



ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA CATIÓNICA Y MODIFICADA

Ing. Benjamín Murguía Martínez

Dr. José Carlos Rubio Avalos

UNIVERSIDAD
MICHOCANA DE
SAN NICOLÁS DE
HIDALGO

*Maestría en
Infraestructura del
Transporte en la
Rama de las Vías
Terrestres*



Agradecimientos

I. AGRADECIMIENTOS PERSONALES

En primer lugar y como todo en mi vida, quiero agradecer a Dios porque ha sido mi fortaleza todo el tiempo.

También quiero agradecer a mis padres José Murguía O. y Carmen Martínez Z. por darme la vida, porque son los dos pilares en los que me he apoyado siempre, pero sobre todo por darme el ejemplo de vida que me ha llevado a ser quien soy. A mis hermanos, los cuales me dan ánimos para seguir adelante, cumplir con mis metas y objetivos, gracias Yunuen, Carmen, José Antonio y Adalyd.

Gracias a mi prometida, por estar ahí cada que la necesitaba, sobre todo en los momentos más difíciles que hemos pasado, por apoyarme de forma generosa en cada instante y por amarme a pesar de mis defectos, gracias Leo.

Quiero agradecer a mis amigos, porque son fundamentales en mi vida, así como para la elaboración de la presente tesis, los cuales han estado desde hace más de 10 años apoyándome, gracias a todos.

Por último, pero no menos importante, agradezco a mi director de tesis el Dr. J. Carlos Rubio A. por todos los consejos y comentarios, los cuales fueron muy útiles para terminar con la tesis, por su apoyo incondicional y sobre todo por creer en mí. También agradezco a los profesores que de alguna u otra manera se preocupan de verdad por la enseñanza en el posgrado, por sus comentarios y sugerencias, los cuales tomaré en cuenta.

II.- AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

En primer lugar, quiero agradecer a mi casa de estudios la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) por apoyarme durante los dos años de estudio de maestría con su infraestructura, así como a su personal docente, administrativo y empleados, de manera especial a los laboratorios de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y del laboratorio de microscopía electrónica del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, los cuales me ayudaron a realizar las pruebas a los materiales que utilicé en el presente trabajo.

También quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por su apoyo con la beca de estudiante durante tres semestres de estudio, la cual me fue de mucha utilidad.

Tesis apoyada por el Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán (CECTI), gracias también por su apoyo con una beca para el quinto semestre, la cual aproveché de forma correcta.

Índice

Contenido

Agradecimientos	2
I. AGRADECIMIENTOS PERSONALES.....	3
II.- AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES.....	4
Índice	5
CAPÍTULO I	9
INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO II	14
MARCO TEÓRICO	14
I. RESEÑA HISTÓRICA DEL ASFALTO	18
I.1 Proceso de obtención.....	20
I.2 Composición.....	20
I.3 Estructura química de los asfaltos	21
I.4 Físicoquímica del asfalto	26
I.5 Reología.....	27
I.6 Modos de utilización del asfalto	28
I.7 Mezclas asfálticas.....	30
II. EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	31
II.1 Conceptos fundamentales	31
II.2 Categorías.....	34
II.3 Agentes superficiales.....	39
II.4 Componentes	47
II.5 Propiedades.....	57
III. ASFALTOS MODIFICADOS	84
IV. AGREGADOS PÉTREOS.....	87
V. TIPOS DE DEGRADACIÓN	89
V.1 Hundimiento	90
V.2 Hundimiento de bordes fracturados.....	91
V.3 Roderas	91
V.4 Baches	92

V.5 Descamado.....	93
V.6 Desprendimiento	94
V.7 Engrosamiento	95
V.8 Pulido	96
V.9 Grietas longitudinales	97
V.10 Grietas transversales.....	98
V.11 Agrietamiento	99
V.12 Juntas defectuosas.....	100
V.13 Baches	101
VI. COSTOS DEL BACHEO	106
VI.1 Bacheo típico en la ciudad de Morelia.....	108
VI.2 Equipo de bacheo con ligante integrado y diseminador de agregados.....	113
CAPÍTULO III	123
CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	123
I. DISEÑO EXPERIMENTAL	124
I.1 Diseño experimental	124
II. CARACTERIZACIÓN DE EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	126
II.1 Destilación de emulsión asfáltica	127
II.2 Penetración en cementos y residuos asfálticos a 25°C, 100g y 5s.....	128
II.3 Ductilidad de cementos y residuos asfálticos a 25°C	129
II.4 Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C.....	130
II.5 Asentamiento a 5 días.....	131
II.6 Retenido en la malla No. 20	132
III. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS	134
III.1 Densidad relativa.....	134
III.2 Desgaste mediante la prueba de los ángeles, de materiales pétreos para mezclas asfálticas	135
III.3 Partículas alargadas y lajeadas, de materiales pétreos para mezclas asfálticas.....	136
III.4 Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas	137
IV. SELECCIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.....	140
IV.1 Selección de la mezcla	140

V. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS FÍSICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.....	143
V.1 Compresión simple sin confinamiento	143
VI. ANÁLISIS FÍSICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA	145
VI.1 Compresión simple sin confinamiento	145
CAPÍTULO IV	148
ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	148
I. FUNDAMENTOS DE LA MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.....	149
I.1 Fundamentos de la técnica	149
II. APLICACIONES	152
III. REQUISITOS Y LIMITACIONES	152
III.1 Secado de las muestras.....	152
III.2 Recubrimiento de las muestras no conductoras.....	154
IV. ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA PARA BACHEO.....	155
CAPÍTULO V	161
ANÁLISIS DE RESULTADOS	161
CAPÍTULO VI	169
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	169
I. CONCLUSIONES	170
II. RECOMENDACIONES	171
CAPÍTULO VII	173
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y DIGITALES	173

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas, mucho esfuerzo científico y tecnológico se ha dedicado al desarrollo de materiales asfálticos para la construcción de carreteras, puesto que las especificaciones de éstas son cada día más estrictas. La tecnología en materia asfáltica se ha enfocado al desarrollo de carpetas asfálticas con mayor duración, con menor huella al paso de vehículos, mayor repelencia al agua, mayor resistencia a la radiación ultravioleta, mayor agarre con la llanta, mejor adhesión entre el asfalto y el material pétreo, mayor facilidad para la reparación de baches, reparación de baches a baja temperatura, etc. Todas estas condiciones impuestas al asfalto dan como resultado una intensa investigación en éste campo desarrollando nuevos materiales asfálticos, así como nuevas formas en las cuales el asfalto modificado puede ser aplicado al sustrato pétreo (IMT, documento técnico No. 23).

El planteamiento de nuevas necesidades, el desarrollo de nuevas técnicas de fabricación o puesta en obra y en definitiva, la mejora y optimización de las técnicas en las emulsiones asfálticas, ha permitido la aparición de nuevos tipos de emulsiones, entre las que podemos enumerar: emulsiones muy viscosas, de alta flotación, de rompimiento controlado por aditivos, emulsiones modificadas y emulsiones de asfaltos modificados.

Actualmente se utiliza una gran variedad de polímeros comerciales con composición química y propiedades diferentes, para emulsiones de asfaltos modificados. Entre los empleados de forma más generalizada tenemos los elastómeros termoplásticos de estireno-butadieno-estireno (SBS) y de estireno-butadieno (SBR), y los copolímeros de estireno de acetato de vinilo (EVA).

Hoy día debe ser prioritario el desarrollo de cualquier técnica o producto que se base en el respeto por el medio ambiente (Asfáltica, revista técnica, pp 4, 2011) y las emulsiones asfálticas parecen ser la solución al tema de las carreteras.

Recientemente se ha tenido el efecto de la crisis financiera internacional sobre la construcción de carreteras, poniendo más énfasis en la conservación de pavimentos en vez de construir nuevas carreteras; y en segundo lugar una aceptación mucho mayor por parte de los legisladores y fabricantes de productos, de la necesidad de reducir el uso de energía y de las emisiones para ayudar a minimizar el cambio climático.

En esencia los mensajes que se envían sobre los beneficios de las emulsiones no han sido alterados a lo largo de los años, pero las circunstancias han cambiado, dando crédito adicional a lo que se dice y añadiendo fuerzas a los argumentos. El desarrollo de la tecnología de emulsiones asfálticas ha sido impulsado por la necesidad de satisfacer las demandas técnicas de la conservación de pavimentos, un área de importancia creciente. Durante años, hemos estado hablando de construir carreteras, pero ya no se hace ahora con tanto énfasis, especialmente en países desarrollados, no sólo cuentan con una importante red de carreteras ya construidas, sino que además ya no existe el financiamiento disponible para la construcción de una infraestructura de gran alcance. El énfasis está cambiando de adquirir nuevos activos a proteger los ya existentes. Una red de carreteras de un país, representa un activo masivo, probablemente el mayor activo que posee el país, no tiene sentido dejar que los activos se devalúen por no tener en posición unos sistemas apropiados para proteger y conservar los pavimentos de las carreteras (Asfáltica, revista técnica, pp 47, 2011).

El Banco Mundial, por nombrar sólo uno, aprecia esta postura y para los contratos que todavía se están firmando para construir nuevas infraestructuras en los países en vías de desarrollo, está intentando incorporar una provisión a largo plazo para el mantenimiento y conservación de las mismas. También es probable que la preocupación medioambiental, afecte positivamente al uso de las emulsiones asfálticas.

Las emulsiones asfálticas permiten el uso de mezclas templadas y frías en una amplia gama de soluciones al pavimento, esto significa un uso mucho menor de energía para calentar los agregados y muchas menos emisiones. El reciclado de mezcla en frío in situ es el mejor modo de reciclar de forma apropiada, evitando el transporte y potenciando al máximo el uso de material virgen, así como la eliminación y traslado de las virutas asfálticas al vertedero de desechos. La flexibilidad de uso, también entra en juego: la temporada de obras se amplía con las mezclas en frío, no existe ninguno de los problemas de salud y seguridad asociados con el calor y los humos. Las emulsiones asfálticas constituyen una gran parte de la solución de la conservación de pavimentos, la tecnología está probada y con frecuencia da como resultado unas soluciones que son más económicas que las conseguidas por otras técnicas.

Es por eso que en el presente trabajo de investigación se aborda el tema de las emulsiones con tanto empeño, dada las necesidades que se tienen y a las futuras previsiones que habrá que hacer.

El trabajo se divide en siete capítulos desarrollos de manera secuencial para llevar de la mano al lector, iniciando con un marco teórico que define y explica extensamente el estado actual de la red carretera mexicana, así como los datos técnicos de los compuestos que forman la mezcla asfáltica para bacheo, a decir de ellos, cemento asfáltico, emulsión asfáltica y agregados pétreos, con la complejidad que mantienen desde su naturaleza, abordando un poco los polímeros y modificadores de asfalto, para pasar a la caracterización de los mismos realizando las pruebas adecuadas y necesarias que marcan los organismos correspondientes como la American Society of Testing Materials (ASTM), American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO), Strategic Highway Research Program (SHRP) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), para obtener los parámetros de los materiales que determinan el comportamiento que tendrán en la puesta en obra y tomar la mejor decisión en la elaboración de la mezcla asfáltica para bacheo, posteriormente se analizan los diferentes materiales, algunos de

manera individual y otros mezclados, por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) obteniendo resultados importantes que se analizan de forma objetiva para poder dar un dictamen de los análisis realizados, a través de las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación, para de esta forma finalizar con el mismo.

Es importante reconocer la utilización de las emulsiones asfálticas a nivel mundial, porque nos permiten obtener grandes beneficios en todos sentidos, por eso, las emulsiones asfálticas son los productos correctos para el lugar y momento oportunos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

La demanda del transporte en México es primordial para el desarrollo del mismo, pero al mismo tiempo requiere de una infraestructura acorde a las necesidades actuales de demanda, las cuales implican un desarrollo tecnológico de primer nivel.

En lo que respecta a la infraestructura carretera, es necesario hacer mención de la carencia de tecnología que se tiene, con diseños geométricos y pavimentos de hace 40 ó 50 años de antigüedad. Hablando de la carpeta asfáltica, se puede mencionar que su análisis requiere de un estudio profundo y específico, considerando variables nuevas de reciente investigación y afectación en su diseño y composición, mismas que anteriormente no se podían considerar por su complejidad y falta de tecnología para hacerlo.

La infraestructura de transporte terrestre en el área de las autopistas mexicanas para 2008, contaba con 360,000 km aproximadamente (SCT, 2010), incluidos caminos pavimentados y sin pavimentar, desde el camino tipo E hasta los de altas especificaciones (ET), de los cuales 128,542.97km estaban pavimentados, 145,746.03km estaban revestidos, 30,015.11km eran terracerías y 55,695.89km eran brechas (SCT, 2010).

De los caminos pavimentados, es decir, del 35.71% solamente 5,241.52km son de concreto hidráulico y 123,301.45km son de pavimento flexible, así mismo, de los pavimentos flexibles 22,075.69km se encuentran en buenas condiciones, 62,260.72km se encuentran en condiciones aceptables y 38,965.04km se encuentran en pésimas condiciones (SCT, 2010).

En el estado de Michoacán la situación es muy similar, se contaba hasta 2008 con 19,339km de caminos pavimentados y sin pavimentar, de los cuales 12,022km estaban pavimentados, 3,317km estaban revestidos, 0.0km de terracerías y 4,000km eran brechas,

permaneciendo un porcentaje similar al del nacional en las condiciones en que se encontraban los caminos (SCT, 2010).

Del Presupuesto de Egresos de la Federación (PEF) para 2012, se destinarán **85,544 MDP** de los cuales el 45% se destinará para la modernización estratégica de la red, 15% se destinará para la construcción de libramientos y accesos, el 14% se destinará para la conservación de la red federal, el 10% se destinará para estudios, proyectos y liberación del derecho de vía, 7% se destinará para caminos rurales y alimentadores, 5% se destinará para obras complementarias en la red federal y 4% se destinará para carreteras interestatales (SCT 2011).

Puede afirmarse que en la filosofía del ingeniero de carreteras y aún en la de la ingeniería nacional como en todo, ha llegado a entronizarse explícita o insidiosamente la idea de que el costo mínimo de construcción (la inversión inicial) es una meta ideal de todo proyecto. El criterio del ingeniero no puede desarrollarse, obviamente, sin una consideración de los factores económicos involucrados, pero éstos resultan siempre de una amplitud y balance que trasciende enormemente la consideración única o preponderante del costo inicial de la misma construcción. Así, un análisis tan incompleto de los factores económicos puede y suele producir serios inconvenientes en los resultados finales de los esfuerzos de la Nación.

El pavimento tiene que sostener una operación y ésta representa, si se toman en cuenta todos los costos nacionales involucrados, valores económicos muy superiores a lo que costó construir y conservar las cosas. Si la construcción de una carretera en México vale 1, la conservación, en su sentido correcto, puede costar 10 o 12, considerando un periodo de utilización de 40 o 50 años (y se está viendo que las carreteras duran mucho menos), pero la operación, es decir, los costos vehiculares directos en que incurre el transporte de carga y mercancías que circulan sobre los pavimentos, puede representar en el

mismo periodo algo comprendido entre 200, 400 o aún más, según el nivel de ocupación (Instituto Mexicano del Transporte IMT) .

Por otra parte, estudios realizados por el Instituto Mexicano del Transporte hacen ver que la diferencia en costo de operación de un camión tipo normal en la red nacional, al circular con una pendiente de 3% es un 50% mayor que si circula por terreno plano; esta diferencia llega al 100% si han de superarse pendientes de 5 o 6%, no raras en las carreteras de México.

Análogamente y según los mismos estudios, si el estado superficial de un pavimento pasa de lo que se considera un estado “óptimo” a otro calificado de “bueno”, el costo de operación por kilómetro recorrido, puede aumentar de un 15 a un 20% y, si el estado superficial llegara a “malo”, este factor de incremento podría ser de 35 o 40%.

Debido al mal estado que guardan los pavimentos y que sin duda alguna son tema de investigación, el daño ocasionado a los mismos se debe en gran medida a una serie de condiciones e ineficiencias por parte de los proyectistas, diseñadores, ingenieros y autoridades. Algunas de estas se mencionan a continuación:

- Transporte con exceso de peso, los cuales no cumplen con la norma oficial mexicana, ocasionando fallas en los pavimentos.
- Se realiza un mal diseño de pavimento, debido a que en el diseño existente no se consideran las variables que determinan el buen funcionamiento del mismo.

- Una vez que se tiene el diseño del pavimento, su ejecución en algunas ocasiones es de mala calidad, así como la supervisión por parte de las instituciones gubernamentales.
- Mala estructura en el cuerpo de las terracerías, ocasionado por la falta de estudios de geotecnia.
- Existe una carencia en el diseño de las obras de drenaje, sobre todo en lo que se refiere al drenaje menor.
- ***Hay escaso análisis y nula aplicación del conocimiento nano y micro estructural del asfalto y la relación que guarda el asfalto con el agregado pétreo y el aditivo.***

De igual forma e inherentemente al gasto millonario de recursos utilizado al mantenimiento de los pavimentos, también se produce un mal estar en las personas usuarias de las carreteras y esto se traduce en la baja calidad de vida de los mismos, que se ven afectados por ese problema.

I. RESEÑA HISTÓRICA DEL ASFALTO

El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos. La palabra asfalto deriva de la lengua que se hablaba en las orillas del Tigris superior de Asia entre los años 1400 y 600 A.C. En esta zona se encuentra la palabra *sphalto*, que significa “durable”. Después el vocablo fue adoptado por el griego, pasó al latín y, más adelante al francés (*asphalte*), al español (*asfalto*) y al inglés (*asphalt*) (Repsol, 2010).

Los estudios arqueológicos indican que es uno de los materiales de construcción más antiguos que el hombre ha utilizado, ya que apreciaron rápidamente las excelentes propiedades impermeabilizantes, adhesivas y de preservación que tenía.

Aseguran que ya en la antigua Mesopotamia los baños de los templos se recubrían con asfalto natural y en la Biblia se menciona en varias ocasiones su uso a propósito del Arca de Noé, la Torre de Babel, la Cuna de Moisés o las Murallas de Jericó. Los árabes desarrollaron un uso medicinal del asfalto de Judea, utilizándolo para el tratamiento de enfermedades de la piel y como desinfectante tópico. Y dadas las propiedades combustibles que presenta, en la antigüedad y hasta la Edad Media se utilizó con fines bélicos o destructivos, en forma de bolas de asfalto llameantes lanzadas con catapulta y en forma de baños incandescentes.

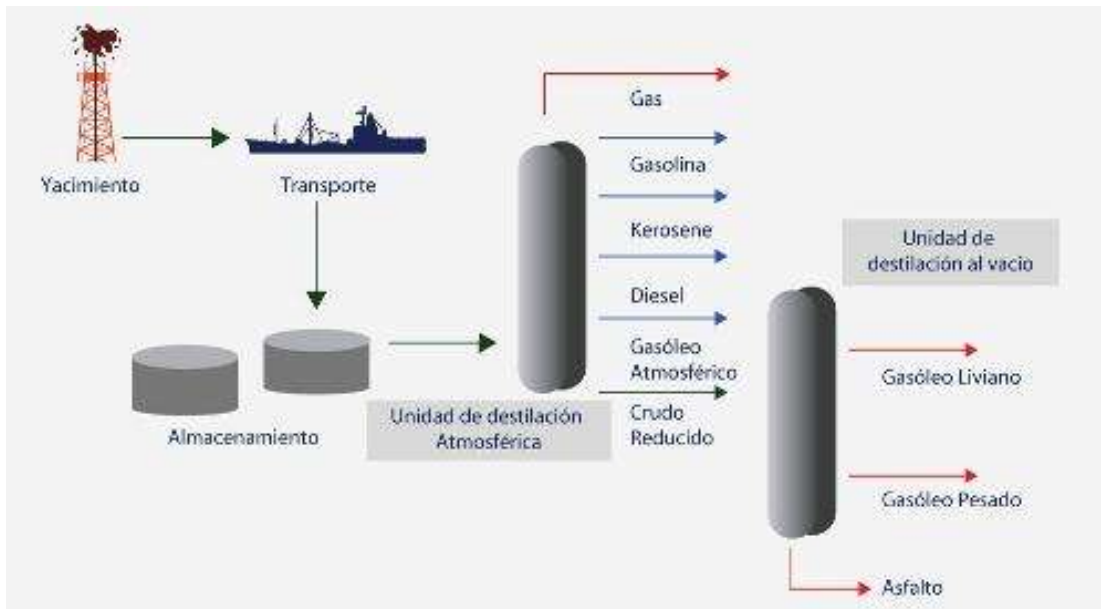
Aunque hubo experiencias previas, la primera patente del asfalto se registró a finales del siglo XIX, y la primera planta de producción de asfalto se abrió a principios del siglo XX en Cambridge (Reino Unido). El ritmo de las obras viales y la necesidad de mejorar los trabajos y reducir costos hizo progresar el desarrollo de las carreteras. Los métodos manuales se mecanizaron poco a poco y fueron apareciendo regadoras de asfalto a presión, distribuidoras de piedra, apisonadoras, rodillos neumáticos, etc.

La tecnología mejoró durante la segunda guerra mundial por necesidad, ya que los vehículos militares debían transportar mercancías muy pesadas. En su evolución, se han logrado avances significativos al tratar el cemento asfáltico original (obtenido del petróleo crudo) con otras sustancias que permiten mejorar su comportamiento cuando es sometido a condiciones extremas, como climas muy fríos o calurosos, tránsito de vehículos muy pesados o ambientes agresivos.

Sólo en Europa actualmente existen más de 4,000 plantas de mezcla asfáltica alrededor de 16 países (España se encuentra entre los principales fabricantes), que producen aproximadamente 300 millones de toneladas al año. El asfalto es totalmente reciclable y su reutilización ha aumentado considerablemente en los últimos años, llegando hasta el 70% (SFERB, Routes de France).

I.1 Proceso de obtención

El asfalto es un subproducto derivado del petróleo, es la última etapa del proceso que se lleva a cabo al producir gas metano, gas propano, gasolina, keroseno, gasóleo, gasóleo ligero de vacío, gasóleo pesado de vacío y por último, *asfalto*, como se observa en el esquema 1.



Esquema No. 1: Proceso de obtención del asfalto; fuente Repsol®

I.2 Composición

Elemento	Betún A	Betún B	Betún C	Betún D
Carbono (%)	83.77	85.78	82.9	86.77
Hidrógeno (%)	9.91	10.19	10.45	10.93
Nitrógeno (%)	0.28	0.26	0.78	1.1
Azufre (%)	5.25	3.41	5.43	0.99
Oxígeno (%)	0.77	0.36	0.29	0.2
Vanadio (ppm)	180	7	1380	4
Níquel (ppm)	22	0.4	109	6

Tabla No. 1: Composición del asfalto; fuente Repsol®

La composición del asfalto es una “enciclopedia” de química orgánica, ver la Tabla 1. En un análisis detallado de los asfaltos encontramos: saturados, anillos nafténicos y aromáticos, sencillos o múltiples, radicales ácidos, aldehídos, cetonas, está constituido por cadenas de peso molecular de hasta 200,000 (Repsol®).

La composición química de los asfaltos es muy compleja, básicamente está constituida por cadenas de moléculas compuestas fundamentalmente por carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y complejos de vanadio, níquel, hierro, calcio y magnesio.

La composición específica de un asfalto en particular dependerá de la procedencia del petróleo crudo del cual procede. El análisis químico del asfalto es muy laborioso, sin embargo, es posible distinguir dos grandes grupos que lo constituyen: los asfaltenos y maltenos, ver el esquema 2.

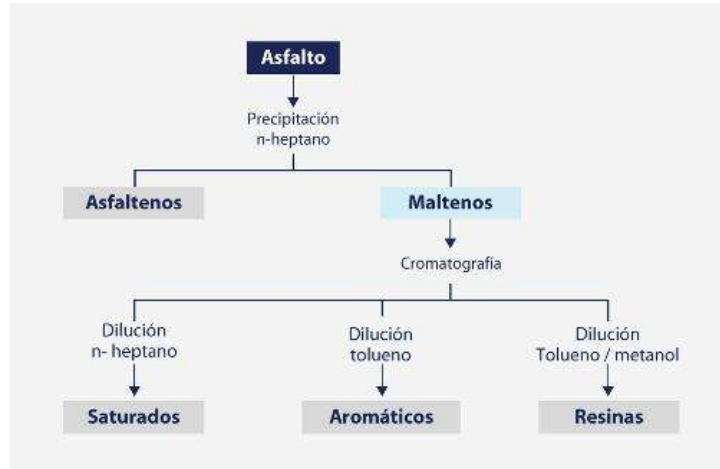
Dentro del grupo de los maltenos, podemos distinguir a tres grupos estructurales con propiedades definidas: saturados, aromáticos y resinas.

I.3 Estructura química de los asfaltos

Cuando el asfalto es disuelto en n-heptano, los materiales duros son precipitados, estos materiales son llamados asfaltenos, nombre propuesto por Boussingault en 1837. Existen otras fracciones asfálticas precipitadas por otros solventes, pero esta es la mejor manera de distinguir a estos materiales como insolubles en n-pentano (Repsol®).

Las sustancias solubles en n-heptano se denominan en general petrolenos, también llamados maltenos. Las resinas se encuentran en los petrolenos, pueden ser parcialmente

precipitadas por algunos solventes o adsorbidas de los petrolenos por medio de arcillas u otros minerales activados, estas resinas, previamente adsorbidas, pueden pasar a un proceso de desorción del mineral por solventes previamente seleccionados. Los carbenos son materiales duros presentes en los asfaltos de algunos asfaltos. Estos son solubles en disulfuro de carbono pero insolubles en tetracloruro de carbono (Repsol®).



Esquema No 2: Estructura del asfalto; fuente Repsol®

I.3.1 Asfaltenos

Son estructuras complejas de compuestos aromáticos de color negro o marrón que contienen además del carbón otros elementos químicos tales como nitrógeno, azufre y oxígeno, en general son compuestos polares de alto peso molecular, como se observa en la figura 1.

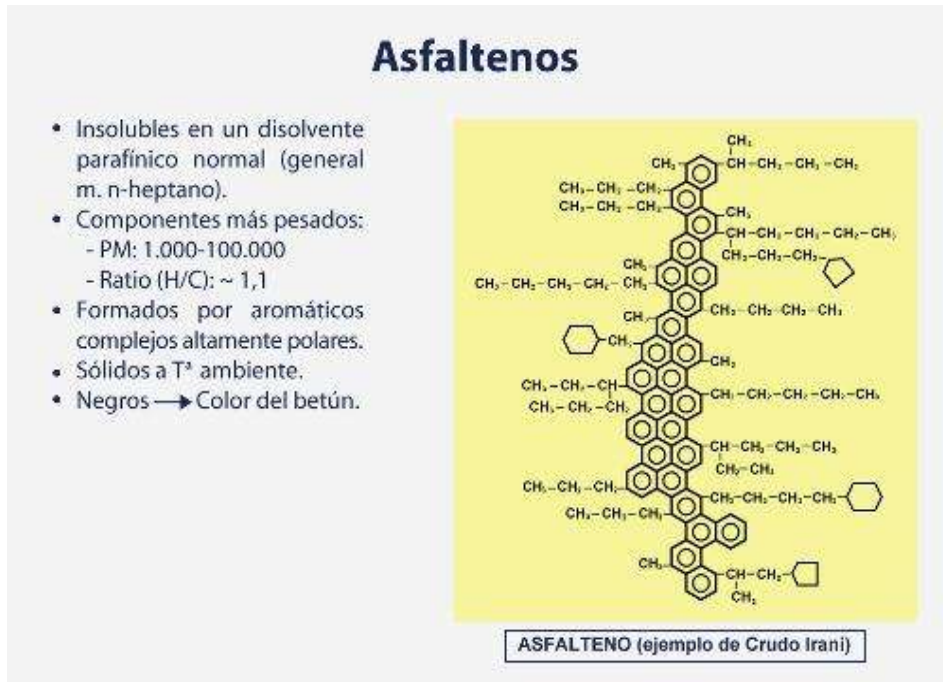


Figura No. 1: composición de los asfaltenos; fuente Repsol®

I.3.2 Maltenos

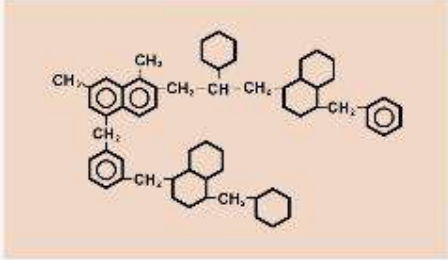
Son sustancias solubles en normal h-heptano y está constituido por resinas, saturados y aromáticos. Son compuestos muy polares de color marrón o marrón claro, sólido o semisólido, solubles en n-heptano y, al igual que los asfaltenos, son compuestos de carbón, hidrógeno y cantidades menores de nitrógeno, oxígeno y azufre.

I.3.2.1 Resinas

Las resinas son materiales muy adhesivos y actúan como dispersantes o peptizantes de los asfaltenos, como se observa en la figura 2.

Resinas

- Compuestos muy polares, fuertemente adhesivos.
- Sólidos o semi-sólidos
 - PM: 500-50.000
 - Ratio (H/C): ~1,3-1,4
- Peptizan los aftaltenos haciendo que el betún sea estable.
- La relación R/A gobierna el tipo coloidad (sol o gel) de un betún molecular.



Resina: Polar-Aromático

Figura No. 2: composición de las resinas; fuente Repsol®

I.3.2.2 Aromáticos

Los aromáticos constituyen entre el 40 y 65 % de la composición total de los asfaltos, son las fracciones de menor peso molecular en la estructura de los asfaltos, representan la mayor proporción de los dispersantes de los asfaltos peptizados. Los aromáticos son compuestos donde predominan las moléculas insaturadas de peso molecular de entre 300 a 2000, no polares, con especial capacidad para actuar como disolventes de otras cadenas hidrocarbonadas de alto peso molecular, ver figura 3.

Aromáticos

- Básicamente son cadenas no polares, predominan los anillos insaturados.
- PM: 300-2.000.
- Componente mayoritario de los betunes.
- Alta capacidad para disolver otros compuestos de alto peso molecular.



AROMÁTICO

Figura No. 3 composición de los aromáticos; fuente Repsol®

I.3.2.3 Saturados

Son cadenas lineales y ramificadas, saturadas, no polares, ver figura 4.



Figura No. 4: composición de los saturados; fuente Repsol®

I.4 Fisicoquímica del asfalto

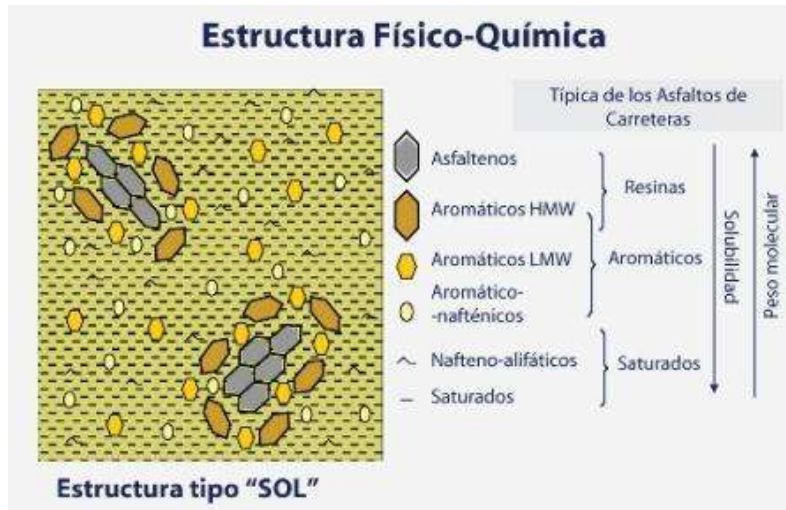


Figura No. 5: fisicoquímica del asfalto tipo sol-gel; fuente Repsol®



Figura No. 6: fisicoquímica del asfalto tipo gel; fuente Repsol®

I.5 Reología

Es la ciencia que estudia el flujo o la deformación de los materiales. El nombre fue propuesto hace más de setenta años por el Dr. E.C. Bingham del “Lafayette College” de los EE.UU de Norte América. Bingham es considerado uno de los padres de la reología.

Propiedades reológicas más importantes:

I.5.1 Consistencia/Viscosidad

- A temperatura intermedia: Penetración a 25°C:
- Base para la clasificación de los asfaltos por penetración: CA 40/50, CA 60/70, CA 85/100, CA 120/150.
- Controlan los criterios de mezcla.
- A temperatura alta: Punto de Reblandecimiento (Anillo y Bola, Punto de ablandamiento) o Viscosidad a 60°C.
- A temperatura baja: Punto de Fragilidad Fraass.

I.5.2 Susceptibilidad térmica

Índice de penetración.

I.5.3 Trabajabilidad

Relación Viscosidad/Temperatura.

I.5.4 Seguridad

Punto de Inflamación Cleveland (vaso abierto-COC).

I.5.5 Durabilidad – Envejecimiento

Valores tras TFOT/RTFOT.

I.6 Modos de utilización del asfalto

Para poder emplear el asfalto, es necesario reducir su viscosidad y para ello existen cuatro sistemas:

1. **Por calentamiento:** Aplicaciones (mezclas) en caliente.
2. **Añadiendo un producto ligero:** Asfaltos fluidificados o asfaltos diluidos.
3. **Dispersando el asfalto en agua:** Emulsiones bituminosas – asfálticas.
4. **Inyectando vapor de agua:** Espuma de asfalto - asfalto espumado.

El asfalto puede emplearse:

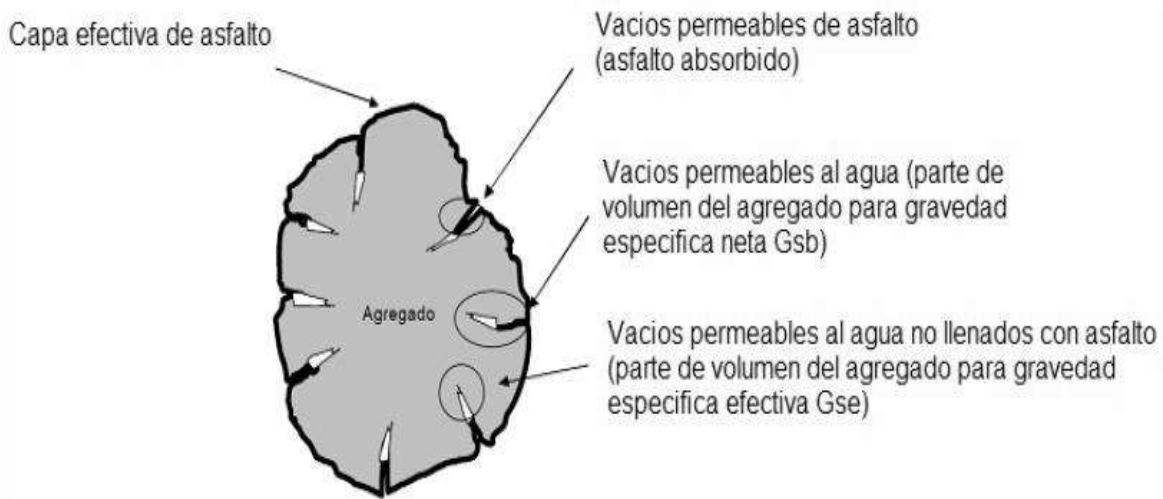
1. **"Tal cual":** Asfalto de penetración - asfalto convencional.
2. **Modificado:** variando sus propiedades.
3. **Por oxidación:** Oxiasfalto (Breas).
4. **Por adición de polímeros:** Asfalto polímero - asfalto polimerizado.

Y toma varios nombres según el país del que se trate, así como se muestra en la tabla 2.

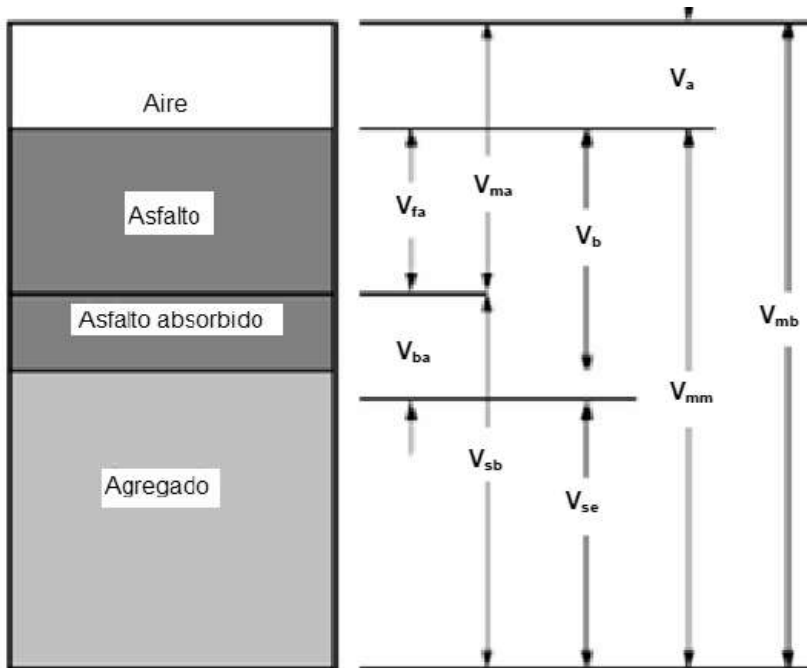
Equivalencias: Diferentes nombres para un mismo producto			
Español (España)	Español (América)	Inglés (Europa)	Inglés (América)
Betún	Asfalto	Bitumen	Asphalt
Asfalto	Asfaltita	Natural asphalt	Lake asphalt
Betún Fluidificado	Asfalto diluido Asfalto líquido Asfalto rebajado	Fluxed bitumen	Cut-back
Mezcla bituminosa	Concreto asfáltico Cemento asfáltico	Asphalt	Asphalt concrete

Tabla No. 2: equivalencias de nombre, de diversos productos derivados del petróleo; fuente Repsol®

Una vez que conocemos el producto con el cual vamos a trabajar, podemos relacionar de manera directa su comportamiento con el agregado pétreo, así como con el aditivo con el que va a trabajar de manera homogénea. De esta forma se puede esquematizar la relación volumétrica del asfalto – agregado pétreo, ver esquemas 3 y 4.



Esquema No. 3: relación volumétrica del asfalto-agregado; fuente Repsol®



Esquema No. 4: representación volumétrica del asfalto; fuente Repsol®

DONDE:

V_{ma} = Vol. de vacíos en agregado mineral.

V_{mb} = Vol. total de la mezcla asfáltica.

V_{mm} = Vol. de la mezcla asfáltica sin vacíos.

V_{fa} = Vol. de vacíos llenados con asfalto.

V_a = Vol. de vacíos de aire.

V_b = Vol. de asfalto.

V_{ba} = Vol. de asfalto absorbido.

V_{sb} = Vol. de agregado mineral (gravedad específica de la masa).

V_{se} = Vol. de agregado mineral (gravedad efectiva).

I.7 Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado, de manera que

aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan (Kraemer et al. 2004). Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto, ver la tabla 3. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

Número	Parámetro de clasificación	Tipo de Mezcla
1	Fracciones de agregado empleadas	Masilla
2		Mortero
3		Concreto
4		Macadam
5	Temperatura de puesta en obra	En frío
6		En Caliente
7		Tibias
8	Huecos en la mezcla (h)	Cerradas (h<6%)
9		Semicerradas (6%< h <12%)
10		Abiertas (h>12%)
11		Porosas (h>20%)
12	Tamaño máximo del agregado (t máx)	Gruesas (t máx>10mm)
13		Finas (t máx<10mm)
14	Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
15		Sin esqueleto mineral
16	Granulometría	Continuas
17		Discontinuas

Tabla No. 3; clasificación de las mezclas asfálticas; fuente Repsol®

II. EMULSIONES ASFÁLTICAS

II.1 Conceptos fundamentales

Entre los diferentes tipos de dispersiones acuosas conocidas – suspensiones (sólido/líquido), emulsiones (líquido/líquido), espumas (gas/líquido), las emulsiones constituyen un sistema heterogéneo muy diversificado. Precisamente por esto, es bastante comprensible que un sinnúmero de investigadores activos en cada especialidad técnica,

hayan estudiado este tipo de estructuras desde hace siglos. Sin remontar a “Galeano”, a quien se le ha atribuido la invención del “cerato” (ungüento de emulsión tipo agua en aceite), un gran número de autores han dejado una más que abundante bibliografía sobre éste tema (SFERB, Routes de France).

El término “**emulsión**” como se usará en este trabajo cumple con la definición tal como se enuncia en la novena edición del diccionario de la Academia Francesa, literalmente: *“una dispersión en forma de partículas muy finas de un líquido en otro líquido en el que no es soluble”*. Un equivalente, aunque es una definición más precisa, es la propuesta por el estándar Francés NF EN ISO 862 (NF T73-000) de octubre de 1995: *“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”*. De manera similar, la renombrada Unión Internacional de Química Pura y Aplicada, quien identifica la nomenclatura de los compuestos químicos, proporciona una definición similar.

Esta definición es suficientemente general en naturaleza, para aplicar a muchos productos de uso diario y que son tan diferentes como la leche, mayonesa, algunas cremas de belleza, mantequilla, pinturas o emulsiones asfálticas “inodoras”, todas compartiendo la propiedad de consistir al menos parcialmente en un líquido disperso en otro.

Por consiguiente, una emulsión cae en la categoría de las dispersiones, que incluyen la mezcla de una fase “discontinua”. Otro caso especial dentro de las dispersiones son las suspensiones donde la fase dispersa es un sólido presente en una fase continua que es líquida.

Una emulsión es diferente de una solución, que consiste en una mezcla de dos componentes miscibles, por ejemplo agua y alcohol en las bebidas alcohólicas. En éste caso, uno tiene que llegar a nivel molecular para encontrar evidencia visible de la presencia de alguno de los dos componentes. Por otra parte, aunque no siempre, en ocasiones es suficiente examinar una emulsión bajo el microscopio para ver que consiste en varios componentes.

En cualquier caso, debe notarse que dos líquidos no miscibles, por definición no tienen afinidad el uno con el otro, de manera que están obligados a repelerse minimizando su área de contacto. Por consiguiente, el estado más natural de una mezcla de dos líquidos como éstos sería estar completamente disociados, con el líquido más ligero flotando sobre el otro. De manera que una emulsión es vista como un estado mezclado, impuesto y calificado de manera general como termodinámicamente inestable o metaestable. Esto significa que todas las fuerzas naturales tienden a separar completamente los dos líquidos que formarían el estado estable, pero en escalas de tiempo que varían lo suficiente para permitir que una emulsión exista por un período tan corto como unos segundos o hasta algunos años, dependiendo del caso particular. Las emulsiones son entonces sistemas en evolución.

Esto implica también que una acción externa puede hacer que dos líquidos se mantengan en forma de una emulsión por cierto tiempo. En todos los casos, uno debe primero fragmentar el líquido que será dispersado en gotas finas, por ejemplo mediante la aplicación de energía mecánica y después estabilizar las gotas formadas así con uno o más componentes, conocido como emulsificante.

II.2 Categorías

De acuerdo a la definición previa, uno puede hacer una distinción entre emulsiones basándose en un número de criterios que expresen las diferencias que todos puedan observar entre las emulsiones.

Además de la clasificación por origen – natural o artificial - las emulsiones pueden distinguirse por sus componentes, y primeramente el tipo de fase, por ejemplo continua, que puede ser o no acuosa. La cantidad o tamaño de las gotas de la fase dispersa pueden ser también un criterio, así como el tipo de emulsificante.

II.2.1. Clasificación según el origen

Algunas emulsiones son de origen natural, aunque la gran mayoría son enteramente artificiales. Sin embargo, la distinción se está volviendo cada vez más difícil de realizar, ya que la mayoría de las emulsiones naturales pasan por un número de tratamientos en el intervalo de su extracción natural y su uso final, así que la emulsión “natural” no es 100% natural. Algunas emulsiones naturales que podemos encontrar son: la leche de los mamíferos, la mantequilla, margarinas, látex naturales (amapola, opio) y hule natural de árbol. Las demás emulsiones son artificiales tales como: pinturas, cosméticos, fármacos, agro-alimentos, productos de mantenimiento, industria de la construcción y obra pública, las emulsiones asfálticas caen en ésta categoría.

II.2.2. Clasificación según el tipo de fase

Con mucha frecuencia, las emulsiones son clasificadas por el tipo de fase continua. Ya que las emulsiones usadas con más frecuencia son las basadas en una fase acuosa y una fase oleosa, aquellas con una fase acuosa continua y fase oleosa dispersa son conocidas como emulsiones directas o alternativamente L/H (L, representando el prefijo lipo y H el prefijo hidro) indicando aceite en agua. Las emulsiones con una fase continua oleosa y una fase acuosa dispersa son conocidas como emulsiones de agua en aceite o H/L, ver figura 7.

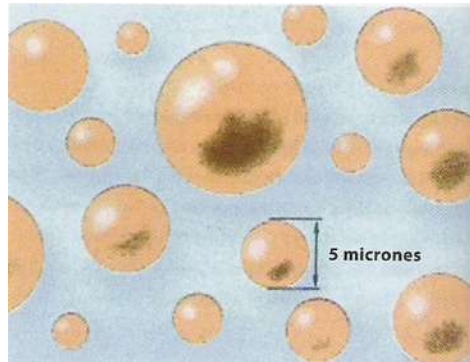


Figura No. 7: representación esquemática de una emulsión L/H o H/L; fuente SFERB

En realidad, tienen a menudo morfologías más complejas y la fase dispersa puede ser en sí una emulsión, controlada o no. En tales casos el término usado es el de doble emulsión o emulsión múltiple. Dependiendo de la fase continua, una emulsión agua en aceite, emulsionada por sí misma en agua sería denominada H/L/H (indicando agua en aceite en agua), ver figura 8, y similarmente una emulsión de aceite en agua emulsionada por sí misma sería denominada L/H/L (aceite en agua en aceite).

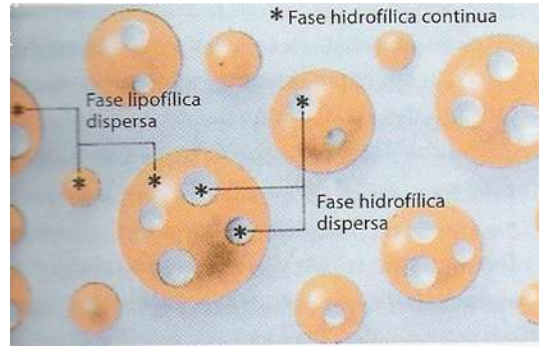


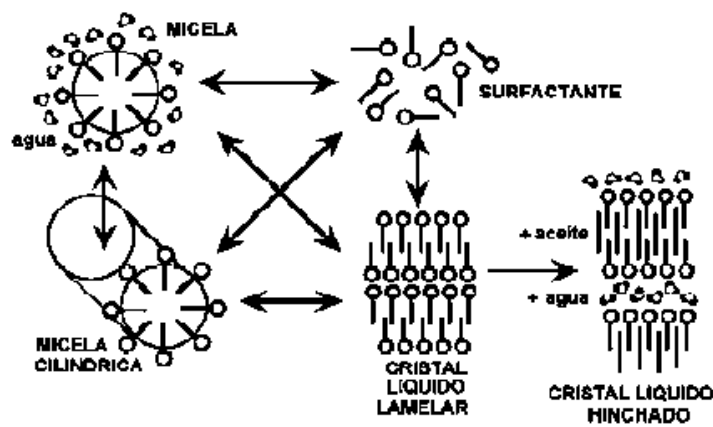
Figura No. 8: representación esquemática de una emulsión múltiple H/L/H; fuente SFERB

Las emulsiones asfálticas son casi siempre el doble de las emulsiones H/L/H con sólo un pequeño porcentaje de contenido de agua en el asfalto.

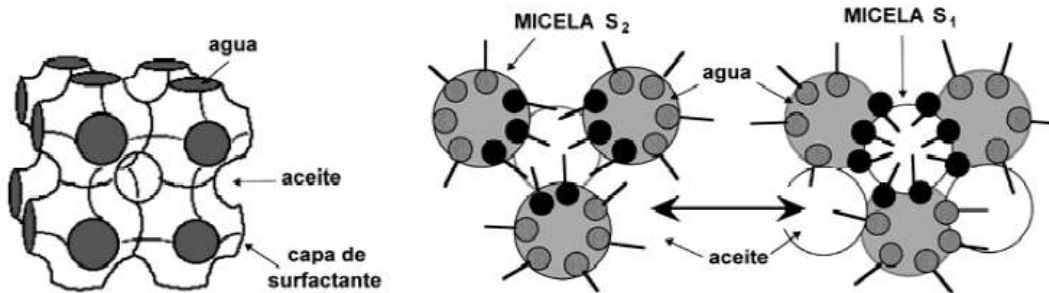
Las abreviaciones en inglés se están usando cada vez más en trabajos recientes realizados para los países de habla francesa donde por ejemplo lo que antes se denominaba emulsión “H/L” ahora también se indica como W/O (agua en aceite), ver esquemas 5 y 6.

II.2.3. Clasificación de acuerdo al tamaño de partículas

Las emulsiones son frecuentemente clasificadas basándose en el tamaño de sus partículas, esto es de sus gotas. Por ejemplo, con frecuencia se refieren a las micro emulsiones como emulsiones extremadamente finas con tamaño de partícula en el rango de 10 a 50 nm.



Esquema No. 5: equilibrios entre moléculas de surfactante y estructura de auto-asociación: micela, micela cilíndrica, cristal líquido lamelar, cristal líquido hinchado con agua y aceite; fuente Salager, Jean-Louis et al.



Esquema No. 6: Izquierda: geometría de curvatura cero en todas partes (superficie de Schwartz). Derecha: curvatura promedio cero con mezcla de micelas y micelas inversas; fuente Salager, Jean-Louis et al.

Cuando se consideran como sistemas fundamentalmente inestables, las emulsiones con tamaño de partícula menor a 500 nm (0.5µm) frecuentemente son denominadas nano-emulsiones o mini-emulsiones. Su diámetro puede disminuir tanto como hasta 30nm. En contraste, las emulsiones de mayor tamaño de partícula son comúnmente llamadas macro-emulsiones. Las emulsiones asfálticas, por ser como la gran mayoría de las emulsiones comerciales, caen en la categoría de las macro-emulsiones.

Al mismo tiempo, las emulsiones están caracterizadas por la distribución del tamaño de sus gotas. Una emulsión formada por gotas del mismo diámetro se le llama mono-dispersa y una con una gran diversidad en el tamaño de las gotas se le denomina poli-

dispersa. En la práctica, es muy difícil hacer emulsiones mono-dispersas y permanecen a la fecha esencialmente como productos experimentales.

II.2.4. Clasificación de acuerdo a la concentración de la fase dispersa

Otro método de clasificación usado comúnmente reside en el contenido de la fase concentrada. Estrictamente aplicada, la clasificación está en realidad basada en las propiedades reológicas de las emulsiones y en consecuencia depende en la fracción por volumen más que por peso.

Uno distingue primero las condiciones de concentración en las que la emulsión se dice que está diluida, típicamente correspondiente a una concentración en volumen menor al 10%. La emulsión entonces tendrá una viscosidad apenas superior a la de la fase continua. Entre el 10 y hasta cerca del 65 o 70%, dependiendo en particular de la distribución del tamaño de partícula, el término de semi-diluido se usa ocasionalmente, dentro del cual las interacciones entre las gotas empiezan a ser significativas. Más allá del 65 a 70%, entramos en el dominio de lo concentrado, donde las interacciones entre las gotas se vuelven extremadamente importantes.

II.2.5. Clasificación de acuerdo al emulsificante

Finalmente, existe un último método de clasificación basado en el emulsificante. Por ejemplo, las emulsiones basadas en emulsificantes sólidos (arcillas, talco, sílice coloidal,...) son conocidas como emulsiones de Pickering en referencia al trabajo del científico con el mismo nombre a principios del siglo XX.

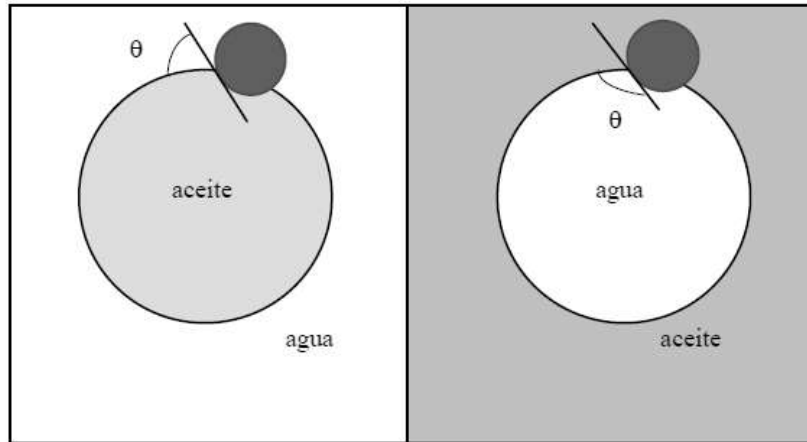


Figura No. 9: partículas hidrófilas e hidrófobas sobre la interfase aceite-agua en emulsiones estabilizadas por partículas sólidas; fuente Surfactant & Colloid Group, The University of Hull, Hull, HU6 7RX, Reino Unido.

Las emulsiones que usan un surfactante como emulsificante son denominadas con el mismo nombre que el del surfactante, así que uno habla de emulsiones aniónicas, emulsiones catiónicas, emulsiones no iónicas o emulsiones anfotéricas, ver figura 9.

II.3 Agentes superficiales

Para que una emulsión tenga un mínimo de estabilidad en el tiempo, un requisito para usarla, es obligatorio que contenga uno o más surfactantes o agentes tenso-activos. El estándar francés NF EN ISO 862 proporciona la siguiente definición: “*compuesto químico con actividad superficial que, cuando se disuelve en un líquido, especialmente agua, disminuye su tensión superficial o interfacial por adsorción preferencial en la superficie vapor/líquido u otras interfaces*”.

Las moléculas que corresponden a esta definición tienen dos afinidades (anfipático) en conflicto:

- a). Una parte consisten en un grupo polar con propiedades hidrofílicas (endofílico con relación al agua).
- b). otra parte consiste de un radical no polar dándole propiedades lipofílicas (exofílica con relación al agua).

Debido a esta dualidad, se dice que estas sustancias son anfifílicas, ver figura 10.

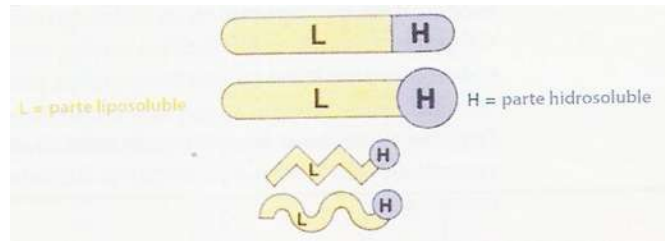


Figura No. 10: surfactantes como se han adoptado por varios autores; fuente SFERB

Las propiedades de los agentes de superficie fueron definidas en 1972 por el “Comité international des dérivés tensioactifs (CID)” (Comité internacional para los derivados de tensoactivos). La definición exacta de sus propiedades está indicada en el estándar NF EN ISO 862. Estas propiedades son:

- i. Poder detergente,
- ii. Poder para suspender,
- iii. Poder solubilizante,
- iv. Poder dispersante,
- v. Poder anti sedimentación,
- vi. Poder humectante,
- vii. Poder espumante,
- viii. Poder emulsificante,
- ix. Poder quelante,
- x. Poder complejante, y

xi. Poder secuestrante.

Algunos tensoactivos pueden poseer propiedades específicas adicionales, por ejemplo bactericida.

Muchos compuestos tensoactivos cumplen estos criterios naturales, pero más particularmente los resultantes de la síntesis química. Se mencionan más adelante de acuerdo a la clasificación más comúnmente aceptada, que se refiere a sus características iónicas. De acuerdo a éste criterio, pueden ser agrupados en cuatro clasificaciones:

- i. Agentes tensoactivos aniónicos
- ii. Agentes tensoactivos catiónicos
- iii. Agentes tensoactivos anfólics
- iv. Agentes tensoactivos no iónicos

II.3.1. Agentes tensoactivos aniónicos

Son productos tensoactivos “*que al ionizarse en solución proveen iones orgánicos cargados negativamente que generan actividad de superficie*” (estándar NF EN ISO 862, índice de clasificación T73-000). Industrialmente acumulan poco menos de la mitad de la producción mundial de tensoactivos. La principal aplicación industrial de estos agentes es el mercado de los detergentes, ver figura 11.

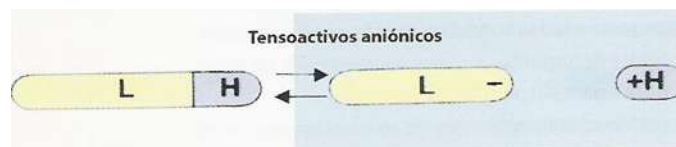
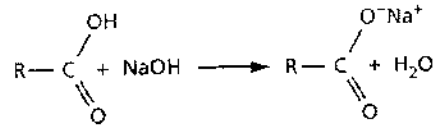


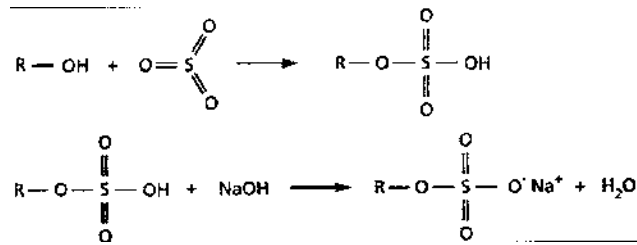
Figura No. 11: representación esquemática de un tensoactivo catiónico; fuente SFERB

Algunos ejemplos de éstos son:

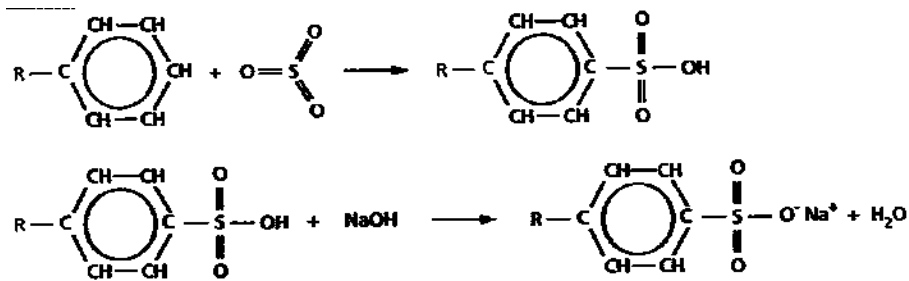
a) Sales de ácidos grasos



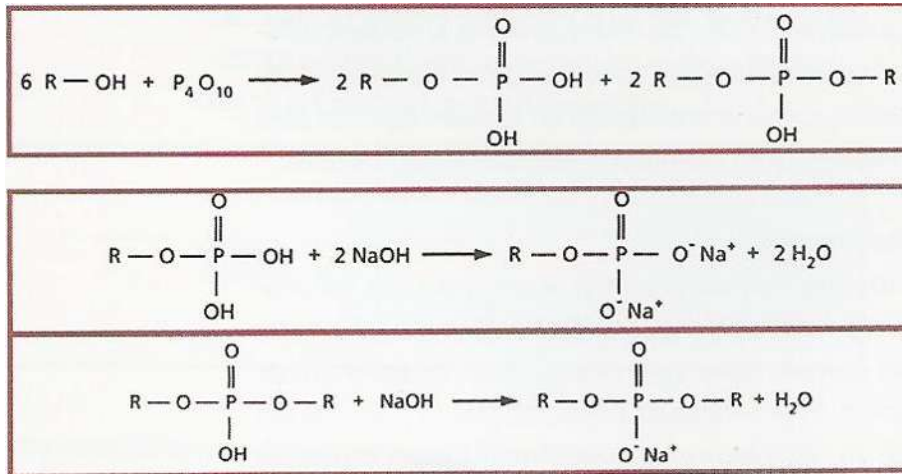
b) Sulfatos



c) Sulfonatos



d) Fosfatos



e) Sulfosuccinatos

II.3.2. Agentes tensoactivos catiónicos

Son tensoactivos *que se ionizan en solución acuosa, para producir iones orgánicos positivamente cargados, responsable de la actividad superficial* (estándar NF EN ISO 862, índice de clasificación T73-000).

Estos agentes tensoactivos catiónicos son, como ya se mencionó anfifílicos. La cadena hidrocarbonada R es lipofílica y el grupo reactivo (cabeza polar) es de naturaleza hidrofílica, acentuada por la formación de sal, ver figura 12.

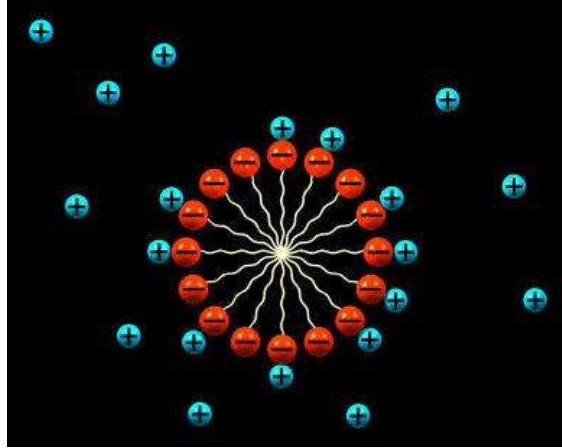
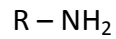


Figura No. 12: representación química de tensoactivos catiónicos; Fuente M.C. Teresa Unda C.

Las principales aminas y sus derivados son:

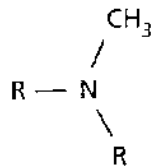
a) Monoaminas primarias



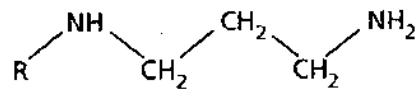
b) Aminas secundarias



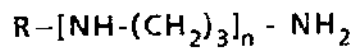
c) Aminas terciarias



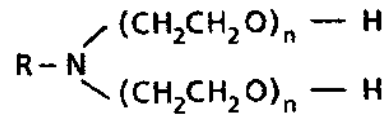
d) Diaminas



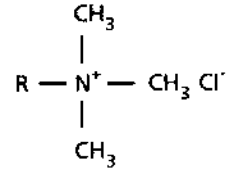
e) Poliaminas



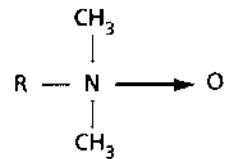
f) Aminas oxialquiladas



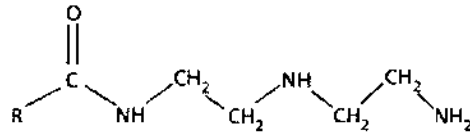
g) Sales cuaternarias de amonio



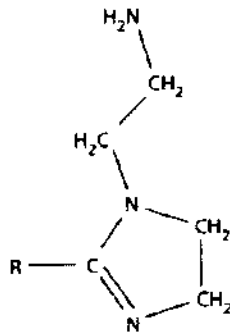
h) Óxido aminas



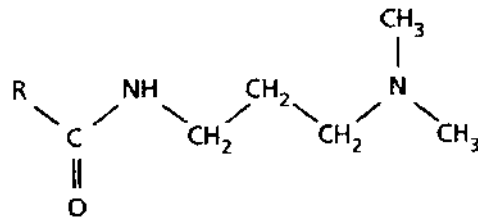
i) Amido amina



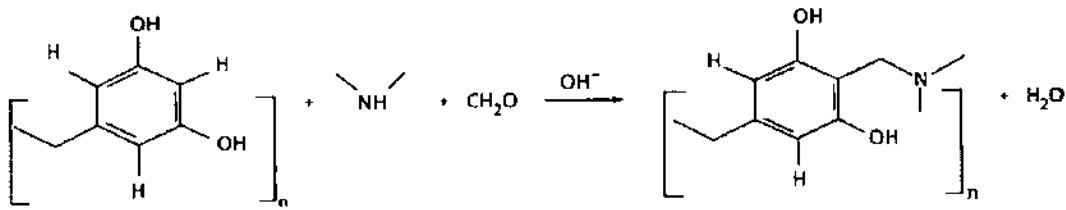
j) Imidazolina



k) Amido amina terciaria



1) Lignin amida

**II.3.3. Agentes tensoactivos anfóteros**

Estos productos se ionizan en solución acuosa para proveer iones orgánicos positivamente cargados, poseyendo un pH ácido que se dice tiene polaridad catiónica, o cargado negativamente poseyendo un pH básico, es decir de polaridad aniónica.

Algunos ejemplos son:

- a) Ácido de alquilamina.
- b) Betaína

II.3.4. Agentes tensoactivos no iónicos

Son aquellos “*que no se ionizan en solución acuosa pero poseen parte de la molécula que es intrínsecamente afín al agua*” (NF EN ISO 862 T con índice de clase 73-000). A escala industrial ahora representan la principal categoría de tensoactivos producidos en el mundo, superando a los agentes aniónicos y sumando en total más de la mitad del mercado. Los otros agentes sólo tienen una participación marginal del mercado.

Las principales reacciones químicas son las de los derivados etoxilados obtenidos por la polimerización de adición de óxido de etileno en alcohol. Donde n típicamente varía entre 1 y 100, pero puede tener valores en el rango de los 200. Las cadenas grasas usadas varían considerablemente pero son generalmente limitadas a alquiléteres (o alquilalcoholes) y alquifenoles, resultando en alquifenoles etoxilados.

El número de unidades configuracionales de oxietileno puede ser ajustada y los tensoactivos no iónicos pueden entonces ser “hechos a la medida”, explicando así el interés que despiertan.

II.4 Componentes

Las emulsiones asfálticas, tal como cualquier otra aplicación industrial, han evolucionado en su tecnología desde su invención. Particularmente, su fórmula química, inicialmente aniónica, es ahora principalmente catiónica. De igual manera, la base ligante que originalmente consistía en puro asfalto ahora ha sido adaptada a un sinnúmero de aplicaciones destinadas a las emulsiones.

II.4.1. Emulsiones aniónicas

Las emulsiones asfálticas con una base de tensoactivo aniónico fueron las primeras en ser usadas. Sin embargo, prácticamente han desaparecido en gran parte del mundo; por otra parte, todavía son de uso común en algunos países como EUA o España. Su nivel de producción sigue estando por debajo de las emulsiones catiónicas, ver figura 13.

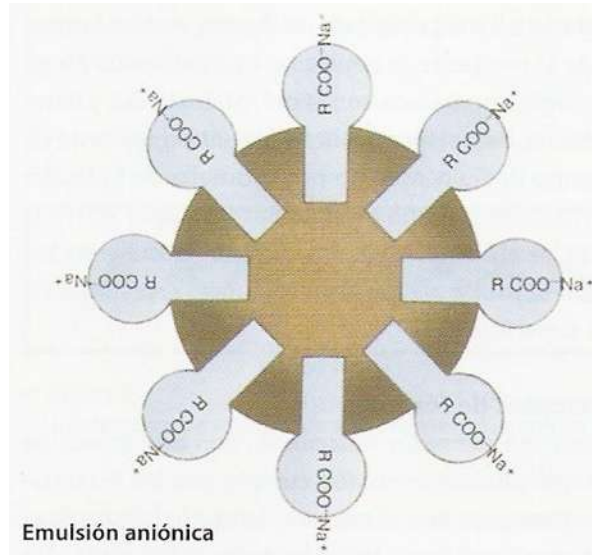


Figura No. 13: gota de asfalto en una emulsión aniónica; fuente SFERB

Algunos asfaltos contienen naturalmente ácidos grasos, generalmente ácidos nafténicos, que pueden ser saponificados en medios básicos. Cuando están presentes en cantidad suficiente, (lo que depende esencialmente del origen del asfalto) se pueden estabilizar en una emulsión sin la necesidad de adicionar ningún emulsificante adicional. Entonces se habla de un asfalto auto emulsificado. Con la disminución de las emulsiones aniónicas, esta propiedad de algunos asfaltos prácticamente no se usa pero crea confusión alrededor de la idea de que una emulsión puede obtenerse mediante el uso de algunos tipos de asfalto. Esto no es verdad y dada la cantidad adecuada del emulsificante adecuado, una emulsión puede hacerse con la mayoría de los asfaltos. De cualquier modo prevalece el hecho de que el tipo de asfalto afecta la calidad de la emulsión, aún en la presencia de tensoactivos y de que el origen del asfalto puede ser importante para aplicaciones específicas.

Las emulsiones llamadas “de alta flotación” usadas comúnmente en Norteamérica son un caso especial de emulsiones aniónicas basadas en “tall oil”. En este caso, el contenido de emulsificante es muy alto. Debido a esto, la película de ligante residual obtenida al romperse la emulsión, es modificada en su Reología, comparada con la del

asfalto inicial y tiene carácter de gel incrementándose enormemente su tiempo de flujo, medido por la prueba de flotación Americana (prueba de flotación estándar ASTM D 139) de ahí su nombre. Este asfalto residual modificado es usado principalmente para el revestimiento de superficies.

II.4.2. Emulsiones catiónicas

Las fases acuosas catiónicas consisten de agua, sales de tensoactivos y ácido (generalmente ácido clorhídrico) y, dependiendo de las propiedades que requiera la fórmula, pueden adicionarse agentes espesantes o sales como cloruro de calcio.

La naturaleza catiónica se incrementa en medio ácido y la ionización de la molécula catiónica ocurre en la fase acuosa durante el proceso de emulsificación del asfalto, permitiendo que el asfalto adsorba al tensoactivo. La parte lipofílica (R) se adsorbe en el asfalto y el grupo polar se orienta a la interfaz entre el asfalto y el agua, ver figura 14.

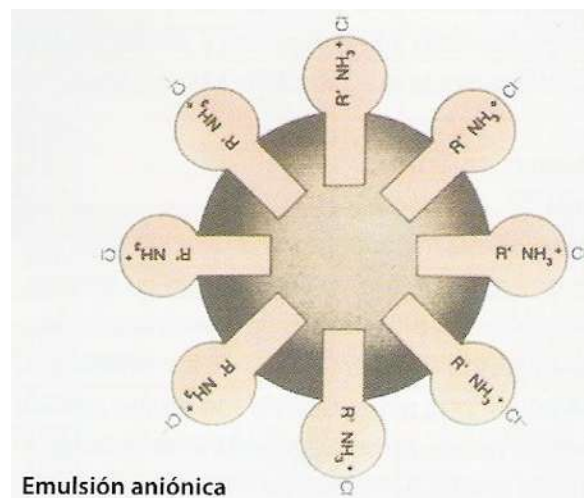


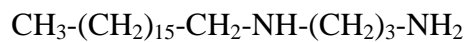
Figura No.14: gota de asfalto en una emulsión catiónica; fuente SFERB

Las gotas de asfalto se cargan positivamente, asegurando así la estabilidad de la emulsión durante su almacenamiento a través de la repulsión electrostática. En contacto con el agregado, la emulsión se desestabiliza y se rompe, después de lo cual la afinidad de las gotas de asfalto por las cargas del mineral hace que se adhieran al agregado.

II.4.2.1. Emulsificantes catiónicos para emulsiones asfálticas

Mientras que es cierto que un gran número de reacciones químicas y productos existen para los emulsificantes catiónicos, como ya se ha dicho, un número importante de otros grupos aún predomina. En el mercado francés los más usados son los siguientes:

- a) **Propilen-diaminas de sebo:** se obtienen usando sebo como ácido graso inicial, ya que esta grasa animal consiste principalmente de ácido octadecanoico o ácido esteárico (cerca del 65%) la fórmula estándar de éste tipo de molécula es:



La representación espacial de ésta molécula se muestra a continuación, en la que los átomos de hidrógeno están en color blanco, el carbono en azul, el nitrógeno en morado y el oxígeno en rojo, ver figura 15.



Figura No. 15: representación espacial de una propilen-diamina de sebo; fuente SFERB

Una posible aplicación es para emulsiones asfálticas de sedimentación (ruptura) rápida.

- b) **Amido-aminas de sebo:** También se obtienen usando sebo como ácido graso inicial, ver figura 16. El ácido graso se hace reaccionar con poliamidas de alquilo y etanolamina, resultando en amido-aminas, la fórmula típica para ésta molécula es:

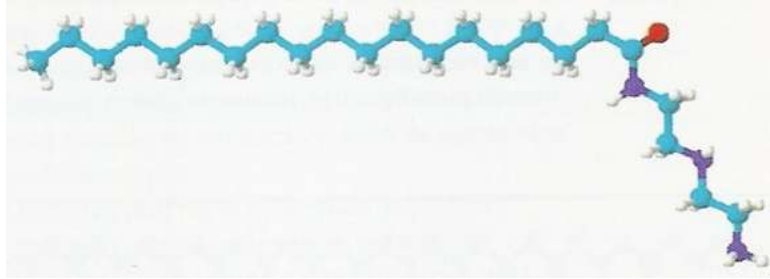
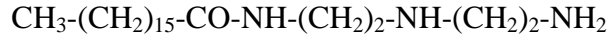


Figura No. 16: representación espacial de una amido-amina de sebo; fuente SFERB

Un posible uso es para emulsiones de sedimentación (ruptura) rápida.

- c) **Amonio cuaternario:** Estos se obtienen de la cuaternización de diaminas, y en particular de propilen-diaminas como las mencionadas anteriormente, la fórmula típica para ésta molécula es:

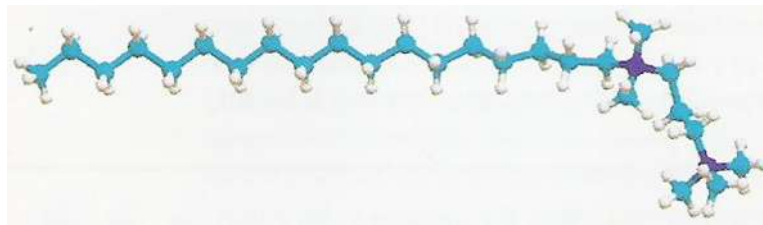
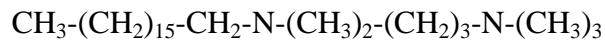


Figura No. 17: representación espacial de un amonio cuaternario; fuente SFERB

Una posible aplicación es para emulsiones sobre-estabilizadas (súper-estables), ver figura 17.

- d) **Propilen-poliaminas de sebo:** Estas son obtenidas usando sebo como ácido graso inicial. El número de N-propilen-aminas varía para cada cadena, pero el valor medio es cercano a 4, la fórmula típica para ésta molécula es:

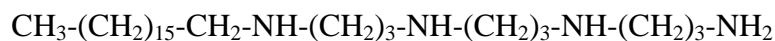


Figura No. 18: representación espacial de una polipropilen-amina de sebo; fuente SFERB

Dado que la mayoría de los grupos amina aumentan la adhesión con el agregado, una posible aplicación sería para emulsiones de rompimiento lento, ver figura 18.

II.4.3. Fase dispersa hidrocarbonatada

El estándar NF EN 13808 “*especificaciones para emulsiones catiónicas de asfalto*” deja a la voluntad del formulador de emulsiones de asfalto el utilizar asfalto puro, asfalto fluidificado o fluxado, incluso modificado por una o varias sustancia, lo más habitual son las macromoléculas destinadas a modificar algunas propiedades intrínsecas del ligante de base. Estas adiciones tienen por objeto adaptar la emulsión a la técnica implementada, a las tensiones debidas al tránsito y a las condiciones ambientales locales.

Se debe tener una consideración especial con las emulsiones destinadas a la fabricación de aglomerados almacenables. El almacenamiento de éstas mezclas, que puede ser de varias semanas antes de ponerse en obra, será posible mediante una mezcla cuidadosamente elegida de asfalto y un solvente (bien de un destilado de petróleo o de un

aceite procedente de la destilación de un alquitrán hulla), cuyas proporciones deberán establecerse en función de la evaporación de las fracciones volátiles. Los dos criterios siguientes pueden ser usados como base de reflexión.

- i. Límite máximo de la viscosidad del ligante residual por encima del cual la manejabilidad y la puesta en obra de la mezcla se hace con dificultad: 0.6 a $0.8 \text{ m}^2/\text{s}$ (es decir, 1500 a 2000 s STV, abertura 10 mm);
- ii. Límite mínimo de la viscosidad del ligante residual por debajo del cual la adherencia del aglomerado en frío puede verse afectada, sobre todo si se emplean en obras con altas velocidades de tránsito: 0.02 a $0.04 \text{ m}^2/\text{s}$ (es decir, 50 a 100 s STV abertura 10 mm).

Por consiguiente, la viscosidad ideal del ligante para realizar la puesta en obra hay que situarla entre estos dos límites de viscosidad, calculados a la temperatura ambiente dónde se depositará la mezcla.

Las emulsiones utilizadas para la realización de tratamientos superficiales con gravilla merecen especial atención. Las propiedades que se esperan de éstos tratamientos exigen de sus ligantes de base cualidades específicas de adhesividad y cohesión. En efecto, los agregados en los tratamientos superficiales con gravilla se encuentran sometidos a muy importantes fuerzas de arranque. Para que un agregado resista alguna de estas fuerzas (denominadas tensión de adhesión global, ver figura 19), es preciso que simultáneamente cumplan lo siguiente:

1. Los agregados no se despeguen del ligante.
2. Que el ligante no se despegue del soporte.
3. El ligante no se rompa a causa de ésta fuerza de tracción.

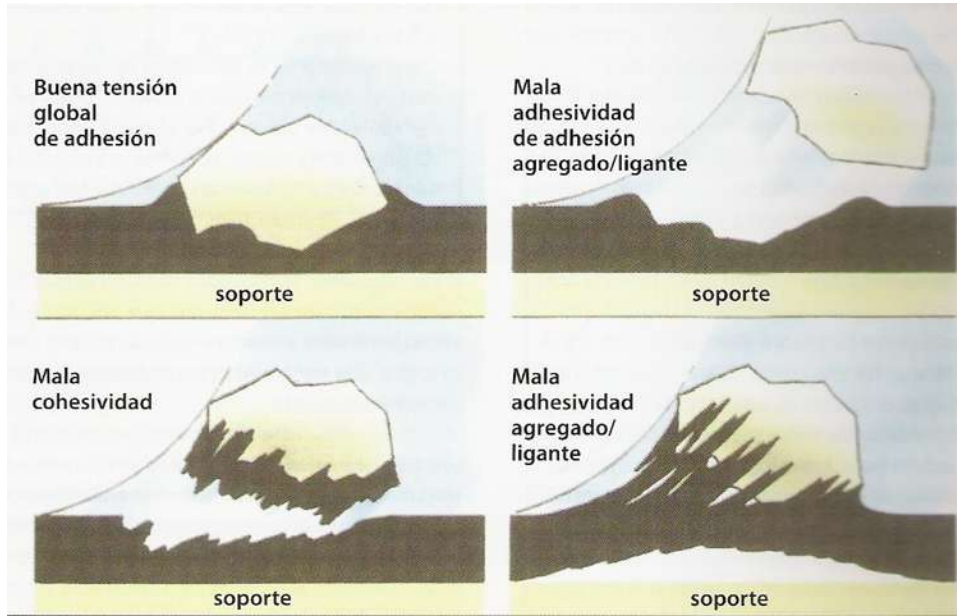


Figura No.19: ilustración que muestra la necesidad de suficiente adhesión y cohesión; fuente SFERB

La adhesión es satisfactoria si se cumplen estas dos condiciones:

1. En primer lugar, que el ligante pueda entrar en contacto con los cuerpos presentes, especialmente con los agregados y el substrato. Para conseguir esto el ligante debe ser suficientemente líquido, lo que es una característica principal de una emulsión. En segundo lugar el ligante debe “mojar” los agregados y el substrato, lo que es más difícil en el caso de emulsiones catiónicas que en el de emulsiones aniónicas. Esta primera condición de adhesividad se denomina adhesión activa, ver figura 20.
2. Si la primera condición ha sido cumplida, los componentes deben enlazarse, particularmente el ligante y el agregado. Este enlace no debe romperse bajo la acción de un agente perturbador como el agua; este efecto se manifiesta en particular en presencia de partículas finas que se incrustan bajo la acción del tránsito. Esta segunda condición se denomina adhesividad pasiva.

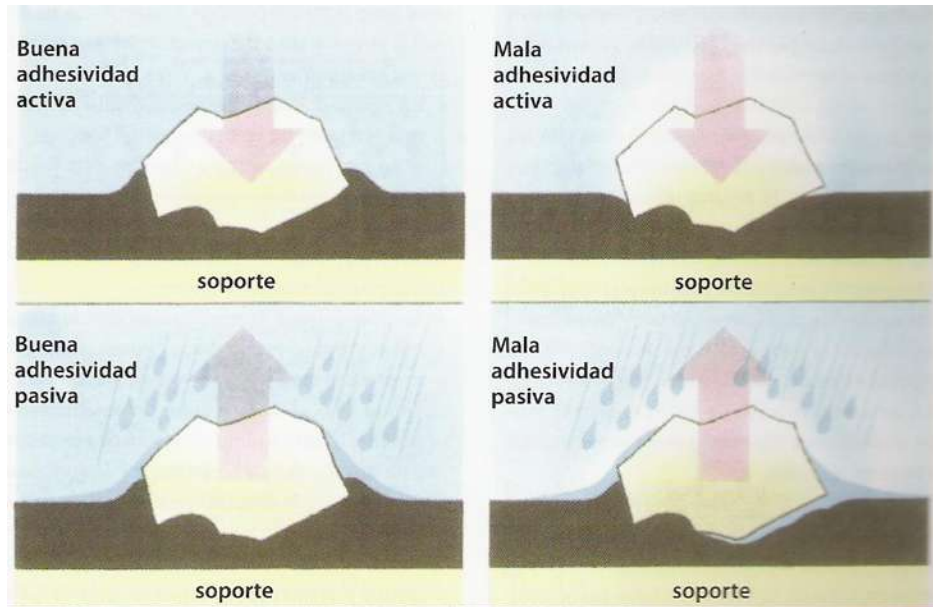


Figura No.20: comportamiento de un agregado en relación a la adhesión (pasiva y activa); fuente SFERB

La cohesión interna del ligante, es la capacidad del ligante de soportar el esfuerzo cortante. Depende de varios factores, siendo el más importante la viscosidad. La cohesión presenta un valor óptimo que corresponde con un rango de viscosidad dada y que depende de la temperatura. Así por debajo de una cierta temperatura el ligante se hace duro y “quebradizo” cuando se sujeta a un esfuerzo mecánico. Por el contrario si la temperatura sobrepasa un determinado valor, el ligante se vuelve demasiado fluido y demasiado “blando” para poder resistir a los esfuerzos de tensión.

Dicho esto, ¿cómo afecta la aplicación de ligante de emulsiones catiónicas? Al contrario que las emulsiones aniónicas, estos ligantes tienen mejor capacidad de mojar debido a la naturaleza de los tensoactivos catiónicos de ser poco hidrofílicos. Por el contrario, las emulsiones catiónicas le confieren al asfalto una adhesividad pasiva netamente superior. En teoría la solución es sencilla, para mejorar el mojado basta con reducir la viscosidad del ligante base. Sin embargo, si la viscosidad del ligante disminuye, la cohesividad puede disminuir en condiciones de mayor temperatura, causada por un

excesivo reblandecimiento del ligante. Esta es una de las paradojas que un especialista debe tener en cuenta cuando formula una emulsión. En consecuencia, un solvente, polímero o incluso ambos pueden ser añadidos a la emulsión base de asfalto para cumplir con todos los requerimientos globales de adhesión.

En resumen se puede decir que, en el caso de las emulsiones catiónicas para tratamientos superficiales con gravilla, el diseño de la formulación implica no solamente la mejor selección de los tensoactivos que, desde el punto de vista químico, asegure la adhesividad al soporte, subbase o superficie sobre el que fue aplicado y a los agregados a largo plazo, sino también el más juicioso compromiso en la composición del ligante. Se trata de un compromiso entre la necesidad de obtener, tras la rotura de la emulsión, un ligante lo suficientemente fluido para que la película de asfalto se deposite y moje perfectamente al agregado y, a mediano plazo, un ligante lo bastante rígido para que no sufra retracciones y pueda resistir las sollicitaciones dinámicas generadas por el tránsito, sabiendo que este comportamiento depende fundamentalmente de las condiciones climáticas locales.

Queda por evocar la calidad del ligante base de las emulsiones destinadas a la fabricación de mezclas: aglomerados, lechadas, grava-emulsión, etc. En este caso, el asfalto no debe reblandecerse por un solvente cualquiera, con el fin de evitar que disminuyan las características del producto. Sin embargo, para resolver problemas específicos, es posible añadir polímeros al asfalto puro, bien en forma de látex o bien mezclándolos en el ligante base.

II.5 Propiedades

Usar emulsiones asfálticas para producir recubrimientos requiere del control de las propiedades de la aplicación. Esencialmente consiste en:

- i. Estabilidad durante el almacenamiento: debe ser el apropiado a las condiciones que prevalecen en el lugar de trabajo.
- ii. Estabilidad durante el transporte: como regla general, la emulsión no debe transportarse a distancias largas. En Francia la red de centros de producción es suficientemente densa como para asegurar que la distancia promedio que el producto debe ser transportado no es mayor a cincuenta kilómetros. Sin embargo puede suceder que una emulsión de un producto especial tenga que acarrear por varios cientos de kilómetros. En todo caso el transporte no debe afectar las características originales de la emulsión.
- iii. Viscosidad: La emulsión producida debe poder ser bombeada y manipulada. Aunque esta viscosidad también debe cumplir con las especificaciones aplicables y su Reología y comportamiento de flujo deben adaptarse a las condiciones de uso.
- iv. Velocidad de ruptura: cuando se pone en contacto con los agregados, la emulsión debe “romper” de manera que el asfalto residual recupere sus propiedades macroscópicas y actúe como ligante del material con el que se está usando. Esta velocidad de ruptura debe adaptarse para cumplir con el tipo de aplicación definida para la emulsión.
- v. Adhesión del asfalto: la formulación de la emulsión debe asegurar que su componente asfáltico se adhiera correctamente a la superficie de los agregados con los que entra en contacto, ambos inmediatamente y a largo plazo.

Los especialistas en emulsiones han refinado sus formulaciones a través del ensayo y error. Basados en su experiencia es posible una formulación rápida para una aplicación específica.

La aplicación hacia el entendimiento del fenómeno característico del comportamiento de una emulsión en una situación dada ha permitido la racionalización de una metodología para formular. Mediante la vinculación de las características fisicoquímicas de una emulsión a su comportamiento, hemos aprendido a ajustar las formulaciones y ahora podemos esperar que quedemos cerca de lo óptimo. El hecho es que el arte de un formulador es encontrar la mejor relación entre las propiedades finales que usualmente son contradictorias – a tal grado que se podría decir que una emulsión es una forma de “esquizofrenia en una botella”.

II.5.1. Características fisicoquímicas

II.5.1.1. Distribución de tamaño

Las emulsiones forman parte de la composición de una gran cantidad de productos, o intervienen en el funcionamiento de varios procesos. La fórmula de la emulsión afecta naturalmente las propiedades requeridas para una aplicación específica. Sin embargo, para la misma fórmula, se puede observar una gran variedad de distribuciones de tamaño de partícula que forman la emulsión, que naturalmente afectará las propiedades de la emulsión.

II.5.1.1.1. Los distintos parámetros

Un método usado comúnmente consiste en hacer uso de un espectro de difracción de un rayo láser para determinar la distribución del tamaño de las partículas. Esto es caracterizado comúnmente con base en dos magnitudes, la media del diámetro y su desviación estándar.

La media del diámetro representa el diámetro al cual la población de partículas está distribuida en dos grupos idénticos. El criterio de “identidad” puede ser el número, el volumen o el peso (cada criterio tiene su propia media del diámetro). La extensión de la curva en el eje de los diámetros puede ser cuantificada por la desviación estándar de la distribución. Mientras la desviación estándar sea más pequeña, la emulsión será más monodispersa.

Como resultado de la dispersión del asfalto en pequeñas gotas y la distribución del tamaño de las mismas, la superficie desarrollada por este asfalto se convierte en un parámetro principal a considerar al entender los fenómenos que afectan la emulsión.

El área superficial específica representa la cantidad de área superficial asociada con un gramo de material. Considérese una emulsión en la cual las gotas son de idéntico diámetro D expresado en micrones (emulsión homométrica). Si se supone que el peso específico del asfalto es de 1 kg/dm^3 , el área superficial específica A_s expresada en m^2 , desarrollada por un gramo de asfalto es expresada por la fórmula:

$$A_s = 6/D$$

La tabla 4 contiene los valores de A_s para los diferentes valores de D , juntos con el área total de la superficie de las gotas presentes en un litro de una emulsión que contiene el 60% de asfalto.

D (micrones)	As = (m ² /g)	Área total de la superficie de asfalto (m ²)
10.0	0.6	360
6.0	1.0	600
1.0	6.0	3600
0.6	10.0	6000

Tabla No. 4: valores As para diferentes valores D; fuente SFERB

Si recordamos que la emulsión se establece mediante el acomodo de moléculas de tensoactivos en la superficie de las gotas, se puede entonces entender por qué la cantidad de emulsificante necesaria para conseguir una emulsión estabilizada es lo más importante, y en consecuencia la finura de la emulsión.

II.5.1.1.2. Caracterización de la extensión de la distribución de tamaño de una emulsión

Considerando la hipótesis de que la verdadera distribución de los diámetros corresponde a una ley normal logarítmica, de la cual la desviación estándar ξ puede ser derivada:

$$\xi = 0.5 \log (D_{84}/D_{16})$$

En esta expresión, D_{84}/D_{16} representa los valores de los diámetros para los que el 84% (y respectivamente el 16%) de las gotas tienen un diámetro mayor. El límite de ésta aproximación es la suposición de una distribución logarítmica normal. En el caso de las

emulsiones de ligantes hidrocarbonados destinados para construcción de caminos, ésta hipótesis es verificada para asfalto puro o rebajado. En contraste, para emulsiones asfálticas, la pregunta surge de si estamos en presencia de poblaciones bimodales o más aún multimodales. Esta es la razón por la que otras magnitudes se pueden usar para caracterizar la extensión de la distribución.

Por ejemplo, se puede definir la dispersión p como el cociente de la desviación estándar y la media del diámetro. No hay una frontera estricta para distinguir una dispersión monodispersa y polidispersa. Comúnmente se considera que cuando el valor de p sea menor a 0.1, la emulsión puede ser considerada monodispersa. La figura 21 muestra ejemplos de distribuciones para las que una media del diámetro constante ha sido escogida y para la cual la desviación estándar ha variado.

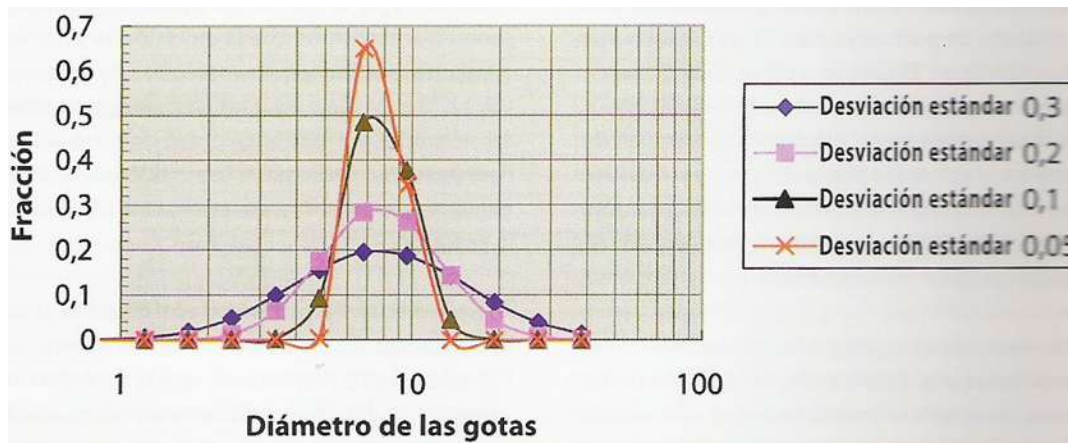


Figura No.21: distribuciones de tamaño de partícula de una emulsión con la media del diámetro fijada en 0.7 micrones y con una desviación estándar variante; fuente SFERB

II.5.1.1.3. Ajustes en la distribución de tamaño

La distribución de tamaño de una emulsión determina las propiedades para su aplicación y es interesante saber cómo una distribución de tamaño dada puede ser obtenida. Una de las primeras formas es variar el tipo y concentración de emulsificante. Ha sido de conocimiento general desde hace tiempo que todos los emulsificantes generan gotas con distinta efectividad. Siendo el resto de los factores iguales, los emulsificantes catiónicos pueden resultar en variaciones con un factor de hasta dos en las medias del diámetro. La finesa de una emulsión también decide la cantidad de tensoactivo a utilizar. Se ha demostrado que cuando se ha removido de las condiciones críticas de emulsificación, el diámetro decrece linealmente con el logaritmo de la concentración de emulsificante. También se sabe que los parámetros termo-mecánicos de manufactura de la emulsión también afecta la distribución del tamaño de las partículas.

II.5.1.2. pH

Esta es una característica de la fase acuosa. Cuando no hay migración de compuestos químicos de una fase a la otra, el pH de las emulsiones permanecerá igual que el del jabón inicial de la emulsión.

Pero, por ejemplo las emulsiones catiónicas, la mayoría del tiempo se observa un ligero incremento en el pH generalmente asignado a la migración de moléculas nitrogenadas originadas del ligante.

En algunos casos especiales, se observan grandes variaciones en el pH. Uno puede entonces esperar que esté en la presencia de una película interfacial de propiedades inusuales y haga susceptible a las emulsiones a ciertos defectos –en particular la estabilidad en almacenamiento y la velocidad de ruptura.

La acidez libre, ejemplo el pH, gobierna los siguientes eventos en la emulsión:

- El balance del emulsificante entre la interfaz, la fase acuosa y la fase hidrocarbonada,
- El balance del emulsificante entre la fase acuosa y las micelas.

Adicionalmente, en el agregado, el pH influencia 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.

II.5.1.3. Conductividad

La conductividad de una emulsión depende de la fase acuosa y del contenido del ligante. Para un contenido de ligante dado, la conductividad depende sólo de la naturaleza y cantidad de los electrolitos disueltos y comparándolo con el pH, puede proveer información extremadamente importante de la composición de la fase acuosa. Por ejemplo, permite la detección de la presencia de sales. Sin embargo, en la práctica diaria de los laboratorios, la conductividad no es considerada como un parámetro significativo para explicar el comportamiento de una emulsión dada.

II.5.1.4. Papel y estado del emulsificante

Una vez que transcurrió la adsorción en la interfaz entre el asfalto y la fase acuosa, los cationes del tensoactivo proveen una carga eléctrica superficial desarrollando un potencial electrocinético responsable en parte de la estabilidad de las emulsiones.

Muchas publicaciones que datan de los principios de los 90's estaban dedicadas al estudio de esta interfaz. Esta investigación ha hecho posible definir la condición del tensoactivo con mayor precisión y así vincular las cantidades adsorbidas con los valores del potencial electrocinético creado por ésta adsorción. Como sea, estos estudios no parecen haber llevado a ninguna mejora apreciable en la formulación de las emulsiones.

Actualmente, los investigadores están dirigiéndose más al estudio de las propiedades de la película interfacial para entender cómo el emulsificante protege las gotas de coagulación. La muy aceptada explicación enfocada en la participación de la energía de repulsión electrostática continúa siendo apropiada para valores pequeños de fuerza iónica. Aunque, para las emulsiones asfálticas comúnmente usadas, la fuerza iónica yace muy por encima del límite en el que los potenciales de interacción de origen eléctrico se hacen despreciables comparados con otros fenómenos relacionados con la existencia de una película de interfaz representando una estructura organizada.

No obstante, los datos experimentales concernientes a la distribución del emulsificante y su papel en la adquisición de una carga eléctrica por las gotas del asfalto siguen siendo completamente válidos. Las figuras 22, 23 y 24 ilustran ésta distribución.



Figura No. 22: gráfica que muestra cómo el potencial electrocinético del asfalto varía con la concentración del emulsificante catiónico cuando está en equilibrio; fuente SFERB



Figura No. 23: gráfica que muestra cómo la cantidad de emulsificante adsorbido varía con la concentración en la fase acuosa cuando está en equilibrio; fuente SFERB

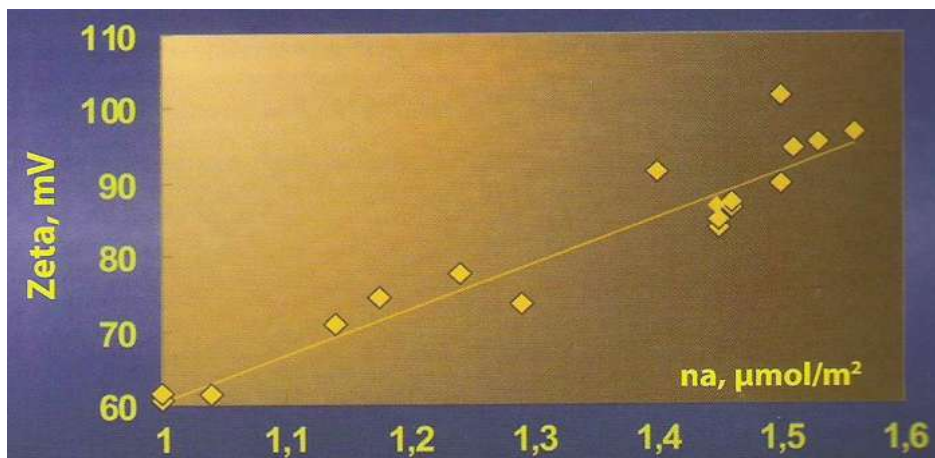


Figura No. 24: relación entre la cantidad adsorbida y el potencial electrocinético; fuente SFERB

II.5.2. Propiedades de aplicación

A excepción de las compañías que comercian con éste producto, la manufactura de emulsiones asfálticas para la ingeniería de caminos no es un objetivo final por sí mismo, más bien una técnica para producir un ligante viscoso en forma líquida para manufacturar una mezcla fría o un revestimiento de superficies para construcción. La emulsión para ingeniería de caminos es entonces un producto intermedio y por definición inestable. Debe:

- a. Tener una vida de servicio que exceda el tiempo previsible de uso antes de que se aplique.
- b. Tener propiedades que permanezcan constantes, durante y mucho después de su vida de servicio.
- c. Pasar por una ruptura rápida y homogénea cuando entre en contacto con los agregados.

II.5.2.1. Estabilidad durante el almacenamiento

La estabilidad durante el almacenamiento es de vital importancia para los fabricantes, quienes deben asegurar que las diferentes propiedades de la emulsión permanezcan constantes por el lapso transcurrido entre el momento en que el producto es manufacturado hasta es usado en la obra. El concepto de estabilidad durante el almacenamiento de hecho comprende tres aspectos:

1. Sedimentación: éste es un fenómeno de segregación durante el cual las partículas se mueven verticalmente ante la acción de la gravedad y el principio de flotación (ejemplo, el famoso principio de Arquímedes). Para el asfalto, que es más pesado que el agua, observamos sedimentación, siendo que el contenido de agua disminuye en la parte baja. En el caso contrario, se habla de cremado.

2. Floculación: éste es un fenómeno de segregación durante el cual las partículas se acercan a una distancia mínima entre ellas. Este proceso es reversible bajo acción mecánica o térmica y puede ser asociado con la sedimentación.
3. Coalescencia: Esta etapa corresponde a la fusión irreversible de las partículas. Lo que resulta en la desaparición de la emulsión por la separación en dos fases, una acuosa y otra hidrocarbonada. Las gotas involucradas pierden individualidad. Sucede entonces la coagulación, junto con un cambio en la distribución de tamaño y un incremento en los valores de media del diámetro, ver figura 25.

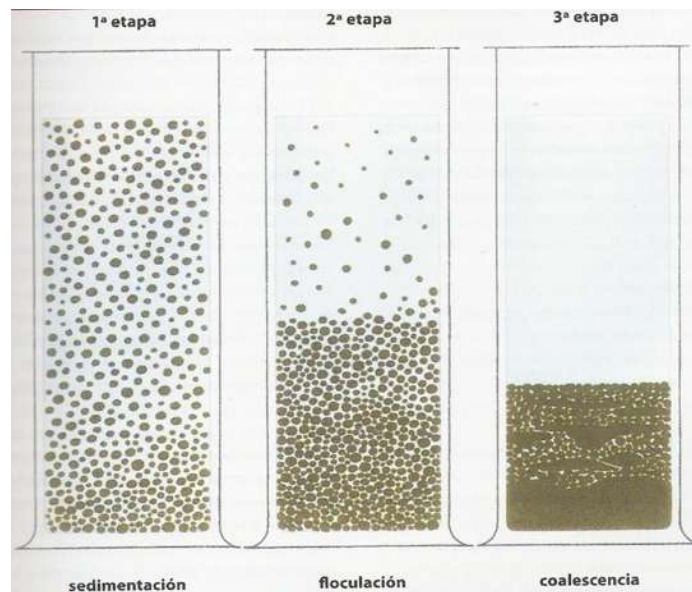


Figura No. 25: las tres etapas de la separación durante el almacenamiento; fuente SFERB

Efectivamente, la floculación no es un fenómeno de peligro para el fabricante o para el usuario, en tanto que no esté acompañado de sedimentación o coagulación. Por otra parte, la sedimentación puede ser un obstáculo considerable ya que da lugar a la segregación y grandes diferencias en el contenido de agua y consecuentemente diferencias en la viscosidad dentro del mismo tanque de emulsión. Puede acarrear dificultades considerables al bombear o aplicar por aspersión la emulsión. La coalescencia siempre es catastrófica, ya que implica la destrucción y pérdida de la emulsión.

II.5.2.1.1. Sedimentación

La velocidad de sedimentación se puede determinar por la fórmula de Stokes:

$$v = \frac{2}{9} g + \frac{r^2(D-d)}{\eta}$$

Dónde:

v = velocidad de movimiento de las partículas,

g = aceleración de la gravedad,

D = densidad de las partículas de la fase dispersa (asfalto),

d = densidad del medio de dispersión (fase acuosa),

r = radio de las partículas, y

η = viscosidad de la fase acuosa.

Al menos para valores pequeños de concentración de asfalto, es directamente proporcional a la diferencia en densidad entre las fases y el cuadrado del radio de las partículas e inversamente proporcional a la viscosidad de la fase continua. Consecuentemente, la velocidad de sedimentación puede disminuirse mediante:

- La disminución en el tamaño de partícula en la emulsión.
- Limitando las diferencias en densidad entre las fases.
- Incrementando la viscosidad de la fase acuosa.

En algunas ocasiones especiales, se ha observado la migración masiva de moléculas del ligante en la fase dispersa. Estas migraciones, que ocurren después de cierto periodo de almacenamiento pueden ser desencadenadas por:

- Un cambio considerable en el pH.
- Un incremento considerable en la fuerza iónica.

II.5.2.1.2. Floculación y coalescencia

La floculación y la coalescencia son fenómenos gobernados por interacciones entre las partículas. Como un acercamiento inicial, las partículas de asfalto pueden considerarse como condensadores esféricos, la capa interna da cargas eléctricas (de iones amonio para emulsiones catiónicas), se sitúa en la superficie del ligante, y la capa externa (iones cloruro) se difunden, en otras palabras con una densidad que disminuye exponencialmente con el radio. Cuando la capa externa se contrae alrededor de la partícula, ésta última se comporta como si estuviera menos cargada en relación con el exterior.

Cuando dos partículas se encuentran, quedan a merced de dos fuerzas la repulsión electrostática y la atracción causada por las fuerzas de Van der Waals. Los estudios de Verwey y Overbeek, y después Van der Tempel han mostrado que la curva del potencial en relación a la distancia entre las dos partículas pasa primero por un máximo y luego un mínimo. Las partículas situadas lejos una de la otra tienden a acercarse hasta llegar a una distancia que corresponde al potencial mínimo, en el que se llega al punto de balance correspondiente a la agregación por lo siguiente:

- Las partículas tienen una distancia entre ellas que no es cero y por lo tanto no se unen.
- Las fuerzas que se requieren superar para dispersar son bajas.

Por otra parte, las partículas que superan exitosamente la barrera de energía correspondiente al máximo se unirán irremediabilmente y la unión reversible de partículas tendrá lugar: coalescencia. La intensidad de las barreras y pozos de energía que determina la floculación y coalescencia dependen de la distribución de tamaño y de la fórmula. Puede mostrarse que la estabilidad depende en primer lugar y principalmente de lo siguiente:

- La naturaleza del emulsificante y su cantidad. Mientras mayor contenido de tensoactivo haya, será más estable la emulsión.
- El pH y la fuerza iónica de la fase dispersa. La estabilidad aunque es mejor a valores bajos se ve disminuida por una concentración alta de electrolitos (alta fuerza iónica), la cual reduce el espesor de la doble y de las repulsiones electrostáticas. Una acidez muy alta o un contenido muy alto de sales contribuirá al deterioro de la estabilidad. Esto implica el comprometer el nivel de acidez.
- El tamaño de las partículas en la emulsión.

II.5.2.1.3. Estabilidad en almacenamiento y pH

En general, se puede decir para las emulsiones catiónicas que:

- Valores bajos de pH son mejores para la estabilidad durante el almacenamiento, aunque el decremento en pH acarrea un incremento en la fuerza iónica.
- La velocidad de ruptura se incrementa con el pH.
- Los mejores valores de adhesión se obtienen a valores de pH entre 3 y 5.

No obstante, el pH no es el único parámetro y las emulsiones estables pueden producirse con un pH alto. Solo basta con incrementar la cantidad de emulsificante.

De igual manera, mediante la reducción de la cantidad de emulsificante, uno puede manufacturar emulsiones con una tasa alta de ruptura y pH bajo ajustando la naturaleza y cantidad de emulsificante.

II.5.2.1.4. Estabilidad y concentración de emulsificante

En general a mayor contenido de emulsificante, mayor será la estabilidad de la emulsión. Aun así, existe un contenido óptimo de emulsificante, donde la concentración de emulsificante en fase se hace muy alta y la concentración en las micelas es suficientemente alta como para iniciar un fenómeno de agotamiento. Este agotamiento lleva a la aparición de una fase clara que aparece en la parte alta de la emulsión, carente en su totalidad de gotas de asfalto.

Considerando las pruebas tradicionales que se usan para caracterizar la estabilidad durante el almacenamiento – comparaciones de contenido de asfalto entre la parte alta y baja del cilindro que contiene la emulsión – una emulsión afectada por agotamiento será considerada como fuera de la especificación relevante, pero en el centro de la fase donde el asfalto está concentrado, posiblemente no haya ocurrido la sedimentación. Este es el típico caso de las formulaciones de emulsiones para mezcla en frío, donde el contenido de emulsificante frecuentemente es más de 6 kg por tonelada de emulsión.

II.5.2.2. Viscosidad

La viscosidad es también una característica importante para el usuario, ya que la emulsión debe ser:

- Suficientemente fluida como para permitir su bombeo y aspersión.
- Suficientemente viscosa como para no fluir fuera de la superficie del camino o en pendientes.

Varía con:

- La naturaleza del emulsificante,
- La viscosidad de la fase acuosa,
- El contenido del ligante,
- El tamaño de la partícula, y
- La viscosidad de la fase dispersa.

No se puede describir fácilmente cómo el tipo de emulsificante afecta la viscosidad de la emulsión, dado que éste parámetro determina simultáneamente la viscosidad de la fase acuosa, la película interfacial y el tamaño de la partícula.

La viscosidad de una emulsión es directamente proporcional a aquella de su fase dispersa. Consecuentemente, puede incrementarse usando agentes espesantes.

II.5.2.2.1. La viscosidad y contenido de asfalto

El segundo parámetro, para determinar primariamente la viscosidad de una emulsión es la concentración de ligante. Un gran número de ecuaciones se han sugerido para representar las variaciones de viscosidad en términos del contenido del ligante, aunque sólo una ha probado ser completamente satisfactoria. En la región de las concentraciones muy pequeñas, la viscosidad varía linealmente con la concentración en la fase dispersa,

pero en las regiones de la curva donde normalmente funcionan las emulsiones asfálticas, la variación es exponencial.

La figura 26 es bien conocida. Muestra cómo la viscosidad de una emulsión asfáltica varía con la concentración de asfalto. Sin embargo, ésta curva es a menudo mal interpretada. La concentración graficada en el eje horizontal (abscisas) es a menudo asimilada como la concentración en peso.

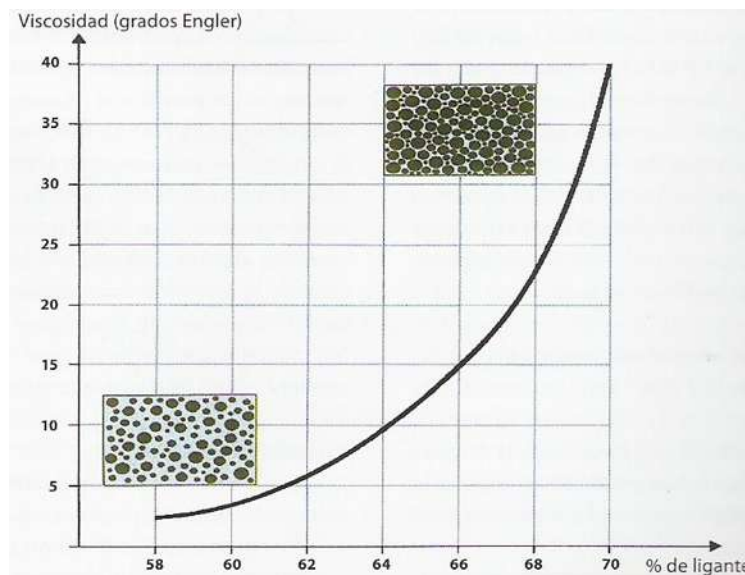


Figura No. 26: relación entre el contenido de asfalto y la viscosidad cinética expresada en grados Engler; fuente SFERB

En realidad, es la relación efectiva de asfalto por volumen la que debería ser considerada, como para permitir las diferentes consideraciones del agua, que puede ser una de las siguientes:

- i. Libre, entre las gotas,
- ii. Atrapada en la gota, como se mencionó anteriormente,
- iii. O nuevamente, contenida dentro de las gotas de asfalto.

La figura 27 muestra éstas situaciones diferentes. Debido al uso de la calorimetría diferencial se sabe que las emulsiones asfálticas son a menudo múltiples.



Figura No. 27: diferentes condiciones del agua en una emulsión; fuente SFERB

II.5.2.2. Viscosidad y tamaño de partícula

Siendo todas las cosas equitativas, a mayor finura y más monodispersa sea la emulsión, la viscosidad será mayor.

II.5.2.3. Control del tamaño de partícula y reología

Un área en la que nuestra profesión ha logrado muchos progresos es la de controlar el diámetro de las gotas del asfalto que forman la emulsión.

Cuando la emulsión se produce sin tomar en cuenta precauciones especiales, la distribución estándar de los diámetros de las gotas de emulsión yace entre 0.3 y 0.4. Mediante el uso de mezcladores estáticos, eso mostró a mediados de los noventa la posibilidad de estrechar esta distribución. Desde entonces, se han desarrollado varios procesos de manufactura para producir emulsiones con un tamaño de partícula fino y ajustado, ofreciendo propiedades interesantes.

En el laboratorio, los físicos y químicos pueden producir emulsiones de asfalto con dispersiones controladas. Manteniendo todos los otros parámetros constantes, una serie de emulsiones asfálticas se han manufacturado con una desviación estándar del tamaño de partícula de 0.15 a 0.4. Mientras más alto sea éste valor, las gotas estarán más polidispersas.

Entonces se mide la viscosidad de éstas emulsiones: mientras menor sea la desviación estándar, la viscosidad será mayor. El hecho de que cuando la concentración en la fase dispersa permanece constante, hay mayor variación en los diámetros el acomodo de las gotas más simple. Los espacios entre las gotas de mayor tamaño son ocupados por gotas de menor tamaño. Cuando la emulsión fluye, el desplazamiento relativo de las gotas se facilita; la viscosidad, que expresa la facilidad con la que un flujo tiene lugar, será entonces menor. Por otra parte, cuando todas las gotas son del mismo tamaño; se “apilan” de manera más compacta; de manera que para fluir, se requiere mayor energía para mover las gotas en relación con las otras.

Es fácil imaginar la ventaja de poder escoger la viscosidad de la emulsión simplemente basándose en el tamaño de la partícula y en consiguiente de las condiciones de manufactura. De esta manera, uno puede mantener la composición química constante y también el abastecimiento de materias primas y la mezcla de formulaciones de

manufactura. Solamente se cambian las condiciones mecánicas al momento de producir las emulsiones, lo que es más simple y flexible para emulsiones, ver figura 28.

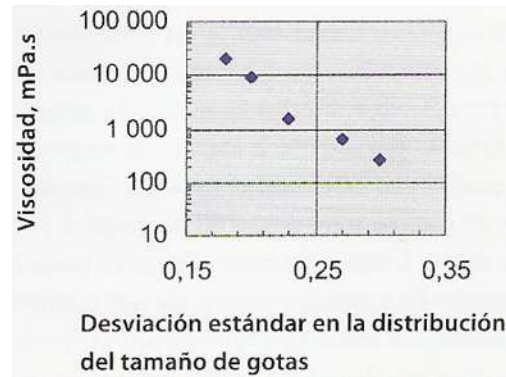


Figura No. 28: relación entre la viscosidad de una emulsión y la polidispersidad de la distribución de sus tamaños, la polidispersidad está caracterizada por la desviación estándar; fuente SFERB

II.5.2.4. Reología

Al menos como una aproximación inicial, se puede decir que las emulsiones tienen una acción “reo-fluidificante”, aunque con reservas. Bajo un esfuerzo cortante constante, se encontró un valor de viscosidad mayor a menor tamaño de gotas. Esta variación puede ser explicada por el hecho de que mientras más pequeñas sean las gotas es mayor la extensión de la interfaz entre el asfalto y la fase acuosa. Esta interfaz acarrea una película de tensoactivos dándole a la emulsión su estabilidad. Esta película de tensoactivos tiene su propia elasticidad y es esta elasticidad la que causa el incremento en la viscosidad.

Con una relación mayor de fuerza cortante, la viscosidad incrementa. Este fenómeno puede ser explicado por el hecho de que bajo las fuerzas cortantes, las gotas de asfalto se coagulan. El agua atrapada en “pilas” de gotas ya no participa en la dispersión de estas gotas, incrementando artificialmente la relación de volumen de la fase dispersa. Es

como si, en lugar de tener un contenido de asfalto del 69%, el contenido efectivo sea de 73 o 74%, ver figura 29.

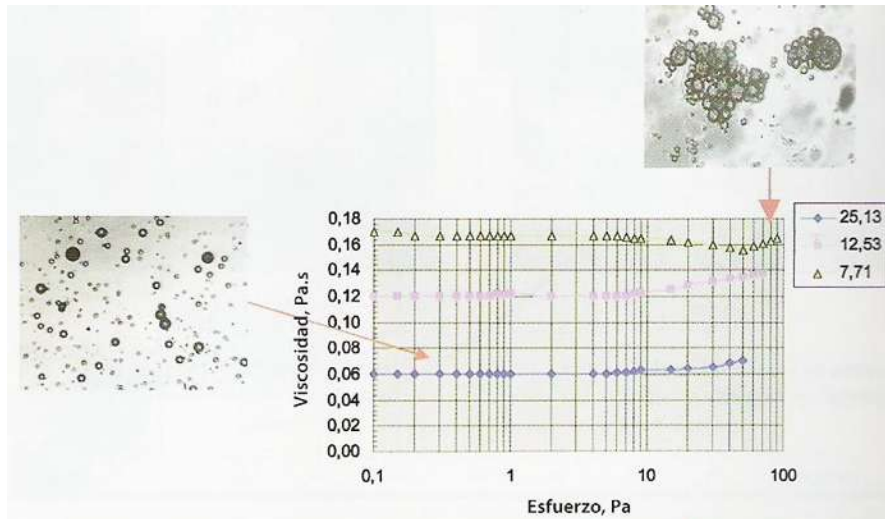


Figura No. 29: ilustración reológica de la agregación bajo condiciones de esfuerzo cortante (las emulsiones estudiadas son idénticas excepto con respecto a la media del diámetro de las gotas. Este valor está indicado en la leyenda. El contenido de asfalto es de 69%); fuente SFERB

II.5.2.5. Velocidad de ruptura y curado

Ruptura significa la combinación de fenómenos en el que las gotas de la emulsión existen separadamente como individuos, en contrario a aquel en el que la gran mayoría de estas gotas pasan por un proceso irreversible que da lugar a la formación de una fase continua asfáltica macroscópica.

Curado significa la combinación de fenómenos que resultan en la remoción de agua del material asfáltico, después de que la fase de ruptura ha concluido o al menos está suficientemente iniciada. Esto mejora las propiedades mecánicas del producto preparado con la emulsión.

La situación ideal ocurre cuando la formulación usada permite que el lapso de la manufactura y el inicio de la ruptura puedan ser controlados. Como una regla general la velocidad de ruptura debe ser lo más rápido posible, ver figura 30.

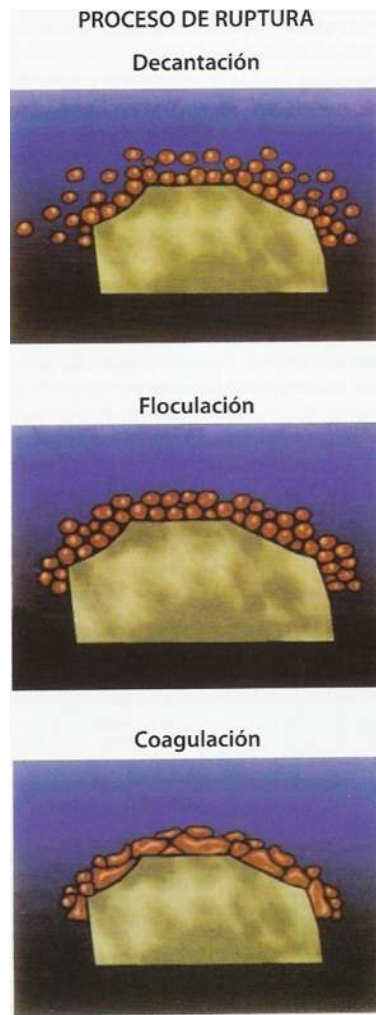


Figura No. 30: etapas del proceso de ruptura de una emulsión asfáltica; fuente SFERB

La velocidad de ruptura de la emulsión se expresa por el índice de ruptura, medido con un filler convencional. El resultado de ésta prueba determina el tipo de aplicación: revestimiento de superficies, impregnado, penetración o mezcla asfáltica.

Las emulsiones son formuladas para tener un nivel de potencial de repulsión entre partículas suficiente como para prevenir cualquier coagulación prematura. Las partículas coalescerán sólo si sucede una modificación, al menos localmente, dentro de las películas de tensoactivos. La causa subyacente del desequilibrio puede ser:

- Un cambio en el balance hidrófilo/lipófilo del emulsificante.
- Un cambio en el pH.
- Un incremento en la fuerza iónica del medio.
- Desorción del tensoactivo en la interfaz entre el asfalto y la fase acuosa.

La interacción entre el agregado y la emulsión es la principal causa para uno o más de estos cambios. Veamos lo que sucede cuando la emulsión entra en contacto con los agregados.

La superficie de los silicatos que componen los materiales de tipo volcánico generalmente adquiere una carga negativa al entrar en contacto con el agua. Atraen las cargas positivas acarreadas por el emulsificante, que entonces se adhiere a su superficie. Esta adsorción crea un conflicto entre las moléculas aisladas, las miscelas y las partículas del ligante emulsificado. Cuanto mayor a 3 sea el pH, la adsorción será más fuerte. Este límite es meramente indicativo, ya que el valor real de pH a considerar es el que induce sitios ionizables en la superficie del mineral que se cargará negativamente. Se puede suponer que en el caso de los agregados volcánicos más comunes, éste requerimiento es cumplido cuando el pH excede de 3.

Si hay un exceso de moléculas y miscelas (como en el caso de las emulsiones asfálticas), el agregado se satura de tensoactivo proveniente de la fase acuosa. La película interfacial asfalto-agua se verá escasamente afectada por este mecanismo.

Por el contrario, cuando las moléculas y las miscelas son insuficientes en número (es el caso de las emulsiones de aplicación rápida, emulsiones para aspersión) la adsorción del emulsificante sucede en la superficie del mineral, para el deterioro de la película situada en la interfaz existente entre el asfalto y la fase acuosa. La película se ve considerablemente alterada. Las partículas de la emulsión atraídas por la superficie del agregado se rompen localmente y cubren al agregado, formando así una película de ligante. Esta película es extremadamente adhesiva debido a la presencia de emulsificante catiónico que actúa como una pasta interfacial.

Si el agotamiento es suficiente, lo que resta de la emulsión se coagulará en la primera película, disparando entonces una fase de curado, la velocidad estará limitada únicamente por la velocidad a la que se remueva el agua del sistema.

El incremento en pH que proviene de la reacción entre los agregados y la fase acuosa también es responsable de la ruptura de las emulsiones formuladas con emulsificantes sensibles al pH.

El caso de piedras calizas es más complejo, ya que los siguientes fenómenos ocurren simultáneamente:

- La caliza es atacada por el ácido de la fase acuosa, creando una variación local de pH y de la fuerza iónica.
- El tensoactivo es adsorbido en los sitios negativos. Estudios más recientes de curado, han encontrado un nuevo mecanismo. Aun cuando conocemos el origen, sabemos que las gotas de asfalto son capaces de agregarse por enlaces que son más fuertes que aquellos que ocurren durante la floculación. Entonces forman un gel que después se encoge. A continuación, después del proceso de curado, toda el agua

presente en el gel es expulsada y el asfalto vuelve a recuperar su forma macroscópica.

Sin embargo, mientras estos mecanismos están bien descritos en términos de balance, se conoce poco de su comportamiento cinético. Consecuentemente, con conocimientos actuales, y el beneficio de la retrospección (a posteriori), es posible entender por qué se puede escoger cualquier formulación, no permite prever (a priori) cuál hubiera sido la fórmula correcta.

Se sabe poco de las dos primeras variables que afectan el rompimiento y la coagulación de las emulsiones: el tamaño de las gotas y la naturaleza del asfalto.

La forma en la que el tamaño de partícula de una emulsión afecta la velocidad de ruptura y el proceso de curado no se ha establecido claramente. De hecho es relativamente difícil llevar a cabo estos estudios mediante la variación de un único parámetro a la vez. Se puede decir que mientras más monodispersa sea la emulsión, estos fenómenos serán más homogéneos. Los cambios en el estado serán entonces más definidos. La posibilidad reciente de controlar la dispersión sin cambiar la fórmula química de la emulsión debe permitir el control de la ruptura con éste parámetro. Entonces será posible validar los hallazgos de laboratorio, donde al mantener constantes los demás parámetros, se ve que usando una prueba convencional, mientras menos sea el diámetro de las gotas, la velocidad de ruptura será más lenta, ver figura 31.

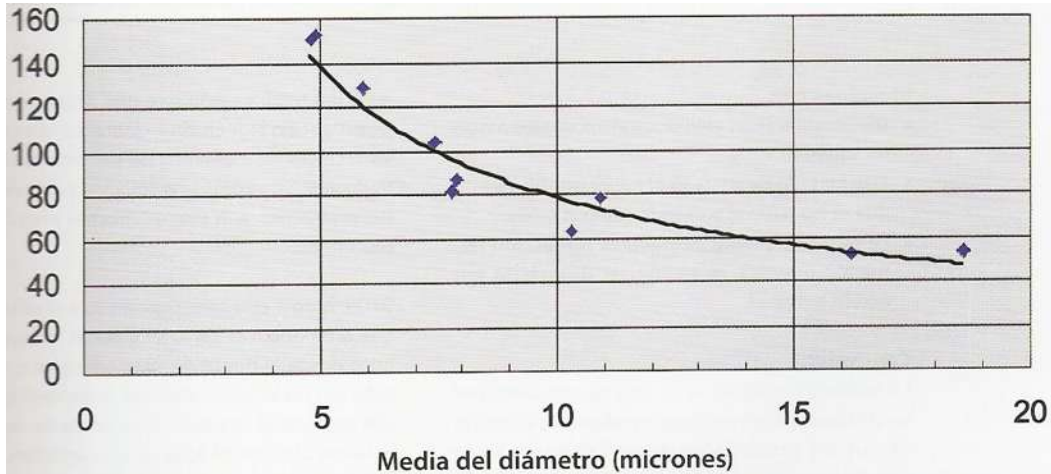


Figura No. 31: velocidad de ruptura de una emulsión asfáltica Vs. la media del diámetro de las gotas; fuente SFERB

II.5.2.6. Adhesión

En principio, la adhesión del ligante residual de una emulsión catiónica producida con una formulación normal es satisfactoria, la razón es que:

- Los emulsificantes elegidos son excelentes pastas de adhesión.
- Éste método de pasta es el mejor posible puesto que se fija tanto al agregado como al asfalto.
- La pasta no puede degradarse por acción térmica o química, ni puede ser desorbido por acción del agua.

Como se observa en la figura 32 y se explica en la tabla 5.

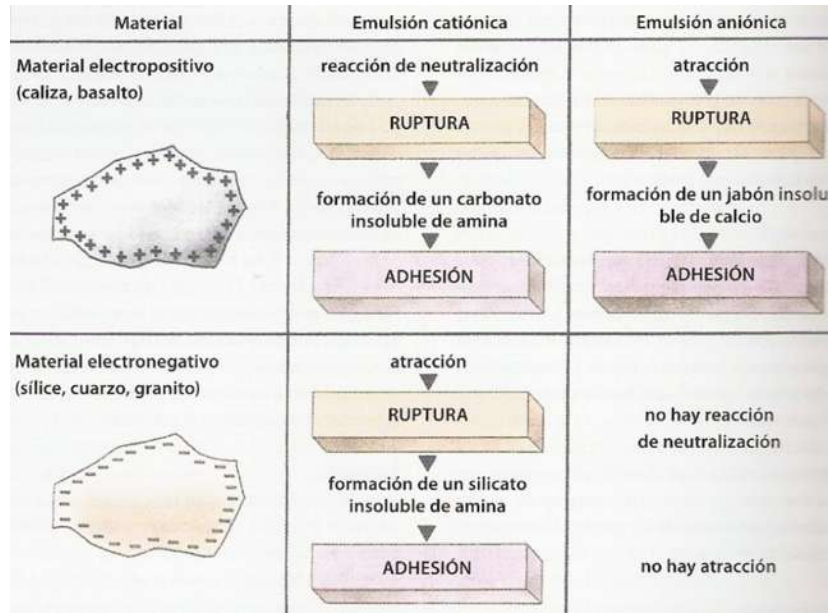


Figura No. 32: representación esquemática de los diferentes procesos de adhesión emulsión-agregado; fuente SFERB

Número	Parámetro de Clasificación	Tipo de Emulsión
1	Por su carga Eléctrica	Catiónica
2		Aniónica
3		Modificada
4	Por su Rompimiento	Lenta
5		Media
6		Rápida
7	Por su Tipo de Fase	Directa (O/W)
8		Inversa (W/O)
9		Múltiple (W/O/W)
10	Por el Tamaño de Micela	Emulsión ($\phi=10^{-6}m$)
11		Microemulsión ($\phi=10^{-8}m$)

Tabla No. 5: clasificación de las emulsiones; fuente Repsol®

III. ASFALTOS MODIFICADOS

La modificación de asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características físicas, químicas y mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular).

Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (ahuellamiento), de las mezclas que componen las capas de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado, disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad para finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular formadas por la unión de cientos o miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas, etc. Algunos modificadores poliméricos que han dado buenos resultados son:

- Homopolímeros: que tienen una sola unidad estructural (monómero).
- Copolímeros: tienen varias unidades estructurales distintas, (EVA, SBS).
- Plastómeros: al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Tienen deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad, dentro de estos tenemos:
 - EVA: etileno-acetato de vinilo.
 - EMA: Etileno-acrilato de metilo

- PE: (polietileno) tiene buena resistencia a la tracción y buena resistencia térmica, como también buen comportamiento a bajas temperaturas.
- PP: (Polipropileno).
- Poliestireno: no son casi usados.

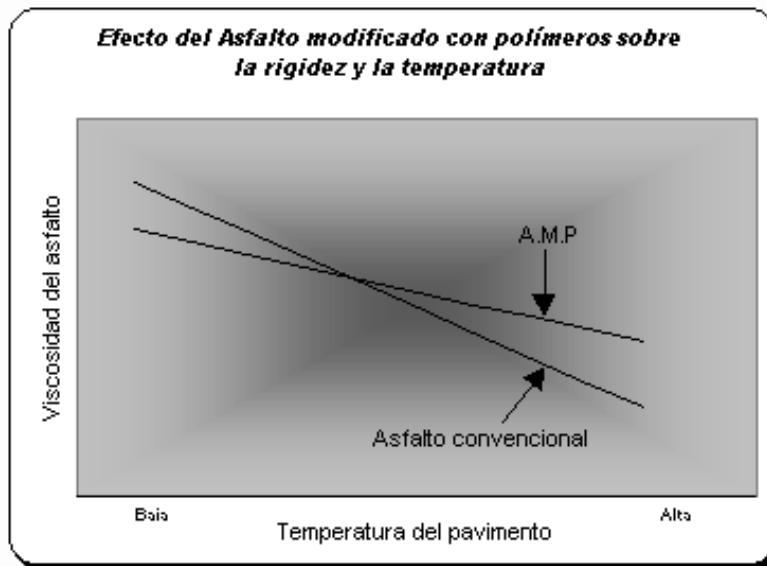
- Elastómeros: al estirarlos, a diferencia de los anteriores, estos vuelven a su posición original, es decir, son elásticos, dentro de estos tenemos:
 - Natural: caucho natural, celulosa, glucosa, sacarosa, ceras y arcillas son ejemplos de polímeros orgánicos e inorgánicos naturales
 - SBS:(estireno-butadieno-estireno) o caucho termoplástico. Este es el más utilizado de los polímeros para la modificación de los asfaltos, ya que este es el que mejor comportamiento tiene durante la vida útil de la mezcla asfáltica.
 - SBR: Cauchos sintéticos del 25% de estireno y 75% de butadieno; para mejorar su adhesividad se le incorpora ácido acrílico
 - EPDM: (polipropileno atáctico) es muy flexible y resistente al calor y a los agentes químicos.

- Termoendurecibles: estos tienen muchos enlaces transversales que impiden que puedan volver a ablandarse al calentarse nuevamente. Son ejemplos de estos las resinas epóxi; estas se usan en grandes porcentajes, mayores al 20%, son muy costosas y se utilizan para casos especiales (ejemplo: playa de camiones).

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases, una formada por pequeñas partículas de polímero expandido y la otra por asfalto. En las composiciones de baja concentración de polímeros existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero; pero si se aumenta la proporción de polímero en el asfalto se produce una inversión de fases, estando la fase continua constituida por el polímero expandido y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella.

Ésta micro morfología bifásica y las interacciones existentes entre las moléculas del polímero y los componentes del asfalto parecen ser la causa del cambio de propiedades que experimentan los asfaltos modificados con polímeros.

El efecto principal de añadir polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad - temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas, ver esquema 7.



Esquema No. 7: relación viscosidad temperatura del asfalto convencional y modificado; fuente Repsol®

Los promotores de adherencia son agentes que se adicionan al asfalto para mejorar su adhesividad hacia un agregado pétreo determinado.

Teniendo en cuenta el carácter ácido del asfalto se considera que entre el asfalto y agregados calcáreos existe una atracción electrostática debido a sus cargas eléctricas opuestas, por el contrario, entre el asfalto y agregados silíceos que poseen la misma carga eléctrica existe una repulsión por lo cual no hay buena adhesividad.

Por otro lado, si el pétreo está húmedo, la presencia de humedad inhibe la adhesión, debido a que el asfalto no puede mojar el pétreo.

Los promotores de adherencia son agentes tenso activos, esto significa que poseen una parte lipofílica afín al asfalto y otra hidrofílica afín al pétreo, por lo cual se forma un puente entre el asfalto y el pétreo aunque este se encuentre húmedo.

Con el empleo de los promotores de adherencia, se puede emplear cualquier tipo de agregado pétreo aún húmedo, obteniéndose buena adherencia, la cual no se lograría sin la presencia de estos productos.

IV. AGREGADOS PÉTREOS

Los agregados pétreos son parte fundamental para la elaboración de mezclas asfálticas, independientemente del tipo de mezcla del que se trate, porque son el esqueleto mineral sin el cual no podría sustentarse la mezcla y resistir las cargas a las cuales están sometidas. Los agregados pétreos además de proveer resistencia y cuerpo a la mezcla, también transmiten las cargas de tránsito a la base que cubren, sirven de elemento y favorecen la adherencia entre la carpeta y los neumáticos. Para asegurar este conjunto de funciones deben ser duros, tener la forma apropiada, no susceptibles a heladas y maximizar las notables propiedades adhesivas de las emulsiones. Las características de los agregados dependen de la elección del banco de materiales (características intrínsecas) y de su elaboración.

Las principales características que afectan el desempeño de los tratamientos superficiales son la granulometría, la angularidad, la forma y la limpieza.

i. Granulometría

Es importante limitar la dispersión de tamaño de los agregados pétreos para producir un patrón de mosaico uniforme y asegurar la homogeneidad y rugosidad del tratamiento superficial.

ii. Angularidad

Los agregados empleados en los tratamientos superficiales proceden en su totalidad del triturado, proviniendo de rocas sólidas o bancos de material. Mientras mayor sea el nivel de tránsito y la necesidad de una buena adhesión, deberá ser mayor el porcentaje de caras trituradas del agregado. Esto es particularmente relevante para un agregado derivado de bancos de material. Durante la producción, la angularidad es controlada a través de la tasa de triturado, que es el cociente entre las dimensiones más pequeñas del material triturado y las dimensiones más grandes del agregado manufacturado.

iii. Forma

La forma de los agregados debe ser tan cúbica como sea posible. Los elementos planos o lajas y alargados o agujas son frágiles y se sitúan mal sobre la carpeta.

iv. Limpieza

Los agregados de los tratamientos superficiales deben estar muy limpios, por lo que se necesita lavarlos durante la producción. La proporción de material que pase por el tamiz de 0.63 mm debe ser menos de 0.5% en masa. Más aún, la presencia de arcilla, aunque sea en una proporción muy pequeña, es altamente nociva. La arcilla es extremadamente hidrófila y el fuerte hinchamiento que se produce en presencia de agua tiende a debilitar el enlace agregado-ligante.

Los materiales pétreos utilizados para elaborar la mezcla asfáltica para bacheo, son materiales naturales sujetos a tratamientos de trituración, que aglutinados con emulsión asfáltica catiónica de rompimiento medio, se emplean en la elaboración de la mezcla asfáltica a que se refiere la Norma N-CMT-4-05-003, “Calidad de Mezclas Asfálticas Para Carreteras”.

V. TIPOS DE DEGRADACIÓN

Bajo la acción del tránsito y de la intemperie, la superficie y los firmes de carreteras se degradan. Por ello es necesario conservarlas con el fin de que permanezcan en buen estado para la circulación y, por lo tanto, para la seguridad y comodidad de los usuarios.

Para lograr un mantenimiento de alta calidad, se requiere conocimiento profundo de los tipos de deterioro y de los procesos de degradación que los causan. Existen diferentes daños, los cuales se pueden dividir en tres grupos:

- a. Daño debido a defectos geométricos grandes, que potencialmente deterioran la seguridad y la comodidad del manejo: hundimiento del pavimento, hundimiento de los bordes del pavimento, baches y surcos.
- b. Daño de la superficie causada por pérdida de ligante o agregados, filtración de la masilla de las fisuras subyacentes (engrosamiento), o desgaste de los agregados, tales como descamación, desprendimiento, engrosamiento y pulido, los cuales en su totalidad reducen la adhesión y llevan a condiciones inseguras del camino.
- c. Degradación resultante de fisuras longitudinales y transversales, juntas fragmentadas o huecas, patrones de fisuras fino y largo. Estas reducen la impenetrabilidad del pavimento afectando su comportamiento mecánico.

Estos diferentes tipos de degradación por lo general se combinan. Por ejemplo, el hundimiento de los bordes del pavimento invariablemente con el tiempo se hace un

agrietamiento en forma de piel de cocodrilo o un bache en un área finamente agrietada que se ha convertido en una alcantarilla. Dependiendo del tipo de daños que se encuentre (tipo y extensión), las tareas de mantenimiento consisten en reparar el camino en las áreas seleccionadas, recubrir la superficie completa o combinarla con reparaciones en áreas específicas.

V.1 Hundimiento

El hundimiento del pavimento toma la forma de deflaciones de forma redondeada causadas por defectos en la capacidad de carga de la tierra, o la cualidad y espesor de los materiales base. Otra causa puede ser el asentamiento de una zanja. Esto es comúnmente acompañado de fisuras por fatiga, ver fotografía 1.



Fotografía No. 1: hundimiento del pavimento; fuente Propia

V.2 Hundimiento de bordes fracturados

Este tipo de desperfecto se manifiesta por depresiones muy pronunciadas por lo regular muy extendidas, situadas en las orillas del pavimento y principalmente ocurre en pavimentos flexibles, con cimientos no tratados. Estos desperfectos son causados por la falta de diseño, construcción local defectuosa o contaminación de los componentes de la estructura. Ellos rápidamente generan otros tipos de degradación estructural como abultamiento o agrietamiento, ver fotografía 2.



Fotografía No. 2: Hundimiento de bordes fracturados; fuente Propia

V.3 Roderas

La rodera se define como una distorsión longitudinal y permanente causada por el tránsito pesado y ocurre en las marcas de las llantas. Esto puede ser el resultado de una mala selección de materiales (un agregado que no tiene suficiente capacidad de carga o una

grava de mala calidad sin tratamiento), construcciones fallidas (mala compactación), o mal diseño resultando en distorsiones de la base. Bajo ciertas consideraciones, una rodera es aquella causada por materiales tratados o no tratados en pavimento flexible, con un alto radio de curvatura, ver fotografía 3.



Fotografía No. 3: rodera; fuente Propia

V.4 Baches

Estos consisten en hoyos de forma irregular y de tamaño variable, causado por la pérdida de materiales de una o más capas estructurales. Los baches son causados por debilitamiento local de los materiales en las capas dando lugar a una construcción defectuosa, ver fotografía 4.



Fotografía No. 4: baches; fuente Propia

V.5 Descamado

Esta degradación proviene del desgaste del camino por desprendimiento en áreas, a través de todo el espesor, que puede variar desde unos cuantos milímetros para una superficie revestida/riego de sello, a algunos centímetros para una capa de asfalto. La causa del descamado es usualmente debida a la fijación incorrecta del recubrimiento, ver fotografía 5.



Fotografía No. 5: Descamado; fuente Propia

V.6 Desprendimiento

El desprendimiento se manifiesta por una pérdida general de agregado de una superficie (superficie revestida/riego de sello, capas sobrepuestas de asfalto frío o caliente) causado por las condiciones incorrectas durante la construcción (baja temperatura, bajo contenido de ligante) o falta de adhesión entre el ligante y el agregado. En el caso de superficies revestidas/riego de sello, el desprendimiento puede eventualmente convertirse en una condición de falso sangrado cuando ya no queda agregado en la superficie, ver fotografía 6.



Fotografía No.6: desprendimiento; fuente Propia

V.7 Engrosamiento

Este es el resultado de la migración hacia la superficie del ligante que puede eventualmente cubrir parcial o totalmente los agregados en la superficie del camino, dando lugar a una apariencia negra y brillante. Las distintas causas posibles de este defecto son el uso de mucho ligante o muy suave, compactación excesiva o el uso de agregados que son demasiado pequeños para la aplicación específica, ver fotografía 7.



Fotografía No. 7: engrosamiento; fuente Propia

V.8 Pulido

Esta es la presencia de exceso de ligante en la superficie, causada por desgaste del pavimento debido a agregados que son demasiado suaves, o exceso de mortero y/o ligante en el asfalto. El pulido reduce la adhesión de la llanta con la superficie., ver fotografía 8.



Fotografía No. 8: pulido; fuente Propia

V.9 Grietas longitudinales

Las grietas longitudinales aparecen en la dirección del tránsito como resultado de la fatiga del pavimento. La fatiga puede ser causada por una capa base que es demasiado delgada o tiene una capacidad de carga insuficiente. De la misma manera, el envejecimiento del ligante en el asfalto puede dar lugar a la aparición de fisuras de fatiga en la superficie, ver fotografía 9.



Fotografía No. 9: grietas longitudinales; fuente Propia

V.10 Grietas transversales

Las grietas transversales aparecen perpendicularmente a la dirección del tránsito. Están espaciadas regularmente y en algunos casos se bifurcan y son causadas por transmisión de grietas de encogimiento de la capa de la carpeta hacia las capas superficiales. Este tipo de grietas es característico de las carpetas tratadas con cemento, ver fotografía 10.



Fotografía No.10: grietas transversales, fuente Propia

V.11 Agrietamiento

El agrietamiento consiste en una combinación de grietas ramificadas que forman una red conformando una serie de pequeños polígonos que crean pequeños baches cuando se desacomodan. El agrietamiento es el resultado de fatiga excesiva de una o más capas del pavimento causado por mal diseño, fijación inadecuada de las capas o materiales de menor calidad, ver fotografía 11.



Fotografía No. 11: agrietamiento; fuente Propia

V.12 Juntas defectuosas

La alineación incorrecta de dos carriles adyacentes de asfalto puede dar lugar a una junta defectuosa (segregación, aplanado insuficiente, unión insuficiente cuando el asfalto caliente es aplicado a bajas temperaturas). Las juntas defectuosas pueden ser causadas también por compactación insuficiente o la reparación de una zanja, ver fotografías 12 y 13.



Fotografía No. 12: juntas defectuosas; fuente Propia



Fotografía No. 13: Juntas defectuosas; fuente Propia

V.13 Baches

Los baches son fallas localizadas en la superficie del pavimento, en forma de oquedades cóncavas, mayores de 15 cm de ancho en su longitud mínima. Es una porción del pavimento que ha sido removida y colocada con o sin material adicional después de la construcción original del pavimento. Estas fallas ocurren comúnmente dentro de un área reparada previamente.

Estos pueden clasificarse de la siguiente manera:

- i. De baja severidad: menor a 1” de profundidad máxima.
- ii. De media severidad: igual a 1” o 2” de profundidad máxima.
- iii. De alta severidad: mayor a 2” de profundidad máxima.

Cabe aclarar que la profundidad del bache es la profundidad máxima debajo de la superficie del pavimento, la cual se determina por medio de una inspección previa al tramo para estudiar la gravedad de la situación. La manera de medirlos es registrando el número de baches en metros cuadrados del área afectada para cada nivel de severidad; cabe aclarar que cuando la profundidad del bache excede los 30 cm es señal de que existe un severo daño en las capas subyacentes de la carpeta, lo que indica que la solución de bacheo del pavimento se convierte en una “recuperación total” del pavimento, es decir, el levantamiento total de la carpeta para su reutilización o para nuestro caso lo que indique la norma N-CSV-CAR-2-02-003-00 y N-CSV-CAR-2-02-004-03 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Los principales factores que originan los baches son:

1. Daños por humedad.
2. Daños por fatiga.
3. Ciclos de hielo-deshielo.
4. Capas de soporte de mala calidad.
5. Tránsito vehicular.
6. Mal drenaje.
7. Composición inadecuada de la mezcla asfáltica, y
8. Desgranamiento superficial.

Los baches se forman al introducirse agua en la estructura del pavimento por una grieta o por el costado del mismo, si el agua entra por la carpeta asfáltica se denomina “tubificación” y si penetra por los costados se le denomina “infiltración”, después se aloja en las capas subyacentes y al transitar los vehículos sobre la capa saturada y/o congelada, la superficie pierde resistencia y se derrumba resultando una oquedad o “bache”. El bache se amplía a medida que el tráfico golpea y rompe los bordes del agujero.

Típicamente son más notorios al finalizar el invierno y principios de primavera, después de los ciclos de hielo-deshielo, no obstante, se vuelven críticos en las temporadas de lluvia.

V.13.1 Que ha pasado en México

Desde hace 30 años, los programas de bacheo en el país han subsanado las estructuras viales con mezcla de bacheo que no se diseñaban y no tenían especificaciones con control y aseguramiento de la calidad. Dichas especificaciones se basaban en ensayos empíricos que se realizaban a una sola y determinada temperatura cuyo resultado era comparado con un rango determinado por otra especificación.

Los resultados de los ensayos se contrastaban con criterios taxativos, lo cual tenía como principal desventaja la necesidad de requerir experiencia previa de camino para poder relacionar el ensayo con el comportamiento en servicio. Ello no sólo no era posible en muchos casos sino que además conducía a serios errores cuando se extrapolaban resultados de una región a otra. Esto generaba altos tiempos de espera por los bajos volúmenes que se manejan, desempeño pobre debido a la deficiente aplicación de la mezcla y altos costos de mantenimiento.

Hoy en día las dependencias federales, estatales y municipales aplican 15,000 m³ de mezcla en bacheo (Ing. Jorge Mogel Ramírez Ordaz), entre las cuales se encuentran mezclas de productos patentados muy caros que tampoco tienen especificaciones ni control/aseguramiento de calidad, pero que ofrecen mejores condiciones de comportamiento. No obstante de dichas mejorías, actualmente de acuerdo con el Ing. Rafael A. Limón: “el promedio de vida de las mezclas asfálticas del país son inferiores al

60% de lo que duran los pavimentos en países de Europa y Estados Unidos, sobre todo en las mezclas densas”.

V.13.2 El Bacheo en la actualidad

Dentro del mantenimiento correctivo de caminos, pocas áreas han cambiado tanto como la técnica de reparación de baches, existen dos tipos de periodos de bacheo:

- a. Bacheo emergente: bajo condiciones difíciles, sin programación, implicando altos costos durante su proceso, y
- b. Bacheo rutinario: mantenimiento programado para periodos con clima cálido y seco.

Los programas de bacheo son una acción meramente emergente que sin duda resultan ser sólo una solución temporal debido a que los baches siempre vuelven a salir, sin embargo, estos programas pasan a ser obsoletos cuando la cantidad de baches es crítica, pues en ese caso, la mejor solución sería la reconstrucción total de la estructura vial, aunque ésta resulta ser una propuesta económicamente elevada.

De igual manera, se deben tomar en cuenta otros factores además del clima en la toma de decisiones para reparar un bache, tales como:

- i. Nivel de tránsito.
- ii. Tiempo para el que se programe la rehabilitación o sobrecarpeta.
- iii. Tolerancia del usuario.

Asimismo, los dos principales elementos que influyen en la calidad del bacheo son:

- a. Selección de las mezclas, y

- b. Selección de las técnicas de reparación.

V.13.3 Selección de la mezcla

Las principales tipos de mezcla para bacheo son:

- i. Mezcla en caliente.
- ii. Mezcla en frío.
 - a. Mezclas locales usando los agregados y ligantes locales, y
 - b. Mezclas propias (patentadas).
- iii. Mezcla tibia.

En la actualidad, las nuevas especificaciones para asfaltos convencionales y asfaltos modificados desarrolladas por el programa estratégico de investigaciones en caminos SHRP de los EUA permiten establecer un sistema de clasificación y selección del ligante para la mezcla en función de las condiciones climáticas del lugar. Dichas condiciones expresadas en rangos de temperatura de diseño del pavimento permiten calcular las propiedades de flujo y deformación de los ligantes para unas condiciones de carga y temperatura adecuadas al proyecto en cuestión.

Tales relacionan las propiedades físicas de los asfaltos con principios ingenieriles que condicionan características reológicas del ligante con el comportamiento del mismo en servicio, propiedades de suma trascendencia a fin de prever la durabilidad de la mezcla.

V.13.4 Técnicas de reparación

Las principales técnicas de reparación de baches utilizadas por las distintas dependencias son:

- I. Throw and go (vacíe y márchese).
- II. Throw and roll (vacíe y compacte).
- III. Semipermanent (semipermanente).
- IV. Spray injection (inyección por esparcido).
- V. Edge seal (sellado de orillas).

Como medidas preventivas se recomienda:

- a. Mejorar la calidad de los materiales, el diseño y el proceso de construcción.
- b. Construir un drenaje adecuado.
- c. Capas estructurales aplicadas a tiempo para incrementar la resistencia del pavimento.
- d. Asfaltos modificados.

VI. COSTOS DEL BACHEO

El costo efectivo de las operaciones de bacheo es afectado por los costos de:

- a. Materiales.
- b. Mano de obra, y
- c. Equipo.

También pueden influir los costos asociados a demoras del usuario, el clima y el tiempo de cierre de carriles.

El costo de los materiales, es el costo más comúnmente asociado con el bacheo, usualmente es uno de los que menos impactan al costo global de las operaciones de bacheo, y sin embargo, impacta el costo global cuando hay diferencias en desempeño. Los materiales más caros que son colocados con menos esfuerzo y tienen mayor durabilidad, pueden reducir el costo inicial del bacheo así como la cantidad necesaria de rebacheos, a su vez esto reduce el costo de la mano de obra y equipo de las operaciones globales.

El costo de la mano de obra depende de la técnica a utilizar, así por ejemplo, cuando se utiliza la técnica de vacíe y compacte el costo de la mano de obra puede reducirse a dos trabajadores quienes realizan el bacheo, más los necesarios para el control del tránsito; cuando se utiliza la técnica semipermanente, se ha probado ser más eficiente cuando se utilizan cuatro trabajadores para el bacheo, más el control del tránsito; cuando se utiliza la técnica inyección por esparido dependiendo del tipo de equipo puede requerir uno o dos operadores, más el control del tránsito; y cuando se utiliza la técnica de sellado de orillas requiere el mismo número de trabajadores que la técnica de vacíe y compacte, pero un paso extra para colocar los materiales de liga y la arena.

Los costos del equipo dependen nuevamente de la técnica utilizada, para las técnicas vacíe y compacte, semipermanente y sellado de orillas, se requiere de herramientas manuales como palas, escobas y rastrillos, para las técnicas de vacíe y compacte y sellado de orillas el principal costo del equipo es el camión de carga de los materiales, el control del tránsito y el señalamiento; para la técnica semipermanente el equipo varía y pueden ser camiones para material y equipo, herramientas manuales, equipo de compactación, compresor de aire, máquina perfiladora de bordes, control de tránsito y señalamiento; *para la técnica de inyección por esparido únicamente se requiere la máquina de Spray-injection, el control de tránsito y el señalamiento.*

A continuación se detallan dos técnicas de bacheo, la primera es la utilizada de ordinario en la ciudad de Morelia Michoacán, México, por el H. Ayuntamiento de la ciudad y la segunda es la técnica de bacheo utilizando inyección por espray, misma que se propone en éste trabajo de investigación como técnica a utilizar en los trabajos que se realicen para bacheo.

VI.1 Bacheo típico en la ciudad de Morelia

El bacheo que se lleva a cabo en la ciudad de Morelia desde hace ya un buen tiempo, se realiza del modo “tradicional”, éste tipo de bacheo se conoce como “bacheo emergente” y la técnica utilizada es la throw and roll (vacíe y compacte). Es decir, a través de un proceso no muy técnico y muy rudimentario se limpia la superficie a bachear, se vacía de forma manual la emulsión sin dosificar en el bache y posteriormente se dispersa de igual forma la mezcla asfáltica sin dosificar al mismo, se homogeniza en el mismo con un rastrillo y posteriormente se compacta con equipo menor utilizado para tal fin, dando de tres a cuatro pasadas sobre la mezcla tendida, para finalizar con el bacheo, ver secuencia 1-7.



Paso 1 del bacheo, limpieza



Paso 2, llenado de emulsión



Paso 3, vaciado de emulsión



Paso 4, vaciado de la mezcla



Paso 5, homogenizado de la mezcla



Paso 6, compactado de la mezcla



Paso 7, fin de bacheo

Todo este proceso se lleva a cabo con siete personas incluyendo al operador del volteo y al banderero.

Como se puede observar, el proceso no tiene control de calidad, dosificación en la mezcla ni en la emulsión asfáltica y por supuesto no se toma en cuenta el diseño que se debe realizar para poder emplear el tipo de mezcla asfáltica adecuada para tal fin.

Cabe señalar los datos técnicos de los materiales utilizados para realizar el bacheo, la emulsión asfáltica utilizada es catiónica de rompimiento medio, transportada de la refinería de Salamanca Guanajuato, los agregados pétreos son del banco de materiales “Cerritos” ubicado en la tenencia de Capula, perteneciente a la ciudad de Morelia Michoacán, designados como tipo 3-E o 3-A, dependiendo del caso en el que se vayan a utilizar, éstos agregados no son de material triturado, por lo tanto el material pétreo presenta una gran cantidad de arcilla y filler que modifican substancialmente la mezcla, haciéndola muy propensa a la reacción con el agua; por último, la compactación realizada con el equipo menor es cualitativa, dado que el operador no realiza un cálculo para obtener el número de pasadas que hay que realizar, sino realiza las pasadas que él cree convenientes de acuerdo a su experiencia en el bacheo.

Todos estos factores conllevan a que el bacheo realizado sea ineficiente porque no resuelve el problema que se tiene en las carpetas asfálticas, o si lo hace es por un corto periodo de tiempo, a decir del jefe de la brigada: el bacheo dura en tiempo de lluvias de dos a tres días, y en tiempo de secas de 3 a 6 semanas; es también muy costoso debido a que se tiene que estar bacheando continuamente durante todo el periodo de lluvias, el cual en algunas zonas del país es muy prolongado, elevando con esto el costo de mantenimiento y sobretodo el costo de operación; y es muy incómodo para el usuario, debido a que al realizar el bacheo se obstruye un carril de circulación en el mejor de los casos y en ocasiones los dos carriles, afectando el tránsito vehicular por un periodo de 15 a 20 minutos por cada bacheo, y si a esto le agregamos que se tiene que llevar a cabo por todo el periodo de lluvias, cada tercer día, el problema se vuelve un caos y no se resuelve de todos modos.

Hablando del costo que se tiene al realizar el bacheo, ya se han mencionado los factores que influyen para obtener el costo real del precio unitario del metro cúbico de bacheo realizado, a continuación se desglosa el análisis del precio unitario de bacheo, realizado por el H. Ayuntamiento de Morelia.

VI.1.1 Análisis del Precio Unitario de Bacheo por m³ en Morelia

- **Descripción**

Bacheo con mezcla asfáltica, incluye: tendido y compactado de la mezcla con maquinaria ligera, el cuadrado del bache, mejoramiento y compactación de la base hidráulica en su caso, limpieza de la superficie a bachear, aplicación de la emulsión de rompimiento medio en paredes y fondo del bache, retiro del material no utilizable, personal, herramienta y equipo necesario. La mezcla asfáltica y la emulsión son aportadas por el H. Ayuntamiento de Morelia., como se muestra en la tabla 6.

CLAVE	DESCRIPCIÓN	U	CANTIDAD	PRECIO U.	TOTAL
Mano de Obra C-Bacheo	Cuadrilla Bacheo (1 cabo + 6 peones)	JOR	0.17391	1748.21	304.03
<i>Total de Mano de Obra</i>					304.03
Equipo M-CAMI01	Camión de volteo de 7m ³ marca Dodge con máquina Cumins de 200 H.P.	HORA	1	255.22	255.22
M-COMA01B	Placa compactadora Wacker	HORA	0.513	58.77	30.15
M-CORT01	Cortadora de concreto EC200 18H.P. disco de 14" motor de gasolina	HORA	0.513	55.78	28.62
<i>Total de Equipo</i>					313.99

Conceptos CIM- RELLEBASE03	Base hidráulica utilizando material de banco tezontle 85% y tepetate 15%, extendida y compactada con maquinaria ligera y/o a mano en capas no mayores de 20 cm de espesor promedio, al 95% de su PVMS incorporando el agua necesaria para obtener la humedad óptima requerida. Incluye: suministro, acarreos, acarreo libre, maniobras, herramienta, equipo y mano de obra necesaria PUOT.	M3	0.2	212.85	42.57
<i>Total de conceptos</i>					42.57
				Costo Directo	660.59
				Indirectos (30%)	198.18
				Precio Unitario	858.77

Tabla No.6: cálculo del precio unitario de metro cúbico de bacheo; fuente H. Ayuntamiento de Morelia

De acuerdo al municipio de la ciudad de Morelia, el Precio Unitario por metro cúbico de bacheo es de \$858.77 pesos 00/100 m.n. sin incluir la emulsión y la mezcla asfáltica, porque esa materia prima la costea el Municipio, sin embargo cabe aclarar que el litro de emulsión asfáltica tiene un valor en el mercado de aproximadamente \$6.0 a \$12.0 pesos 00/100 m.n. dependiendo del proveedor, así que habría que agregar éste costo al precio unitario del bacheo para determinar de manera real el valor del metro cúbico de bacheo, es decir, 30% más al precio unitario obtenido, para de esta forma obtener **\$1,116.10** pesos 00/100 m.n. por metro cúbico para bacheo.

Es conveniente resaltar que en la descripción del análisis del precio unitario se mencionan algunas actividades que se tienen que realizar previo al bacheo, las cuales en la realidad no se llevan a cabo, ocasionando con esto un sobre costo del precio unitario, porque se está cobrando un concepto que no se ejecuta en la obra, ocasionando con ello un deterioro en la economía del municipio y en la misma obra que se realiza.

A continuación se describe la segunda técnica que se utiliza para realizar el bacheo, ésta técnica es utilizada en diversas partes del mundo y en México se está incorporando recientemente en algunos Estados del País, es decir, es tecnología nueva en lo que se refiere a bacheo.

VI.2 Equipo de bacheo con ligante integrado y diseminador de agregados

Este tipo de equipo está diseñado para distribuir la emulsión y los fragmentos pétreos simultáneamente para reparar defectos someros en la superficie (agrietamiento, descamado, desprendimientos, engrosado y juntas defectuosas). Las emulsiones asfálticas y agregados son diseminados sucesivamente en la superficie dañada, después de haber limpiado y secado. Produce tratamientos de capas sencillas, dobles o múltiples, dependiendo de la geometría de la sección deteriorada.

Los productos son aplicados usando medios convencionales (el distribuidor de ligante con una lanza aspersora, distribución manual de pétreos) o con equipo delicado diseñado para distribuir simultáneamente una capa delgada de ligante y agregado a la superficie o un diseminador dual, ver fotografía 14.



Fotografía No. 14: distribuidor de ligante con lanza aspersora y distribuidor manual de pétreos; fuente Jetpatcher

El equipo requerido para realizar las diferentes funciones se hace llegar con un tren de camino. Una característica única de este tipo de equipo es la habilidad para diseminar simultáneamente, si es requerido, el ligante y la grava sobre un ancho variable para asegurar que se aplane inmediatamente.

Las ventajas de los sistemas con diseminador dual son:

- Técnica: control de la velocidad de aplicación del agregado y del ligante para evitar la sobre aplicación, combinada con el aplanado sistemático.
- Ahorro en costo: un alto nivel de eficiencia permitiendo la aplicación de hasta 9 toneladas de emulsión, por ejemplo, cerca de cinco veces más que con un equipo convencional de bacheo, reduciendo costos entre un 40 y 60%.
- Mejora en seguridad: no hay personal trabajando en el camino.

Los agregados pueden ofrecer las mismas características que aquellos para asfaltos almacenados.

Las emulsiones asfálticas que se usan son predominantemente las de asentamiento rápido, ligeramente fluidas, emulsiones de baja viscosidad con 65% de ligante.

También se pueden hacer pruebas de adhesión pasiva para adaptar la fórmula de la emulsión a la reactividad de los agregados (estándar NF EN 13614).

VI.2.1 Proceso de bacheo por aspersión

La técnica de bacheo por aspersión fue desarrollada primeramente en Nueva Zelanda en 1988 y posteriormente en los países anglosajones (Reino Unido, Australia, Canadá e Irlanda).

Las aplicaciones de ésta técnica son las mismas que las de las máquinas automáticas de bacheo o asfaltos almacenables. Estas son empleadas para: baches, degradaciones superficiales, depresiones, fisuras, agrietamiento y juntas defectuosas.

El equipo consiste en un camión adaptado con una manguera de funciones múltiples, un tanque de emulsión, un rodillo, una tolva para el material, un silo para el cemento y un tanque para aditivos.

Para el llenado de baches y el asentamiento local de los pavimentos, se aplica el siguiente procedimiento:

- i. **Limpieza del bache:** se aplica aire a alta velocidad para desalojar impurezas del bache, como pueden ser piedras, basura, polvo, inclusive agua, ésta acción se realiza también en la periferia del bache para descubrir posibles grietas o micro fisuras que

pudieran estar alrededor del bache, todo aquel material que no se desprenda durante esta operación deberá dejarse.

- ii. **Dispersar la película adhesiva:** consiste en aplicar emulsión a alta presión para sellar las grietas internas y externas, así como todo el interior del bache. Es un procedimiento normal sellar todo el bache para evitar futuras filtraciones de agua.
- iii. **Llenado del bache:** se realiza al permitir el paso del agregado a través del chorro de emulsión, en forma de cono, produciéndose con esto la mezcla asfáltica que nos servirá para rellenar el bache. Esta aplicación del llenado por inyección a presión, se ejecuta a partir del fondo del bache hacia la superficie, obteniéndose compactaciones superiores a cualquier otro método, sin la utilización de ningún medio mecánico. El nivel de la reparación deberá ser el mismo que el nivel de la carpeta original.
- iv. **Poreo de la reparación:** este paso se refiere a la aplicación de arena seca, para acelerar el rompimiento de la emulsión y permitir el acceso inmediato del flujo vehicular sobre la superficie reparada, sin que esta sufra ninguna distorsión o que la mezcla de la reparación se adhiera a las ruedas de los vehículos.

En estos cuatro sencillos pasos que se mencionan, se realiza de manera eficiente y segura la reparación de un bache, debido principalmente al equipo con el que se realiza, el cual cuenta con las siguientes características:

- **Motor auxiliar**

De uso industrial, 4 cilindros operado a diésel; genera la operación del soplador a través de un cople flexible, con volumen de aire constante; Compresor de aire de doble pistón y alta eficiencia, es movido a través de una banda dentada, el grupo de generación de fuerza cuenta con una bomba hidráulica conectada, por medio de una transmisión amortiguada.

- **Tolva para agregados**

En capacidades desde 2.5 a 8 metros cúbicos, fabricadas en acero al carbón de 4 mm de espesor; con una banda transportadora colocada a todo lo largo, fabricada en materiales de alta resistencia a la abrasión.

- **Sistema de aplicación de agregado**

Venturi giratorio patentado, manguera para agregados de alta resistencia a la abrasión, de diseño y fabricación exclusiva con boquilla de aluminio y anillo de aspersión, válvulas de control, brazo de soporte articulado de 3.5 m con giro de 270°; la aplicación de la emulsión, mezcla asfáltica y arena, se logran desde los controles de la botonera.

- **Tanques presurizados**

Para emulsión: en capacidades variables en función del tamaño de la tolva.

Para solvente: sirve para la limpieza de todo el sistema de flujo de emulsión.

Para agua: se usa para la limpieza del equipo en su parte interna y externa, así como para humedecer las zonas de reparación.

- **Controles**

Colocados en la parte trasera del equipo para el encendido y la regulación de las velocidades. El volante de operación tiene integrado una botonera para administrar la operación como los flujos de agregado, arena y emulsión, así como también la comunicación con la cabina.

- **Equipo periférico**

Pasillos traseros y de servicio, compartimientos de herramientas y utensilios, escalera, manguera retráctil para agua, depósito para solvente y para limpieza de componentes, salpicaderas, chasis integral para montaje, luces de advertencia, sistema de llenado del tanque de emulsión a partir de tambores de 200 litros.

Estas características que presenta el equipo necesario para realizar la operación de bacheo, hace bastante sencilla, económica y segura su utilización, además de ofrecer las siguientes ventajas:

- Capacidad de producción de 2.4 metros cúbicos por hora de mezcla asfáltica en operación continua, correspondiente a 4.27 toneladas aproximadamente.
- Velocidad de depósito de la mezcla de 100 km/hora, logrando compactaciones superiores a otros métodos, sin uso de medios mecánicos de compactación.
- Sistema Venturi para el lanzamiento del agregado sin partes móviles sujetas a desgaste, es giratorio lo cual permite que el operario desplace la manguera al realizar la reparación sin ningún esfuerzo.
- Transportador para agregado a todo lo largo de la tolva, mismo que permite el desalajo del material en cualquier posición.
- Tolva para arena seca que nos permite porear la superficie de la reparación.
- Ajustes mínimos para el inicio de la operación.
- Controles de operación integrados en un solo mando que le permiten al operador realizar todas las funciones desde una botonera.
- Velocidades variables en el transportador de agregado para controlar los volúmenes a depositar, dependiendo del tamaño de la reparación.
- Para la aplicación de esta técnica no se requiere escuadrar o “cajear” el bache, ya que las aristas irregulares sirven para el anclaje de la reparación, logrando con esto ahorros importantes en volúmenes de material.
- El asfalto adyacente no se daña ya que no es necesario aplicar mecanismos de compactación.
- Mezclas asfálticas frescas y sin desperdicios de materiales.
- Reparaciones más durables.
- Alta productividad en las cuadrillas de reparación, esto se logra a través del poco esfuerzo físico que aplican los operarios, además de dignificar esta labor, convirtiéndose en un trabajo más eficiente y limpio.
- Mayor seguridad del personal, debido a que la reparación se ejecuta más rápido, esto permite que los operarios estén menos tiempo expuestos al tráfico.
- Se requiere una menor cantidad de personal, herramientas y equipos complementarios al ejecutar el trabajo.

Todas éstas ventajas que se obtienen al utilizar ésta técnica de reparación de baches, se ven reflejadas en la reparación misma del bache, debido a que se obtiene una mayor durabilidad en la mezcla asfáltica, mayor adherencia con los neumáticos, menor ruido al paso de los vehículos, mayor confort y seguridad del usuario, es decir, mejor calidad de vida para los mismos.

Las técnicas que usan emulsiones asfálticas se ajustan bastante bien a la ejecución de las tareas de mantenimiento. Las emulsiones dan flexibilidad a su uso y permiten que las aplicaciones se puedan adaptar a la extensión de las reparaciones, a los niveles de tránsito o a variaciones estacionales.

El gran número de instalaciones de producción, facilidad de almacenamiento en múltiples depósitos, la simplicidad y flexibilidad al usar emulsiones asfálticas, es la mejor alternativa cuando se requieren soluciones rápidas de mantenimiento que impliquen el menor trastorno a los usuarios del camino.

VI.2.2 Análisis del costo por metro cúbico de bacheo

Una vez visto las ventajas técnicas que ofrece el uso de ésta técnica, ahora se analizará igual que la técnica anterior el costo por metro cúbico de bacheo, previendo una ventaja económica respecto de la otra técnica, tal como se muestra en la tabla 7.

CLAVE	DESCRIPCIÓN	U	CANTIDAD	PRECIO U.	TOTAL
Materiales MAT BASE	Material de base puesto en obra	M3	1.3	100	130

<i>Total de Materiales</i>					130
Equipo DISTRIBUIDOR	Distribuidor de ligante con lanza aspersora y distribuidor manual de pétreos	HORA	1	255.22	255.22
<i>Total de Equipo</i>					255.22
Mano de Obra C BACHEO	Cuadrilla (Operador + chofer + 2 banderilleros)	JOR	0.17391	971.43	168.94
<i>Total de Mano de Obra</i>					168.94
				Costo Directo	554.16
				Indirectos (30%)	116.25
				Precio Unitario	720.41

Tabla No.7: cálculo del precio unitario por metro cúbico de bacheo; fuente propia

El valor obtenido del precio unitario es de \$720.41 pesos 00/100 m.n. sin considerar la mezcla asfáltica, para lo cual se tiene que aumentar un 30% al precio unitario calculado para obtener el precio real, obteniendo así un valor real de **\$936.53** pesos 00/100 m.n.

VI.2.3 Análisis del costo por metro cúbico de bacheo en la SCT

Se ha querido incluir en éste apartado, un análisis de precios unitarios por metro cúbico de bacheo, utilizado en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), para tener otra referencia más y determinar de mejor forma qué técnica ofrece las mejores ventajas técnicas, económicas, así como de confort y seguridad.

- **Descripción**

Bacheo profundo aislado por unidad de obra terminada, incluye la extracción del material fallado, la reposición del material de las capas subyacentes del pavimento, con calidad de base hidráulica y de la carpeta asfáltica construida con mezcla de concreto asfáltico en caliente (N.CSV.CAR.2.02.004/03), ver tabla 8.

CLAVE	DESCRIPCIÓN	U	CANTIDAD	PRECIO U.	TOTAL
Materiales MAT BASE	Material de base puesto en obra	M3	1.3	100	130
<i>Total de Materiales</i>					130
Equipo H #COMPACT 533E	Compactador vibratorio Caterpillar CS-533E	HORA	0.1365	535.23	73.06
H #MOTO CAT 12 H	Motoconformadora Caterpillar 12 H	HORA	0.0683	744.65	50.86
H# EXCAVADORA 320	Excavadora Caterpillar 320 C	HORA	0.092	555.83	51.14
<i>Total de Equipo</i>					175.06
Auxiliares EXTRACCIÓN AGUA	Extracción y acarreo de agua	M3	0.23	35.79	8.23
<i>Total de Auxiliares</i>					8.23
				Costo Directo	313.29
				Indirectos (30%)	94
				Precio Unitario	407.29

Tabla No.8: cálculo del precio unitario por metro cúbico de bacheo; fuente ASYCSA

El precio unitario elaborado para licitación en la secretaría de comunicaciones y transportes fue de \$407.29 pesos 00/100 m.n. sin considerar los conceptos de mezcla asfáltica y mano de obra, aunque en la descripción sí los tomaron en cuenta; esto quiere decir que hay que aumentar 30% de mezcla asfáltica y 100% de mano de obra al precio

unitario calculado, para obtener el precio unitario real, de esta forma tenemos un precio unitario de **\$936.77** pesos 00/100 m.n. por metro cúbico para bacheo.

VI.2.4 Análisis de los resultados

Una vez que se han realizado los diferentes cálculos aproximados para obtener el precio unitario que tiene un metro cúbico para bacheo, se llegó a los siguientes resultados:



Gráfica No.1: comparativa del precio unitario de las tres opciones mencionadas, H. Ayuntamiento, SCT y La Propuesta; fuente propia.

El costo más alto del precio unitario fue el del Municipio, obteniendo un valor de \$1116.10 pesos 00/100 m.n. por metro cúbico de bacheo; y existe prácticamente un empate entre el costo que presenta a quien se denominó SCT, por ser un análisis de una empresa particular que licita obra en la secretaría de comunicaciones y transportes, y la propuesta que en éste trabajo de investigación se señala, con un precio unitario de \$936.77 y \$936.53 pesos 00/100 m.n. respectivamente, como se muestra en la gráfica 1.

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

I. DISEÑO EXPERIMENTAL

Una vez analizadas las diferentes variables que se deben tomar en cuenta para llevar a cabo un buen diseño de una mezcla para bacheo, así como el proceso y técnica de ejecución, se ha elaborado un diseño experimental que permitirá organizar y desarrollar de manera sistemática el método que se seguirá para la realización del proceso en su conjunto, mismo que servirá para analizar los resultados obtenidos de la propuesta que se haga en éste proyecto de investigación, ver tabla 9.

I.1 Diseño experimental

DISEÑO EXPERIMENTAL	
<p>Selección de la Emulsión Asfáltica</p> <p>Se seleccionará la emulsión asfáltica en base a la norma de la secretaría de Comunicaciones y Transportes, que se debe usar para bacheo, auxiliados además del protocolo de la Asociación Mexicana del Asfalto A. C.</p>	<p>Selección del Material Pétreo</p> <p>Se seleccionará el agregado pétreo que indique la norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, que se debe usar para bacheo, apoyado con el protocolo de la Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.</p>
<p>Caracterización Física</p> <p>Se realizarán las pruebas mecánicas a la emulsión asfáltica que indica la norma N.CMT.4.05.001 de la SCT.</p>	<p>Caracterización Física</p> <p>Se realizarán las pruebas mecánicas a los agregados pétreos que indica la norma N.CMT.4.04 de la SCT.</p>
<p>Análisis de Resultados</p> <p>Una vez hechas todas las pruebas se analizarán los resultados obtenidos de ellas, para aprobar o no la emulsión.</p>	<p>Análisis de Resultados</p> <p>Una vez hechas todas las pruebas se analizarán los resultados obtenidos de ellas, para aprobar o no el agregado pétreo.</p>
<p>Selección de la Mezcla Para Bacheo</p> <p>La mezcla a utilizar se definirá a través del</p>	<p>Selección del Agente Modificador</p> <p>El polímero se definirá de forma particular.</p>

protocolo AMAAC y sus especificaciones para bacheo.	
<p style="text-align: center;">Caracterización Física</p> <p>Se realizarán las pruebas mecánicas a la mezcla seleccionada que indica la norma N.CMT.4.05.003 de la SCT y el protocolo AMAAC.</p>	<p style="text-align: center;">Caracterización Física</p> <p>La caracterización se hará en función de las pruebas mecánicas de la mezcla preparada con el agente modificador adicionado en ella.</p>
<p style="text-align: center;">Análisis de Resultados</p> <p>Una vez hechas todas las pruebas se analizarán los resultados obtenidos de ellas, para su aprobación o no de la mezcla asfáltica.</p>	<p style="text-align: center;">Análisis de Resultados</p> <p>Una vez hechas todas las pruebas se analizarán los resultados obtenidos de ellas, para su aprobación o no del agente modificador.</p>
<p style="text-align: center;">Caracterización Microestructural</p> <p>La mezcla convencional se caracterizará a través de la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).</p>	<p style="text-align: center;">Caracterización Microestructural</p> <p>La mezcla modificada se caracterizará a través de la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).</p>
<p style="text-align: center;">Análisis de Resultados</p> <p>Una vez hechas todas las pruebas se analizarán los resultados obtenidos de ellas.</p>	<p style="text-align: center;">Análisis de Resultados</p> <p>Una vez hechas todas las pruebas se analizarán los resultados obtenidos de ellas, para su aprobación o no del agente modificador.</p>
<p>Comparación de Resultados</p> <p>Una vez obtenidos los resultados de los análisis de las dos mezclas, se compararán los mismos para obtener la mezcla con los mejores resultados en virtud de la norma de la SCT y el protocolo AMAAC.</p>	

Tabla No. 9: ruta crítica; fuente SCT, AMAAC y propia

II. CARACTERIZACIÓN DE EMULSIÓN ASFÁLTICA

Para realizar adecuadamente el diseño de una mezcla asfáltica, se debe contar con la norma específica que señale como se debe realizar dicha mezcla, así pues, para nuestro caso de estudio, nos basamos en las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) para caracterizar el material, es decir, se elaboró el diseño experimental que nos marca cual es la ruta a seguir para desarrollar satisfactoriamente el buen diseño de la mezcla en el proyecto. Obteniendo para tal fin, la caracterización de manera separada del material a utilizar, en primer lugar la emulsión asfáltica, posteriormente el agregado pétreo y finalmente la mezcla asfáltica para bacheo.

Obteniendo los siguientes resultados, mismos que se comparan con los rangos de calidad que pide la norma y en su caso el protocolo de la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC).

Selección de la emulsión asfáltica.

- Se caracterizaron dos tipos:
 - a) Emulsión catiónica de rompimiento rápido.
 - b) Emulsión catiónica de rompimiento medio.

A los dos tipos de emulsión se les caracterizó con las mismas pruebas de laboratorio, las cuales están indicadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, las que a su vez se basan en las normas de la ASTM.

II.1 Destilación de emulsión asfáltica

La primera prueba realizada a las emulsiones asfálticas, fue la de contenido de cemento asfáltico en masa o mejor conocida como destilación de emulsiones asfálticas, misma que se basa en la norma N.CMT.4.05.001, la cual indica lo siguiente: la prueba consiste esencialmente en efectuar la destilación de una muestra de emulsión asfáltica, hasta una temperatura máxima de 260°C, para separarla en residuo asfáltico, agua y disolventes. En el residuo asfáltico se realizan otras pruebas que ayudan a identificar la emulsión. Cuando se requiera también identificar los disolventes, se separa de ellos una porción representativa de tamaño suficiente para su posterior análisis (Norma de la SCT, 2010), ver fotografías 15 y 16.



Fotografía No. 15: Prueba de destilación de emulsión asfáltica; fuente propia



Fotografía No. 16: Prueba de destilación de emulsión asfáltica; fuente propia

Obteniendo los siguientes resultados:

- i. Emulsión catiónica de rompimiento rápido: 68% de cemento asfáltico.
- ii. Emulsión catiónica de rompimiento medio: 66% de cemento asfáltico.

II.2 Penetración en cementos y residuos asfálticos a 25°C, 100g y 5s

La segunda prueba realizada al residuo de la emulsión asfáltica, fue la prueba de penetración, misma que se basa en la norma N.CMT.4.05.001 y que indica lo siguiente: esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, así como de los residuos por destilación de las emulsiones y asfaltos rebajados, mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra de prueba de dichos materiales bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura (Norma de la SCT, 2010), ver fotografías 17 y 18.



Fotografía No.17: prueba de penetración a residuo asfáltico; fuente propia



Fotografía No. 18: prueba de penetración a residuo asfáltico; fuente propia

Obteniendo los siguientes resultados:

- i. Residuo de emulsión catiónica de rompimiento rápido: 194
- ii. Residuo de emulsión catiónica de rompimiento medio: 100

II.3 Ductilidad de cementos y residuos asfálticos a 25°C

La tercera prueba realizada al residuo de la emulsión asfáltica fue la de ductilidad y al igual que las anteriores se basa en la norma N.CMT.4.05.001, la cual dice lo siguiente: esta prueba permite determinar la capacidad para deformarse sin romperse, de los cementos asfálticos, del residuo de la prueba de película delgada y de los residuos asfálticos obtenidos por destilación de emulsiones. La prueba consiste en medir la máxima distancia a la cual una briqueta de dichos materiales, de geometría y bajo condiciones de temperatura y velocidad de deformación específicas, puede ser estirada sin romperse (Norma de la SCT, 2010), ver fotografías 19 y 20.



Fotografía No. 19: prueba de ductilidad; fuente propia



Fotografía No. 20: prueba de ductilidad; fuente propia

Obteniendo los siguientes resultados:

- i. Emulsión de rompimiento rápido: 107 cm.
- ii. Emulsión de rompimiento medio: 88 cm.

II.4 Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C

Posteriormente se realizó la prueba de viscosidad Saybolt-Furol, la cual hace referencia a la misma norma N.CMT.4.05.001, misma que dice a la letra lo siguiente: ésta prueba permite conocer la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura de 135°C para los cementos, de 25 y 50°C para las emulsiones y de 50 y 60°C para los asfaltos rebajados, pudiéndose hacer a otras temperaturas, con el propósito de estudiar la susceptibilidad al calor de los materiales asfálticos y determinar las viscosidades apropiadas para su utilización.

La prueba consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 60cm³ del material a probar a través de un orificio Furol, instalado en un tubo de viscosidad Saybolt, bajo condiciones de carga y temperatura preestablecidas (Norma de la SCT, 2010), ver fotografías 21y 22.



Fotografía No. 21: equipo para la prueba de viscosidad Saybolt Furol; fuente propia



Fotografía No. 22: prueba de viscosidad Saybolt Furol; fuente propia

Obteniendo los siguientes resultados:

- i. Emulsión de rompimiento rápido: 116.2 s

- ii. Emulsión de rompimiento medio: 45 s

II.5 Asentamiento a 5 días

La prueba que se realizó en seguida fue la de asentamiento de emulsiones asfálticas a 5 días, la cual se basa en la norma N.CMT.4.05.001, misma que hace mención de lo siguiente: esta prueba permite determinar el grado de homogeneidad que conservan las emulsiones asfálticas catiónicas o aniónicas, después de haber sido almacenadas durante periodos prolongados. La prueba consiste en dejar reposar muestras de emulsión asfáltica durante un tiempo especificado y posteriormente, determinar la diferencia de concentración de asfalto a diferentes niveles de la muestra (Norma de la SCT, 2010), ver fotografías 23 y 24.



Fotografía No.23: probetas para la prueba de asentamiento a 5 días de; fuente propia



Fotografía No.24: probetas después de la prueba de asentamiento a 5 días; fuente propia

Obteniendo los siguientes resultados:

- i. Emulsión de rompimiento rápido: 6%
- ii. Emulsión de rompimiento medio: 2%

II.6 Retenido en la malla No. 20

La última prueba que se realizó para caracterizar las emulsiones asfálticas fue la de retenido en la malla no. 20, y posteriormente se determinó cuál de las dos emulsiones era la óptima para ser usada en la mezcla asfáltica. Al igual que las pruebas anteriores, ésta se basa en la norma N.CMT.4.05.001, la cual indica lo siguiente: esta prueba permite cuantificar el asfalto de una emulsión que se retienen las mallas No. 20 y No. 60, cuando contiene glóbulos de asfalto relativamente grandes, para estimar la uniformidad de la emulsión. La prueba consiste en hacer pasar a través de las mallas No. 20 y No. 60 una cantidad de emulsión y calcular los porcentajes de asfalto que se retienen en ellas (Norma de la SCT, 2010), ver fotografías 25 y 26.



Fotografía No.25: prueba de retenido en la malla No. 20 del residuo de la emulsión; fuente propia



Fotografía No.26: pesando la malla No. 20 con el residuo de emulsión; fuente propia

Obteniendo los siguientes resultados:

- i. Emulsión de rompimiento rápido: 0.16%
- ii. Emulsión de rompimiento medio: 0.01%

A continuación se mencionarán las pruebas que se utilizaron para caracterizar a los agregados pétreos, tomando como base las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, las cuales nos dicen cómo realizar dichas pruebas, así como el muestreo del agregado pétreo en el banco de materiales.

Para nuestro caso, el tipo de agregado pétreo que indica la norma que se debe utilizar para realizar la mezcla asfáltica en frío para bacheo, debe ser de un banco de material triturado, el banco de material seleccionado para extraer el material fue el denominado Banco de Materiales Abraham González Contreras (AGC) ubicado en el km 15 de la carretera Morelia-Salamanca, en el ejido Mezón Nuevo, ver fotografías 27 y 28.



Fotografía No.27: banco de materiales AGC; fuente propia



Fotografía No. 28: obtención del material directamente del depósito de la banda transportadora; fuente propia

III. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS

III.1 Densidad relativa

Es la primera prueba que se realizó para caracterizar a los agregados pétreos del banco de material triturado, esta prueba se basa en la norma N.CMT.4.04, la cual menciona lo siguiente: esta prueba permite determinar la densidad relativa de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas con el fin de conocer la masa de sólidos por unidad de volumen de dichos sólidos sin vacíos en cada una de sus fracciones, ya sea arena con finos o grava, respecto a la densidad del agua.

La prueba para la arena con finos, una vez separada de la grava, consiste en eliminar el aire atrapado en la muestra de prueba, al estar sumergida totalmente en agua destilada en ebullición, para obtener su densidad relativa.

Para la grava, una vez separada de la arena con finos, la prueba consiste en introducir la muestra de prueba en un depósito con agua destilada, para determinar el volumen que desplaza, para después, al comparar con dicho volumen la masa seca de la muestra de prueba, obtener su masa por unidad de y finalmente, compararla con la densidad del agua, para obtener su densidad relativa (Norma de la SCT, 2010), ver fotografías 29 y 30.



Fotografía No.29: material saturado en agua, prueba de densidad relativa; fuente propia



Fotografía No.30: secado del material en parrilla, prueba de densidad relativa; fuente propia

Obteniendo el siguiente resultado:

- Densidad relativa de agregado pétreo: 2.63

III.2 Desgaste mediante la prueba de los ángeles, de materiales pétreos para mezclas asfálticas

Posteriormente se caracterizó a los agregados pétreos, mediante la prueba de desgaste, a la cual hace referencia la norma N.CMT.4.04, la cual menciona lo siguiente: el objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio, en donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado, midiendo la variación granulométrica de la muestra como la diferencia entre la masa que pasa la malla

No. 12 (1.17 mm de abertura), antes y después de haber sido sometida a este tratamiento (Norma de la SCT, 2010), ver fotografías 31 y 32.



Fotografía No.31: equipo para la prueba de desgaste de los ángeles; fuente propia



Fotografía No.32: esferas metálicas para la prueba de desgaste de los ángeles; fuente propia.

Obteniendo los siguientes resultados:

- Desgaste mediante la prueba de los ángeles: 13.64%

III.3 Partículas alargadas y lajeadas, de materiales pétreos para mezclas asfálticas

También se caracterizó el agregado mineral mediante la prueba de las partículas alargadas y lajeadas, la cual se basa en la norma N.CMT.4.04, la cual señala lo siguiente: esta prueba permite determinar el contenido de partículas de formas alargada y lajeada presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en separar el retenido en la malla No. 4 de una muestra de materiales pétreos, para determinar la forma da cada partícula, empleando calibradores de espesor y de longitud (Norma de la SCT, 2010), ver fotografías 33 y 34.



Fotografía No.33: separando las partículas por su espesor y longitud; fuente propia



Fotografía No.34: calibradores y material pétreo en la prueba de partículas alargadas y lajeadas; fuente propia

Obteniendo los siguientes resultados:

- i. Partículas alargadas: 12.05%
- ii. Partículas lajeadas: 12.15%

III.4 Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas

Por último, se realizó la prueba de equivalente de arena y con ésta se finalizó la caracterización de los materiales pétreos, dicha prueba se basa en la norma N.CMT.4.04, la cual menciona lo siguiente: esta prueba permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en agitar un cilindro, que contiene una muestra de material pétreo que pasa la malla No. 4, mezclada con una solución que permite separar la arena de la arcilla (Norma de la SCT, 2010), ver fotografías 35, 36 y 37.



Fotografía No.35: agitador de probetas para la prueba del equivalente de arena; fuente propia



Fotografía No. 36: probetas agitadas en la prueba del equivalente de arena; fuente propia



Fotografía No.37: probeta después de dejar asentar; fuente propia

Obteniendo los siguientes resultados:

- Equivalente de arena: 91%

Después de haber realizado la caracterización de los materiales que se utilizan para elaborar la mezcla asfáltica, se realizaron dos tablas con los resultados de ambas caracterizaciones a manera de resumen, comparando con los parámetros que indican las normas de la SCT y seleccionando el material que más convenga para la elaboración de la misma.

Prueba	Rango		ECR	ECM
	Ecr	Ecm		
Contenido de cemento asfáltico en masa	60% min	60% min	68.00%	66.00%
Penetración a 25°C, 100 g y 5 s	110 - 250	100 - 250	194	100
Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C	40 s, min	25 s, min	116.2 s	45 s
Ductilidad a 25°C	40 cm, min	40 cm, min	107 cm	88 cm
Asentamiento a 5 días	5 % max	5 % max	6%	2%
Retenido malla No. 20	0.1 % max	0.1 % max	0.16%	0.01%

Tabla No. 10: resultados de la caracterización de las emulsiones asfálticas; fuente propia

En la tabla 10 se pueden apreciar cuatro columnas Ecr, Ecm, ECR y ECM, las siglas representan las abreviaturas de los nombres de los dos tipos de emulsiones, catiónicas de rompimiento rápido y rompimiento medio, en ellas se encuentran los valores tanto de los rangos de la norma como de los resultados obtenidos, y en la parte inferior de la columna de rompimiento rápido en un recuadro rojo, dos valores que no cumplen con los rangos establecidos por la norma. Lo que hace que la elaboración de la mezcla asfáltica para bacheo se lleve a cabo con emulsión catiónica de rompimiento medio (ECM), la cual si cumple con las características que establece la norma y se encuentra dentro de los rangos especificados por la misma.

Prueba	Rango	Agregado
	$\Sigma L > 10^6$	
Densidad relativa	2.4 min	2.63
Desgaste Los Ángeles	25% max	13.64%
Partículas alargadas	relación 3 a 1, 15% max	12.05%
Partículas lajeadas	relación 3 a 1, 15% max	12.15%
Equivalente de arena	55% min	91%

Tabla No.11: resultados de la caracterización del agregado pétreo; fuente propia

Por otra parte, en la tabla 11 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del agregado pétreo, los cuales indican que el material del banco de materiales triturados AGC cumple satisfactoriamente con las características especificadas para ser utilizado en la elaboración de la mezcla asfáltica para bacheo de nuestro trabajo de investigación.

Por lo tanto, la mezcla a elaborar será constituida con emulsión asfáltica catiónica de rompimiento medio y agregado mineral triturado del banco de materiales AGC, por cumplir con lo especificado por las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) de México y por la American Society of Testing Materials (ASTM) de EEUU.

IV. SELECCIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

IV.1 Selección de la mezcla

Una vez que se tienen los elementos necesarios para realizar la mezcla asfáltica para bacheo, es necesario definir qué tipo de mezcla es la que se requiere para tal uso, de acuerdo a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en México se cuenta con los siguientes tipos de Mezclas:

IV.1.1 Mezclas asfálticas en caliente

Son las elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla (Norma de la SCT, 2010).

Las mezclas asfálticas en caliente se clasifican a su vez en:

- i. Mezcla asfáltica de granulometría densa.
- ii. Mezcla asfáltica de granulometría abierta.
- iii. Mezcla asfáltica de granulometría discontinua tipo SMA.

IV.1.2 Mezclas asfálticas en frío

Son las elaboradas en frío, en una planta mezcladora móvil, utilizando emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados y materiales pétreos (Norma de la SCT, 2010).

Las mezclas asfálticas en frío se clasifican a su vez en:

- i. Mezcla asfáltica de granulometría densa.
- ii. Mortero asfáltico.

IV.1.3 Mezclas asfálticas por el sistema de riegos

Son las que se construyen mediante la aplicación de uno o dos riegos de un material asfáltico intercalados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de tamaños decrecientes que, según denominación, satisfaga los requisitos de calidad establecidos en la cláusula G de la Norma N.CMT.4.04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Las carpetas por el sistema de riegos se clasifican en carpetas de uno, de dos y de tres riegos. Las carpetas de un riego o la última capa de las carpetas de dos o de tres riegos, pueden ser premezcladas o no. Normalmente se colocan sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, nueva o existente, como capa de rodadura con el objeto de proporcionar resistencia al derrapamiento y al pulimento (Norma de la SCT, 2010).

IV.1.4 Mezcla del protocolo de la AMAAC

De acuerdo al protocolo de la AMAAC, el único tipo de mezcla que se usa en sus diseños, es la mezcla de granulometría densa. El método de diseño propuesto por AMAAC, establece diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa en función de la importancia de la carretera, determinada por el nivel de tránsito esperado en el carril de diseño. Para su selección existen cuatro niveles de diseño:

- i. Nivel I: diseño volumétrico, susceptibilidad a la humedad y selección del asfalto por el grado PG.
- ii. Nivel II: nivel I más, susceptibilidad a la deformación permanente.
- iii. Nivel III: nivel II más, módulo dinámico.
- iv. Nivel IV: nivel III más, diseño por fatiga.

En función de los diferentes tipos de mezclas que se han abordado anteriormente, se procedió a seleccionar el tipo de mezcla asfáltica, inmediatamente se descartaron las opciones de mezclas asfálticas en caliente, por el simple hecho de que se estaría trabajando con emulsión asfáltica. De ésta forma sólo nos quedaba utilizar tres tipos de mezclas, la densa, el mortero y por el sistema de riegos, por lo que acudimos al protocolo de la AMAAC para resolver la decisión, puesto que plantea una serie de recomendaciones que favorecen al diseño de las mezclas, haciéndolas de alto desempeño. Lo que resultó en la selección de la mezcla asfáltica de granulometría densa, haciendo una serie de combinaciones entre lo que indica la norma de la SCT y las recomendaciones del protocolo de la AMAAC.

La selección de la mezcla asfáltica de granulometría densa contempla el uso de los siguientes requisitos:

- i. Tamaño máximo nominal del agregado pétreo de 9.5 mm (3/8”).

- ii. Definición de mezcla de graduación densa y gruesa.

La cual permitirá lo siguiente:

- a) Espesores gruesos.
- b) Incrementa la macro textura.
- c) Mejor estructura interna.
- d) Elevada durabilidad en todos los tipos de proyecto.

V. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS FÍSICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

V.1 Compresión simple sin confinamiento

La mezcla asfáltica se caracterizó realizando la prueba de compresión simple sin confinamiento en la prensa del mismo nombre, ésta prueba nos ayuda a determinar la carga axial en kN que resiste una pastilla cilíndrica de mezcla asfáltica, elaborada con un peso y volumen determinados: La prueba consiste en elaborar la mezcla asfáltica en frío y vaciarla en un recipiente cilíndrico con volumen determinado, para posteriormente precargarla en la prensa de compresión simple de acuerdo a lo especificado por la misma, y finalmente aplicar una carga axial sobre la misma, sin confinamiento alguno y determinar su resistencia en kN, ver las fotografías 38 y 39.



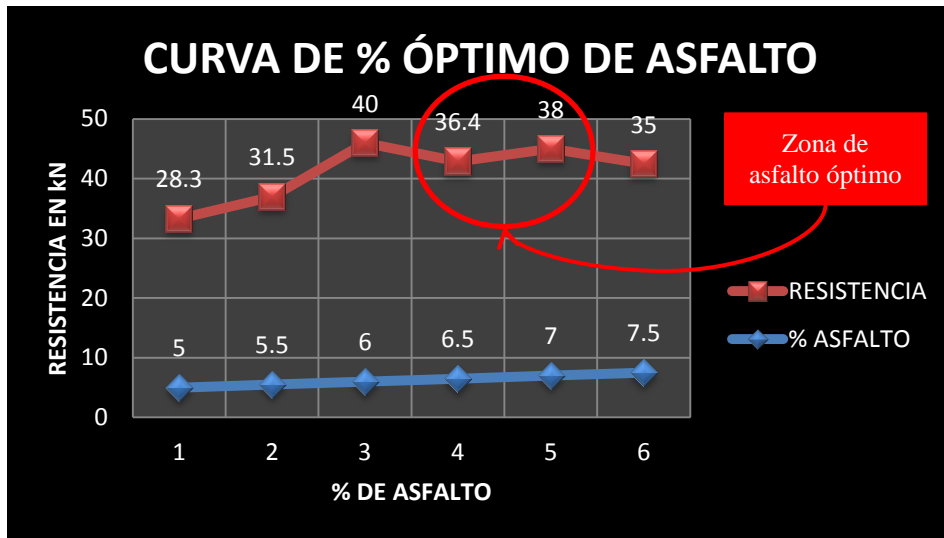
Fotografía No. 38: elaboración de pastillas de mezcla asfáltica;
fuente propia



Fotografía No.39: prueba a la compresión simple sin confinamiento; fuente propia

Obteniendo los siguientes resultados:

- i. Pastilla con 5% de asfalto: 28.3 kN en promedio.
- ii. Pastilla con 5.5% de asfalto: 31.5 kN en promedio.
- iii. Pastilla con 6% de asfalto: 40 kN en promedio.
- iv. Pastilla con 6.5% de asfalto: 36.4 kN en promedio.
- v. Pastilla con 7% de asfalto: 38 kN en promedio.
- vi. Pastilla con 7.5% de asfalto: 35 kN en promedio.



Gráfica No.2: curva de % óptimo de asfalto; fuente propia

Lo que se marca en la gráfica 2 en círculo rojo, es la zona del porcentaje de asfalto óptimo, obtenido después de dos corridas de pruebas a las pastillas de mezcla asfáltica elaboradas con diferentes porcentajes de asfalto, obteniendo un promedio de ambas corridas, es decir seis pastillas, una en cada uno de los puntos porcentuales del asfalto, realizando un total de 12 pastillas, dos por cada punto porcentual, que es el mínimo que indica la prueba. Para obtener de esta forma, entre el punto 6.5% y 7%, la zona de contenido óptimo de asfalto, es decir, 6.75% de asfalto para elaborar la mezcla asfáltica de granulometría densa para bacheo con una resistencia máxima de carga axial de 37.2 kN.

VI. ANÁLISIS FÍSICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA

VI.1 Compresión simple sin confinamiento

Para caracterizar la mezcla asfáltica modificada, se realizó la misma prueba de compresión simple sin confinamiento, pero en ésta ocasión al elaborar la mezcla asfáltica con el contenido óptimo de asfalto, se le adicionó un agente modificador al 5% w/w a base de cemento portland compuesto 30-R (CPC 30-R), suponiendo con esto que se puedan

mejorar las características de la mezcla, aumentando la resistencia a la compresión simple de la misma.



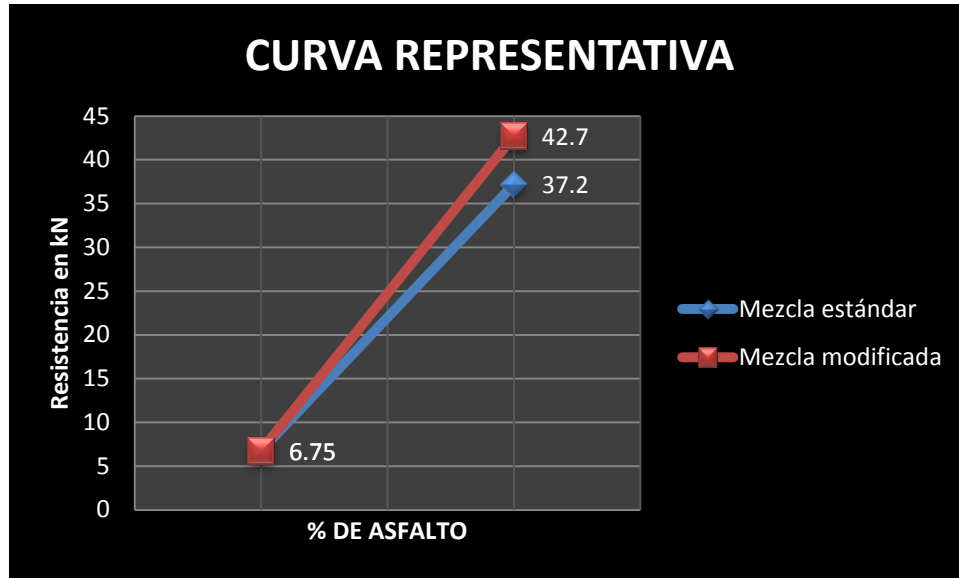
Fotografía No.40: elaboración de pastillas con mezcla modificada; fuente propia



Fotografía No.41: prueba de compresión simple sin confinamiento; fuente propia

Obteniendo los siguientes resultados:

- i. Pastilla modificada con 6.75% de asfalto: 41.5kN
- ii. Pastilla modificada con 6.75% de asfalto: 43.8kN
- iii. Promedio de las dos pastillas: 42.7kN



Gráfica No.3: curva comparativa de la resistencia de la mezcla asfáltica estándar contra la mezcla modificada; fuente propia

Una vez que se realizó el análisis físico de las dos mezclas asfálticas, la estándar y la modificada, se observa en la gráfica 3, la curva que demuestra la capacidad que obtuvo la mezcla modificada para resistir mayor carga axial sin confinamiento, adicionando solamente 5% de cemento portland a la misma, obteniendo un aumento en la resistencia a la carga axial de aproximadamente 15% con respecto a la mezcla estándar.

Esto nos indica que el agente modificador si mejora las características de la mezcla, produciendo un aumento en la resistencia a la carga axial de la misma, tal afirmación se analizará de manera que no quepan dudas del comportamiento que está teniendo el agente modificador en la mezcla.

En primera estancia las pruebas físicas realizadas dan como mejor opción el uso de mezcla asfáltica modificada, contra la mezcla asfáltica estándar. Faltando el último análisis a las dos mezclas, mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

I. FUNDAMENTOS DE LA MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

I.1 Fundamentos de la técnica

Cuando un haz de electrones incide sobre la superficie de un sólido, tienen lugar varios fenómenos: reemisión de una parte de la radiación incidente, emisión de luz, electrones secundarios y Auger, rayos X, etc. Todas estas señales se pueden emplear para obtener información sobre la naturaleza de la muestra (morfología, composición, estructura cristalina, estructura electrónica, etc.) y de hecho, existen microscopios electrónicos de barrido que disponen de detectores que permiten el análisis de electrones secundarios retrodispersados y rayos X característicos.

La técnica consiste, principalmente, en enviar un haz de electrones sobre la muestra y mediante un detector apropiado registrar el resultado de esta interacción. El haz se desplaza sobre la muestra realizando un barrido en las direcciones X e Y de tal modo que la posición en la que se encuentra el haz en cada momento coincide con la aparición del brillo, proporcionalmente a la señal emitida, en un determinado punto de una pantalla.

En el microscopio electrónico de barrido (MEB o SEM) es necesario acelerar los electrones en un campo eléctrico, para aprovechar de esta manera su comportamiento ondulatorio, lo cual se lleva a cabo en la columna ondulatoria del microscopio, donde se aceleran por una diferencia de potencial de 1,000 a 30,000 voltios. Los electrones acelerados por un voltaje pequeño son utilizados para muestras muy sensibles, como podrían ser las muestras biológicas sin preparación adicional, o muestras muy aislantes. Los altos voltajes se utilizan para muestras metálicas, ya que éstas en general no sufren daños como las biológicas, y de esta manera se aprovecha la menor longitud de onda para tener una mejor resolución. Los electrones acelerados salen del cañón, y son enfocados por las

lentes condensadora y objetiva, cuya función es reducir la imagen del filamento, de manera que incida en la muestra un haz de electrones lo más pequeño posible (para así tener una mejor resolución). Con las bobinas deflectoras se barre este fino haz de electrones sobre la muestra, punto por punto y línea por línea.

Las imágenes que se obtienen en el MEB, corresponden a electrones secundarios o electrones retrodispersados emitidos tras la interacción con la muestra de un haz incidente de entre 5 y 30 KeV.

La señal de electrones secundarios se forma en una delgada capa superficial, del orden de 50 a 100 Å. Al ser grande el número de electrones emitido se puede establecer un buen contraste. Por otra parte, al ser electrones de baja energía, menos de 50 eV, pueden ser desviados fácilmente de su trayectoria emergente inicial, y se puede obtener información de zonas que no están a la vista del detector. Esta particularidad es fundamental para otorgar a esta señal la posibilidad de aportar información en relieve. La apariencia de la imagen es la que tendría una muestra que hubiese sido iluminada desde el detector y se estuviese observando desde el cañón de electrones.

En cuanto a la señal de electrones retrodispersados, su principal utilidad reside en que su emisión, que se debe a choques de tipo elástico y por tanto con energía del mismo orden que la de los electrones incidentes, depende fuertemente del número atómico de la muestra. Esto implica que dos partes de la muestra que tengan distinta composición se revelan con distinta intensidad aunque no exista ninguna diferencia de topografía entre ellas. Los electrones retrodispersados salen de la muestra en mayor cantidad en las direcciones próximas a la de incidencia, por lo que su detección se hace mejor en las proximidades del eje de incidencia.

Finalmente, los rayos X que se generan en una muestra sometida a bombardeo electrónico permiten identificar los elementos presentes y establecer su concentración. Cuando un haz electrónico suficientemente acelerado incide sobre la superficie de un sólido, se produce la ionización de los átomos presentes, esto es, la pérdida de electrones internos. En este estado un electrón de una capa más externa salta inmediatamente a la capa deficitaria, y rellena el hueco producido. Este salto implica una liberación de energía, cuyo valor es igual a la diferencia entre las energías que tenía cada electrón en su orbital correspondiente. Esta energía se manifiesta de dos formas: electrones Auger o rayos X y es única para cada elemento. Cuando se presenta la intensidad de esta radiación electromagnética frente a su energía se obtiene un espectro de rayos X, constituido por una serie de picos, designado como líneas, de intensidad variable, a los que se denomina rayos X característicos, que está superpuesto a un fondo continuo de menor intensidad (Rayos X continuos). En algunos casos aparecen además unas líneas satélites, asociadas a las líneas características, ver fotografía 42.



Fotografía No.42: microscopio electrónico de barrido; fuente propia

II. APLICACIONES

Las aplicaciones de la técnica son muy numerosas tanto en ciencias de materiales, como en ciencias biomédicas. Dentro de la ciencia de materiales destacan las aplicaciones en metalurgia, petrología y mineralogía, materiales de construcción, materiales cerámicos tradicionales y avanzados, electrónica, fractografía y estudio de superficies y composición elemental de sólidos en general. La MEB también se aplica en botánica, en el uso de cultivos celulares, en dermatología, en odontoestomatología y biomateriales, en hematología, inmunología y en el estudio de la morfología de preparaciones biomédicas en general, concretos y agregados pétreos, mineralogía de cementos: Clinker y alitas, mineralogía de agregados pétreos: granito, calizas, etc, Crecimientos cristalinos, texturas, fisuraciones, porosidades, fragilidad, fases reactivas, productos expansivos, interferencia agregado mineral cemento asfáltico, índice de huecos, composición microquímica, alteraciones, cuantificación de parámetros de caracterización.

También se utiliza en metales y orgánicos, análisis morfológico y fractográfico, análisis de inclusiones, corrosión de superficies y oxidaciones, estudio, análisis y evaluaciones de fases, cartografía de elementos químicos, ataques superficiales por alteración, espesores y distribución de capas.

III. REQUISITOS Y LIMITACIONES

Es fundamental que las muestras que vayan a ser observadas en MEB estén exentas de líquido y además que sean conductoras.

III.1 Secado de las muestras

Las muestras que quieran ser investigadas mediante MEB, deben ser secadas antes de ser introducidas en el microscopio, de otro modo la baja presión en el mismo causará

que el agua (y otros líquidos volátiles) se evaporen saliendo violentamente del espécimen y alterando la estructura del mismo.

Muestras con una rigidez inherente como metales, rocas, huesos, etc., se pueden secar al aire o en un desecador de vacío sin que su estructura sufra alteración alguna. Sin embargo, las estructuras blandas con un alto contenido de agua se deformarán si se dejan secar al aire ya que las fuerzas de tensión superficial asociadas a la salida del agua causarán daños estructurales. Para evitar los efectos dañinos que las fuerzas anteriormente mencionadas tienen en la estructura de los especímenes secados al aire, durante el proceso de secado debe pasarse el límite entre la fase líquido-gas. Entre los métodos que existen para conseguirlo se encuentra el método del punto crítico en el cual el líquido pasa directamente a la fase gas. De este modo las fuerzas de deformación se evitan debido a que el proceso de secado tiene lugar por encima del punto crítico del líquido, donde el límite entre la fase líquida y la fase gas no existe.

El punto crítico es aquel estado particular de un gas en el cual todavía puede sufrir licuefacción. Este estado viene determinado por la presión crítica y la temperatura crítica. Por encima de este punto el gas no puede experimentar licuefacción debido a que el límite entre la fase gaseosa y la fase líquida ha desaparecido. En este punto el estado líquido y el estado gaseoso son igualmente densos. Éste es el punto crítico. El líquido pasa a la fase gaseosa sin pasar por el límite de fases líquido-gas, y la muestra se seca sin los efectos dañinos del secado en aire.

Según los valores de presión y temperatura crítica del agua, 228.5 bar y 374°C, si un espécimen contiene agua no puede ser secado mediante el método del punto crítico ya que los valores tan altos de presión y temperatura podrían destruirlo. Así la muestra debe ser transferida a un agente apropiado, llamado fluido transicional, tal como es el dióxido de

carbono cuyos valores de punto crítico son considerablemente más ventajosos, 73.8 bar y 31°C.

III.2 Recubrimiento de las muestras no conductoras

Cuando se desea visualizar una muestra en un MEB ésta debe ser conductora ya que, de no ser así, se carga durante la irradiación por una acumulación de carga que desvía el haz electrónico y como consecuencia de ello aparecen distorsiones en la imagen. Una solución a este problema, es recubrir la muestra con una película conductora, de espesor comprendido entre 10 y 25 nm.

Las técnicas empleadas para mejorar la conductividad de las muestras para su estudio al MEB son la evaporación térmica y el recubrimiento por sputtering. Ambas conducen a los mismos resultados, pero los mecanismos son distintos.

La elección del material con el que se va a cubrir la muestra depende fundamentalmente del estudio que se va a realizar. Así, para la observación de imágenes de electrones secundarios el oro y el oro-paladio son los materiales que conducen a los mejores resultados; al ser elementos pesados, producen mayor emisión. Cuando lo que se pretende es un estudio micro analítico es recomendable emplear carbono. El bajo número atómico de este elemento lo hace prácticamente transparente a los rayos X emitidos por la muestra. También se emplean, a veces, aluminio, cromo, etc.

IV. ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA PARA BACHEO

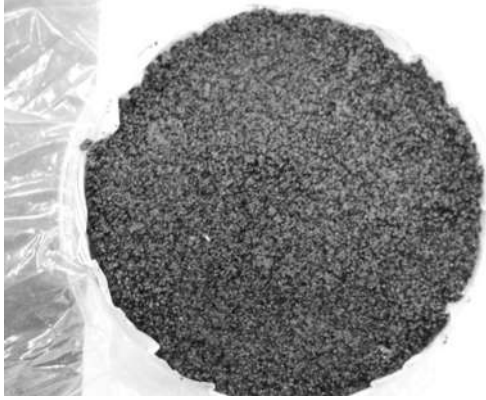
Para poder analizar las muestras por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido, se realizaron muestras pequeñas de cada uno de los componentes de la mezcla asfáltica, es decir, de la emulsión asfáltica catiónica de rompimiento medio, de los agregados pétreos, de la mezcla asfáltica de granulometría densa, así como de los mismos elementos pero modificados con cemento portland al 5% w/w. Cada una de las muestras tenía un área de $1 \times 1 \text{ cm}^2$, pero al ser un material no conductor se procedió a metalizar todas las muestras a base de cobre durante un tiempo aproximado de 50 min al vacío, para poder observar la morfología y microestructura de cada uno de los elementos, así como de la mezcla asfáltica y finalmente la mezcla con el agente modificador mezclado, ver fotografías 43 a 48.



Fotografía No.43: muestra del agregado pétreo y emulsión estándar, para ser analizado por MEB ; fuente propia



Fotografía No.44: muestra del agregado pétreo y emulsión modificada para ser analizado por MEB; fuente propia



Fotografía No.45: mezcla asfáltica estándar para analizar por MEB; fuente propia



Fotografía No.46: mezclas asfáltica modificada para ser analizada por MEB; fuente propia



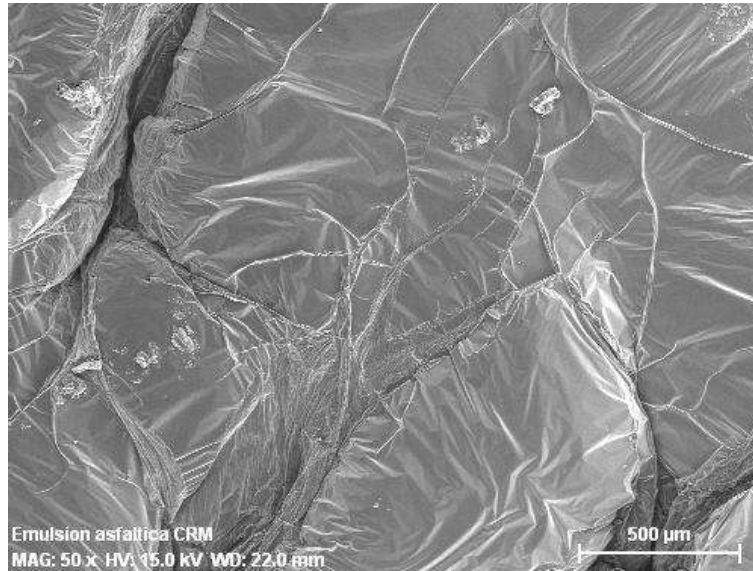
Fotografía No.47: emulsión asfáltica estándar para ser analizada por MEB; fuente propia



Fotografía No.48: emulsión asfáltica modificada para ser analizada por MEB; fuente propia

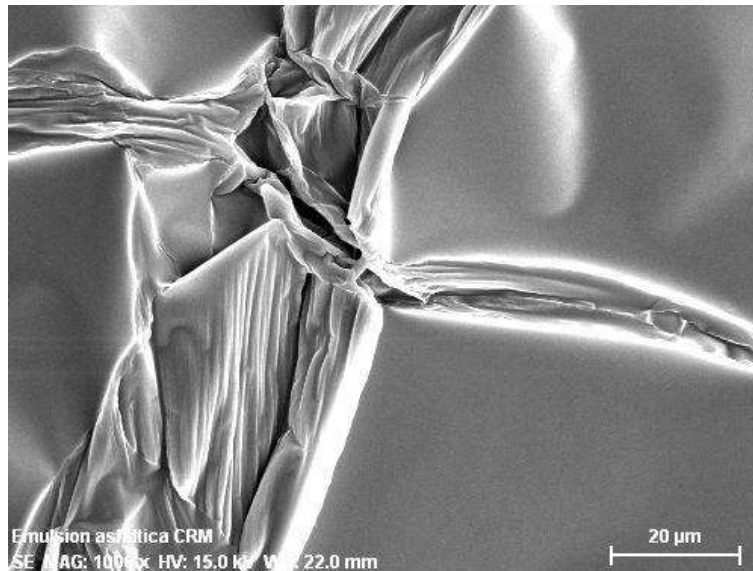
Obteniendo los siguientes resultados:

- i. En la microfotografía 1, se aprecia una emulsión asfáltica estándar de rompimiento medio. Como se puede observar, es un material amorfo, sin formación cristalina, debido a que su formación procede de una emulsión asfáltica, además se observan fronteras entre diferentes clusters de la misma.



Microfotografía No.1: emulsión asfáltica de rompimiento medio analizada por MEB a 50x; fuente propia

- ii. Se realizó un acercamiento en las fronteras de partículas de asfalto y se aprecia una unión débil en la microfotografía 2.



Microfotografía No. 2: acercamiento de la microfotografía 47 a 1000x; fuente propia

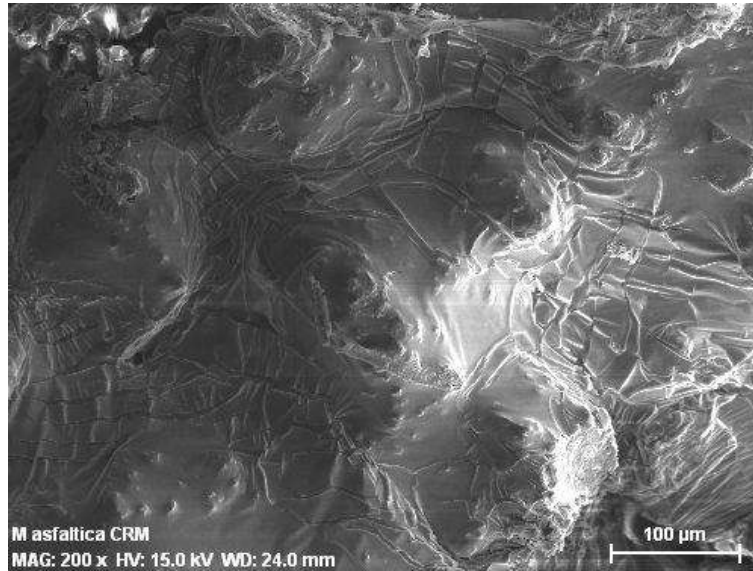
- iii. La microfotografía 3 muestra una emulsión asfáltica modificada con cemento portland como promotor de adherencia a 50x y sobre la muestra de emulsión no se

aprecia formación cristalina producto de la hidrólisis e hidratación del cemento. Por lo cual se procedió a preparar y analizar muestras conteniendo agregado pétreo para visualizar dichos productos.



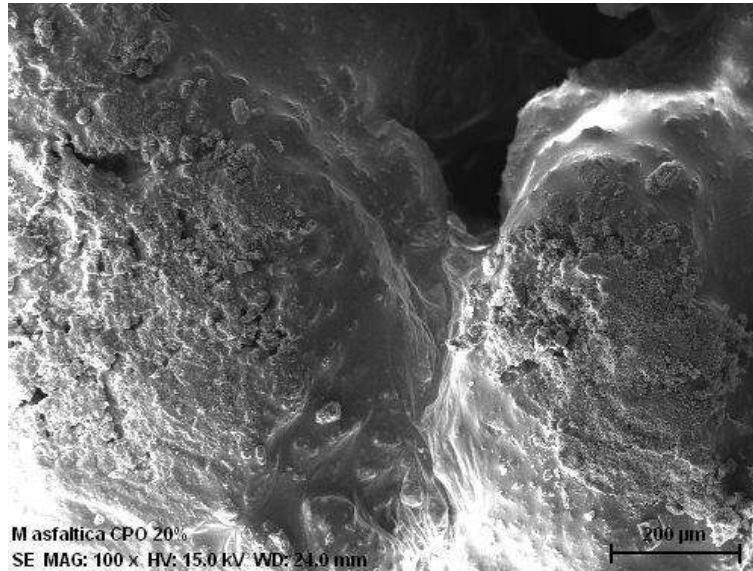
Microfotografía No.3: emulsión asfáltica modificada, analizada por MEB a 50x; fuente propia

- iv. En la microfotografía 4 se aprecia una mezcla con emulsión asfáltica estándar, se observa que se presenta una buena adherencia entre granos de agregado pétreo y la formación de una película discontinua. Esta película tiene una microestructura amorfa y no presenta formación o incrustación de cristales, por lo cual forma un material flexible.



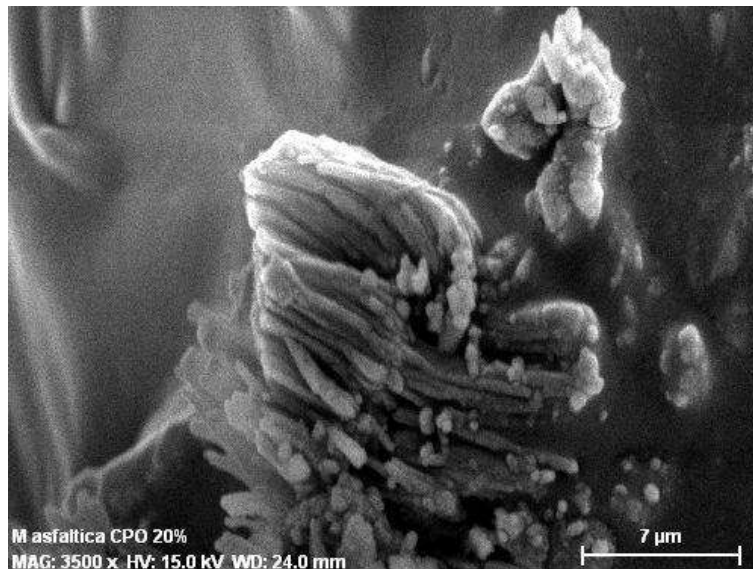
Microfotografía No.4: mezcla asfáltica estándar, analizada por MEB a 200x; fuente propia

- v. En la microfotografía 5 se puede observar la incorporación de una estructura microcristalina dentro de la matriz de asfalto proveniente de la hidratación del cemento portland, dichos cristales cambiarán el comportamiento macroestructural del asfalto debido a que existe un rompimiento de la continuidad de la película y un cambio en el módulo de elasticidad generando un incremento en la rigidez, adicionalmente se observa porosidad superficial sobre la película asfáltica.



Microfotografía No.5: mezcla asfáltica modificada, analizada por MEB a 100x; fuente propia

- vi. La Microfotografía 6 es un acercamiento de la microfotografía 5 a 3500x, en donde se aprecian los cristales típicos de etringita sub-producto de la hidratación del cemento portland, obsérvese la incrustación dentro de la matriz flexible de asfalto.



Microfotografía No.6: acercamiento de la microfotografía 51 a 3500x; fuente propia

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante todo el proceso que se llevó a cabo, de las diferentes fases del presente trabajo de investigación, es necesario y muy importante realizar un análisis detallado de los resultados obtenidos, para de esta forma obtener conclusiones y recomendaciones que puedan servir a otros investigadores que aborden el mismo tema o uno similar.

Para comenzar con el análisis de resultados, se tiene que recurrir al diseño experimental que se utilizó en el transcurso del presente trabajo, el cual nos dará la pauta a seguir de dicho análisis.

En primer lugar se realizó la selección de los elementos que conforman la mezcla asfáltica en estudio, es decir, la emulsión asfáltica y el agregado mineral, en ésta fase del trabajo se pudieron observar dos criterios para definir qué materiales emplear para elaborar la mezcla, en primer lugar analizar qué tipo de elementos existen para elaborar la mezcla y en segundo, con cuáles de los elementos que existen, contamos en nuestra región para elaborarla, esto nos dio la pauta a seguir para la selección.

Comenzando por la selección de la emulsión asfáltica, se observa que tiene una variedad inmensa de características para su selección, de las cuales se decidió definirla a través del surfactante empleado para su elaboración, es decir, emulsión catiónica, aniónica, no iónica o anfotérica; de éstos cuatro tipos de surfactantes, los más utilizados en nuestro país son aniónico y catiónico, pero para nuestro caso, el más utilizado en la región en donde se elaboró la emulsión es catiónica, por lo tanto la selección del tipo de emulsión sería catiónica. Posteriormente se observó que de las emulsiones catiónicas que existen, se encuentra un gran número de ellas, de rompimiento rápido, medio, lento y súper estables; para determinar cuál de ellas utilizar, la norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes N.CMT.4.05.003/08, indica que para mezclas para bacheo se debe usar de rompimiento medio o lento, pero en la norma N.CMT.4.05.001/06, indica que para bacheo se debe utilizar de rompimiento medio, sin embargo como no podíamos arriesgarnos a

utilizar una emulsión que no fuera la adecuada, se decidió caracterizar dos tipos de emulsión, de rompimiento rápido (que posteriormente se explica por qué) y de rompimiento medio. Para de ésta forma seleccionar el tipo de emulsión que se utilizaría en la elaboración de la mezcla.

Posteriormente la selección de los agregados pétreos se dio una vez que se seleccionó el tipo de emulsión asfáltica, es decir, como la emulsión asfáltica era catiónica debíamos seleccionar el agregado pétreo que tuviera carga negativa en su composición, de manera que en base a la norma N.CMT.4.04/08, que indica que los agregados pétreos deben ser sujetos a tratamientos de disgregación, cribado y trituración o lavado, se seleccionó el material pétreo de un banco de materiales triturados con carga eléctrica negativa, como es el sílice. Para de esta forma seleccionar el material pétreo para formar el tipo de mezcla asfáltica con las mejores características, necesarias para un buen funcionamiento en la obra.

En segundo lugar se procedió de acuerdo al diseño experimental a caracterizar los materiales seleccionados, para determinar si cumplían con lo establecido en las normas de calidad de la SCT y elaborar la mezcla asfáltica.

La caracterización que se hizo de las emulsiones asfálticas, de rompimiento rápido y rompimiento medio fue la siguiente: se realizaron las pruebas de calidad que indica la norma N.CMT.4.05.001/06, así como de las recomendaciones del protocolo de la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC). Los resultados que arrojaron las pruebas realizadas a los dos tipos de emulsiones dan como mejor emulsión a la de rompimiento medio, porque cumple con todos los parámetros que la norma exige, esto nos da una expectativa mayor de garantía en el uso de la mezcla asfáltica para proveer mejores características en la puesta en obra de la mezcla asfáltica, en comparación con la otra.

Por otro lado, de acuerdo a la norma N.CMT.4.04/08 y a las recomendaciones del protocolo de la AMAAC, la caracterización de los agregados pétreos dan como resultado al material pétreo seleccionado como apto para ser utilizado en la elaboración asfáltica, por cumplir con todos los parámetros de calidad que la norma establece.

De esta forma se tenía la certeza de usar ambos materiales para la elaboración de la mezcla asfáltica, tanto la emulsión catiónica de rompimiento medio, como del agregado pétreo del banco de materiales triturados.

En tercer lugar y una vez que se tenían los materiales para elaborar la mezcla asfáltica, se procedió a seleccionar el tipo de mezcla asfáltica a utilizar, debido a que la norma N.CMT.4.05.003/08, indica que existen varias mezclas asfálticas, a saber: en caliente de granulometría densa, abierta, discontinua tipo SMA; en frío de granulometría densa, mortero asfáltico y por el sistema de riegos, era necesario descartar las que no eran apropiadas para el trabajo en el que se pensaba emplear dicha mezcla. Para la selección de la mezcla se acudió al protocolo de la AMAAC y a la norma antes mencionada de la SCT, ya que la AMAAC trabaja únicamente con mezclas densas en caliente y la elaboración de nuestra mezcla se realizaría con emulsión asfáltica, se optó por combinar las características de ambas instituciones, es decir, se utilizó la granulometría y las características de calidad recomendadas por la AMAAC y la elaboración y uso de las normas para caracterizar los materiales de la SCT.

De ésta forma se seleccionó la mezcla asfáltica en frío de granulometría densa, y aquí cabe señalar la caracterización anterior de la emulsión asfáltica de rompimiento rápido, puesto que la mezcla se usará en la reparación de baches, la necesidad de usar emulsión de rompimiento lento no era factible, debido a la tardanza en el paso de los vehículos después de la reparación, caso contrario en la de rompimiento rápido, que el paso del tránsito vehicular es inmediato, y debido a la granulometría que tiene la mezcla asfáltica

que es de un tamaño máximo nominal de 9.5 mm (tipo sello) el uso de la emulsión de rompimiento rápido era correcto, además de que la norma de la SCT no prohíbe el uso de éste tipo de emulsión para tal mezcla.

Como se mencionó anteriormente, la mezcla tendría un tamaño máximo nominal de 9.5 mm o 3/8", elaborada con emulsión asfáltica catiónica de rompimiento medio y agregado pétreo triturado, la cual fue caracterizada con la prueba de compresión simple sin confinamiento para saber su resistencia a la carga axial, y después de dos corridas de pruebas a dicha mezcla se obtuvieron resultados que determinan que con 6.75% de asfalto, considerado como porcentaje de asfalto óptimo, la mezcla obtiene una resistencia de 37.2 kN (se denominó mezcla estándar). Posteriormente se elaboró una mezcla asfáltica similar a la anterior, pero con la diferencia de que en ésta segunda mezcla se agregaría un agente modificador de cemento portland compuesto 30-R al 5% w/w de la mezcla (denominada mezcla modificada), para ser probada bajo las mismas condiciones que la anterior y obtener resultados que definieran si el agente modificador aportaba una diferencia de resistencia entre la mezcla estándar y la mezcla modificada. Tales pruebas dieron como resultado que se obtenía con la mezcla modificada una resistencia a la carga axial de 42.7 kN, éstos resultados dan como mejor mezcla asfáltica a la modificada, aumentando su resistencia en un 15% más que la mezcla estándar.

Una vez que se obtuvieron los resultados de ambas mezclas, se procedió a realizar el análisis microestructural a través de la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB), para determinar qué es lo que influye en la mayor resistencia de la mezcla modificada respecto de la estándar, sabiendo que la mezcla es la misma, excepto por el agente modificador que se le adicionó en la segunda mezcla, así como las condiciones de prueba son exactamente iguales para ambas mezclas, realizando en ambos casos dos corridas para estar seguros de no cometer un error a la hora de aplicar la prueba. Qué es lo que estaba pasando en la microestructura de la mezcla modificada, para aumentar su resistencia a la carga axial.

Para el análisis de microscopía electrónica de barrido, fue necesario primeramente, metalizar las muestras a base de cobre durante 50 min al vacío, debido a que dichas muestras no son conductoras eléctricas, por su composición orgánica, en el caso de la emulsión, e inorgánica, en el caso del agregado pétreo, esto para poder observar la morfología y microestructura de cada elemento que conforma la mezcla asfáltica.

Una vez que se tenían las muestras metalizadas, se procedió al análisis por la técnica de MEB, de la cual se obtuvieron cerca de 50 imágenes aproximadamente en diferentes ángulos y acercamientos para cada muestra, lo que arrojó como resultado que se observara en cada una de las muestras lo siguiente:

En el primer análisis, que fue de la emulsión estándar, se aprecia su formación amorfa típica de su composición, además se observa una unión débil entre las fronteras de los clusters de la misma, es decir, aquí se empieza a comprender el porqué de la menor resistencia de la mezcla asfáltica estándar, debido a que existe una cohesión débil del agente ligante.

Para el siguiente análisis, que se realizó al agregado pétreo triturado, se observa su característica angular con superficie rugosa y oquedades diversas, sin embargo al analizar el mismo agregado mineral envuelto con el agente modificador, se aprecia una superficie con menos oquedades y más homogéneo, manteniendo su angularidad propia de su naturaleza. Con éste análisis se observa que el agente modificador proporciona homogeneidad en su superficie, proporcionándole mayor densidad al mismo.

En el análisis de la mezcla asfáltica estándar, se aprecia que se presenta una buena adherencia entre los granos del agregado pétreo y la formación de una película discontinua, ésta película tiene una microestructura amorfa y no presenta formación o incrustación de

crisales, por lo cual forma un material flexible. Del análisis de la mezcla asfáltica estándar se puede observar que a pesar de la buena adherencia que existe entre el agregado pétreo y la emulsión asfáltica, no es suficiente porque presenta discontinuidades en la superficie de la película de asfalto, lo que puede ocasionar un desprendimiento del mismo ocasionando fallas en la estructura de la mezcla.

Finalmente se analizó la mezcla asfáltica modificada, en la cual se aprecia la incorporación de una estructura microcristalina de etringita dentro de la matriz de asfalto, subproducto proveniente de la hidratación del cemento portland, dichos cristales cambiarán el comportamiento macroestructural del asfalto debido a que existe un rompimiento de la continuidad de la película y un cambio en el módulo de elasticidad generando un incremento en la rigidez de éste. Éstos cristales que permanecen inactivos en el cemento portland, el cual envuelve al agregado pétreo, al mezclarse con la emulsión asfáltica la cual contiene un porcentaje de agua, produce que el cemento portland se active y produzcan una reacción química dentro de la matriz de la mezcla asfáltica, produciendo éstos cristales de etringita, los cuales interrumpen la película de asfalto, ocasionando con ello un mayor agarre y una mayor adherencia entre el asfalto y el agregado pétreo, lo cual resulta en una mayor resistencia a la carga axial a la que fue sometida la mezcla, porque permite distribuir la carga de manera más homogénea en toda la matriz de asfalto y agregado pétreo que se forma.

Debido a éste análisis que se realizó una vez hecha la microscopía electrónica de barrido, se concluye que las propiedades que le ofrece el agente modificador a la mezcla asfáltica a nivel microestructural son muy buenas, aumentando con ello la resistencia a la carga axial en 15% más que la mezcla estándar, es decir, las propiedades microestructurales afectan positivamente las propiedades macroestructurales de la mezcla asfáltica para bacheo.

Prosiguiendo con el análisis de los resultados, ahora que ya se sabe que la mezcla asfáltica modificada resultó con mejores características que la mezcla asfáltica estándar, se tendrá que analizar cuál es la técnica de bacheo que más conviene para llevar a cabo dicha reparación.

De las dos opciones que se presentaron anteriormente, la técnica de vaciar y compactar, que presenta tanto el H. Ayuntamiento de Morelia, como la empresa licitadora ante la SCT, y la técnica propuesta en el presente trabajo, bacheo de inyección por esparado, se realizaron dos análisis, el económico y el técnico, se estimó un costo por metro cúbico de bacheo, para tener un parámetro financiero que determine económicamente cual técnica resulta ser más adecuada, además se analizaron las ventajas y desventajas técnicas propias de cada caso, y la técnica propuesta en éste trabajo resulto ser la más viable técnica y económicamente hablando, es decir, ofrece un costo-beneficio que es más rentable para realizar la reparación de los baches.

Es por eso que la técnica que se presenta en éste trabajo de investigación se recomienda para ser utilizada en la reparación de baches, utilizando la mezcla asfáltica modificada aprobada con anterioridad, en el mismo trabajo de investigación.

Finalizando con el análisis de los resultados, se resume que la mezcla asfáltica elaborado en frío para bacheo y modificada con cemento portland, es la más adecuada en éste caso, para realizar las reparaciones de bacheo, utilizando la técnica de inyección por esparado, la cual es mucho mejor técnica y económicamente, que la presentada por el Municipio de Morelia y la empresa que licita obras de bacheo en la SCT.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con éste capítulo se llega a la conclusión del presente trabajo de investigación, después de haber recorrido un panorama general de las carreteras en México, las diferentes mezclas asfálticas que existen, asfaltos modificados y más específicamente de las emulsiones asfálticas, dado el tema propuesto para el proyecto de tesis, las cuales se ha visto, son muy importantes para el futuro de las mezclas asfálticas en el mundo, debido al cambio climático que está sufriendo el planeta, ocasionando con ello que se utilicen nuevas técnicas amigables con el ambiente, y las emulsiones asfálticas lo son en gran medida.

Es por eso que a continuación se mencionan las conclusiones a las que se llegó, después de haber realizado el trabajo de laboratorio y gabinete de éste proyecto, reconociendo que hace falta mucha más investigación en el tema.

I. CONCLUSIONES

- I. La elaboración que se realizó de la mezcla asfáltica modificada, es producto de la combinación de las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) las cuales se basan en las normas de la American Society of Testing Materials (ASTM) y de las recomendaciones del protocolo de la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC). Esto nos lleva a concluir que es bueno combinar normativas de diversas instituciones calificadas en el área, para compensar diferencias que presente una respecto de la otra y obtener lo mejor de todas.
- II. Para la caracterización de los materiales, al igual que para seleccionar la elaboración de la mezcla asfáltica, se usó la combinación de las normas de la SCT y recomendaciones de la AMAAC.
- III. Una parte fundamental que resultó del proyecto de tesis, es el análisis a través de la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB), porque debido a ella se pudo observar el comportamiento del agente modificador en la interacción de los

materiales que constituyen la matriz asfáltica, la cual sirvió para definir el comportamiento de las características macroestructurales de la mezcla.

- IV. Una vez realizada la caracterización de los materiales, se observó que la mezcla que se debe usar para la reparación de baches, es la mezcla asfáltica modificada con cemento portland 30-R al 5% w/w, debido a que se obtiene un aumento en la resistencia a la carga axial del 15% respecto de la mezcla asfáltica estándar.
- V. La técnica que se debe usar para realizar la reparación de baches, de acuerdo al análisis costo-beneficio de las técnicas presentadas, fue la de bacheo a través de inyección por esparado, la cual es técnicamente más eficiente y económicamente más rentable, resultando ser 16% más económica que la técnica que realiza el H. Ayuntamiento de Morelia.

En el siguiente listado, se sugieren algunas recomendaciones para mejorar el trabajo de investigación realizado, no sin antes aclarar, que éstas no se pudieron llevar a cabo por falta de tiempo.

II. RECOMENDACIONES

- I. Es necesario continuar con el trabajo de investigación, para ahondar aún más en el tema, debido a que éste es muy extenso, el cual requiere de mayor profundidad en el conocimiento, mismo que proporcionará soluciones más eficientes y sustentables.
- II. Se recomienda el uso del mayor número posible de normas, reglamentos, recomendaciones y procedimientos, tanto de adquisición y caracterización de materiales, elaboración de mezclas y ejecución de ellas, de instituciones gubernamentales, académicas, científicas y civiles, calificadas en el área, que proporcionen dicha información.
- III. Es importante llevar a cabo un análisis más profundo de la mezcla asfáltica modificada, a través de más técnicas microscópicas, como la de Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM, por sus siglas en inglés), Espectroscopía de

Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés), Microscopía Óptica (OM, por sus siglas en inglés) y Difracción de Rayos X (DRX). Debido a que éstas técnicas de microscopía, ofrecen una mayor gama de resultados de la interacción microestructural de los elementos que conforman la matriz asfáltica.

- IV. Se recomiendan realizar más pruebas a la mezcla asfáltica modificada, para garantizar que la misma cumple con las condiciones ideales para ser puesta en obra, así como realizar tramos de prueba, en lugares en donde se localicen baches de diversos tamaños y profundidades.
- V. Es importante optimizar el uso de técnicas para bacheo como la que se propone en éste proyecto de tesis, o alguna otra que sea técnica, económica y sustentablemente mejor que la técnica tradicional.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y DIGITALES

1. Rogelio Rodríguez Talavera, Víctor Manuel Castaño Meneses y Miguel Martínez Madrid, *Emulsiones Asfálticas*, IMT - Documento Técnico No. 23, Sanfandila Queretaro, ISSN 0188-7114, 2001.
2. Jean Claude Roffé et al, *Routes de France section SFERB*, 10 rue Washington, 75008 París, ISBN 2-913414-48-6, pp 20-185, 2006.
3. Jaleydi Cárdenas y Elsa Fonseca, *Modelación del Comportamiento Reológico de Asfalto Convencional y Modificado con Polímero Reciclado, Estudiada Desde la Relación Viscosidad-temperatura*, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia), Revista EIA, ISSN 1794-1237 número 12, pp 125-137, 2009.
4. A. Padmarekha and J. Murali Krishnan, *Experimental Investigation on Sol-Gel Transition of Asphalt*, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras Chennai, India, pp 131-139, 2011, DOI 10.1007/s12572-0110048-5.
5. Mónica Jiménez Acuña et al, *Mezclas Asfálticas en Frío en Costa Rica, Conceptos, Ensayos y Especificaciones*, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Infraestructura Vial No. 21, 2009.
6. Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC), PA-MA 01/2008, *Diseño de Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa de Alto Desempeño*, pp 2-15, 2008.
7. Zhenjun Wang and Aimin Sha, *Micro Hardness of Interface Between Cement Asphalt Emulsion Mastics and Aggregates*, School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xiao Zhai Campus, pp 453-461, 2009. DOI 10.1617/s11527-009-9502-2.
8. Youngguk Seo and Y. Richard Kim, *Using Acoustic Emission to Monitor Fatigue Damage and Healing in Asphalt Concrete*, KSCE Journal of Civil Engineering, pp 237-243, 2008, DOI 10.1007/s12205-008-0237-3.
9. Rashid K. Abu Al-Rub, Taesun You, Eyad A. Masad and Dallas N. Little, *Mesomechanical Modeling of the Thermo-Viscoelastic, Thermo-Viscoplastic, and Thermo-Viscodamage Response of Asphalt Concrete*, Indian Institute of Technology Madras, pp 14-33 2011, DOI 10.1007/s12572-011-0028-9.
10. L.D. Poulidakos and M.N. Partl, *Micro Scale Tensile Behaviour of Thin Bitumen Films*, Society for Experimental Mechanics, pp 1171-1183 2011, DOI 10.1007/s11340-010-9434-3.
11. Zhanping You, Sanjeev Adhikari and M Emin Kutay, *Dynamic Modulus Simulation of the Asphalt Concrete Using the X-Ray Computed Tomography Images*, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University, Houghton, MI, USA, pp 617-630 2008, DOI 10.1617/s1527-008-9408-4.

12. Ryan P. Rodgers and Alan G. Marshall, *Petroleomics: Advanced Characterization of Petroleum-Derived Materials by Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry*, National High Magnetic Field Laboratory at Florida State University, Department of Chemical and Biochemistry, pp 63-93.
13. Yang Sheng-feng, Yang Xin-hua and Chen Chuan-yao, *Simulation of Rheological Behavior of Asphalt Mixture with Lattice Model*, School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China, pp 155-157 2008, DOI 10.1007/s11771-008-336-9.
14. Christophe Block, Nick Watzeels, Hubert Rahier, Bruno Van Mele and Guy Van Assche, *Rheology of Nanocomposites*, Modelling and Interpretation of nanofiller influence, Department of Physical Chemistry and Polymer Science (FYSC), Vrije Universiteit Brussel (VUB), Pleinlaan 2, pp 731-736 2011, DOI 10.1007/s10973-011-1417-9.
15. Sergio Alonso, Luis Medina-Torres, Roberto Zitzumbo y Felipe Avalos, *Rheology of Asphalt and Styrene-Butadiene Blends*, Materials Research Department, CIATEC A:C: Omega 201, Chemistry Faculty, UNAM, E. Building, D.F. México, pp 2591-2597 2010, DOI 10.1007/s10853-010-4230-0.
16. Robert Karlsson, Ulf Isacsson and Jonas Ekblad, *Rheological Characterization of Bitumen Diffusion*, Division of Highway Engineering, Royal Institute of Technology, SE-100 Stockholm, Sweden, pp 101-108 2006, DOI 10.1007/s10853-006-1047-y.
17. Liu Cong-hui, Wu Shao-pen, Liu Quan-tao and Zhu Guo-jun, *Rheological Characteristics of Aged Asphalt Binder*, Key Laboratory of Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China, pp 298-301 2008, DOI 10.1007/s11771-008-367-2.
18. S.P. Wu, G.J Zhu, G. Liu and L. Pang, *Laboratory Research on Thermal Behavior and Characterization of the Ultraviolet Aged Asphalt Binder*, Key Laboratory of Silicate Materials Science and Engineering of the Ministry of Education, Wuhan University of Technology Wuhan, Hubei 430070, China, pp 595-599 2009, DOI 10.1007/s10973-008-9252-3.
19. S.P. Wu, G.J Zhu, Cheng NZheng and Liu Zhi-fei, *Laboratory Research on Rheological Behavior and Characterization of Ultraviolet Aged Asphalt*, Key Laboratory of Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China, pp 369-373 2008, DOI 10.1007/s11771-008-382-3.
20. R. Gubler, M.N. Partl, F. Canestrari and A. Grilli, *Influence of Water and Temperature on Mechanical Properties of Selected Pavements*, Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Testinf and Research, Laboratories for Road Engineering / Sealing Components, Überlandstrsse 129, CH-8600 Dübendorf, Switzerland, pp 523-532 2005, DOI 10.1617/14317.

21. Hilde Soenen, Joelle De Visscher, Ann Vanelstraete and Per Redelius, *Influence of Thermal History on Rheological Properties of Various Bitumen*, Nynas Belgium A.B. Noorderlaan 183, 2030 Antwerp, Belgium, pp 729-739 2006, DOI 10.1007/s00397-005-0032-8.
22. V.S. Punith, Feipeng Xiao, Bradley Putman, Serji N. and Amirkhanian, *Effects of Long Term Aging on Moisture Sensitivity of Foamed WMA Mixtures Containing Aggregates*, Department of Civil Engineering, Clemson University, Clemson, SC 29634-0911, USA, pp 251-264 2012, DOI 10.1617/s11527-011-9763-4.
23. Tao Ma, Xiao-ming Huang, Enad Mahmoud and Emil Garibaldy, *Effect of Moisture on the Aging Behavior of Asphalt Binder*, School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China, pp 460-466 2011, DOI 10.1007/s12613-011-0463-4.
24. Liang Yongsheng, Feng Zhengang and Yu Jianying, *Effect of Chemical Compositions on Temperature Susceptibility of Bitumens*, Key Laboratory of Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China, pp 669-673 2010, DOI 10.1007/s11595-040-0067-2.
25. Mouhamad Mouazen, Arnaud Poulesquen and Bruno Verbnes, *Correlation Between Thermal and Rheological Studies to Characterization the behavior of Bitumen*, CEA Macouleville, Direction de l'Énergie Nucléaire, DTCD/SPDE/L2ED, BP 17171, pp 169-178 2011, DOI 10.1007/s00397-011-0534-5.
26. Michelle G. Mothé, Leni F.M. Leite and Cheila G. Mothé, *Thermal Characterization of Asphalt Mixtures by TG/DTG, DTA and FTIR*, Department of Organic, School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, 21949900, Brazil, pp 105-109 2008, DOI 10.1007/s10973-007-8807-z.
27. Johan Sjöblom, Pal V. Hemmingsen and Harald Kallevik, *The Role of Asphaltenes in Stabilizing Water-in-Crude Oil Emulsions*, Ugelstad Laboratory, Department of Chemical Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, pp 549-587.
28. Atul Sharma and Oliver C. Mullins, *Insights into Molecular and Aggregate Structures of Asphaltenes Using HRTEM*, Advanced Fuel Group, Energy Technology Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 16-1 Onogwa, Tsukuba 305-8569, Japan, pp 205-229.
29. G.P. Kayukova, A.M. Kiyamova and G.V. Romanov, *Hydrothermal Transformations of Asphaltenes*, Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry, Kazan Research Center, Russian Academy of Sciences, ul. Akademika Arbuzova 8, Kazan, 420083 Tatarstan, Russia, pp 7-16 2012, ISSN 0965-5441, DOI 10.1134/S0965544111060089.
30. Seref Oruc, Fazil Celik and M. Vefa Akpinar, *Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures*, Civil Engineering Department, Karadeniz Technical University, 61080 Trabzon, Turkey, pp 578-583 2007, DOI 10.1007/s11665-007-9095-2.

31. A. Jäger, R. Lakner, Ch. Eisenmenger-Sittner and R. Blab, *Identification of Four Material Phases in Bitumen by Atomic Force Microscopy*, Road Materials and Pavement Desing, EATA, pp 9-24 2004.
32. Michael W. Davidson and Mortimer Abramowitz, *Optical Microscopy*, National High Magnetic Field Laboratory, the Florida State University, 1800 E. Paul Tallahassee, Florida 32306, pp 1-41.
33. R.E. Rowland and E.M. Nickless, *Confocal Microscopy Opens the Door to 3-Dimensional Analysis of Cells*, Institute of Molecular Bio Sciences Massey University P. Bag 11-222 Palmerston North New Zealand, pp 3-7 2000.
34. Masson J-F, Leblond V. and Margerson J, *Bitumen Morphologies by Phase-detection Atomic Force Microscopy*, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada Ottawa, Ontario, Canada, KIA 0R6, pp 1-32 2006, DOI 10.1111/j.1365-2818.2006.01540.x.
35. Western Research Institute, Innova Engineering, LLC, PLX, Inc. SimWright, *Asphalt Surface Aging Prediction (ASAP) System*, Research and Innovation Technology Administration, pp 1-124 2010, Contract DTOS59-07-H-0006.
36. Transportation Research, Circular Number E-C102, *Asphalt Emulsion Technology*, Transportation Research Board of the National Academies, pp 1-52 2006, ISSN 0097-8515.
37. K. Miskovsky, M.Taborda Duarte, S.Q Kou and P.A. Lindqvist, *Influence of the Mineralogical Composition and Textural Properties on the Quality of Coarse Aggregates*, Department of Civil and Mining Engineering Lulcä University of Technology SE-97187, Lulcä, Sweden, pp 144-150, 2004, DOI 10.1361/10599490418334.
38. S.N. Suresha, Varghese George, A.U. Ravi Shankar, *Effect of Aggregate Gradations on Properties of Porous Friction Course Mixes*, Department of Civil Engineering National Institute of Technology Karnataka, Mangalore 575025, India, pp 789-801 2010, DOI 10.1617/s11527-009-9548-1.
39. Horacio Delgado Alamilla, Paul Garnica Anguas, Gilber Mario Villatoro Mendez, Giovanni Rodríguez Oropeza, *Influencia de la Granulometría en las Propiedades Volumétricas de la Mezcla Asfáltica*, Publicación Técnica No. 299, Sanfandila Querétaro Instituto Mexicano del Transporte (IMT), pp 1-98 2006, ISSN 0188-7297.
40. Mehmet Dogan and Erdal Bayraml, *Effect of Polymer Additives on the Physical Properties of Bitumen Based Composites*, A Thesis Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, pp 1-59 2006.

41. Salager Jean-Louis, Forglarini Ana, Márquez Laura, Tolosa Laura y Vejar Francia, *Microemulsiones para la Recuperación Mejorada de Crudo y la Limpieza de Pozos*, Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Química, Lab. FIRP, Mérida Venezuela, pp 79-92 2009, ISSN1316-7081.
42. Alberto Robledo y Gerardo Ruiz, *Emulsiones: Estructura y Aplicaciones*, Instituto de Física de la Universidad Autónoma de México, Facultad de Ciencias, México D.F., pp 18-21 1990.
43. I. Aranberri, B.P. Binks, J.H. Clint y P.D.I. Fletcher, *Emulsiones Estabilizados por Nanopartículas para Formulaciones de Productos Agroquímicos*, Surfactant & Colloid Group, the University of Hull, Hull, HU67RX, Reino Unido, pp 40-53 2009.
44. Charles P. Poole Jr y Frank J. Owens, *Introduction to Nanotechnology*, Editorial Reverté S. A. Loreto 13-15 local B 08029, Barcelona España, pp 51-56 2007, ISBN 978-84-291-7971-2.
45. J.C. Múnera, M. Álvarez-Láinez y E.A. Ossa, *Análisis Micro y Nano Estructural de Asfaltos Colombianos*, Grupo de Investigación en Materiales de Ingeniería, Escuela de Ingeniería, Universidad EAFIT Cra 49 No. 7 Sur 50, Medellín Colombia, pp 1-9 2010.
46. Araceli Adabache Ortíz, Marcelo Silva Briano y Ricardo Galván de la Rosa, *El Microscopio Electrónico de Barrido un Instrumento Útil para la Ciencia*, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias Básicas, Departamento de Biología, Laboratorio de Microscopio Electrónico de Barrido, Edificio 202, Avenida Universidad 940, Ciudad Universitaria, Aguascalientes México, pp 1-4.
47. Jorge Alarcón Ibarra, Julio Alejandro Chávez Cárdenas, Carlos Chávez Negrete y Limbert Ramón Cortés Bautista, *Estudio de la Afinidad de un Agregado Basáltico Triturado Utilizando Asfaltos Convencionales y Aditivos Promotores de Adherencia*, Infraestructura Vial No. 18 agosto, pp 39-43, 2007.
48. Isacson Ulf and Lu Xiaohu, *Properties of Bitumens Modified With Elastomers and Plastomers*, Royal Institute of Technology, Division of Highway Engineering SE – 100 44 Stockholm, Sweden, pp 342-349 2000.
49. Motoyuki Sugano, Yuusuke Iwabuchi, Tohru Watanabe, Jun Kajita, Shigeo Iwai and Katsumi Hirano, *Thermal Degradation Mechanism of Polimer Modified Asphalt*, Department of Materials and Applied Chemistry, Nihon University 1-5 Kanda Surugadai Chiyoda-Ku, Tokyo 101-0062, Japan, pp 1-6 2009, ISBN 978-88-95608-04-4, ISSN 1974-9791, DOI 10.3303/CET0918137.
50. F. Pérez Jiménez, R. Miró Recasens, A. Martínez, C. Martínez Láinez y A. Páez Dueñas, *Cohesion in Crumb Rubber Modified Bitumen*, Laboratorio de Caminos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona España, pp 43-54 2006, ISSN 0465-2746.

51. José Luis Peña Ruiz, *Reciclado "In Situ" en Frío con Emulsión, Panorámica de la Técnica*, Probisa Tecnología y Construcción S.A., Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB), pp 1-16.
52. Pedro Ferré, *Las Emulsiones de Betún su Química- Física*, Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB), pp 1-22.
53. Miguel Ángel del Val Melus, *Pliego de Grava-Emulsión*, Elaborado por la Asociación de Emulsiones Bituminosas (ATEB), Universidad Politécnica de Barcelona, España, pp 1-21.
54. Eyad Masad, Simulation, *Imaging and Mechanics of Asphalt Pavements*, Department of Civil Engineering and Texas Transportation Institute Texas A & M University College Station, TX 77843, pp 1-103 2005, FHWA DTF61-03-X-00026.
55. Alejandro Padilla Rodríguez, *Mezclas Asfálticas, Capítulo 3*, Universidad Politécnica de Cataluña, pp 39-64.
56. Ali Akbar Yousefi, *Polimer-Modified Bitumen from the Wastes of Petrochemical Plants*, Institute for Colorants, Paint and Coatings, Theran Iran, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Theran Iran, pp 207-215 2009.
57. Koichi Takamura, *Improved Fatigue Resistance of Asphalt Emulsion Residue Modified with SBR Latex*, BASF Corporation, Charlotte Technical Center, 11501 Steele Creek Road Charlotte NC 28273 USA, pp 1-15 2003.
58. N. Castaño, P. Ferré, F. Fossas and A. Puñet, *A Real Heat Stable Bitumen Antistripping Agent*, Kao Corporation S.A., pp 12-16 2004, ISBN 1-920-01718-6.
59. Tienfuan Kerh, Yu-Min Wang and Yulern Lin, *Experimental Evaluation of Anti-stripping Additives Mixing in Road Surface Pavement Materials*, Department of Civil Engineering, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung 91207 Taiwan, pp 1427-1433 2005, ISSN 1546-9239.
60. Juan M. Orozco y Orozco y Roberto D. Hernández Islas, *Indicadores de Mantenimiento de los Pavimentos para Carreteras Mexicanas*, Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), pp 1-6 2008.
61. <http://www.sct.org.mx>
62. <http://www.imt.org.mx>
63. <http://www.amaac.org.mx>
64. <http://www.amivtac.org.mx>

65. <http://www.umich.mx>
66. <http://www.unam.mx>
67. <http://www.astm.com>
68. <http://www.aashto.com>
69. <http://www.semmaterials.com.mx>
70. <http://www.gruposurfax.com.mx>
71. <http://www.quimikao.com.mx>
72. <http://www.basf.com.mx>
73. <http://www.dynasolelastomers.com>
74. <http://www.jetpatcher.com.mx>
75. <http://www.ammex.com.mx>
76. <http://www.repsol.com>
77. <http://www.pemex.org.mx>
78. <http://www.dupont.com.mx>
79. <http://www.gmarca.com>
80. <http://www.monografias.com/trabajos14/tensoactivos/tensoactivos.shtml>