puede observar en la tabla 6 y tabla 7.

Desgaste de los Ángeles

**Tabla 9 Desgaste de los ángeles ,Banco de triturado AGC**

<b>Prueba No.</b>	<b>1</b>
Tipo de Granulometría	C
Carga Abrasiva	
No. Esferas	9
Masa inicial de la muestra, g (1)	5000.3
Masa final de la muestra, g (2)	4476.5
%Desgaste	10.48%

Fuente: Elaboración propia.

En lo referente a la normativa M-MMP-4-04-006/02 “Desgaste mediante la prueba de los Ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas” el porcentaje de desgaste cumple con lo estipulado y la tabla 8.

Densidad y absorción del grueso

**Tabla 10 Densidad y absorción del grueso Banco de triturado AGC**

<b>Prueba No.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>		
Masa del contenedor				
Masa al aire del contenedor + mat en SSS	3087	3087		
Masa aparente sumergida del material	1934	1934		
Masa al aire del contenedor + material seco	3022.2	3022.2	<b>Promedio</b>	<b>Desviación Est.</b>
Densidad Secada al horno	2.621	2.621	2.621	0.000
Densidad sat. Sup. Seca	2.677	2.677	2.677	0.000
Densidad aparente	2.777	2.777	2.777	0.000
Absorción	2%	2.1%	2.14%	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Densidad y absorción del fino

**Tabla 11 Densidad y absorción del fino, Banco de triturado AGC**

<b>Prueba No.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>		
Masa del espécimen en SSS	500.1	500.1		
Masa del espécimen + picnómetro + agua	946.8	946.8		
Masa del picnómetro + agua	635.3	635.3		
				<b>Desviación</b>
Masa del espécimen seco	496.7	496.7	<b>Promedio</b>	<b>Est.</b>
Densidad Secada al horno	2.634	2.634	2.634	0.000
Densidad sat. Sup. Seca	2.652	2.652	2.652	0.000
Densidad aparente	2.682	2.682	2.682	0.000
Absorción	1%	0.7%	0.68%	0.000

Fuente: Elaboración propia.

La normativa “Densidades relativas y de absorción de materiales pétreos para mezclas asfálticas” es la M-MMP-4-04-003/18 y M-MMP-4-04-003/02. Encontrando valores dentro de la mismas, los obtenidos en los ensayos y mostrados en las tablas 9 y 10.

Equivalente de arena

**Tabla 12 Equivalente de arena, Banco de triturado AGC**

<b>Prueba No.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Lectura de arcilla	5.9	6	5.7
Lectura de arcilla	3.8	3.7	3.6
Eq. De Arena	64%	62%	63%
Media		63.08%	
Desviación			
Estándar		0.01	

Fuente: Elaboración propia.

Lo referente a equivalente de arena lo encontramos en la normativa M-MMP-4-04-004/16. Revisando la normativa encontramos que los resultados obtenidos son satisfactorios, mostrados en la tabla 11.

Resumen de las características de agregado

**Tabla 13 Caracterización del agregado Banco de triturado AGC**

Propiedad física	Norma	Arena	Grava	Especificación protocolo AMAAC 2013
Gravedad Específica bruta, Gsb		2.652	2.677	> 2.4
Gravedad Específica Aparente, Gsa	ASTM C 127			
	ASTM C 128	2.682	2.777	-
Absorción, %		0.68%	2.14%	-
Agregado fino				
Equivalente de Arena %	ASTM D 2419	63.08%	-	50% mín.
Agregado grueso				
Desgaste de Los Ángeles, %	ASTM C 131	-	10.48%	30% máx.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 12, encontramos un resumen de la caracterización del agregado pétreo obtenido en el banco de triturado AGC en Michoacán. Observando que cumple de manera satisfactoria, la igual que con la normativa nacional con las estipuladas en la tabla 12 referentes a ASTM.

Es necesario mencionar, que, para este trabajo de investigación, no sé evaluó el comportamiento de la mezcla asfáltica, por el contrario, se evaluó únicamente el comportamiento de las emulsiones asfálticas, sus propiedades de comportamiento como la adhesividad y la cohesión, motivo por los cuales las propiedades medidas anteriormente tienen importancia, pero no alteran los resultados que se obtuvieron en la experimentación.

#### 4.2.2 Caracterización del ligante.

Para los ligantes, se utilizaron tres diferentes emulsiones asfálticas, con el fin de comparar el comportamiento de cada una de ellas al estar puestas en servicio. La primera emulsión a emplear es una emulsión funcionalizada. Esta emulsión es necesario mencionar, que derivado a que una de las ventajas que presentan las emulsiones funcionalizadas es largos periodos de almacenamiento, tiene un año almacenada, fue fabricada en junio del 2017. La segunda emulsión es una emulsión súper estable, a base de C31H con un PH 2 con una proporción de 10 kg/T de emulsificante. La tercera emulsión, es una emulsión funcionalizada de reciente fabricación, para comparar el comportamiento de una emulsión funcionalizada de fabricación reciente, con una emulsión funcionalizada de un año de almacenamiento. La emulsión funcionalizada se encuentra en proceso de patente, sin embargo, uno de los componentes de esta emulsión es SBR en bajas proporciones.

Los contenidos de asfalto obtenidos en cada una de las emulsiones los podemos encontrar en la tabla 13, en la cual podemos observar que la emulsión funcionalizada de un año de almacenamiento posee un contenido asfáltico ligeramente mayor comparado con la emulsión superestable. Sin embargo, la emulsión funcionalizada, muestra el contenido asfáltico más bajo.

**Tabla 14 Contenido de asfalto****Contenido de asfalto**

	<b>Emulsión funcionalizada (1 año)</b>	<b>Emulsión Superestable</b>	<b>Emulsión funcionalizada</b>
<b>Tara (grs)</b>	1.0488	1.0918	1.0399
<b>Peso Inicial (grs)</b>	3.1192	4.438	2.2687
<b>Peso Final (grs)</b>	3.0952	3.9992	2.4401
<b>Contenido :</b>	66.11%	65.51%	61.72%

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 14, podemos observar los resultados del ensaye asentamiento a 5 días. Los asentamientos en la emulsión superestable y la emulsión funcionalizada a un año de almacenamiento son parecidos, es necesario mencionar, que, a la hora de mezclar para reacondicionar la emulsión, fue más sencillo homogeneizar la emulsión funcionalizada que la emulsión superestable. Por su parte la nueva emulsión funcionalizada, posé un asentamiento mínimo, siendo una de sus principales ventajas respecto a las emulsiones convencionales.

**Tabla 15 Asentamiento a 5 días**

<b>Asentamiento a 5 días</b>			
	<b>Emulsión funcionalizada (1 año)</b>	<b>Emulsión Superestable</b>	<b>Emulsión funcionalizada</b>
		Superior	
<b>Tara (grs)</b>	1.0374	1.0496	1.043
<b>Peso Inicial (grs)</b>	4.9694	4.9404	4.7485
<b>Peso Final (grs)</b>	4.1181	4.213	3.9631
<b>Contenido :</b>	61.99%	64.03%	61.50%
		Inferior	
<b>Tara (grs)</b>	1.0391	1.0371	1.0484
<b>Peso Inicial (grs)</b>	5.324	6.283	7.9993
<b>Peso Final (grs)</b>	4.5955	5.2909	6.0302
<b>Contenido :</b>	66.80%	67.70%	62.28%
<b>Asentamiento:</b>	4.81%	3.67%	0.78%

Fuente: Elaboración propia.

El índice de ruptura, nos indica la estabilidad que tiene una emulsión, los resultados a esta prueba los podemos analizar en la tabla 15, en la cual observamos que la emulsión superestable, es la emulsión que requirió una mayor adhesión de finos para iniciar el fenómeno de ruptura de la emulsión.

**Tabla 16 Índice de ruptura**

	<b>Índice de ruptura</b>		
	<b>Emulsión funcionalizada (1 año)</b>	<b>Emulsión Superestable</b>	<b>Emulsión funcionalizada</b>
<b>Emulsión (grs)</b>	20.7	21.3	20.8
<b>Arena Sílica (grs)</b>	205.9	227.7	196.3
<b>Índice(gr arena/100 gr emulsión) :</b>	994.69	1069.01	943.75

Fuente: Elaboración propia.

La viscosidad es la resistencia que tienen los fluidos a desplazarse, la cual es medida por un viscosímetro de afluencia, contabilizando el tiempo en segundos, que tardan 50 ml de emulsión el pasar por un orificio de 10 mm. Los resultados los podemos observar en la tabla 16, observando que la emulsión funcionalizada es mucho más viscosa, presentando una buena trabajabilidad, de este modo asegurando una película más abundante de emulsión envolviendo el agregado.

**Tabla 17 Viscosidad**

	<b>Viscosidad</b>		
	<b>Emulsión funcionalizada (1 año)</b>	<b>Emulsión Superestable</b>	<b>Emulsión funcionalizada</b>
<b>Segundos</b>	169	53	178

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 17 podemos analizar el resumen de las propiedades medidas a las emulsiones asfálticas a comparar en esta experimentación.

**Tabla 18 Resumen de propiedades**

<b>Prueba</b>	<b>Emulsión funcionalizada (1 año)</b>	<b>Emulsión Superestable</b>	<b>Emulsión funcionalizada</b>
C.A. (%)	66.11%	65.51%	61.72%
Asentamiento (%)	4.81%	3.67%	0.78%
Índice de Ruptura (gr arena/100 gr emulsión)	994.69	1069.01	943.75
Viscosidad	169	53	178

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Metodología UCL®

#### 4.3.1 Fabricación de probetas

Para realizar las probetas, se determinó una mezcla patrón, siendo necesarios agregados pétreos sanos y limpios, la granulometría se mantuvo constante con un 80% de agrado que pasa la malla N° 4 y retiene la malla N°8 y el 20% faltante siendo agregado que pasa la malla N°8 y retiene la malla N°30. Los agregados pétreos empleados para la fabricación de las probetas son 1000 gramos con un porcentaje de asfalto del 4.5% sobre el agregado. Siguiendo el procedimiento Marshall empleando para su compactación 50 golpes por cara. Es necesario mencionar, que para cumplir los principios mencionados por la metodología UCL®, es necesario lavar la fracción de los agregados pétreos después de cribarlos, para eliminar la presencia de finos adheridos a la superficie del agregado. En la figura 19 se ilustran las probetas fabricadas.



**Figura 19. Muestra de las probetas fabricadas**

Fuente: Elaboración propia

Lo referente a la Susceptibilidad térmica, se acondicionaron las probetas por periodos de 4 horas en una cámara de temperatura u horno para ambientarlas a cada una de las variables. En cuanto a la susceptibilidad a la humedad, se sumergieron las probetas en baño maría a 60°C el periodo de tiempo que nos indica

la variable, esto con la finalidad de que sea progresiva la exposición a la humedad y evaluar el comportamiento del ligante, teniendo como ejemplo la figura 18. Del mismo modo que para la susceptibilidad a la humedad se realizó el envejecimiento, pero estas pastillas se someten a 163°C al horno, el cual debe contar con sistema de aireación para promover un envejecimiento acelerado. Como el asfalto a esa temperatura, tiende a disminuir su viscosidad, fue necesario protegerlas para evitar deformaciones, aplicando un cinturón de malla que permita la circulación del aire y unas tapas para evitar que se deforme, lo anterior se ve ejemplificado en la figura 20.



**Figura 20. Acondicionamiento para susceptibilidad a la humedad y envejecimiento**

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.2 Ensayo Cántabro

El Ensayo Cántabro nos permitió evaluar la cohesión que un ligante proporciona, se pudo determinar mediante las pérdidas por desgaste, cuanto mayor fue la cohesión, mayor la resistencia a la disgregación y menores las pérdidas por desgaste. Lo referente a la adhesividad, es necesario mencionar que es una relación entre el ligante y el agregado, la cual se vio expuesta por el fenómeno de desenvuelta por agua, donde el ligante se separa del agregado pétreo, disminuyendo la cohesión que el ligante proporciona a la mezcla. Mientras las

pérdidas por desgaste se incrementen, la adhesividad será mala y viceversa. El fenómeno de envejecimiento se puede simular y acelerar en laboratorio, evaporando los compuestos volátiles y sometiendo las probetas a reacciones de oxidación, provocando endurecimiento del ligante, volviéndolo más frágil. A mayor envejecimiento mayores fueron las pérdidas por desgaste. La resistencia al envejecimiento por acción de rayos ultravioleta y agentes atmosféricos como aire, calor, agua, es una propiedad relacionada directamente con su durabilidad. El Ensayo Cántabro obtuvo la comparativa de los ligantes, evaluando las pérdidas de masa de las probetas ensayadas en la máquina de desgaste de Los Ángeles, siendo ejemplificado en la figura 21.



**Figura 21 Probetas ensayadas al Cántabro**

Fuente: Elaboración propia

En las siguientes tablas 18, 19 y 20, encontraremos los resultados obtenidos al someter las probetas de las distintas emulsiones, a las variables experimentales de los distintos parámetros a evaluar, refiriéndonos a susceptibilidad térmica, susceptibilidad al agua y envejecimiento. Mostrando las pérdidas al Cántabro obtenidas por probeta y por promedio de las tres probetas acondicionadas para la misma variable.

**Tabla 19 Resultados con emulsión funcionalizada de 1 año de fabricación**

N° Probeta	Parámetro	Emulsión	Temp. De ensayo (°C)	Peso inicial (Kg)	Peso final (Kg)	% de pérdidas	Promedio	Desv. Est.
1	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	60	0.9089	0.1188	86.93%		
2	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	60	0.8781	0.1583	81.97%	84.45%	11.93%
3	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	60	0.9077	0.3246	64.24%		
4	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	40	0.9071	0.5760	36.50%		
9	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	40	0.9210	0.4273	53.60%	46.16%	8.76%
10	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	40	0.9171	0.4735	48.37%		
11	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	20	0.9364	0.5389	42.45%		
12	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	20	0.9324	0.3876	58.43%	38.76%	11.94%
13	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	20	0.9345	0.6067	35.08%		
14	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	10	0.9286	0.4309	53.60%		
15	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	10	0.9270	0.3429	63.01%	58.30%	14.78%
16	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	10	0.9298	0.1620	82.58%		
25	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	-10	0.9263	-	100.00%		
26	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	-10	0.9307	0.0104	98.88%	95.02%	7.69%
27	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada (1 año)	-10	0.9281	0.1284	86.17%		
28	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	1	0.9388	0.5661	39.70%		
29	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	1	0.9325	0.5851	37.25%	39.58%	2.27%
40	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	1	0.9344	0.5439	41.79%		

**Continuación Tabla 20 Resultados con emulsión funcionalizada de 1 año de fabricación**

41	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	8	0.9205	0.6091	33.83%		
42	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	8	0.9279	0.6204	33.14%	33.48%	8.92%
43	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	8	0.9237	0.4718	48.92%		
44	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	24	0.9349	0.4989	46.64%		
45	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	24	0.9316	0.4691	49.65%	46.28%	3.55%
46	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	24	0.9300	0.5341	42.57%		
55	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	36	0.9219	0.6219	32.54%		
56	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	36	0.9277	0.4852	47.70%	40.12%	9.59%
57	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	36	0.9293	0.4618	50.31%		
47	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	72	0.9177	0.3955	56.90%		
48	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	72	0.9153	0.4471	51.15%	53.77%	2.91%
49	Envejecimiento	Emulsión Funcionalizada (1 año)	72	0.9113	0.4261	53.24%		
58	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	4	0.9301	0.3111	66.55%		
59	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	4	0.9296	0.3817	58.94%	64.85%	5.27%
65	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	4	0.9279	0.2871	69.06%		
66	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	8	0.9274	0.1213	86.92%		
67	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	8	0.9234	0.0636	93.11%	89.18%	3.42%
68	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	8	0.9284	0.1159	87.52%		
69	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	16	0.9153	0.0086	99.06%		
75	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	16	1.0000	-	100.00%	99.69%	0.54%
76	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	16	1.0000	-	100.00%		

**Continuación Tabla 21 Resultados con emulsión funcionalizada de 1 año de fabricación**

77	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	32	0.9255	-	100.00%		
78	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	32	0.9231	-	100.00%	100.00%	0.00%
79	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	32	0.9205	-	100.00%		
85	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	74	0.9172	-	100.00%		
86	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	74	0.9212	-	100.00%	100.00%	0.00%
87	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada (1 año)	74	0.9142	-	100.00%		
98	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	4	0.9481	0.1235	86.97%		
99	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	4	0.9445	0.1378	85.41%	87.29%	2.05%
105	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	4	0.9524	0.1002	89.48%		
106	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	8	0.9394	0.2125	77.38%		
107	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	8	0.9401	0.1066	88.66%	82.78%	5.66%
108	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	8	0.9412	0.1665	82.31%		
109	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	16	0.9399	0.1344	85.70%		
115	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	16	0.9407	0.1032	89.03%	86.81%	1.92%
116	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	16	0.9418	0.1346	85.71%		
117	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	32	0.9478	0.0747	92.12%		
118	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	32	0.9432	0.0614	93.49%	92.26%	1.17%
119	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	32	0.9463	0.0836	91.17%		
95	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	74	0.9524	0.0159	98.33%		
96	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	74	0.9570	0.0203	97.88%	98.10%	2.90%
97	Inmersión	Emulsión Funcionalizada (1 año)	74	0.9438	0.0651	93.10%		

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 22 Resultados obtenidos con emulsión superestable**

N° Probeta	Parámetro	Emulsión	Temp. De ensayo (°C)	Peso inicial (Kg)	Peso final (Kg)	% de pérdidas	Promedio	Desv. Est.
5	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	60	0.8263	0.1328	83.93%	84.28%	2.36%
6	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	60	0.9462	0.1250	86.79%		
7	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	60	0.9025	0.1614	82.12%		
8	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	40	0.8942	0.5706	36.19%	35.86%	10.16%
17	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	40	0.9275	0.5979	35.54%		
18	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	40	0.9302	0.4330	53.45%		
19	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	20	0.9318	0.2426	73.96%	69.02%	4.85%
20	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	20	0.9304	0.2901	68.82%		
21	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	20	0.9338	0.3336	64.28%		
22	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	10	0.9312	0.3826	58.91%	55.72%	11.01%
23	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	10	0.9330	0.4430	52.52%		
24	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	10	0.9304	0.2423	73.96%		
30	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	-10	0.9310	-	100.00%	100.00%	0.00%
31	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	-10	0.9344	-	100.00%		
32	Susceptibilidad térmica	Emulsión Superestable	-10	0.9313	-	100.00%		
33	Envejecimiento	Emulsión Superestable	1	0.9322	0.7424	20.36%	27.33%	8.70%
34	Envejecimiento	Emulsión Superestable	1	0.9327	0.7039	24.53%		
35	Envejecimiento	Emulsión Superestable	1	0.9287	0.5843	37.08%		

**Continuación Tabla 23 Resultados obtenidos con emulsión superestable**

36	Envejecimiento	Emulsión Superestable	8	0.9270	0.5850	36.89%		
37	Envejecimiento	Emulsión Superestable	8	0.9317	0.6212	33.33%	33.78%	2.91%
38	Envejecimiento	Emulsión Superestable	8	0.9244	0.6366	31.13%		
39	Envejecimiento	Emulsión Superestable	24	0.9349	0.5551	40.62%		
50	Envejecimiento	Emulsión Superestable	24	0.9172	0.5197	43.34%	42.33%	1.48%
51	Envejecimiento	Emulsión Superestable	24	0.9348	0.5326	43.03%		
60	Envejecimiento	Emulsión Superestable	36	0.9242	0.6008	34.99%		
61	Envejecimiento	Emulsión Superestable	36	0.9279	0.5445	41.32%	38.16%	3.24%
62	Envejecimiento	Emulsión Superestable	36	0.9279	0.5629	39.34%		
52	Envejecimiento	Emulsión Superestable	72	0.9290	0.4311	53.60%		
53	Envejecimiento	Emulsión Superestable	72	0.9248	0.4511	51.22%	56.49%	7.17%
54	Envejecimiento	Emulsión Superestable	72	0.9365	0.3310	64.66%		
63	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	4	0.9266	0.1437	84.49%		
64	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	4	0.9267	0.3593	61.23%	71.98%	11.73%
70	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	4	0.9251	0.2756	70.21%		
71	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	8	0.9186	0.1005	89.06%		
72	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	8	0.9317	0.1300	86.05%	87.55%	3.51%
73	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	8	0.9218	0.0642	93.04%		
74	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	16	0.9262	-	100.00%		
80	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	16	0.9085	-	100.00%	98.73%	2.19%
81	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	16	0.9212	0.0350	96.20%		

**Continuación Tabla 24 Resultados obtenidos con emulsión superestable**

82	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	32	0.9218	-	100.00%		
83	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	32	0.9245	-	100.00%	100.00%	0.00%
84	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	32	0.9272	-	100.00%		
90	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	74	0.9147	-	100.00%		
91	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	74	0.9158	-	100.00%	100.00%	0.00%
92	Envejecimiento 163°C	Emulsión Superestable	74	0.9223	-	100.00%		
103	Inmersión	Emulsión Superestable	4	0.9472	0.0961	89.85%		
104	Inmersión	Emulsión Superestable	4	0.9551	0.1131	88.16%	88.36%	1.40%
110	Inmersión	Emulsión Superestable	4	0.9381	0.1212	87.08%		
111	Inmersión	Emulsión Superestable	8	0.9405	0.1978	78.97%		
112	Inmersión	Emulsión Superestable	8	0.9293	0.2917	68.61%	72.92%	5.39%
113	Inmersión	Emulsión Superestable	8	0.8422	0.2426	71.19%		
114	Inmersión	Emulsión Superestable	16	0.9395	0.2185	76.74%		
120	Inmersión	Emulsión Superestable	16	0.9396	0.1139	87.88%	82.08%	5.58%
121	Inmersión	Emulsión Superestable	16	0.9435	0.1734	81.62%		
122	Inmersión	Emulsión Superestable	32	0.9394	0.7634	18.74%		
123	Inmersión	Emulsión Superestable	32	0.9434	0.0531	94.37%	92.57%	2.55%
124	Inmersión	Emulsión Superestable	32	0.9471	0.0875	90.76%		
100	Inmersión	Emulsión Superestable	74	0.9483	0.0644	93.21%		
101	Inmersión	Emulsión Superestable	74	0.9513	0.0144	98.49%	96.21%	2.71%
102	Inmersión	Emulsión Superestable	74	0.9398	0.0289	96.92%		

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 25 Resultados obtenidos con emulsión funcionalizada**

N° Probeta	Parámetro	Emulsión	Temp. De ensayo (°C)	Peso inicial (Kg)	Peso final (Kg)	% de pérdidas	Promedio	Desv. Est.
125	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	60	0.9111	0.2228	75.55%		
126	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	60	0.9292	0.1580	83.00%	76.44%	6.16%
127	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	60	0.9311	0.2722	70.77%		
128	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	40	0.9319	0.5183	44.38%		
129	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	40	0.9269	0.5643	39.12%	41.75%	11.36%
130	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	40	0.9287	0.3632	60.89%		
131	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	20	0.9258	0.4151	55.16%		
132	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	20	0.9137	0.7757	15.10%	23.97%	20.07%
133	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	20	0.9303	0.6249	32.83%		
170	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	10	0.9355	0.5275	43.61%		
171	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	10	0.9338	0.5409	42.08%	48.33%	9.54%
172	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	10	0.9288	0.3779	59.31%		
137	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	-10	0.9303	0.0339	96.36%		
138	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	-10	0.9269	0.0795	91.42%	95.01%	3.14%
139	Susceptibilidad térmica	Emulsión Funcionalizada	-10	0.9294	0.0255	97.26%		
155	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	4	0.9287	0.4346	53.20%		
156	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	4	0.9300	0.3702	60.19%	59.19%	5.55%
157	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	4	0.9306	0.3335	64.16%		

**Continuación Tabla 26 Resultados obtenidos con emulsión funcionalizada**

158	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	8	0.9330	0.2988	67.97%		
159	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	8	0.9344	0.2051	78.05%	73.01%	8.52%
160	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	8	0.9323	0.1406	84.92%		
161	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	16	0.9238	0.0074	99.20%		
162	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	16	0.9290	0.1367	85.29%	94.83%	8.27%
163	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	16	0.9231	-	100.00%		
164	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	32	0.9278	-	100.00%		
165	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	32	0.9268	-	100.00%	100.00%	0.00%
166	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	32	0.9264	-	100.00%		
167	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	74	0.9211	-	100.00%		
168	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	74	0.9209	-	100.00%	100.00%	0.00%
169	Envejecimiento 163°C	Emulsión Funcionalizada	74	0.9176	-	100.00%		
140	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	4	0.9827	0.2134	78.28%		
141	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	4	0.9300	0.5794	37.70%	40.85%	21.84%
142	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	4	0.9306	0.5211	44.00%		
143	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	8	0.9330	0.5587	40.12%		
144	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	8	0.9344	0.5916	36.69%	38.54%	1.73%
145	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	8	0.9323	0.5705	38.81%		
173	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	16	0.9412	0.6283	33.24%		
174	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	16	0.9408	0.5107	45.72%	39.48%	8.82%
-	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	16	-	-	-		

**Continuación Tabla 27 Resultados obtenidos con emulsión funcionalizada**

149	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	32	0.9285	0.6198	33.25%		
150	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	32	0.9406	0.3889	58.65%	56.39%	22.10%
151	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	32	0.9390	0.2135	77.26%		
152	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	74	0.9333	0.2359	74.72%		
153	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	74	0.9343	0.2030	78.27%	76.50%	9.12%
154	Inmersión	Emulsión Funcionalizada	74	0.9435	0.0756	91.99%		

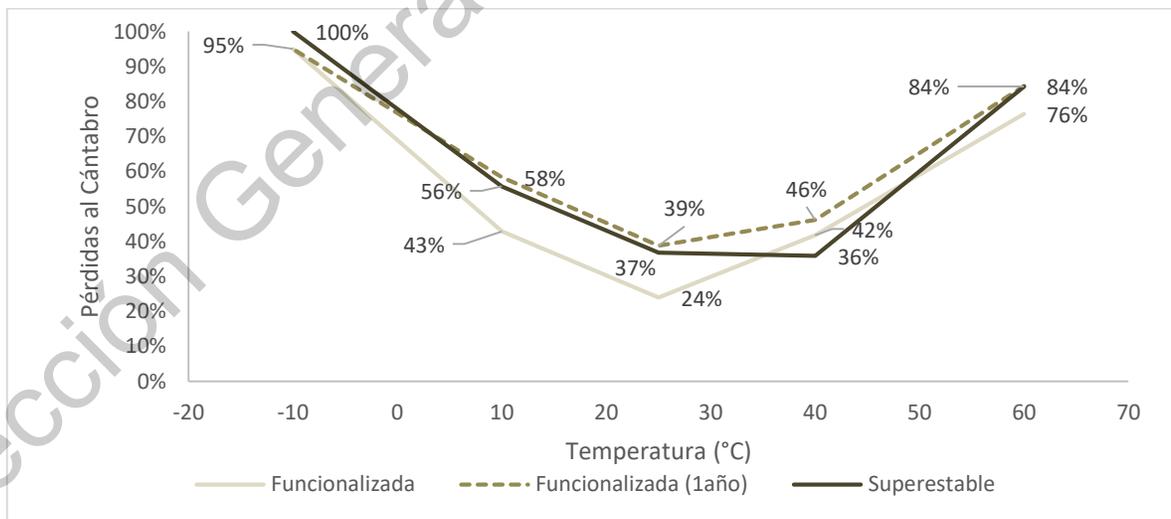
Fuente: Elaboración Propia

#### 4.4 Análisis de resultados

En esta parte del documento se realizó el análisis de los resultados obtenidos ante los fenómenos replicados en los ensayos de laboratorio. Para sintetizar los resultados se procedió a graficar los mismos para hacer un análisis y comparativa de los resultados obtenidos

##### 4.4.1 Análisis de comportamiento ante la Susceptibilidad térmica.

Para el análisis de susceptibilidad térmica, se graficó la denominada “Curva de Estado” que se muestra en la figura 22. Los ligantes se caracterizan por tener un comportamiento frágil a bajas temperaturas, un comportamiento elasto-plástico a temperaturas medias y un comportamiento inconsistente a temperaturas altas. El ensayo Cántabro puso en manifiesto este comportamiento, pues las pérdidas obtenidas por desgaste a diferentes temperaturas, cuando el ligante es frágil son altas, cuando su comportamiento es elasto-plástico las pérdidas son menores y vuelven a incrementarse las pérdidas cuando entra el ligante en un estado de inconsistencia.

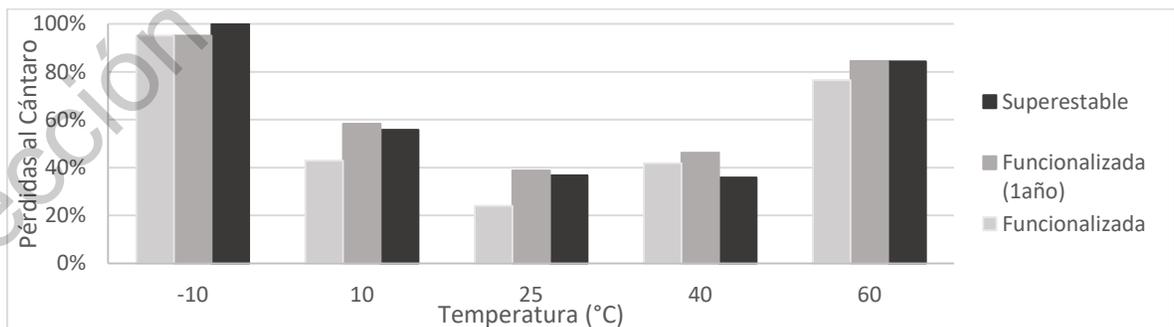


**Figura 22 Curva de estado, Susceptibilidad térmica**

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvieron elevadas pérdidas a bajas temperaturas, llegando a valores de 75% en 0°C lo que refleja un comportamiento frágil. Las pérdidas disminuyeron a medida que aumentó la temperatura teniendo sus valores mínimos en el rango de 20°C y 40°C donde se aprecia que es el comportamiento elastoplástico. De esta temperatura en adelante se produce incremento en las pérdidas, refiriéndonos al comportamiento inconsistente. Se pueden observar curvas con pendientes pronunciadas y con concavidad, lo que nos indica que existe una susceptibilidad térmica. En comparativa, los ligantes tienen comportamientos similares en cuanto al comportamiento de las curvas, las pendientes son muy similares y presentan el mismo tipo de concavidad, sin embargo, la emulsión funcionalizada, presenta un comportamiento mejor en casi todo el desarrollo de la curva, teniendo menores pérdidas, y una zona elastoplástica más grande que la emulsión funcionalizada de 1 año de almacenamiento y la emulsión superestable. Se considera para cualquier tipo de ligante, sea o no sea emulsión que para los 60°C es sumamente deformable la mezcla. Sin embargo, podemos observar que la emulsión superestable, presenta un rango de trabajabilidad más estable entre los 20 y 40°C

En la gráfica de la figura 23 observamos los mismos datos que se presentan en las curvas de estado, pero para visualizar de un mejor modo las diferencias, en las cuales, la emulsión funcionalizada, presenta menores pérdidas, a excepción de los 40°C donde la superestable, a esa temperatura presenta mejor comportamiento.

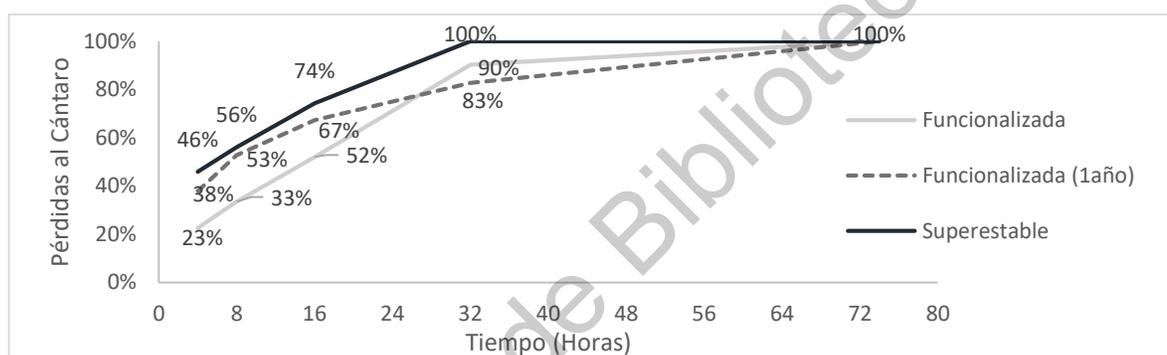


**Figura 23 Pérdidas al Cántaro por susceptibilidad térmica**

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.2 Análisis de comportamiento ante Envejecimiento

La resistencia al envejecimiento de los ligantes por acción de rayos ultravioleta y agentes atmosféricos como lo son el aire, calor, agua, entre otros; es una propiedad de los ligantes que se relaciona directamente con la durabilidad. Si está oxidación y envejecimiento se produce de una manera rápida, mayor será la rapidez con la cual el ligante se volverá frágil, disminuyendo su resistencia a la acción abrasiva del tráfico.

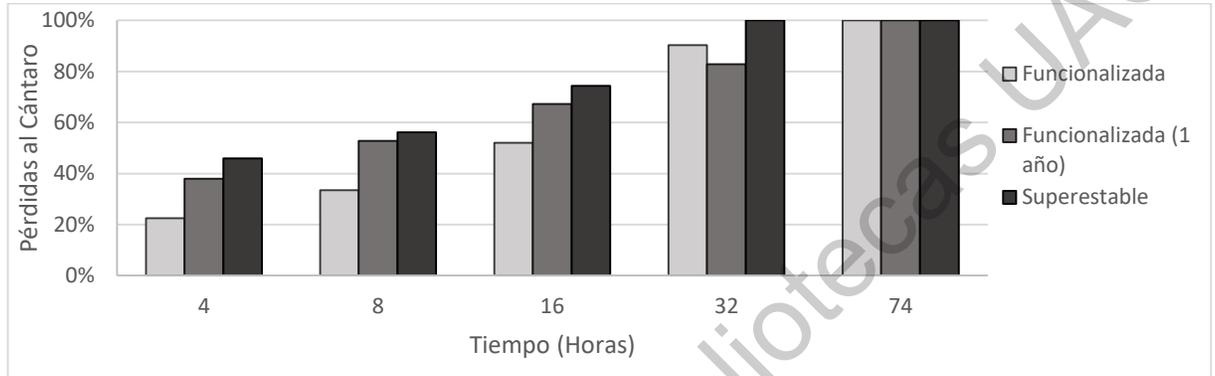


**Figura 24 Curva de envejecimiento**

Fuente: Elaboración propia

Podemos observar en la figura 24 que todas las curvas de envejecimiento presentaron una forma similar, con pendientes pronunciadas en un corto plazo, mientras que a largo plazo se comportan de una manera más estable. Claramente se aprecia que las emulsiones funcionalizadas tienen un mejor comportamiento que una emulsión superestable. Podemos concluir que la pérdida de aceites y volátiles se presenta en un corto plazo, lo que ocasiona que sea en este corto plazo se presente mayor cambio en las pérdidas y a un largo plazo, donde ya se presentaron las pérdidas de aceites y volátiles, se disminuya la pendiente de la curva de pérdidas por desgaste.

. En la figura 25 podemos observar que las emulsiones funcionalizadas, presentan una menor pérdida al Cántabro, en todas las etapas de envejecimiento evaluadas en esta experimentación. Siendo en una etapa temprana pérdidas menores hasta en un 23% y en una etapa avanzada de envejecimiento desde un 10%.

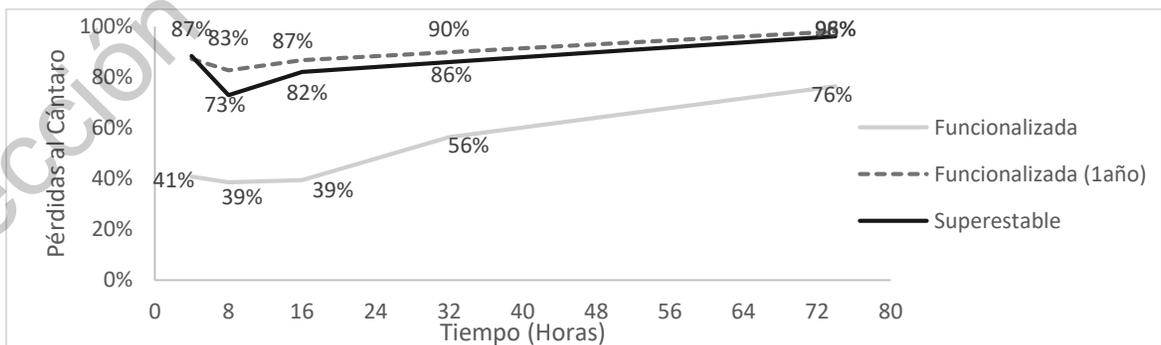


**Figura 25 Pérdidas al Cántabro por envejecimiento**

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.3 Análisis de comportamiento ante Susceptibilidad a la humedad

Por efecto del agua, el ligante se separa del agregado pétreo disminuyendo la cohesión de la mezcla, motivo por el cual el ligante debe ser capaz de envolver a los agregados, adhiriéndose a ellos, dando la cohesión necesaria para resistir las acciones del agua.



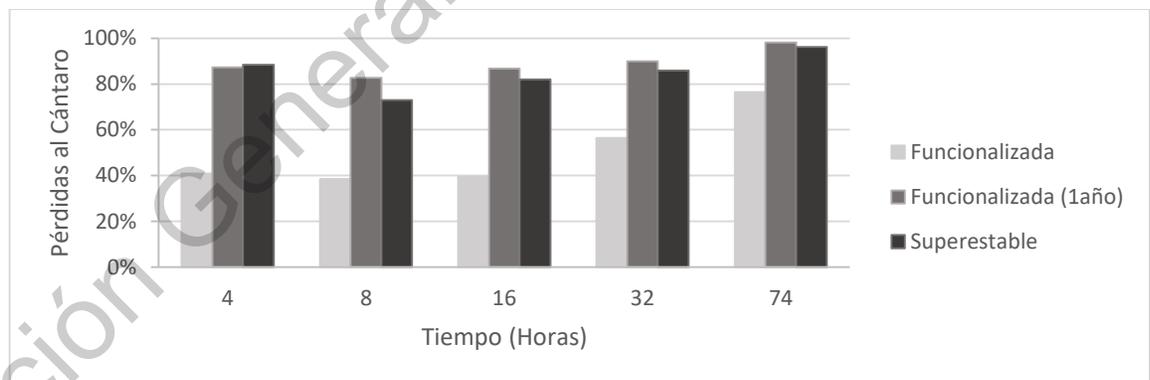
**Figura 26 Curva de susceptibilidad a la humedad**

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la figura 26 que los ligantes alcanzaron pérdidas altas desde un inicio, existiendo poca diferencia entre la emulsión superestable y la emulsión funcionalizada con un año de almacenamiento, por su parte la emulsión funcionalizada, presenta una mejoría bastante notable, respecto a las pérdidas tras la inmersión al agua.

Observamos un comportamiento similar en cuanto a la estructura de la curva, que presenta un pequeño decremento de las pérdidas y después comportándose respecto a una pendiente, siendo la emulsión superestable la que presenta la mayor pendiente, y la emulsión funcionalizada la que presenta una pendiente casi nula, siendo de este modo la que mejor comportamiento presenta ante la susceptibilidad a la humedad

En la figura 27 se aprecia que la emulsión funcionalizada tiene pérdidas al Cántabro en un inicio de un 46% menos, y a un periodo mayor de exposición al agua de un 10%, siendo de este modo la que mejor comportamiento presenta ante la susceptibilidad a la humedad.



**Figura 27 Pérdidas al Cántabro por susceptibilidad a la humedad**

Fuente: Elaboración propia

## 5. Conclusiones

En la actualidad, la comunicación y transporte de mercancías son la base del desarrollo económico y social. Las comunidades rurales, se ven favorecidas cuando comienzan a construirse obras de infraestructura, ya sean servicios básicos o caminos que interconecten las poblaciones para fomentar el desarrollo económico, generando de esta manera, una mejor calidad de vida para los habitantes de estas comunidades. La construcción de vías de comunicación, fomenta el comercio, pues agiliza y economiza la distribución de los productos.

Las mezclas asfálticas en caliente son la primera opción hoy en día para los proyectos de pavimentación, pero éstas pueden ser una opción inviable derivado de los tiempos de itinerario, al trasladarse desde la planta de producción hasta la ubicación de la obra, generando problemas técnicos y constructivos. El suministro de concreto hidráulico puede ser muy costoso dependiendo de los volúmenes de obra a ejecutar resultando que el proyecto por su monto de inversión se convierte en una obra con poca factibilidad de ejecución. Por otra parte, para la fabricación del cemento es necesario un gasto energético elevado al obtener el Clinker, base del cemento portland. Estas situaciones, provocan que muchas comunidades no tengan caminos adecuados, pues las relaciones costo-beneficio no justificarían su construcción, sin embargo, la construcción de los mismos generaría el desarrollo antes mencionado. Motivo por el cual, el uso de emulsiones asfálticas funcionalizadas es una alternativa para la construcción en las obras de baja inversión, donde la construcción no justifica el traslado de alguna planta de mezclas asfálticas en caliente, o el movimiento de camiones mezcladores de concreto hidráulico, donde no se tenga mano de obra capacitada, ni maquinaria sofisticada, pues su trabajabilidad y su comportamiento como ligante, darán como resultado una mezcla fácil de producir, con características de nivel de desempeño satisfactorias.

Podemos concluir que la hipótesis si se cumple, las emulsiones asfálticas funcionalizadas, presentan mejoras en la trabajabilidad, siendo muy sencillo realizar mezclas con el agregado pétreo. Por su parte una de las principales mejoras que presenta ante emulsiones convencionales es que puede ser almacenada por periodos prolongados, sin perder las propiedades de emulsión. Si bien su desempeño se ve ligeramente afectado, inclusive después de un año, presenta un desempeño similar al de las emulsiones convencionales. Si las emulsiones funcionalizadas son aplicadas con normalidad, mejora sustancialmente el desempeño en susceptibilidad a la humedad, teniendo pérdidas de agregado menores hasta en un 46%. Mientras que en el fenómeno de envejecimiento presenta mejoría, disminuyendo las pérdidas de agregado hasta en un 23%.

Los ligantes que presentaron mejor desempeño en susceptibilidad a la temperatura son fueron la emulsión funcionalizada y la superestable, en mayor proporción la funcionalizada, por su parte observamos que la emulsión superestable, tienen un comportamiento de menor desempeño frente a las variables de susceptibilidad al agua y envejecimiento respecto a los otros ligantes, y que al término de la curva de envejecimiento el mejor desempeño lo tuvo la emulsión funcionalizada de un año de almacenamiento, sin embargo, la emulsión funcionalizada fue la que presentó buen desempeño en los 3 rubros.

Hablar de un “mejor” ligante en términos absolutos puede resultar imposible derivado de que las propiedades pueden estar contrapuestas, sin embargo, se debe llegar a la solución de escoger el ligante que mejor se adapte a las necesidades específicas de cada proyecto, para el caso de este proyecto de investigación, no queda duda de que la emulsión funcionalizada elaborada, presenta además de propiedades que permiten su almacenamiento a periodos prolongados, facilidad de reincorporación, poco asentamiento, trabajabilidad sencilla, los mejores resultados acorde a los aspectos evaluados, siendo el mejor ligante en esta comparativa.

Las emulsiones asfálticas funcionalizadas al poseer altos contenidos de emulsificante, logran tener una mayor estabilidad, esto derivado a mientras mayor sea el contenido del emulsificante, tendrán contenido que evite el contacto entre los glóbulos, encontrándose protegidos de comenzar la coalescencia. Lo anterior hace referencia al tiempo de rompimiento de la emulsión funcionalizada, logran permanecer en la etapa de floculación un periodo mayor, o inclusive en flotación o sedimentación, por lo cual es viable almacenarla por periodos largos, sin correr el riesgo de que rompa la emulsión. Cabe mencionar que la emulsión funcionalizada empleada en este trabajo de investigación fue elaborado en junio del 2017. Y la experimentación comenzó en Julio del 2018.

Por su parte el tener polímero SBR le aporta a la emulsión mejoras en la adhesividad con el agregado pétreo. También proporciona una mejora en la elasticidad y flexibilidad del aglutinante y previene la entrada de agua en el pavimento.

Su viscosidad alta permite una película más espesa que proporcione una mejor retención de los agregados y, además, un menor escurrimiento del cemento asfáltico; por el contrario, esta misma viscosidad alta permite menor la dispersión de la emulsión del agregado, sin embargo, tiene una trabajabilidad derivada de algún polímero, lo que permite que el mezclado sea sencillo de realizar y se pueda dispersar de manera adecuada.

Otro factor importante de mencionar son los altos contenidos de asfalto, los cuales se traducen en ahorros económicos, pues se trasladará más asfalto por unidad de emulsión, reduciendo los contenidos de agua, presentes en la emulsión funcionalizada.

Los resultados obtenidos anteriormente, son aplicables principalmente para la emulsión fabricada por Viaker, sin embargo, no son exclusivos pues cualquier emulsión que sea funcionalizada bajo el mismo esquema que propone Viaker, podrán presentar el comportamiento que en este proyecto de investigación se obtuvieron, lo cual será recomendable corroborar bajo la metodología del proyecto de investigación.

De igual modo podemos generalizar, que este tipo de emulsiones, presentará un desempeño superior bajo los esquemas de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad térmica, derivado a que la mayoría de las emulsiones, si no es que el total de éstas son procedentes del mismo tipo de asfalto, originado del mismo crudo de petróleo. Siendo el proceso de funcionalización esa diferencia.

En este trabajo de investigación se invita a aplicar en campo las emulsiones funcionalizadas, monitorear su estado de servicio y realizar una comparativa respecto a mezclas con emulsiones convencionales, mezclas en caliente y concreto hidráulico, llevando control en los gastos de construcción y su desempeño a un corto y mediano plazo. De este modo, podríamos tener una comparativa no solo referente al comportamiento de la emulsión, si no, una referencia de estado de servicio, respecto a las diferentes alternativas de pavimentación.

## 6. REFERENCIAS

- Acuña, M. J., Sibaja, D y Molina, D. (2009), Mezclas asfálticas en frío en Costa Rica, conceptos, ensayos y especificaciones, Revista Infraestructura Vial, vol. 11 y No. 21, pp.18-29.
- Alarcón J., Chávez J., Chávez C. y Cortés L. (2017), Ligantes asfálticos, Estudio de la afinidad de un agregado basáltico triturado usando asfaltos convencionales y aditivos promotores de adherencia. Infraestructura Vial N°18, Agosto 2017.
- Ali Akhber Yousefi (2002) "Rubber Modified Bitumens." Iranian Polymer Journal, 11 (5). Department of Plastics, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14965/115, Tehran, I.R. Iran 1026-1265/2002
- Aquino, M. Z. (2015). Diseño de Pavimentos Flexibles Primera Parte, Asociación Mexicana del Asfalto, Ciudad de México.
- Arya, N. (2007) Review and recommendation of cold asphalt emulsion mixtures (CAEMs) design. Journal Civil Engineering Dimension. Vol 9. No. 1. pp. 49-56.
- Asociación Mexicana del Asfalto A.C (2011). Publicación técnica, Protocolo AMAAC PA-EA-03/2011. México.
- Asociación Mexicana del Asfalto A.C (2013). Publicación técnica, Protocolo AMAAC PA-MA-01/2013. México.
- Asociación Mexicana del Asfalto A.C.(2010) "Emulsiones Asfálticas" ISBN : 9/8 607-8134-00-7, México.
- Asociación Mexicana del Asfalto A.C.(2011); Protocolo AMAAC PA-EA 02/2011 "Procedimiento de fabricación, aplicación y control de calidad de las emulsiones asfálticas" , México

Asociación Mexicana del Asfalto A.C.(2013); Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013  
“Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño” ,  
México

Asphalt Academy (2007), Technical Guideline: The use of modified bituminous  
binders in road construction, TG1, Second Edition,. ISBN 978-0-7988-5572-  
3 November 2007

Asphalt Institute, Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing.  
SUPERPAVE Series N°1 (SP-1), Estados Unidos, 1994.

Asphalt Institute, SUPERPAVE Level 1 Mix Design, SUPERPAVE Series N°2 (SP-  
2), Estados Unidos, 1995.

Association française de Normalisation (1995) NF EN ISO 862, T73-000 (10/1995)  
Surface active agents. Vocabulary. Trilingual version. - Agents de  
surface.

Blankendaal, T.; Schuur, P. y Voordijk, H. (2013), Reducing the environmental impact  
of concrete and asphalt a scenario approach, Journal of Cleaner  
Production, JCPL 3172.

CEMEX Concretos S.A. de C.V. (2001) Manual de diseño y construcción de  
pavimentos México D.F.

Cyna M., Ussols M., Fouchard C. (2006) Les émissions de bitumme. Section des  
fabricants émulsions routière de bitumen (SFERB) Editions RGRA.

Fonseca, C., Serment, V. y Villalobos, R., (1999), Empleo del método UCL® en la  
caracterización de cementos asfálticos en México, Asociación Mexicana del  
Asfalto, Primer Congreso Nacional del asfalto Memoria, 1999.

Giorgetti, J. y Simoncelli, J. (1990), QUALAGON: L'approche SHELL pour une meilleure appreciation du comportement des bitumes routiers, Revue Generale es Routes et des Aerodromes, pp. 69-77, ISSN: 670, 1990.

Guimbertau F. y Leal C. F. (1999), Granuométrie des émulsions de bitume, Bulletin de Liasion des laboratorios des Ponts et Cussées (BLLPC), volumen 222, pp.13-22.

Harrison, T. y Shell International Petroleum Company Limited (1990), QUALAGON: the SHELL bitumen quality template, Shell Bitumen Review, p. 2-4, ISSN: 0037-3516, 1990.

Highway Research Board (1970), Standard Nomenclature and Definitions for Pavement Components and Deficiencies. Special Report N° 113, Washington, D.C.

Huntzinger, D.N., Eatmon, T.D., 2009. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. Journal of Cleaner Production 17, 668–675.

INEGI (2018) Cuentame INEGI, Economía, Petróleo, recuperado de <http://cuentame.inegi.org.mx/impresion/economia/petroleo.asp>

James, Alan (2006), Cold mix design in North America, Akzo Nobel Surface Chemistry LLC, Willowbrook, IL, U.S.A.

Kramer, Carlos (2004). Ingeniería de Carreteras. España: Mc Graw Hill.

Kumar, S.; Thomas, B.; Gupta, V. y Basu, P. (2018), Sandstone wastes as aggregate and its usefulness in cement concrete – A comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, núm 81 1147-1153.

- Martinelli, Marissa; Froimowicz, Pablo; Calderón, Marcelo; Sturmia, Miriam (2003).  
Materiales poliméricos funcionalizados, Revista Iberoamericana de  
polímeros, Volumen 4 (4), diciembre 2003, P.p 30-47.
- Martínez, Wilfredo (2014), Evaluación del impacto ambiental en obras viales,  
Negotium, vol. 10, núm. 29, pp. 5-21, ISSN: 1856-1810.
- Méndez Pinilla, Ulloa Duarte (2000), Diseño y colocación de mezcla densa en frío.  
Circunvalar de San Andrés, Isla. Ltda.
- Méndez Pinilla, Ulloa Duarte (2002), Experiencias del reciclaje de pavimentos en  
Colombia utilizando emulsiones asfálticas. TRID, Colombia
- Miró, J., (1994), Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante  
el empleo del ensayo cántabro, Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de  
Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de  
Cataluña, Barcelona, España, 1994.
- Mora S. (2002) Análisis del diseño estructural con emulsión asfáltica del pavimento  
del aeródromo de Montecarlo: Nazca Perú. UNI, Perú
- Múnera, Juan Camilo y Ossa, E. Alexander (2014), Estudio de mezclas binarias  
asfalto-polímero, Revista Facultad de ingeniería Universidad de Antioquia,  
núm. 70, pp. 18-33, ISSN: 0120-6230.
- Nurul Hidayah ( 2002) What are the Types of Modifier in Bitumen?, Highway  
Engineering, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia Batu Pahat, Johor,  
Malaysia, 2002
- Obregón, S., (1997). Papeles de Población, Características de la movilidad de la  
población residente entre el medio urbano y rural de una zona metropolitana.  
Nº.97 CIEAP/UAEM.

- Pavement Preservation and Recycling Alliance (2019) Emulsions, About emulsions, Recuperado de: <https://roadresource.org/emulsions/about>
- Pérez, F. y Miró , J., (2002) (A), Evaluación de la adhesividad árido-ligante mediante el Método Funcional UCL®. X CILA. España, 2002.
- Pérez, F. y Miró , J., (2002) (B), Evaluación de la resistencia al envejecimiento de los ligantes bituminosos mediante el Método Funcional UCL®. X CILA. España, 2002.
- Pérez, F. y Miró, J., (2002) (C)Evaluación de la cohesión y susceptibilidad térmica de los ligantes bituminosos mediante el método funcional UCL®, X CILA, España 2002.
- Ponce, A. V. (2016). Análisis de desempeño de mezclas en frío utilizando distintas emulsiones, bajo el protocolo AMAAC, Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.
- Ramond G. y Giger J. (1974), La formulación des émulsions, BLLPC, Numéro Special W., Les emulsions de bitumen, p. 32
- Reyes, O., Fuentes, L.G. y Moreno, O. (2013) Comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos modificados con ceras. Revista Ingeniería y Desarrollo. Vol 31 No.1 pp. 161-178.
- Reyes, Oscar (2009), Cambios dinámicos y mecánicos de una mezcla asfáltica densa por las propiedades del asfalto y energía de compactación, Ingeniería y desarrollo, núm. 26, pp. 139-155, ISSN: 0122-3461.
- Rodríguez, Rogelio; Castaño, Víctor; Martínez, Miguel (2001). Emulsiones Asfálticas, publicación técnica N°23, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte. ISSN: 0188-7114.

- Ronald, M. y Fuentes, L. (2016), Asphalt emulsions formulation: State of the art and dependency of formulation on emulsions properties. *Construction and Building Materials*, núm 123, 162-17
- Sauterey R., Ajour A., Giger J., Ramond G., (1974) L'adhésivité liants hydrocarbours granulats, *Revue générale des routes et des aerodromes (RGRA)*, no. 503, Novembre.
- SCT (2000). Norma Oficial Mexicana N-CMT-4-05-001-00. Calidad de materiales asfálticos. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Diario Oficial de la Federación 15 de agosto de 2000.
- SCT (2002). Norma Oficial Mexicana N-CMT-4-05-003/02. Calidad de mezclas asfálticas para carreteras. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Diario Oficial de la Federación 9 de diciembre de 2002.
- SCT (2015). Norma Oficial Mexicana N-CTR-CAR-1-04-007-15. Carpetas asfálticas con mezclas en frío. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Diario Oficial de la Federación 30 de enero de 2015.
- Takamura, Koichi; Puiggené, Jordi; Torres, José (2008). Efectos del empleo del látex de SBR en la modificación de cemento asfáltico y de emulsiones bituminosas de uso vial, BASF, EUA-España.
- Tomás Raz Ramón y, Rincón Jiménez Jesús (2000) Las emulsiones en el mundo. Últimos avances. *Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, núm 108, pp.67-74, ISSN:0212-6389.

Vatopoulus, K. y Tzimas, E. (2012), Assessment of CO2 capture technologies in cement manufacturing procces, Journal of Cleaner Production, núm 32, 251-261.

VIAKER Selladores Asfálticos y Equipo (2017), Boletín informativo, Modo de uso de ECOBIT, Zapopan, Jalisco, México.

World Commission on Environment and Development (1987) Our common future Oxford ; New York : Oxford University Press, 1987

Dirección General de Bibliotecas UAO