



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE

Actualización y Mejoramiento de la Normativa Chilena para Tecnologías en Frío que utilicen Emulsiones Modificadas con Polímeros

Francisco Javier Araya Zúñiga

**Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil**

**Profesor Guía
Carlos Wahr**

octubre de 2016



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE

Actualización y Mejoramiento de la Normativa Chilena para Tecnologías en Frío que utilicen Emulsiones Modificadas con Polímeros

Memoria de Titulación presentada por
Francisco Javier Araya Zúñiga

Como requisito parcial para optar al Título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Carlos Wahr

octubre de 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Rosa María y Horacio, y a mi hermano Rodrigo, por entregarme todo el cariño y la contención que necesité durante los momentos más difíciles de la etapa universitaria.

A mi señora Catalina y su familia, además de mi grupo de amigos más cercanos, por toda la paciencia, ánimo y apoyo que me dieron durante el proceso de elaboración de esta memoria.

También aprecio y agradezco de gran manera el tiempo, la disposición y toda la ayuda que me entregaron los profesores Carlos Wahr y Darío Cabrera, para poder cerrar mi ciclo universitario con la realización de esta memoria.

RESUMEN

En esta memoria se presenta una revisión bibliográfica actualizada acerca de las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros. Se investiga acerca de su definición, componentes, clasificación, usos, fabricación y normativas utilizadas para caracterizarlas. Esto fue realizado con la finalidad de poder comparar el escenario que presentan hoy las emulsiones desarrolladas en Chile, con lo que se realiza en otros países.

Como ejemplo a seguir se tomaron las normativas EN, desarrolladas en Europa y en particular las UNE-EN Españolas, ya que dicho país es uno de los mayores productores de emulsiones asfálticas en el mundo y nuestro principal referente para homologar las normativas locales.

Se realiza un estudio de la evolución que han tenido las normativas española y chilena para emulsiones asfálticas, preferentemente modificadas con polímeros, identificando los cambios más significativos que ha tenido cada una de ellas. Luego, se hace una comparación entre la última versión actualizada de la normativa UNE EN 13808 (año 2013), que se encuentra dentro del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales españolas PG-3 (2015) y que entrega las especificaciones para las emulsiones asfálticas modificadas y convencionales, con la última versión indicada para estas tecnologías en la normativa nacional (Manual de Carreteras, 2015). La comparación es realizada para establecer la factibilidad de actualizar nuestras especificaciones en relación a los estándares europeos.

Al mismo tiempo se realiza una investigación acerca de los principales ensayos de las emulsiones modificadas con polímeros, los cuales son necesarios para elaborar los microaglomerados asfálticos en frío (MAF), tecnología empleada en la última década en nuestro país como tratamiento superficial en la conservación de carreteras, fundamentalmente concesionadas.

Se incluye también un capítulo que trata acerca del riego de liga, usando emulsiones modificadas con polímeros, al emplearse como capa de adherencia en la aplicación de microaglomerado asfáltico en frío (MAF) o en la colocación de mezclas asfálticas en caliente, tanto como capas intermedias o de rodadura. Para esto, se analizan las distintas recomendaciones en la aplicación del riego de liga, de acuerdo a los manuales: Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA, Estados Unidos), International Slurry Surfacing Association (ISSA, Estados Unidos), Pliego de Prescripciones Técnicas (PG-3, España) y Manual de Carreteras (Chile).

ABSTRACT

This thesis presents a bibliographic revision about polymer modified asphalt emulsions. The investigation includes its definition, components, classification, uses, fabrication and the normative used to manufacture. This was done with the aim of compare the state of art of emulsions development today in Chile, with what is done in another countries.

This work take as a role model the European normative UNE-EN, developed in Spain. This is because Spain is one of the biggest producers of emulsions in the world and is our reference to equalize local regulations.

In this work a study of the evolution about the European and Chilean normative is done, respect to specifications of asphalt emulsions, specially the modified with polymers, remarking the most significative changes that have each normative. Later, a comparison is done between the last versions of the normative UNE-EN 13808 (2013) in the spanish document "Pliego de Prescripciones" (PG – 3)with the local normative. The aim of this is establish the factibility to update our normative with the European standards.

Furthermore, a research is done about the principal essays which apply to the polymer modified asphalt emulsions, necessary to elaborate microsurfacing. This technology corresponds to a superficial treatment used with a lot of success to preserve the pavement.

A chapter about tack coat using modified asphalt emulsions is included in this work, when this technology is applied as a bonding layer, prior to the application of microsurfacing. To do this, different recommendations were analyzed, according to the next manuals: Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA, United States), International Slurrying Surfacing Association (ISSA, United States), Pliego de Prescripciones Técnicas (PG-3, Spain) y Manual de Carreteras (Chile).

Índice de Contenido

1.	Introducción	10
1.1.-	Antecedentes Generales	10
1.2.-	Objetivos	10
1.3.-	Alcances	10
1.4.-	Estructura de la Memoria	11
2.-	Emulsiones Asfálticas Modificadas	12
2.1.-	Definición	12
2.2.-	Componentes	12
2.2.1.-	Asfalto	12
2.2.2.-	Agua	12
2.2.3.-	Agente Emulsificador	13
2.2.4.-	Polímeros	14
a)	Látex de Caucho Natural (NRL)	15
b)	Látex de Caucho Estireno-Butadieno-Rubber (SBR)	15
c)	Látex de Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)	15
d)	Etileno Vinil Acetato (EVA)	16
2.3.-	Tipos de Emulsiones Modificadas	17
2.3.1.-	Emulsiones Monofásicas	17
2.3.2.-	Emulsiones Bifásicas	17
2.4.-	Clasificación de las Emulsiones	18
2.4.1.-	Según Carga Eléctrica	18
2.4.2.-	Según Velocidad de Rotura o Quiebre	18
2.5.-	Usos y Beneficios	19
2.5.1.-	Usos	19
2.5.2.-	Beneficios	24
3.-	Fabricación de Emulsiones Asfálticas Modificadas	25
3.1.-	Plantas de Producción	25
3.2.-	Molino Coloidal y el Tamaño de las Partículas	27
3.3.-	Emulsiones Modificadas Monofásicas	30
3.4.-	Emulsiones Modificadas Bifásicas	31
3.5.-	Concentración de Polímeros	32
4.-	Normativa	34
4.1.-	Normativa Española	34
4.1.1.-	Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)	34

4.2.- Normativa Nacional	45
4.2.1.- Manual de Carreteras: Tratamientos Superficiales	45
4.2.2.- Manual de Carreteras: Microaglomerados Asfálticos en Frío (MAF).	47
4.3.- Obtención del residuo asfáltico de las emulsiones modificadas	49
4.4.- Recomendaciones a la Normativa Chilena para las especificaciones de Emulsiones Asfálticas Modificadas con Polímeros	55
4.4.1.- Diferencias entre Normativa Europea y Normativa Chilena	55
4.4.2.- Recomendaciones para la Normativa Chilena	57
5.- Microaglomerados Asfálticos en Frío (MAF)	61
5.1.- Ensayos Principales	61
5.1.1.- Determinación del Porcentaje Óptimo de Betún	61
5.1.2.- Consistencia de la Mezcla	65
5.2.- Desprendimiento de Partículas	66
6.- Proceso Constructivo de MAF	71
6.1.- Aplicación del Riego de Liga: Análisis de Normativas	71
6.1.1.- Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA, USA)	71
6.1.2.- International Slurry Surfacing Association (ISSA, USA).....	71
6.1.3.- Pliego de Prescripciones Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3, España)	71
6.1.4.- Manual de Carreteras	72
6.1.5.- Recomendaciones para aplicar el riego de liga.....	73
6.2.- Scrub Seal	75
7.- Conclusiones	78
8.- Referencias.....	80
9.- Anexo A: Norma UNE – EN 13074-1	83
10.- Anexo B: Norma UNE – EN 13074-2	86
11.- Anexo C: Modelación del Efecto del Riego de Liga en el Comportamiento Estructural del Pavimento.....	89
12.- Anexo D: Cotizaciones de Equipos	97
13.- Anexo E: Normas Actualizadas	98

Índice de Tablas

Tabla 3-1: Polímeros modificadores mayormente utilizados, sus métodos de mezcla, dosis recomendadas y aplicaciones.	32
Tabla 4-1: Especificaciones para Emulsiones Modificadas con Polímeros. Art 216.	35
Tabla 4-2: Principales Aplicaciones de Emulsiones.....	36
Tabla 4-3: Especificaciones de las Emulsiones Asfálticas Catiónicas Modificadas, Art. 214 PG-3. 39	
Tabla 4-4: Especificaciones Asfalto Residual, Art. 214 PG-3.....	39
Tabla 4-5: Denominación y aplicación para emulsiones modificadas. Artículo 214.	40
Tabla 4-6: Emulsiones Asfálticas Modificadas con Elastómero, vol. 5 Manual de Carreteras 1997. Sellos Bituminosos.	46
Tabla 4-7: Requerimientos para Emulsiones Asfálticas Modificadas con Polímeros, vol. 5 Manual de Carreteras 2015. Sellos Bituminosos.....	46
Tabla 4-8: Requisitos para Emulsiones de Quiebre Controlado Modificadas con Polímeros, Vol. 5 Manual de Carreteras 2003.....	47
Tabla 4-9: Requisitos para Emulsiones de Quiebre Controlado Modificadas con Polímeros, Vol. 5 Manual de Carreteras 2005.....	47
Tabla 4-10: Requisitos para Emulsiones de Quiebre Controlado Modificadas con Polímeros, Vol. 5 Manual de Carreteras 2015.....	48
Tabla 4-10: Resultados del empleo del equipo DSR en el residuo asfáltico de emulsiones tradicionales, obtenido con las normas de Destilación ASTM D6997 y Evaporación ASTM D7497.53	
Tabla 4-11: Resultados del empleo del equipo DSR en el residuo asfáltico de emulsiones modificadas, obtenido con las normas de Destilación ASTM D6997 y Evaporación ASTM D7497. 53	
Tabla 4-12: Resultados del empleo del equipo DSR en el residuo asfáltico de la emulsión tradicional y modificada con asfalto PG58-28, obtenido con las normas de Evaporación ASTM D7497.	54
Tabla 5-1: Variables que causan Desprendimiento de Pavimento.....	67
Tabla 6-1: Aplicación de Riego de Liga.	72
Tabla 10-1: Tabla comparativa de deformaciones para cada nivel de desprendimiento. Caso 1....	92
Tabla 10-2: Relación entre Número de Ciclos de Fatiga. Caso 1.....	93
Tabla 10-3: Tabla comparativa de deformaciones para cada nivel de desprendimiento. Caso 2.1. 93	
Tabla 10-4: Relación entre Número de Ciclos de Fatiga. Caso 2.1.....	94
Tabla 10-5: Tabla comparativa de deformaciones para cada nivel de desprendimiento. Caso 2.2. 95	
Tabla 10-6: Relación entre Número de Ciclos de Fatiga. Caso 2.2.....	96

Índice de Figuras

Figura 2-1: Esquema Agente Emulsificador, Ref [4].	13
Figura 2-2: Esquema Bloque de Polímero, Ref [3].	14
Figura 2-3: Esquema de Emulsión Monofásica, Ref [4].	17
Figura 2-4: Esquema de Emulsión Bifásica, Ref [4].	18
Figura 2-5: Comparación entre Chip Sealcon emulsión modificada.	20
Figura 2-6: Comparación entre Chip Seal con emulsión modificada y no modificada.	21
Figura 2-7: Tiempo de Curado v/s Temperatura de Resistencia al Ahuellamiento, Ref [3].	22
Figura 2-8: Resultados al aplicar ensayo L.W.T sobre diferentes muestras asfálticas, Ref [3].	23
Figura 3-1: Producción de emulsión asfáltica. Planta continua. Ref [10].	25
Figura 3-2: Producción de emulsión asfáltica. Planta discontinua. Ref [10].	26
Figura 3-3: Esquema de Molino Coloidal, Ref [11].	27
Figura 3-4: Tamaños para los glóbulos asfálticos en la emulsión. (Sin escala) Ref [7].	28
Figura 3-5: Granulómetro Láser, Ref [12].	28
Figura 3-6: Laboratorio donde se ha implementado el uso de Granulómetro Láser, Ref [12].	29
Figura 3-7: Granulometría de la emulsión obtenida por medio del Granulómetro Láser.	29
Figura 3-8: Esquema Proceso Productivo de Emulsión Asfáltica Monofásica, Ref [4].	30
Figura 3-9: Esquema Proceso Productivo de Emulsión Asfáltica Bifásica, Ref [4].	31
Figura 4-1: Equipo Péndulo Vialit Cooper, Ref [20].	42
Figura 4-2: Gráfico Energía de Cohesión v/s Temperatura, Ref [20].	43
Figura 4-3: Gráfico comparación de residuos de emulsiones modificadas. Ref [23].	50
Figura 4-4: Esquema indicando parámetros de DSR. Ref [28].	52
Figura 4-5: Horno Ventilado. Placas Planas de silicona, Ref [15].	58
Figura 5-1: Equipo utilizado para el ensayo W.T.A.T., Ref [12].	61
Figura 5-2: Curva Pérdida por Abrasión v/s Contenido de Betún, Ref [12].	62
Figura 5-3: Equipo utilizado para el ensayo L.W.T., Ref [12].	63
Figura 5-4: Curva Arena Adherida v/s Contenido de Betún, Ref [12].	63
Figura 5-5: Curva que indica contenido óptimo de betún, Ref [12].	64
Figura 5-6: Esquema Cono de Consistencia. Escala en cm. Ref [12].	65
Figura 5-7: Límites aceptables para consistencia de la mezcla, Ref [12].	66
Figura 5-8: Material Grueso Desprendido de Microaglomerado en Frío. Conservación Ruta 5.	68
Figura 5-9: Material Grueso Desprendido de Microaglomerado en Frío.	69
Figura 5-10: Material Grueso Desprendido de Microaglomerado en Frío.	69

Figura 5-11: Material Grueso Desprendido de MAF.	70
Figura 6-1: Pavimento al que se le ha aplicado un micro en frío, MAF. Ruta 5.	73
Figura 6-2: Pavimento al que se le ha aplicado Microaglomerado en Frío MAF, Ruta 5.	74
Figura 6-3: Reflejo de grieta en pavimento con Microaglomerado en Frío, Ruta 5.	74
Figura 6-4: Aplicación de Riego de Liga (sin diluir) y de Scrub Seal, Ruta 5.	75
Figura 6-5: Aplicación de Microaglomerado asfáltico (MAF), Ruta 5.	76
Figura 6-6: Obra terminada, Ruta 5.	76
Figura 11-1: Esquema base para modelo.	91
Figura 11-2: Esquema de cargas para modelo.	91
Figura 11-3: Gráfico Deformación por Tracción v/s Desprendimiento.	93
Figura 11-4: Gráfico Deformación por Tracción v/s Desprendimiento (40% de peso)	94
Figura 11-5: Gráfico Deformación por Tracción v/s Desprendimiento (60% de peso)	95

1. Introducción

1.1.- Antecedentes Generales

Al comienzo de la década de los 90', en Europa, se crea el Comité Técnico TC19/SC1 de la Comisión Europea de Normalización (CEN), que aborda la elaboración de los métodos de ensayo y especificaciones europeas para las emulsiones asfálticas, tanto tradicionales como modificadas, preferentemente catiónicas [1].

En el año 1990, la comunidad europea estaba constituida por 12 países. Al inicio se elaboraron una serie de borradores, al interior del CEN, con el inconveniente de que existían objeciones de algunos países, de modo que el consenso durante esta década fue difícil [1].

Sin embargo, posterior al Congreso de Eurobitume (Luxemburgo, 1999) el CEN llega a un acuerdo y elabora un proyecto de norma europea, para emulsiones asfálticas, bajo el título "*prEN 13808: Bitumen and bituminous binder-Framework for specifying cationic bituminous emulsions*". La norma finalmente se publica en el año 2005, sin embargo, los países de la comunidad europea debieron cumplir de manera obligatoria con sus especificaciones recién desde el año 2011 [1].

Después de prácticamente dos décadas (1990 a 2011), el CEN finalmente logra el consenso y la norma EN 13808 se aplica en todos los países de la comunidad europea bajo el Mercado CE [1]. El análisis realizado en esta memoria, tomará como base lo expuesto en la última versión publicada de la norma UNE EN 13808 (España), con el fin de establecer la factibilidad de actualización de la normativa nacional.

1.2.- Objetivos

En esta memoria se ha privilegiado un análisis comparativo entre la normativa nacional (Manual de Carreteras) y la normativa europea (UNE EN), con respecto a las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros. Esto se realiza con el fin de establecer recomendaciones que permitan actualizar la normativa nacional y propendan a un mejor desempeño de las tecnologías asfálticas en frío, preferentemente en los tratamientos superficiales y riegos de liga, empleados masivamente en las tecnologías asfálticas de ejecución de proyectos nuevos y de conservación de pavimentos asfálticos en servicio.

1.3.- Alcances

- Realizar una revisión bibliográfica acerca de las emulsiones asfálticas modificadas con polímero, con respecto a su composición, usos y normativa nacional e internacional (principalmente Europa- España).

- Comparar particularmente la normativa chilena con la española, en cuanto a los ensayos y métodos de fabricación, con el fin de determinar si los estándares nacionales se asemejan a los estándares españoles.
- Establecer recomendaciones a la normativa chilena, que permita actualizarla y asemejarla a los estándares españoles.
- Indicar los ensayos principales que permiten fabricar los microaglomerados en frío, técnica mayormente usada para la preservación de pavimentos.
- Recomendar que tratamientos previos deben realizarse a la superficie pavimentada antes de la colocación del microaglomerado en frío. Además de sugerir la utilización de la técnica Scrub Seal, utilizada para un mejor sellado de grietas y fisuras en el pavimento en servicio.

1.4.- Estructura de la Memoria

Esta tesis se compone de los siguientes capítulos:

1. **Capítulo 1: Introducción**

Capítulo que cumple la función de entregar todas las bases en las que se sostendrá la presente memoria, además de darle al lector un contexto general en el cual se ubicará.

2. **Capítulo 2: Emulsiones Asfálticas Modificadas**

Capítulo que presenta una visión detallada acerca de qué son las emulsiones, sus componentes, sus tipos, diferencias entre sí, sus usos y ventajas.

3. **Capítulo 3: Fabricación de Emulsiones Asfálticas Modificadas**

En este capítulo se presentan los implementos necesarios en la producción de Emulsiones Asfálticas Modificadas, además de destacarse el proceso que se lleva a cabo para fabricar los distintos tipos de emulsiones.

4. **Capítulo 4: Normativa**

En este capítulo se analizan las diferencias entre la normativa utilizada en Chile con la utilizada en la Comunidad Europea - España. Además se entregan recomendaciones y/o propuestas para actualizar la normativa nacional, en base la norma europea vigente.

5. **Capítulo 5: Microaglomerados Asfálticos en Frío (MAF)**

Capítulo destinado a indicar y detallar los ensayos principales utilizados para el diseño de microaglomerados en frío. Además se destacan problemas comunes con los pavimentos cuando éste tipo de mezcla es mal diseñada o mal aplicada.

6. **Capítulo 6: Proceso Constructivo de MAF**

Se comparan los procesos constructivos indicados en normativas de Chile y el mundo, estableciendo sus diferencias más notorias, además de proponer un nuevo proceso constructivo que asegure un mejor comportamiento de la emulsión sobre el pavimento.

7. **Capítulo 7: Conclusiones**

En este capítulo final se establecen todos los comentarios y observaciones extraídos en la confección de esta memoria.

2.- Emulsiones Asfálticas Modificadas

2.1.- Definición

En la literatura existen varias maneras de definir una emulsión asfáltica. Una definición sencilla sería, “una mezcla que contenga tres ingredientes básicos: asfalto, agua y un agente emulsificador, la que a veces puede contener aditivos, como por ejemplo estabilizadores” [2].

Cuando a estos tres componentes básicos se le adiciona un polímero modificador, la emulsión asfáltica se convierte en modificada [3].

2.2.- Componentes

Los cuatro componentes básicos de una emulsión asfáltica modificada son:

- Asfalto.
- Agua.
- Agente Emulsificador.
- Polímero.

2.2.1.- Asfalto

Es el componente básico en una emulsión asfáltica, llegando a tener como dotación o contenido en algunos casos, entre el 50 – 70 % de la emulsión.

Algunas propiedades del asfalto afectan significativamente la producción de la emulsión, pero como su química es difícil de analizar, no se ha podido encontrar una correlación entre esas propiedades y la facilidad con que el asfalto es emulsificado. De todas maneras, sí se ha determinado que la buena compatibilidad química entre el emulsificador y el asfalto base, es esencial para la estabilidad de la emulsión. Es por esto que existe un control de calidad constante a lo largo de todo el proceso productivo, que asegura los óptimos resultados de la emulsificación [2].

2.2.2.- Agua

Es el segundo ingrediente de la emulsión asfáltica y tiene mucha influencia en el proceso productivo, debido a que posee minerales u otro tipo de materia que afecta la producción de emulsiones asfálticas estables.

El agua que se utilice para generar emulsiones asfálticas, debe ser procesada, debido a las impurezas que posee, ya sean diluidas o como partículas suspendidas.

Por ejemplo, es importante la presencia de iones de calcio y de magnesio en el agua, ya que éstos ayudan a la formación de emulsiones catiónicas. De hecho, a menudo se agregan estos iones a las emulsiones catiónicas para aumentar su estabilidad de almacenamiento. Sin embargo, estos mismos iones pueden ser dañinos para la formación de emulsiones aniónicas, debido a que en estos tipos de emulsiones se utilizan, como emulsificadores, iones de sodio y potasio, los que al reaccionar con los iones de calcio y magnesio pueden desestabilizar la emulsión. Es por esto que es de suma importancia el previo tratamiento del agua que se utilizará en el proceso productivo [2].

2.2.3.- Agente Emulsificador

El agente emulsificador es un compuesto químico que permite modificar la tensión interfacial agua-betún, ya que su estructura está compuesta por una molécula que posee una cabeza lipofílica (gran afinidad con el asfalto) y una cadena hidrofílica (gran afinidad con el agua), lo que permite que las gotas de asfalto o coloides, no se unan entre ellas manteniéndolas dispersas en el agua [4].

A continuación se entrega un esquema de la estructura del agente emulsificador

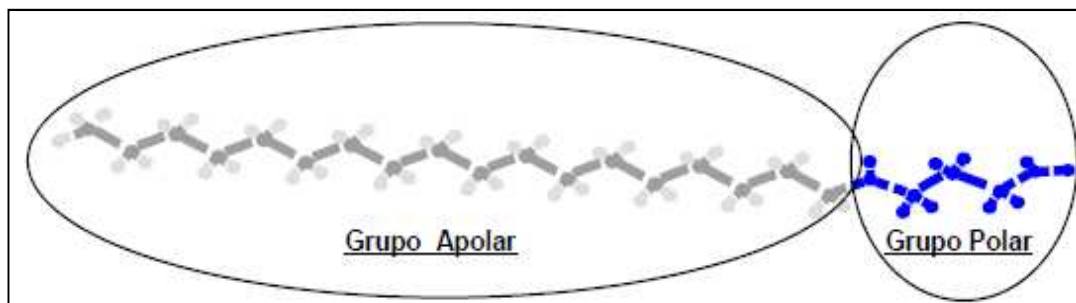


Figura 2-1: Esquema Agente Emulsificador, Ref [4].

Básicamente existen tres tipos de emulsificadores, clasificados por las características que tienen al disociarse en agua o mantener las partículas de betún en suspensión:

- a) Emulsificador Aniónico.
- b) Emulsificador Catiónico.
- c) Emulsificador No-Iónico.

El agente emulsificador es el ingrediente más importante en la producción de una emulsión asfáltica, dado que sus características influyen de manera notable en las propiedades de la emulsión [5].

2.2.4.- Polímeros

Los polímeros son moléculas muy largas, hechas por moléculas más pequeñas que reaccionan juntas químicamente. Las propiedades físicas de los polímeros se determinan a base de las moléculas iniciales llamadas monómeros. Cuando dos o más monómeros se combinan, se forma un copolímero. La estructura del copolímero puede ser aleatoria o puede repetirse en bloques de polímeros [6], como se muestra en la siguiente figura.

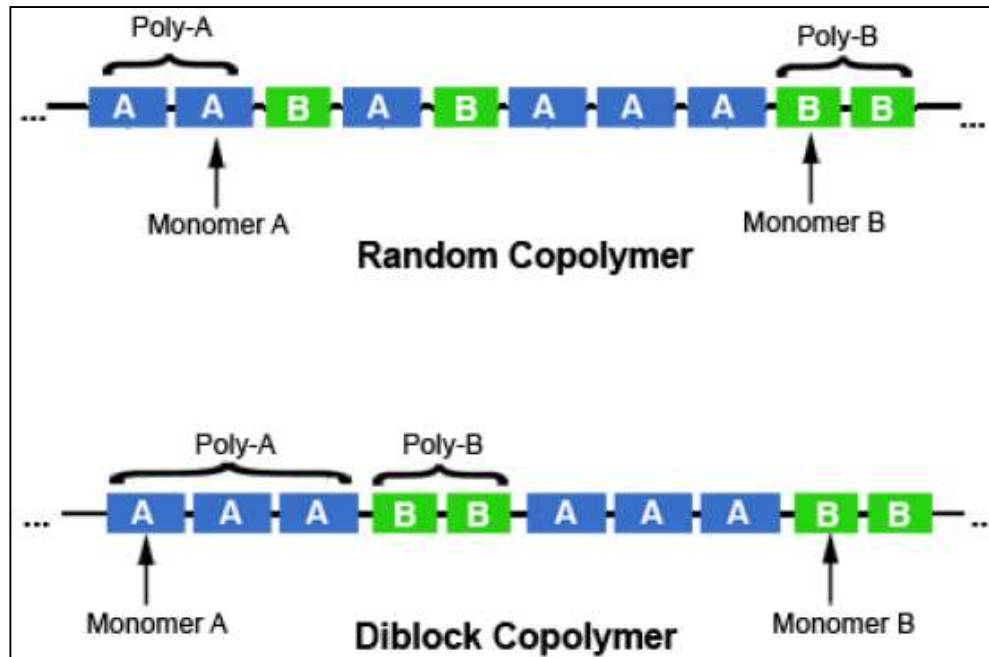


Figura 2-2: Esquema Bloque de Polímero, Ref [3].

Existen dos tipos básicos de polímeros que son usados para modificar el asfalto para aplicaciones sobre caminos:

- Plastómeros.
- Elastómeros.

Los polímeros del tipo plastómeros, modifican el asfalto formando una red tridimensional dura y rígida, lo que les permite alcanzar una alta resistencia rápidamente ante temperaturas altas, pero son frágiles y poco resistentes a la deformación a baja temperatura [7].

Por su parte, los polímeros del tipo elastómero, son flexibles y pueden ser estirados hasta diez veces su tamaño sin quebrarse y rápidamente retornar a su forma original, una vez que la carga sobre ellos haya sido retirada [7]. Se comportan equilibradamente ante bajas y altas temperaturas.

La calidad de las propiedades de los materiales de las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros, no sólo depende de la uniformidad en la mezcla de sus componentes, sino que también se relaciona en gran medida con el tipo, el estado y la naturaleza del polímero o modificadores [6].

Algunos de los modificadores más usados son:

a) Látex de Caucho Natural (NRL)

El látex de caucho natural (Natural Rubber Latex, NRL) es un polímero elastomérico hidrocarbonado que existe de forma natural como una savia lechosa producida por varias especies de plantas. La savia tiene una estructura coloidal basada en agua [6]. El caucho natural es producido de látex de caucho natural por coagulación, para formar un material sólido. En 1929, se aplicó por primera vez látex de caucho natural en la construcción de caminos y tomó lugar en Singapur [6]. En Inglaterra, Europa y Estados Unidos el uso de NRL en la modificación de asfaltos ha sido estudiado de manera extensiva entre la década de los años '50 y '60 [6]. Sin embargo en la década de los años '70 un proceso patentado, conocido como RALUMAC (Alemania 1979), fue desarrollado para modificar emulsiones asfálticas con látex de caucho natural. Este proceso involucra la mezcla de látex de caucho natural aniónico en una fase acuosa con emulsiones asfálticas catiónicas durante la emulsificación del asfalto. Desde su introducción original, se ha encontrado que la modificación del asfalto, usando látex de caucho natural, mejora la estabilidad térmica del asfalto de dos maneras [6]:

- i. A altas temperaturas, el látex de caucho natural, aumenta la viscosidad del bitumen (espesándolo), haciendo a la superficie del camino más resistente a la deformación bajo grandes presiones en climas calurosos.
- ii. A bajas temperaturas, el látex de caucho natural, aumenta la elasticidad del material, reduciendo el agrietamiento térmico asociado.

b) Látex de Caucho Estireno-Butadieno-Rubber (SBR)

Es un látex que posee una estructura aleatoria de copolímero. En una emulsión de asfalto modificado, las partículas del látex SBR tienden a quedarse en la fase acuosa y espontáneamente transformarse en una película microscópica continua de polímeros que rodean las partículas de asfalto durante el proceso de curado. Cuando la emulsión ya ha perdido prácticamente toda el agua, queda sólo el asfalto modificado adherido al agregado o pavimento [6]. Los beneficios que se logran en la emulsión al utilizar este tipo de polímero, incluyen una mejor retención de agregados, un aumento en la resistencia al deslizamiento y mejoras en el comportamiento del pavimento a bajas temperaturas (mejor elasticidad, menor fragilidad y mejor adhesión de los agregados) [3].

c) Látex de Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)

Son copolímeros de bloque y están clasificados como elastómeros que aumentan la elasticidad del bitumen y son, probablemente, el polímero más apropiado para la modificación de asfaltos tradicionales [6]. Los copolímeros SBS derivan su fuerza y elasticidad del entrelazamiento tridimensional que existe entre las moléculas [6].

Uno de los beneficios en la aplicación de los polímeros SBS en la modificación de emulsiones asfálticas, es el aumento notable en la resistencia a la elongación, es decir, en la recuperación elástica que adquiere el residuo asfáltico de la emulsión. Sin embargo, este polímero al tener que calentarse a altas temperaturas para ser licuado, se prefiere

usarlo en la modificación previa de un betún asfáltico y luego emulsificarlo, dando paso a las emulsiones modificadas monofásicas [6].

d) Etileno Vinil Acetato (EVA)

EVA es usada comúnmente como un modificador plastomérico que representa un copolímero de etileno y acetato de vinilo. El polímero EVA ha sido utilizado en la construcción de caminos hace más de 20 años, para mejorar la trabajabilidad del asfalto durante la construcción y la resistencia a la deformación plástica de pavimentos en servicio. No existen muchos registros de emulsiones asfálticas modificadas con EVA [6]. Al igual que con el polímero SBS, el asfalto debe ser previamente modificado con este polímero y luego emulsificado. Por otra parte, por las características del polímero EVA, en el residuo asfáltico de la emulsión se ha reportado que el uso de este tipo de polímero, disminuye la penetración, la ductilidad y por consiguiente aumenta la rigidez y la susceptibilidad térmica de dicho residuo. De aquí que su uso es preferentemente en asfaltos modificados con polímeros empleados en mezclas asfálticas en caliente [3].

2.3.- Tipos de Emulsiones Modificadas

En la producción de Emulsiones Modificadas, se distinguen dos tipos:

- Emulsiones Monofásicas.
- Emulsiones Bifásicas.

2.3.1.- Emulsiones Monofásicas

Son aquellas emulsiones en las que el polímero modificador se agrega directo y previamente al asfalto base. En este tipo de emulsiones se observa sólo una fase dispersa, o discontinua, en la fase acuosa. La fase dispersa corresponde al asfalto previamente modificado con el polímero [4].

A continuación, se indica un esquema de una emulsión monofásica,

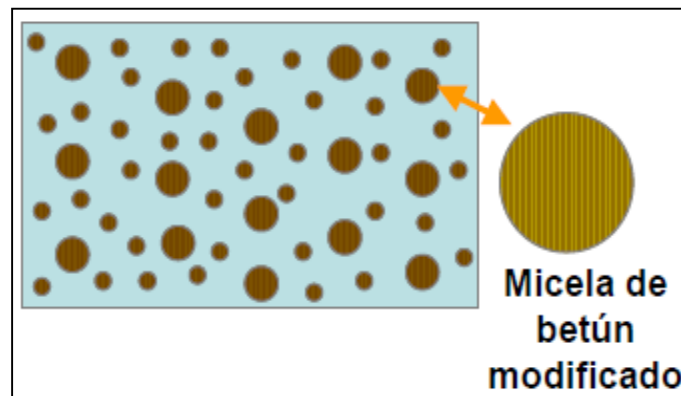


Figura 2-3: Esquema de Emulsión Monofásica, Ref [4].

2.3.2.- Emulsiones Bifásicas

Son aquellas emulsiones en las que el polímero modificador se agrega en forma de látex, generalmente en la fase acuosa. En este tipo de emulsión se aprecian dos fases dispersas en la fase acuosa, que corresponden al asfalto base y al látex [4].

En la siguiente figura se aprecia la distribución de las micelas de asfalto y de látex dentro de la fase acuosa.

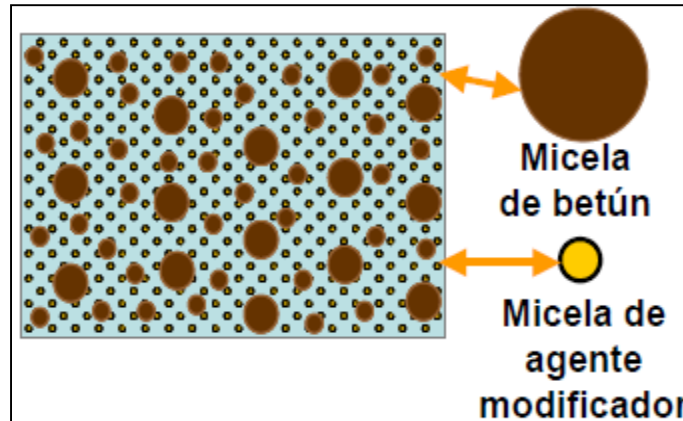


Figura 2-4: Esquema de Emulsión Bifásica, Ref [4].

2.4.- Clasificación de las Emulsiones

2.4.1.- Según Carga Eléctrica

Las emulsiones asfálticas se clasifican en tres tipos: aniónicas, catiónicas y no iónicas [2].

En la práctica, los primeros dos tipos son ampliamente usados en la construcción de caminos y mantenimiento de ellos.

La clasificación anterior es según la carga eléctrica que rodea a las partículas de asfalto, lo que se deriva de la ley básica de la electricidad: cargas iguales se repelen y cargas distintas se atraen. Cuando dos polos (ánodo y cátodo) están inmersos en un líquido por el cual fluye una corriente eléctrica, el ánodo se carga positivamente y el cátodo se carga de forma negativa. Ahora, si una corriente se hace pasar a través de una emulsión que posee partículas cargadas negativas de asfalto, éstas migrarán hacia el ánodo, por lo tanto, la emulsión se denominará “aniónica”. Del mismo modo, si las partículas de asfalto cargadas positivas migran al cátodo, la emulsión se denominará “catiónica” [2].

En el caso de las emulsiones “no-iónicas”, las partículas de asfalto no están cargadas por lo que no emigran hacia ningún polo.

2.4.2.- Según Velocidad de Rotura o Quiebre

Las emulsiones asfálticas también se clasifican según la velocidad de quiebre, es decir, según la velocidad en que la fase dispersa (asfalto) y continua (agua) se separan.

Existen 4 términos para clasificar la velocidad de quiebre de una emulsión: RS (rapid-setting), MS (medium-setting), SS (slow-setting) y QS (quick-setting), donde la emulsión tipo RS es la que posee mayor velocidad de quiebre y la emulsión del tipo SS es aquella que posee la menor velocidad de quiebre. Por otro lado, la emulsión clasificada como QS es de un quiebre controlado (tiempo de rotura en segundos o minutos) y su uso es preferentemente en lechadas asfálticas y microaglomerados asfálticos en frío (MAF) [2].

Las emulsiones del tipo RS tienen poca o nula habilidad para poder mezclarse con agregados, las del tipo MS tienen afinidad con los agregados gruesos, pero no con los agregados finos, mientras que las del tipo SS y QS pueden mezclarse con agregados finos, siendo la del tipo QS la que al tener un tiempo de quiebre determinado, permite una adecuada mezcla de los agregados con la emulsión [2].

Cuando se usan emulsiones catiónicas o aniónicas del tipo RS o MS, el mecanismo de quiebre es a través de fenómenos electro-químicos. Por otro lado, al utilizar emulsiones del tipo SS o QS, el mecanismo de quiebre se basa en la evaporación del agua en forma controlada [2].

2.5.- Usos y Beneficios

El uso del asfalto modificado con polímeros comenzó incluso antes de que se patentara el proceso de modificación del asfalto, usando polímero natural y sintético. Hoy en día, la tecnología para la modificación de los asfaltos es usada en la búsqueda y producción, tanto de betunes asfálticos como de emulsiones asfálticas, para lograr un mejor desempeño ante el proceso de oxidación o envejecimiento, tanto en pavimentos nuevos como en servicio [6].

Las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros son usadas para tecnologías en frío, especialmente para riegos de liga de alta prestación, tratamientos superficiales en base a gravillados (chip seal), lechadas (slurry seal) y microaglomerados asfálticos en frío (MAF o Microsurfacing) [6].

2.5.1.- Usos

2.5.1.1.- Tratamientos Superficiales en base a Gravillados (Chip Seal)

Tratamientos superficiales (Chip Seal) consisten en una emulsión asfáltica, que es aplicada como spray a la superficie del pavimento e inmediatamente cubierta con una capa de agregado (chip), a la que luego se le aplica el rodillo para asentar el agregado. Los tratamientos superficiales, son usados comúnmente como una tecnología de bajo costo y de alta prestación en la construcción de caminos de bajo tránsito o rurales, como también un método de mantención del pavimento preventivo o de rehabilitación [3].

Los gravillados son usados sobre base granular cuando, en caminos secundarios o de bajo tránsito, se quiere cambiar el estándar de caminos granulares o rípiados a caminos pavimentados, para lo cual se puede, de acuerdo a las recomendaciones del Manual de Carreteras, en una primera etapa ejecutar las tecnologías en frío caracterizadas por los dobles tratamientos superficiales (DTS) [8].

Por otra parte, el uso de gravillados sobre pavimentos existentes se ejecuta según lo indicado para tratamientos superficiales (TS) en el Manual de Carreteras [8].

Las ventajas en el uso de emulsiones asfálticas modificadas con polímeros en las aplicaciones de gravillados son [3]:

- Mejor y mayor tiempo de retención del agregado.
- Mayor rapidez en la apertura del pavimento al tráfico.
- Aumento de la vida útil del pavimento por el paso de tráfico pesado.

A continuación, se muestra un gráfico que compara la capacidad de retención del agregado aplicando la técnica del gravillado (*Chip Seal*) con una emulsión modificada con polímeros, versus una emulsión asfáltica convencional [3]. Los resultados que se muestran en la Figura 2-5, fueron obtenidos mediante el ensayo *Sweep Test* (ASTM D7000), utilizado para medir la capacidad de retención del agregado que posee una mezcla.

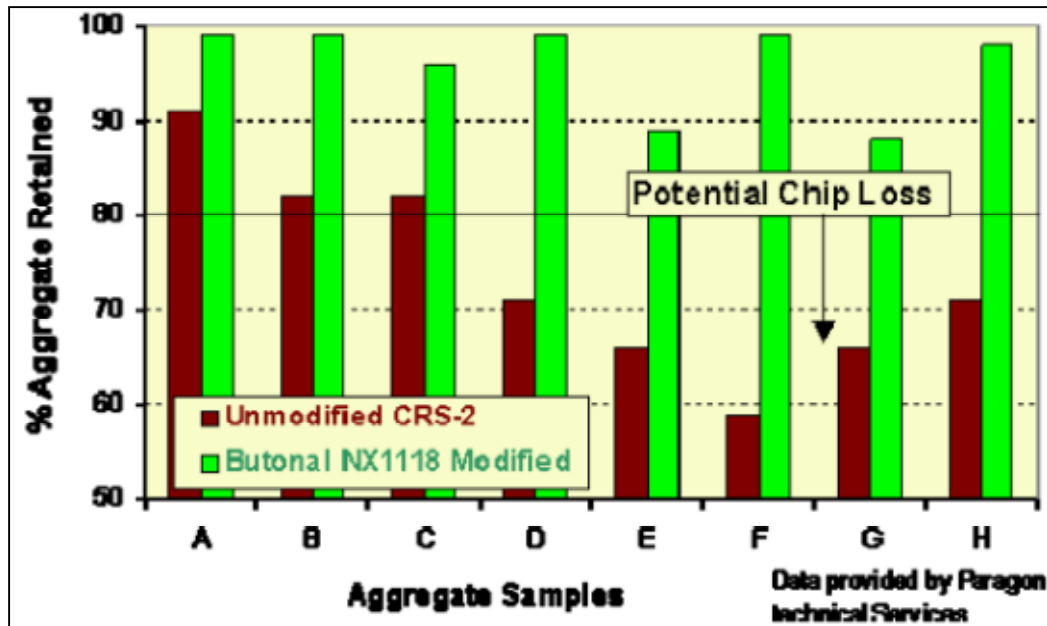


Figura 2-5: Comparación entre *Chip Seal* con emulsión modificada y no modificada para el desprendimiento del agregado, Ref [3].

Para este ejemplo se utilizó el polímero modificador Butonal NX1118 en la emulsión asfáltica modificada. Los resultados indican que para cada una de las muestras (8 en total) con emulsión modificada, el porcentaje de retención de agregados aumenta, llegando en la mayoría de las muestras a un 90%. Por lo tanto, de éste ejemplo particular se determina que, la adición de éste polímero a la emulsión original mejora la retención del agregado [3].

Reafirmando lo anterior, en la Figura 2-6 presenta un gráfico donde se mide la capacidad de retención del agregado a diferentes temperaturas, al utilizar la técnica del *chip seal* con una emulsión modificada con látex SBR versus una emulsión tradicional. De este ejemplo, se concluye que la adición de este tipo de polímero a la emulsión original, incrementa la capacidad de la emulsión para retener el agregado [3]. Los resultados mostrados en la Figura 2-6 fueron obtenidos mediante el ensayo *Vialit Test* (California Department of Transportation. *Vialit Test Retention in Chip Seals - French Chip*, 2008).

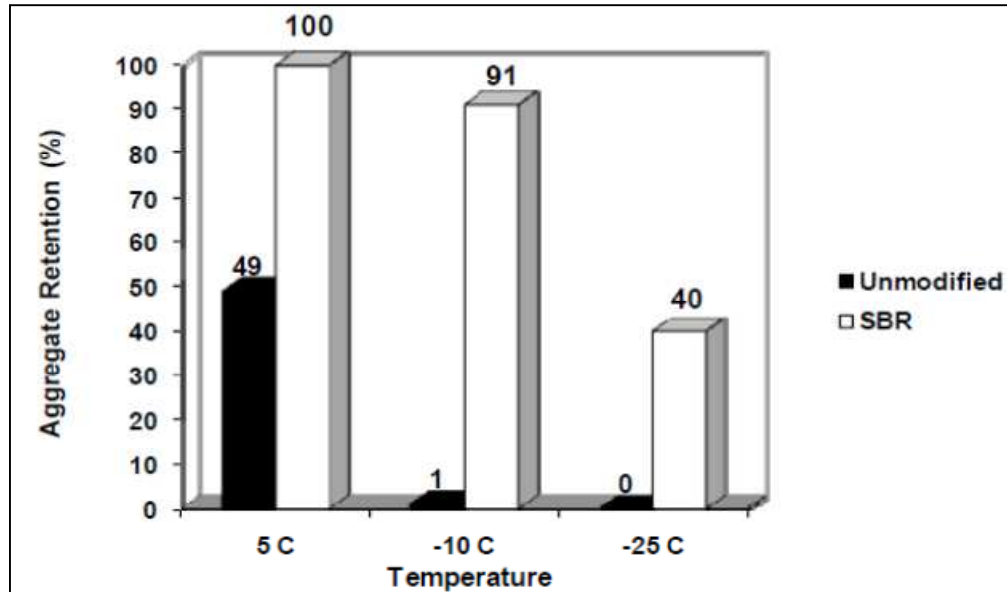


Figura 2-6: Comparación entre *Chip Seal* con emulsión modificada y no modificada. Desprendimiento de agregado a distintas temperaturas, Ref [3].

2.5.1.2.- Lechadas Asfálticas (Slurry Seal)

Las lechadas asfálticas (*Slurry Seals*) consisten en mezclas homogéneas de agregado chancado y una emulsión asfáltica, la que es aplicada sobre la superficie del pavimento en una sola capa. El curado de *slurry seals* ocurre cuando el agua se evapora, dejando sólo el asfalto residual adhiriéndose al agregado [3]. En general, las mezclas con *slurry seal* contienen una alta proporción de finos, que habitualmente mejoran la resistencia al deslizamiento y a la filtración del agua. Generalmente son aplicados para caminos de bajo tránsito y se aplican en capas únicas que tienen un espesor entre 1 a 1.5 cm [9].

2.5.1.3.- Microaglomerados Asfálticos en Frío (Microsurfacing)

Los microaglomerados asfálticos en frío (MAF) o microsurfacing, son comúnmente usados como una forma de lechada asfáltica, que consiste en una combinación de agregado mineral y polvo filler, una emulsión asfáltica modificada con polímeros y otros aditivos [3]. La diferencia primordial entre el microaglomerado en frío y las otras formas de lechadas tradicionales, es la formulación química de la emulsión que se emplea.

Habitualmente en las especificaciones y en los procedimientos de diseño para microaglomerados en frío se utilizan emulsiones modificadas con polímeros, como también los requisitos a cumplir son más estrictos que aquellos utilizados para lechadas tradicionales [3]. Por definición, las emulsiones utilizadas en la fabricación del microaglomerado en frío contienen polímeros, mientras que las emulsiones de la lechada tradicional no los tienen.

Los microaglomerados en frío se utilizan mayormente en caminos de alto tráfico [9] y tienen una mayor prestación que las lechadas asfálticas, puesto que, al utilizar emulsiones modificadas, su tiempo de curado (tiempo que le toma al agua evaporarse de la emulsión, dejando al asfalto adherido al agregado superficial) es menor, generando una pronta apertura al tráfico [3]. El tiempo de curado del microaglomerado depende de varios factores, en los que se destaca el pH de la emulsión asfáltica, el tipo y cantidad de surfactante (emulsionante), el tipo del bitumen y del agregado y la temperatura a la que se aplica la mezcla. Muchos productores advierten que el microaglomerado desarrolla suficiente “fuerza” y está listo para abrirse al tráfico al cabo de una hora de haberse ejecutado [3].

El microaglomerado en frío es comúnmente usado para corregir, en un pavimento en servicio, las fallas por ahuellamiento (con profundidad de hasta 2 a 2,5 cm), para mejorar la resistencia al deslizamiento y preferentemente para aumentar la resistencia al envejecimiento [3].

Se han realizado estudios [3] para comprobar que el uso de emulsiones modificadas con polímeros, en la producción de microaglomerados en frío, sí mejora las propiedades de éstos al compararlas con el uso de emulsiones convencionales (producción de lechadas asfálticas).

El gráfico de la Figura 2-7 muestra los resultados que se obtienen al comparar el tiempo de curado de un microaglomerado en frío con la temperatura que dicha mezcla resiste al ahuellamiento. El ensayo se basa en variar la cantidad de polímero agregado al microaglomerado en frío y analizar la influencia que tiene el tiempo de curado de la mezcla en la temperatura de resistencia al ahuellamiento. El curado de la mezcla se realiza a una temperatura constante de 60°C [3].

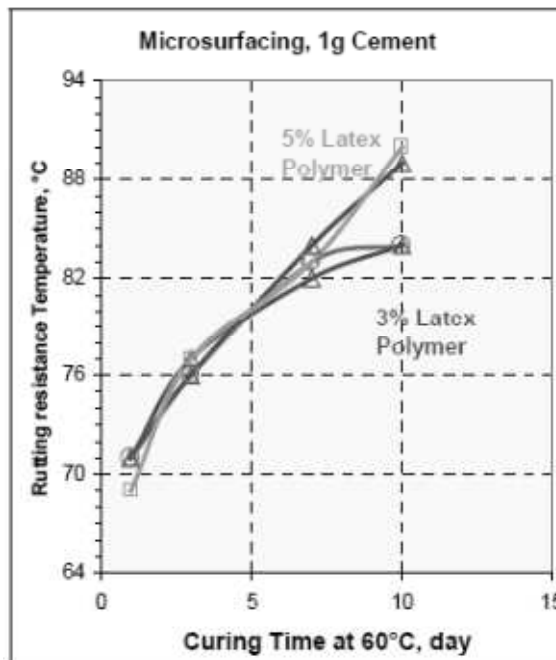


Figura 2-7: Tiempo de Curado v/s Temperatura de Resistencia al Ahuellamiento, Ref [3].

Como resultado de lo mostrado la Figura 2-7, se obtiene una relación directa entre la cantidad de polímero, el tiempo de curado y la temperatura de resistencia al ahuellamiento, ya que al aumentar la dosis del polímero en la mezcla y dejándola a ésta curar por más tiempo a 60°C, se obtiene una mayor temperatura de resistencia al ahuellamiento.

Otro ensayo desarrollado es el indicado en el gráfico de la Figura 2-8, el que muestra los resultados del ensayo *Load Wheel Test* (Ensayo de Rueda Cargada, descrito en sección 5.1 de esta memoria), utilizado para medir la susceptibilidad de los materiales asfálticos a sufrir deformaciones debido a la acción de cargas (ahuellamiento). Para el ensayo se compararon seis emulsiones asfálticas, cinco de ellas son modificadas con polímeros (microaglomerados) y una contiene emulsión tradicional (lechada asfáltica con asfalto puro). Para el polímero se utilizó una concentración de un 3% (en peso del asfalto) [3].

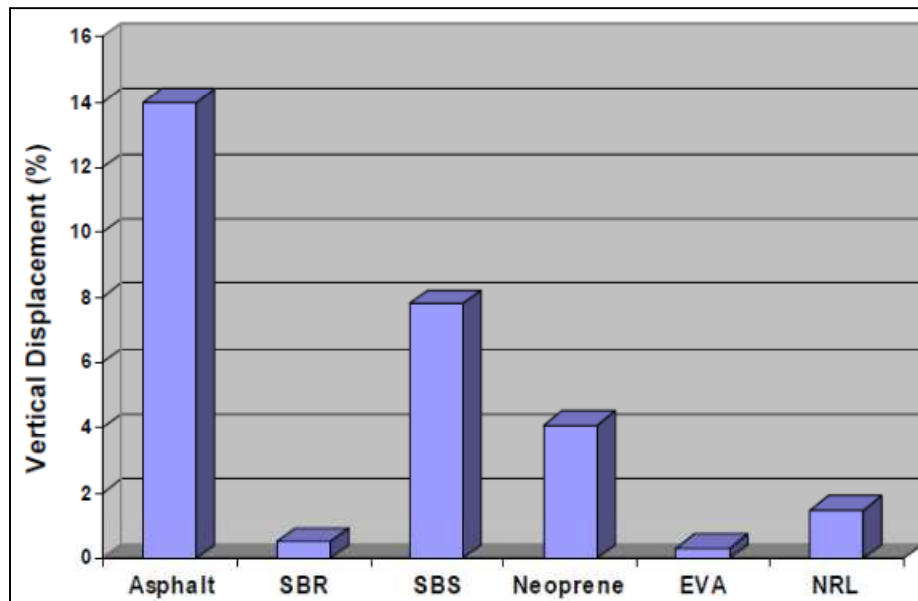


Figura 2-8: Resultados al aplicar ensayo L.W.T sobre diferentes muestras asfálticas, Ref [3].

De los resultados expuestos en la Figura 2-8, se aprecia que la menor susceptibilidad a sufrir deformaciones por ahuellamiento se logra al utilizar emulsiones modificadas con polímeros de tipo SBR y EVA.

Cabe destacar que, para obtener resultados satisfactorios con el uso de microaglomerados en frío como tecnología para el mantenimiento de pavimentos, se recomienda usar polímeros modificadores del tipo SBS o EVA en Emulsiones Monofásicas y SBR en Emulsiones Bifásicas, en una concentración entre el 3% al 5% [3].

2.5.1.4.- Cape Seal (Sello del Cabo)

La aplicación del tipo Cape seal representa una combinación de agregados grandes, como las usadas en la primera capa de un sello Tratamiento Superficial Simple (TS) o Doble Tratamiento Superficial (DTS), pero cubiertas por una capa de lechada tradicional (Slurry Seal) o microaglomerado asfáltico en frío (Microsurfacing) [3].

El uso de emulsiones modificadas con polímeros, en este tipo de aplicaciones, puede aumentar la resistencia a la deformación, aumentando así la vida útil del pavimento y el desempeño frente a altas temperaturas. Además el uso de una cubierta de lechada asfáltica es útil para aumentar la capacidad de retención de agregado del cape seal y para proveer una superficie impermeable, además de prolongar la vida de servicio de un pavimento con un índice de fricción adecuado para el usuario [3].

2.5.2.- Beneficios

El buen desempeño de una emulsión asfáltica modificada con polímeros, no sólo pasa por la materia prima de sus componentes, sino que además depende de la compatibilidad entre el polímero y el asfalto base, definiéndose como el estado de dispersión entre dos componentes. Si existe una buena compatibilidad, la emulsión tendrá un mejor desempeño, ya que las “redes poliméricas” que se formen alrededor de los glóbulos de asfalto permitirán que ésta mejore sus propiedades. Al mismo tiempo, el tamaño y la distribución granulométrica de la emulsión que se consigue en el proceso de fabricación de la emulsión en el molino coloidal (finura de la emulsión y su correspondiente superficie específica) es fundamental en el comportamiento posterior de la lechada o microsurfacing (MAF) [3].

Las ventajas de utilizar emulsiones asfálticas modificadas con polímeros por sobre emulsiones asfálticas no modificadas o convencionales, puede resumirse en los siguientes beneficios [6]:

- Mayor resistencia al ahuellamiento y al agrietamiento térmico.
- Mayor resistencia a la exudación.
- Aumento en la resistencia al agrietamiento por fatiga.
- Aumento en la retención de los agregados.
- Mayor rapidez de curado.
- Mayor resistencia al envejecimiento.
- Ciclo de vida más largo, con costo equivalente o incluso menor.

3.- Fabricación de Emulsiones Asfálticas Modificadas

En general, las emulsiones asfálticas tradicionales o modificadas, pueden producirse en una planta de procesos continua (en serie) o discontinua (por lotes), pero es indispensable que ambas plantas cuenten con un molino coloidal, equipo que mezcla y homogeniza todos los componentes que conforman la emulsión.

3.1.- Plantas de Producción

Como se mencionó previamente, existen dos tipos de plantas en las que se producen emulsiones asfálticas: plantas continuas y plantas discontinuas.

La planta de elaboración continua, se caracteriza porque todos los componentes de la emulsión son ingresados al proceso de producción, como su nombre lo indica, de manera continua, es decir, utiliza bombas dosificadoras individuales para cada material [10].

La siguiente figura indica el esquema de fabricación de una planta continua o en serie

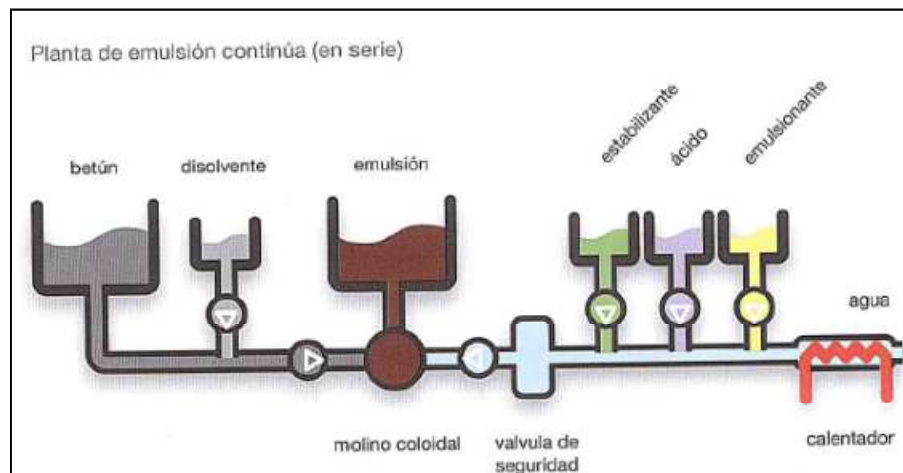


Figura 3-1: Producción de emulsión asfáltica. Planta continua. Ref [10].

Por otro lado, la elaboración discontinua o por lote, se refiere a que la producción de la emulsión asfáltica implica al menos dos etapas: la preparación de la fase acuosa y la producción de la emulsión asfáltica propiamente tal. La fase acuosa se prepara en un depósito donde se mezcla el agua más los emulsificantes y otros productos químicos. Cuando esta fase está lista, es posible mezclarla con el asfalto en el molino coloidal [10].

La siguiente figura indica el esquema de fabricación de una planta discontinua o por lotes

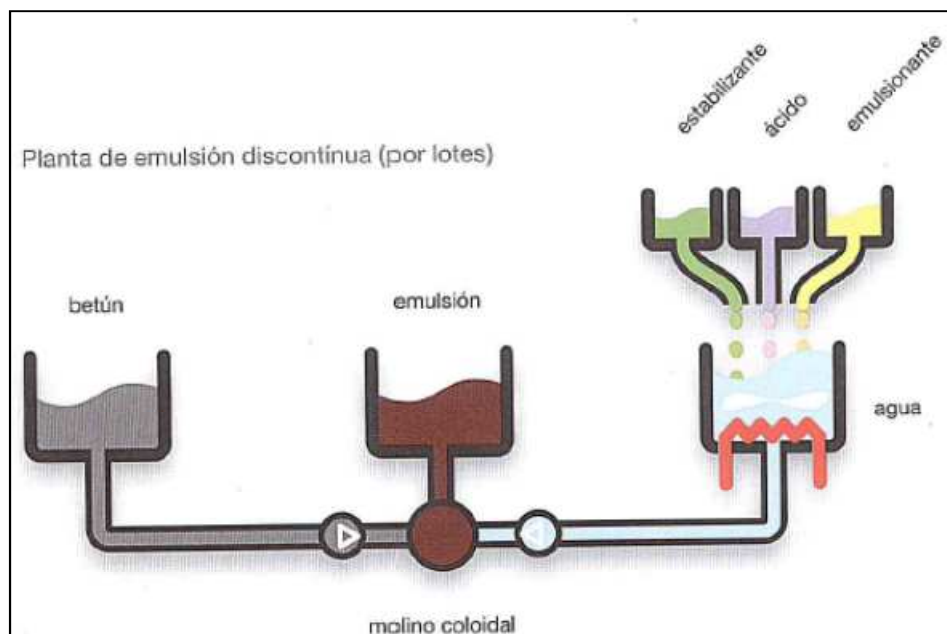


Figura 3-2: Producción de emulsión asfáltica. Planta discontinua. Ref [10].

El proceso de producción de las emulsiones asfálticas modificadas es similar al de las emulsiones asfálticas convencionales, con la diferencia de que a las emulsiones modificadas se debe agregar un polímero modificador, que puede añadirse en la fase bituminosa (Emulsión Monofásica) o en la fase acuosa (Emulsión Bifásica)

Un aspecto básico en la fabricación de las emulsiones modificadas, son las temperaturas de las dos fases que componen la emulsión. La fase dispersada (asfalto) debe calentarse hasta alcanzar una viscosidad mínima que permita su bombeo y cizallamiento en el equipo mezclador (Molino coloidal). Por su parte, la fase acuosa debe calentarse hasta una temperatura que no provoque un choque térmico excesivo en el contacto con la fase dispersada a la entrada al mezclador. Por otra parte, la suma de las temperaturas de las fases no debe sobrepasar los 200°C, para así evitar la ebullición del agua, ya que la presencia de vapor de agua en el equipo mezclador provocaría cavitaciones en el mismo, y ocasionaría roturas parciales de la emulsión. Esta condición se cumple para los asfaltos habitualmente blandos, que son los más empleados, donde la temperatura de trabajo se encuentra entre 120°C y 150°C para la fase asfáltica, mientras que, para la fase acuosa, la temperatura de trabajo se mantiene entre 30°C y 60°C [4].

La condición descrita anteriormente (temperatura en mezclador menor a 200°C), no es posible respetarla en emulsiones fabricadas con asfaltos muy duros o asfaltos modificados previamente (Emulsiones Monofásicas), ya que requieren aumentar la temperatura de la fase dispersa hasta 180°C - 190°C y hasta 70°C - 80°C en la fase acuosa.

Cuando esto ocurre es necesario que todo el sistema de fabricación esté bajo presión, generalmente de unos 2-3 kg/cm², y se debe disponer de un sistema de enfriamiento rápido mediante un intercambiador de calor, a la salida del equipo mezclador, que evite la evaporación del agua de la emulsión [4].

3.2.- Molino Coloidal y el Tamaño de las Partículas

El molino coloidal es el equipo mezclador encargado de realizar el proceso de emulsificación, que corresponde a la separación del betún en pequeñas gotas o micelas, es decir, es el que define el tamaño final de los glóbulos de la emulsión asfáltica.

El tamaño de partículas de la emulsión resultante depende principalmente de [11]:

- Un espacio de aire ajustable (abertura) entre el estator (parte fija) y el rotor (parte que rota).
- Velocidad de rotación del rotor ajustable.

Las dos características mencionadas anteriormente cumplen un rol fundamental en la producción de emulsiones asfálticas debido a que, por un lado, la abertura entre el estator y el rotor influye directamente en la finesa de la emulsión, haciendo que, a mayor abertura, los glóbulos de asfalto sean más grandes. Generalmente este espacio de aire varía entre 0.2 a 0.6 mm.

Por otro lado, a mayor velocidad de rotación del rotor, menor será el tamaño de los glóbulos de asfalto [11].

A continuación, se muestra el esquema de un molino coloidal.

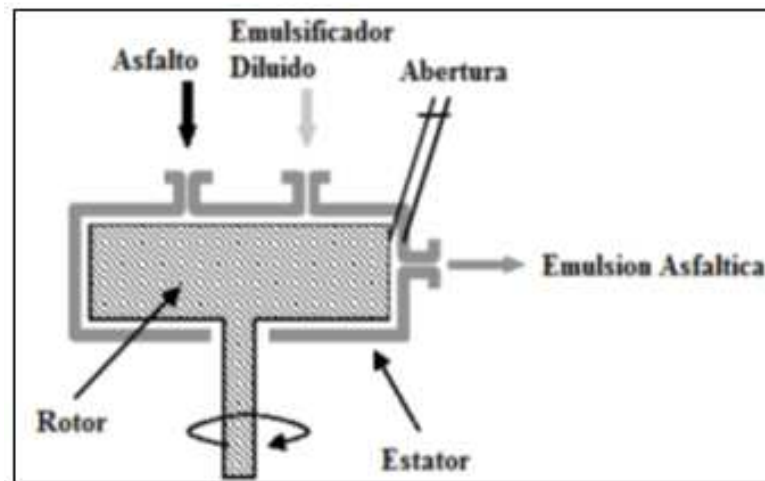


Figura 3-3: Esquema de Molino Coloidal, Ref [11].

Luego del proceso de emulsificación, las gotas de asfalto tienden a adherirse entre sí, situación que se evita gracias a la acción del emulsificante [10],

El tamaño de los glóbulos de asfalto puede variar entre 2 micras y 10 micras (Figura 3-4) y tiene una gran influencia en las propiedades que tendrá la emulsión final, como, por ejemplo, en la estabilidad al almacenamiento. Si las partículas son de gran tamaño, puede que sedimenten rápidamente, lo que generaría que las partículas floculen, y posteriormente se unan y provoquen el quiebre prematuro de la emulsión en los depósitos o estanques de almacenamiento.

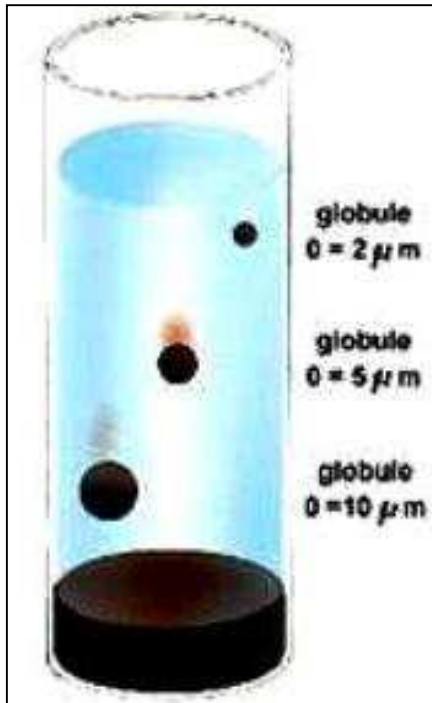


Figura 3-4: Tamaños para los glóbulos asfálticos en la emulsión. (Sin escala) Ref [7].

El control del tamaño de las partículas se lleva a cabo mediante la utilización de un Granulómetros Láser, equipo capaz de medir la granulometría de la emulsión. Su funcionamiento se basa en hacer pasar por una muestra pulverulenta, en seco o en suspensión en un líquido no reactivo, un haz de luz láser produciéndose una dispersión de luz cuya intensidad y ángulo son dependientes del tamaño de las partículas dispersas [5].

Las siguientes figuras muestran el equipo Granulómetro láser y la granulometría de una emulsión en particular.



Figura 3-5: Granulómetro Láser, Ref [12].



Figura 3-6: Laboratorio donde se ha implementado el uso de Granulómetro Láser, Ref [12].

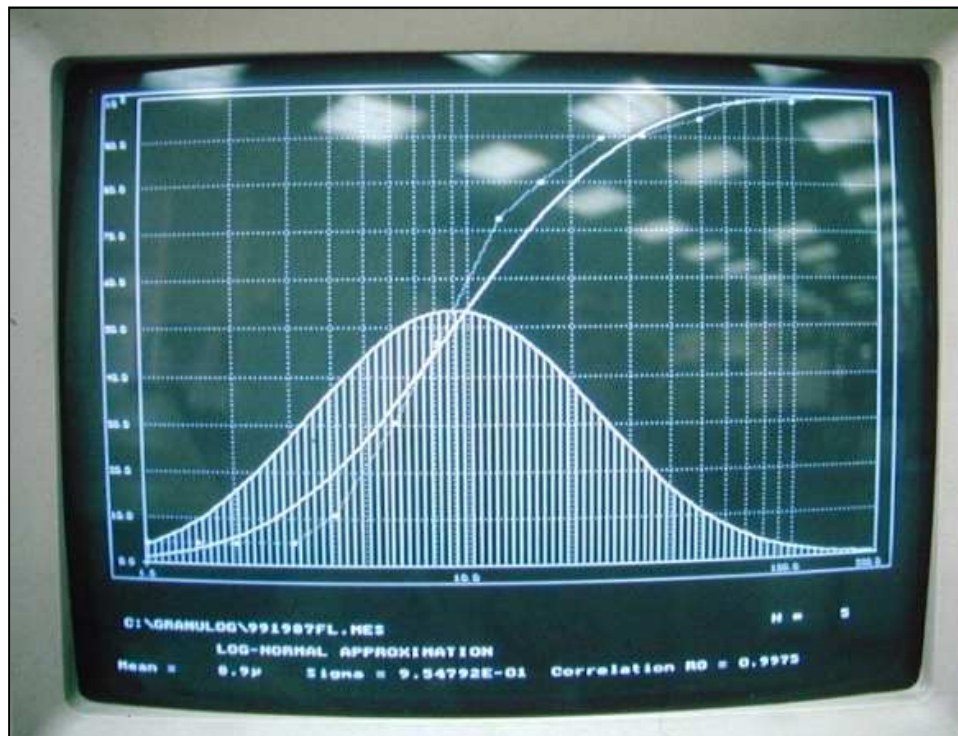


Figura 3-7: Granulometría de la emulsión obtenida por medio del Granulómetro Láser. Ref [12].

3.3.- Emulsiones Modificadas Monofásicas

El procedimiento es similar al de las emulsiones asfálticas convencionales, sin embargo, las emulsiones modificadas definidas como monofásicas, son aquellas donde el polímero modificador se mezcló previamente con el asfalto base, dando como resultado un asfalto modificado con polímero [4].

A continuación, se muestra un esquema

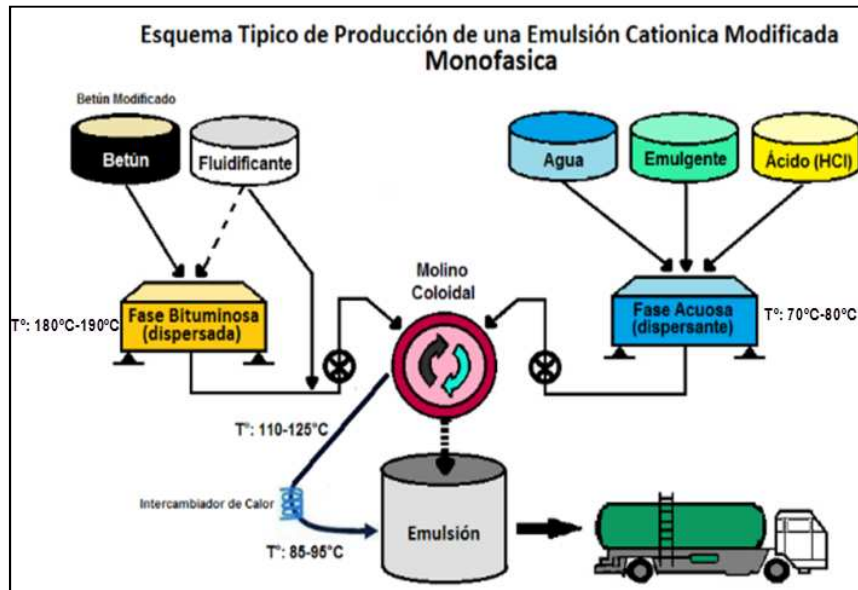


Figura 3-8: Esquema Proceso Productivo de Emulsión Asfáltica Monofásica, Ref [4].

El esquema mostrado en la Figura 3-8, es el que representa la típica forma de producción de una emulsión monofásica. Este tipo de emulsiones se logra incorporando el polímero directamente al asfalto, previo al proceso de emulsificación, lo que en síntesis es emplear en el proceso de emulsión un asfalto base ya modificado, con todas las características correspondientes a normas de asfaltos o ligantes modificados [6].

Una característica importante y crítica de éste proceso, es que la temperatura de la fase asfáltica llega a los 190°C , dado que el asfalto modificado necesita de una viscosidad adecuada que permita el correcto bombeo y emulsificación en el molino coloidal. También en este esquema, se observa un intercambiador de calor a la salida del molino coloidal, equipo indispensable y necesario para disminuir la temperatura de salida de la emulsión, evitando así la evaporación de la fase acuosa.

En las emulsiones modificadas monofásicas se ha observado que existen problemas de estabilidad y de separación de fases (quiebre de emulsión) asociadas al uso de polímeros modificadores sólidos en la modificación previa del asfalto base. Dichos polímeros, generalmente necesitan ser diluidos a elevadas temperaturas, dando como resultado un asfalto modificado altamente viscoso que posteriormente, en el proceso de emulsificación, debe ser sometido a altas temperaturas (Figura 3-8, $180-190^{\circ}\text{C}$), lo que conlleva a que el proceso de emulsiones monofásicas sea complejo y caro [4].

3.4.- Emulsiones Modificadas Bifásicas

El proceso productivo para fabricar emulsiones modificadas bifásicas se diferencia del anterior principalmente en la forma de la adición del polímero, ya que en este proceso el polímero se adiciona en la Fase Acuosa o Dispersante [4].

A continuación, se muestra el esquema de fabricación de emulsión bifásica.

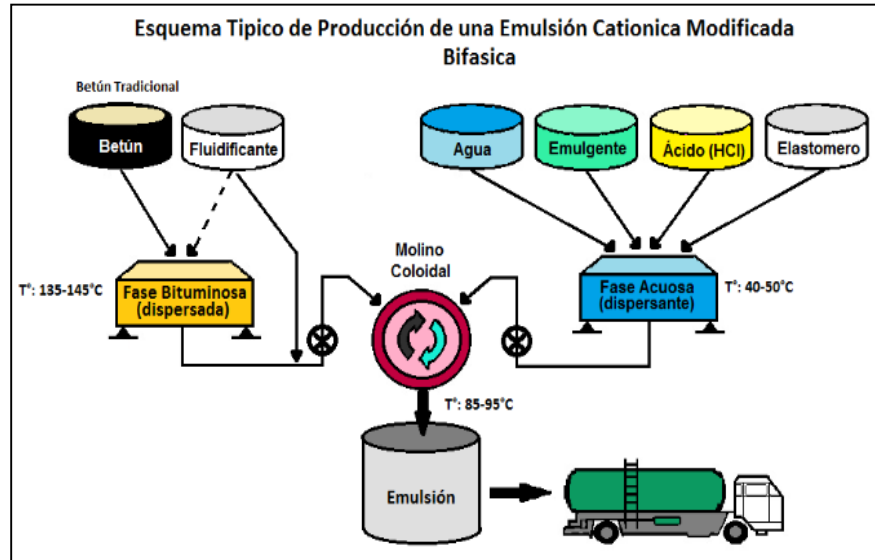


Figura 3-9: Esquema Proceso Productivo de Emulsión Asfáltica Bifásica, Ref [4].

Otra diferencia importante con respecto al proceso de producción monofásico, es la temperatura de fabricación en cada etapa, ya que se asemejan más a la producción de una emulsión tradicional.

El esquema indicado en la Figura 3-9, es uno de los principales procedimientos que sirven para obtener emulsiones asfálticas modificadas bifásicas.

A continuación, se indican otros métodos para el mezclado de los componentes en la producción de emulsiones bifásicas [6]:

- i. Todos los componentes de la emulsión: polímero, bitumen y la solución emulsionada (agua más emulsificador) se mezclan juntos en el molino coloidal.
- ii. El polímero modificador es agregado a la fase dispersante o acuosa, previo al proceso de mezcla con el asfalto o ligante base tradicional.
- iii. El polímero modificador es incorporado a la emulsión asfáltica final u obtenida en fábrica y luego añadido en la planta de fabricación de mezclas en frío o en equipos en terreno.

De los 3 métodos descritos, el más común y preponderante en el mercado mundial de emulsiones modificadas, es el segundo, donde la solución acuosa más un polímero diluido (Látex), se mezclan con el asfalto base tradicional, en el molino coloidal [6] (Figura 3-9).

Cabe destacar que la emulsión asfáltica bifásica es el tipo más usado para la producción de emulsiones asfálticas modificadas, dado que no existen antecedentes que demuestren un uso masivo de emulsiones monofásicas [6]. En el caso de Chile, la disponibilidad de emulsiones modificadas con polímeros corresponde a las emulsiones bifásicas.

3.5.- Concentración de Polímeros

La siguiente tabla resume los principales tipos de polímeros utilizados para modificar las emulsiones, junto con sus métodos de mezcla, concentración y aplicaciones [3].

Tabla 3-1: Polímeros modificadores mayormente utilizados, sus métodos de mezcla, dosis recomendadas y aplicaciones. Ref [3].

Tipo de polímero	Método de mezcla	Concentración de Polímero Sólido	Aplicación
SBR	Premezclar con agua más emulsificante	3-4% de asfalto residual	Lechadas asfálticas
SBR	Sin especificación	3% de asfalto residual	Varios
SBR (Botunal LS 198)	Premezclar con agua más emulsificante	2-6% de asfalto residual	Varios
SBR	Premezclar con agua más emulsificante	3% de asfalto residual	Microaglomerados
SBR, NRL, Neopreno, SBS, EVA	Premezclar latex con bitumen usando un mezclador de alta capacidad de corte	2% de asfalto residual	Microaglomerados
SBR, NRL	Premezclar con agua más emulsificante, mezcla en molino o agregar a mezcla final	3-5% de asfalto residual	Varios
SBS	Premezclar con asfalto	5-12% de asfalto residual	Varios
SBS, SB	Premezclar con asfalto	4% de peso de contenido de asfalto	Aplicaciones en frío
EVA	Premezclar con asfalto	5% de peso de contenido de asfalto	Varios
EVA/EVM	Premezclar con asfalto	6% de peso de contenido de asfalto	Aplicaciones en frío

Como se observa de la Tabla 3-1, premezclar el polímero con la solución acuosa (“sopa”, agua más emulsificante) es generalmente el método preferido para agregar el polímero. Por otro lado, a pesar de que para algunos polímeros se indique el método de premezclar el látex con el asfalto antes del proceso de emulsificación, esta acción genera problemas de estabilidad en la emulsión final [3].

4.- Normativa

El objetivo de éste capítulo es comparar los ensayos y requisitos expuestos en la normativa utilizada en la actualidad por la Comunidad Europea, con los requerimientos que entrega la normativa nacional, expuesta en el Volumen 5 del Manual de Carreteras, acerca de las características de las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros.

Para esto, primero se hará un breve resumen acerca de la normativa, europea y chilena, indicando las modificaciones más relevantes que han tenido a lo largo de los años de aplicación, con el fin de proponer cambios y poner al día la normativa nacional vigente desde 1997 a la fecha, aprovechando el avance europeo en esta tecnología.

4.1.- Normativa Española

4.1.1.- Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)

El PG-3 es el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes en España. Es el símil de nuestro Manual de Carreteras, que constituye un conjunto de instrucciones para el desarrollo de las obras de carreteras y puentes; y además contiene las condiciones técnicas normalizadas referentes a los materiales y a las unidades de obra [13].

Para el caso de la presente memoria, interesa estudiar los artículos relacionados con las emulsiones modificadas con polímeros, establecidos en el PG-3, los que se nombran a continuación:

- Artículo 216: Emulsiones Bituminosas Modificadas con Polímeros (Vigente hasta Octubre 2011).
- Artículo 214: Emulsiones Bituminosas (Vigente desde Noviembre 2014). Cabe mencionar que este artículo está basado en la norma UNE-EN 13808 "*Betunes y ligantes bituminosos – Especificaciones de las emulsiones bituminosas catiónicas*", que fue fruto de más de dos décadas de estudio con respecto a las emulsiones asfálticas, disponibles en Europa y realizado por el CEN [1].

Entre el período comprendido desde Octubre 2011 hasta Noviembre 2014, existió un documento, del Ministerio de Fomento Español, llamado "Orden Circular OC29/11", que sirvió como una transición y que permitió definir la normativa utilizada hoy en día.

A continuación se hará un breve resumen de los cambios que ha tenido la normativa española con respecto a la caracterización de las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros.

4.1.1.1.- Artículo 216: Emulsiones Asfálticas Modificadas con Polímeros (Vigente hasta Octubre 2011)

La siguiente tabla, indica las especificaciones para las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros, descrita en el Artículo 216 del PG-3. Cabe destacar que éste artículo sólo trataba lo referente acerca de las emulsiones modificadas con polímeros, ya que en paralelo existía otro artículo (213) que indicaba las especificaciones referentes a las emulsiones asfálticas convencionales.

Tabla 4-1: Especificaciones para Emulsiones Modificadas con Polímeros. Art 216. Ref [14]

CARACTERÍSTICAS	Unidad	Norma NLT	ECR-1-m		ECR-2-m		ECR-3-m		ECM-m		EAM-m		ECL-2-m		
			min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	
EMULSIÓN ORIGINAL															
Viscosidad Saybolt Furol	a 25°C	s	138	-	50	-	-	-	-	-	-	40	-	-	50
	a 50°C			-	-	20	-	40	-	20	-	-	-	-	-
Carga de partículas		194	positiva						positiva		positiva				
Contenido de agua (en volumen)	%	137	-	43	-	37	-	32	-	35	-	40	-	40	
Betún asfáltico residual	%	139	57	-	63	-	67	-	59	-	57	-	60	-	
Fluidificante por destilación	%	139	-	5	-	5	-	2	-	12	-	10	-	0	
Sedimentación (a los 7 días)	%	140	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	10	
Tamizado	%	142	≤ 0,10												
Estabilidad: Ensayo de mezcla con cemento	%	144	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	
RESIDUO POR EVAPORACIÓN A 163°C (NLT-147)															
Penetración (25°C; 100g; 5s)	0,1 mm	124	120 n ^o 50	200 n ^o 90	120 n ^o 50	200 n ^o 90	120 n ^o 50	200 n ^o 90	100	220	100	220	100 n ^o 50	150 n ^o 90	
Punto de Reblandecimiento anillo y bola	°C	125	45 n ^o 55	-	45 n ^o 55	-	45 n ^o 55	-	40	-	40	-	45 n ^o 55	-	
Ductilidad (5°C; 5 cm/min.)	cm	126	≥ 10												
Recuperación elástica (25°C; torsión)	%	329	≥ 12												

⁽¹⁾ Estas emulsiones con residuos por evaporación más duros, se denominarán con el tipo correspondiente, añadiendo la letra d a continuación del número 1, 2 ó 3 (ejemplo ECR-1d-m)

Como se aprecia de la Tabla 4-1, existían 6 tipos de emulsiones, las que de acuerdo con sus aplicaciones se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 4-2: Principales Aplicaciones de Emulsiones. Ref [15].

Naturaleza	Tipo	Denominación	Principales aplicaciones
Catiónicas "Normales"	Rápida	ECR-1	Riego de adherencia. Termoadherentes
		ECR-2	Riegos con gravillas
		ECR-3	
	Media	ECM	Mezclas abiertas en frío. Mezclas Templadas
	Lenta	ECL-1	Imprimación de materiales granulares
		ECL-2	Lechadas. Reciclados y Mezclas densas en frío (gravaemulsión)
Imprimación	ECI	Imprimación de materiales granulares	
Aniónicas "Normales"	Rápida	EAR-1	Riegos con gravillas y de penetración
	Media	EAM	Mezclas abiertas en frío
	Lenta	EAL-2	Mezclas densas en frío (gravaemulsión). Impermeabilización industrial
Modificadas	Rápida	ECR-1 m	Riegos de adherencia en PA, M y F . Termoadherentes
		ECR-2 m	Riegos con gravillas en condiciones difíciles
		ECR-3 m	
	Media	ECM m	Mezclas drenantes en frío. Mezclas Templadas
	Lenta	ECL-2 m	Microaglomerados en frío

A continuación, se hace una breve descripción de los ensayos utilizados para caracterizar las distintas emulsiones, según lo expuesto en el Artículo 216 (Vigente hasta Octubre 2011).

Ensayos sobre Emulsión Original

- a) **Viscosidad Saybolt Furol:** Ensayo realizado para determinar la fluidez de una emulsión a una temperatura dada. La fluidez es determinada según el tiempo que demora una cantidad normada de emulsión, al pasar por un agujero de dimensiones estándar.
- b) **Carga de Partículas:** Realizado para determinar la carga eléctrica, positiva o negativa, que poseen las partículas bituminosas en las emulsiones.
- c) **Contenido de Agua:** Ensayo realizado para determinar la cantidad de agua en la emulsión, por el método de destilación (norma NLT-139) a 260 °C, para las emulsiones convencionales, y por evaporación (norma NLT-147) a 163°C, para las emulsiones modificadas.
- d) **Betún Asfáltico Residual y Fluidificante por Destilación:** Ensayos que hasta Octubre del año 2011, se determinaban por el método de destilación (norma NLT-139). Estos ensayos servían para determinar cuantitativamente el residuo y los destilados oleosos de las emulsiones bituminosas tradicionales con fines de aceptación, evaluación, control o investigación.
- e) **Sedimentación (7 días):** Sirve para valorar que tan susceptible es la emulsión a sedimentar, midiendo la diferente concentración de betún que se produce al cabo de cierto tiempo, entre las partes superior e inferior del depósito que contiene la emulsión.

- f) **Tamizado:** Ensayo necesario para determinar la cantidad de productos bituminosos mal emulsionados que hay en la muestra.
- g) **Estabilidad (Mezcla con Cemento):** Este ensayo describe el procedimiento a seguir para determinar qué tan estable (desde el punto de vista de la homogeneidad) es la emulsión, utilizada en microaglomerados en frío, durante la etapa de mezclado con los agregados en el camión slurry. Solamente es válida para emulsiones de rotura lenta.

Ensayos sobre Emulsión Recuperada por Evaporación

La norma NLT-147 disponía de dos métodos para la recuperación del asfalto: el primero, utilizado sólo cuando se requería determinar el porcentaje de residuo de la emulsión. El segundo método, era utilizado cuando se quería realizar otros ensayos normalizados sobre el residuo asfáltico recuperado desde la emulsión. A continuación, se describe brevemente el proceso completo (ambos métodos).

Para recuperar el asfalto desde la emulsión, se coloca la muestra sobre un vaso precipitado con varilla, y éste se lleva a un horno para ser calentada a 163°C por dos horas. Luego la muestra se saca del horno, se agita y se vuelve a colocar en el horno para ser calentada una hora más a 163°C. Después de este tiempo, se retira el vaso precipitado, se deja enfriar a temperatura ambiente y se determina la masa del conjunto emulsión, vaso y varilla [16].

Luego de este procedimiento, el conjunto vuelve a ser introducido al horno hasta que el residuo asfáltico esté lo suficientemente fluido para pasar por el tamiz UNE 320 micrómetros, lo que requerirá de unos 15 a 30 min. Finalmente, el material que pasa por el tamiz se recoge directamente en los moldes adecuados de acuerdo a los ensayos previstos a realizar con el residuo [16].

A continuación, se describen los ensayos a realizar sobre el residuo asfáltico, indicados en la Tabla 4-1.

- h) **Penetración:** Permite determinar la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico.
- i) **Punto de Reblandecimiento o Ablandamiento:** Usado para determinar la temperatura a la cual el asfalto pasa de un estado viscoelástico a viscoso. Con este ensayo es posible determinar si el asfalto ensayado es propenso a sufrir deformaciones por ahuellamiento.
- j) **Ductilidad:** Necesario para determinar la ductilidad de los materiales bituminosos por medio de un ensayo de tracción. La ductilidad se define como la distancia máxima en centímetros que se estira la probeta hasta el instante de la rotura.
- k) **Recuperación Elástica por Torsión:** Determina el grado de elasticidad de un asfalto. Este ensayo se basa en colocar la muestra en un equipo de torsión, que permite hacer girar la muestra por un tiempo normado con el fin de determinar la recuperación elástica de la muestra debido a la fuerza aplicada.

4.1.1.2.- Artículo 214: Emulsiones Bituminosas y Orden Circular OC. 29/11

Antes de describir el artículo 214, Vigente en PG-3 desde Enero de 2015, se hará un breve resumen de la Orden Circular OC.29/11.

La Orden Circular 29/11, tuvo vigencia desde Octubre del 2011 hasta Diciembre de 2014. Fue un documento de actualización para los artículos relativos a conglomerados hidráulicos y asfaltos hidrocarbonados, dentro del PG-3 [17]. Esta actualización fue necesaria dado la incorporación de nuevos métodos de ensayos y por la necesidad de adaptación de la normativa española (NLT) a la normativa europea (EN), tanto de los asfaltos bituminosos como de lechadas. Es decir, la Orden Circular 29/11, fue un documento de transición que sirvió para que la normativa española NLT (vigente hasta Octubre 2011) fuera reemplazada por la nueva normativa europea, y que en España pasan a denominarse UNE-EN, e incorporadas oficialmente al PG-3 en Enero 2015.

Dentro de todos los artículos actualizados por la Orden Circular 29/11, sólo un artículo quedó pendiente, el Artículo 214, cuyas especificaciones fueron incorporadas en el Artículo 213, durante el tiempo de vigencia transitoria de la Orden Circular 29/11. Es decir, las especificaciones referentes a Emulsiones Bituminosas (modificadas o convencionales) estuvieron indicadas en el Artículo 213, entre Octubre 2011 y Diciembre 2014.

Finalmente, luego de todo ese tiempo de estudio, análisis, y puesta en marcha de nuevos métodos de ensayos y especificaciones indicadas en OC29/11, es repuesto y entra en vigencia en el PG-3, el *Artículo 214: Emulsiones Bituminosas*, referente a las especificaciones de las emulsiones asfálticas catiónicas convencionales y modificadas. Este artículo es el que rige hoy en día.

Las siguientes tablas indican las especificaciones para las emulsiones asfálticas catiónicas modificadas referentes a este artículo.

Tabla 4-3: Especificaciones de las Emulsiones Asfálticas Catiónicas Modificadas, Art. 214 PG-3. Ref [18].

DENOMINACIÓN UNE-EN 13808			C60BP3 ADH	C60BP3 TER	C60BP4 MIC
CARACTERÍSTICAS	UNE-EN	UNIDAD	ENSAYOS SOBRE EMULSIÓN ORIGINAL		
Índice de rotura	13075-1		70-155 ⁽¹⁾ Clase 3	70-155 ⁽³⁾ Clase 3	110-195 ⁽⁴⁾ Clase 4
Contenido de ligante (por contenido de agua)	1428	%	58-62 Clase 6	58-62 Clase 6	58-62 Clase 6
Contenido en fluidificante por destilación	1431	%	≤ 2,0 Clase 2	≤ 2,0 Clase 2	≤ 2,0 Clase 2
Tiempo de fluencia (2 mm, 40 °C)	12846-1	s	40-130 ⁽²⁾ Clase 4	40-130 ⁽²⁾ Clase 4	15-70 ⁽⁵⁾ Clase 3
Residuo de tamizado (por tamiz 0,5 mm)	1429	%	≤ 0,1 Clase 2	≤ 0,1 Clase 2	≤ 0,1 Clase 2
Tendencia a la sedimentación (7 d)	12847	%	≤ 10 Clase 3	≤ 10 Clase 3	≤ 10 Clase 3
Adhesividad	13614	%	≥ 90 Clase 3	≥ 90 Clase 3	≥ 90 Clase 3

⁽¹⁾ Con tiempo frío se recomienda un índice de rotura <110 (Clase 2). En este caso, la emulsión se denominará C60BP2 ADH.

⁽²⁾ Cuando la dotación sea más baja, se podrá emplear un tiempo de fluencia de 15-70 s (Clase 3).

⁽³⁾ Con tiempo frío se recomienda un índice de rotura <110 (Clase 2). En este caso, la emulsión se denominará C60BP2 TER.

⁽⁴⁾ Con temperaturas altas y/o áridos muy reactivos, se recomienda un índice de rotura >170 (Clase 5) por su mayor estabilidad. En este caso, la emulsión se denominará C60BP5 MIC.

⁽⁵⁾ Se podrá emplear un tiempo de fluencia de 40-130 s (Clase 4) especialmente cuando los áridos presenten una humedad elevada.

Tabla 4-4: Especificaciones Asfalto Residual, Art. 214 PG-3. Ref [18].

DENOMINACIÓN UNE-EN 13808			C60BP3 ADH	C60BP3 TER	C60BP4 MIC
CARACTERÍSTICAS	UNE-EN	UNIDAD	ENSAYOS SOBRE EL LIGANTE RESIDUAL		
Residuo por evaporación (UNE-EN 13074-1)					
Penetración 25 °C	1426	0,1 mm	≤ 330 ⁽⁶⁾ Clase 7	≤ 50 ⁽⁷⁾ Clase 2	≤ 100 Clase 3
Punto de reblandecimiento	1427	°C	≥ 35 ⁽⁶⁾ Clase 8	≥ 55 Clase 3	≥ 50 Clase 4
Cohesión por el ensayo del péndulo	13588	J/cm ²	≥ 0,5 Clase 6	≥ 0,5 Clase 6	≥ 0,5 Clase 6
Recuperación elástica, 25 °C	13398	%	DV Clase 1	≥ 50 Clase 5	≥ 50 Clase 5
Residuo por evaporación (UNE-EN 13074-1), seguido de estabilización (UNE-EN 13074-2)					
Penetración 25 °C	1426	0,1 mm	≤ 220 ⁽⁶⁾ Clase 5	≤ 50 Clase 2	≤ 100 Clase 3
Punto de reblandecimiento	1427	°C	≥ 43 ⁽⁶⁾ Clase 6	≥ 55 Clase 3	≥ 50 Clase 4
Cohesión por el ensayo del péndulo	13588	J/cm ²	≥ 0,5 Clase 6	≥ 0,5 Clase 6	≥ 0,5 Clase 6
Recuperación elástica, 25 °C	13398	%	≥ 50 Clase 5	DV Clase 1	DV Clase 1

DV: Valor declarado por el fabricante.

⁽⁶⁾ Para emulsiones fabricadas con betunes más duros, se admite una penetración ≤150 décimas de milímetro (Clase 4) y un punto de reblandecimiento ≥43 °C (Clase 6). Tras evaporación y seguido de estabilización, se admite una penetración ≤100 décimas de milímetro (Clase 3) y un punto de reblandecimiento ≥50 °C (Clase 4).

⁽⁷⁾ Con temperatura ambiente alta es aconsejable emplear residuos de penetración <30 décimas de milímetro (Clase 1).

Como se observa, en las nuevas especificaciones las emulsiones modificadas se clasifican en 3 tipos (anteriormente eran 6, Tabla 4-1), los que se indican en la siguiente tabla.

Tabla 4-5: Denominación y aplicación para emulsiones modificadas. Artículo 214. Ref [18].

DENOMINACIÓN UNE EN 13808	APLICACIÓN
C60BP4 ADH C60BP3 ADH	Riegos de Adherencia
C60BP4 TER C60BP3 TER	Riegos de Adherencia (termoadherente)
C60BP5 MIC C60BP6 MIC	Microaglomerados en frío

Las emulsiones utilizadas para riego de adherencia y microaglomerado, se diferencian principalmente en la velocidad de quiebre que ésta tenga. Las emulsiones utilizadas para riego de adherencia deben ser de quiebre rápido, para permitir que el camión transportador de la mezcla, que será aplicada sobre el riego, pase por sobre éste sin levantarlo. Mientras que las emulsiones utilizadas para los microaglomerados en frío (MAF) deben ser de quiebre controlado o lenta (aprox. 2 a 3 minutos), lo que permite un mezclado óptimo de la emulsión en el camión [19].

A continuación, se hace una breve descripción de los ensayos utilizados para caracterizar las distintas emulsiones, según lo expuesto en la Tabla 4-3.

Ensayos sobre Emulsión Original

- a) **Índice de rotura:** Nuevo ensayo utilizado para determinar la cantidad de filler que es necesario agregar a una cierta cantidad de emulsión para que ésta quiebre. Indirectamente en presencia de este índice, se infiere que las emulsiones pueden clasificarse como rápidas, media o lentas, dependiendo de la cantidad de filler adicionada a la emulsión. El índice de rotura no posee unidad de medida (es adimensional) y se representa con un número en escala de 1 a 7.
- b) **Contenido de ligante (por contenido de agua):** Ensayo que permite determinar el contenido de agua, por porcentaje (en peso) con respecto al peso de la emulsión total, para luego calcular el contenido de ligante, restando al peso de la emulsión el peso del agua determinado.
- c) **Contenido de fluidificante por destilación:** Ensayo que permite calcular que porcentaje del volumen total de la emulsión corresponde a fluidificante.
- d) **Tiempo de fluencia (2mm, 40°C):** Nuevo ensayo que permite determinar la viscosidad de las emulsiones, midiendo el tiempo que demora en pasar a través de un agujero normado cierta cantidad de emulsión. Para éste ensayo es necesario el uso de un Viscosímetro STV (Standard Tar Viscosimeter), utilizado originalmente para medir la viscosidad de alquitranes (normativa original británica).

- e) **Residuo de tamizado (por tamiz, 0.5 mm):** Ensayo que permite determinar qué porcentaje (en peso) de la emulsión queda retenido en un tamiz de tamaño específico.
- f) **Tendencia a la sedimentación (7 días):** Ensayo utilizado para determinar la capacidad de sedimentación de la emulsión, la que permanece cerrada en probetas por un tiempo y a una temperatura específica. Luego se determina el contenido de agua de las capas superior e inferior (como porcentaje en peso de la emulsión), siendo la sedimentación la diferencia entre estas cantidades.
- g) **Adhesividad:** Ensayo que determina la capacidad de adhesión de la emulsión, midiendo el porcentaje (de manera visual) de la superficie de un árido que está cubierta con emulsión y sumergido en agua.

Con respecto a la obtención del residuo asfáltico, de acuerdo con el artículo 214, se oficializa una nueva metodología para recuperar el residuo desde una emulsión asfáltica modificada. Además, aparecen dos nuevos ensayos para aplicar sobre el residuo asfáltico recuperado.

Ensayos para la Recuperación del Residuo Asfáltico.

UNE – EN 13074 - 1: Recuperación del ligante de las emulsiones bituminosas o de los ligantes bituminosos fluidificados o fluxados/ Parte 1: Recuperación por Evaporación.

Este ensayo describe el método para recuperar el ligante, por medio de evaporación, de las emulsiones bituminosas o de betunes fluidificados o fluxados después de su acondicionamiento a temperatura ambiente (24°C) por 24hrs, seguido de otro período en horno a 50°C por 24hrs.

UNE – EN 13074 - 2: Recuperación del ligante de las emulsiones bituminosas o de los ligantes bituminosos fluidificados o fluxados / Parte 2: Estabilización después de la recuperación por evaporación.

Este ensayo explica que, inmediatamente luego del proceso de recuperación por evaporación (24hrs a 24°C más 24hrs en horno a 50°C), la emulsión debe estabilizarse en horno a 85°C por 24 hrs adicionales. Los resultados de este ensayo corresponderían a las características del residuo asfáltico de la emulsión modificada, a más de un año en el pavimento en servicio, tratado con un microaglomerado asfáltico en frío (MAF) [20].

Ensayos sobre residuo recuperado

- a) **Cohesión por el ensayo del péndulo:** Este ensayo se realiza sobre el residuo asfáltico de las emulsiones modificadas, y se basa en la medida de la energía absorbida por un ligante, que une el conjunto de ensayo constituido por un soporte y un cubo metálico de 10mm de lado, que es impactado por el brazo del péndulo [21].

Este ensayo permite medir la cohesión de los asfaltos residuales recuperados desde las emulsiones asfálticas modificadas con polímero, utilizando los métodos descritos anteriormente.

Para su realización es necesario contar con un Péndulo de Cohesión (Vialit), como el que se muestra en la siguiente figura.



Figura 4-1: Equipo Péndulo Vialit Cooper, Ref [21].

Las medidas de cohesión se realizan en un rango de temperaturas, que se determinan en función de la consistencia de cada residuo, de modo que para cada ligante residual se ensayan 6 probetas por temperatura, hasta un total de ocho temperaturas diferentes [21].

El ensayo se inicia con el péndulo en su posición de partida, según lo que indica la norma respectiva. Luego, al soltarse el péndulo, éste golpea al cubo pegado al soporte, soltándolo y registrando un ángulo final. Cada uno de los ángulos se anota y se convierten a un valor de energía, según las ecuaciones indicadas en la norma de ensayo. Luego se determina la cohesión como la diferencia entre dos medidas realizadas, una con y otra sin ligante, dividiendo por la superficie de rotura (1 cm^2). El resultado se expresa en $[\text{J}/\text{cm}^2]$ [21].

Luego los resultados son presentados en el siguiente gráfico

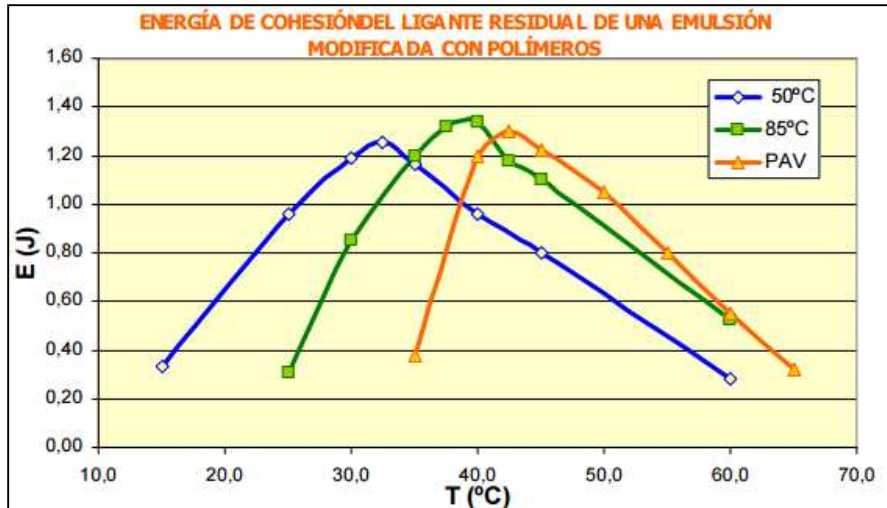


Figura 4-2: Gráfico Energía de Cohesión v/s Temperatura, Ref [21].

En este caso el residuo es recuperado por tres métodos:

- a. Por evaporación, 24hrs a temperatura ambiente más 24hrs. en horno a 50°C.
- b. Por estabilización, la muestra recuperada por evaporación (a), se ingresa a un horno a 85°C por 24hrs.
- c. Por PAV* (Pressure Aging Vessel), la muestra recuperada por evaporación y luego estabilizada (b) se ingresa a un horno a 85°C por 65hrs a una presión de 2.1MPa.

Lo que se aprecia de la figura anterior es que el residuo recuperado por evaporación alcanza una energía de cohesión peak de 1.25[J] a una temperatura de ensayo de 32.5°C. Por otro lado, se aprecia que el asfalto envejecido (recuperado por estabilización y PAV) requiere de una mayor temperatura de ensayo para alcanzar la máxima energía de cohesión, a causa de su mayor consistencia [21].

En resumen, este ensayo mide que tan resistente es el asfalto recuperado frente a fuerzas de corte (acción del péndulo), según el método de recuperación empleado.

***Nota: El método de recuperación PAV (Pressure Aging Vessel) fue inicialmente considerado por la Comisión Europea de Normalización (CEN) en la norma UNE EN 13808, publicada como obligatoria el año 2010. Después de 5 años de vigencia, éste método no fue considerado en la actualización del año 2015.**

- b) **Recuperación elástica con ductilómetro:** Este ensayo permite medir la capacidad de recuperación que posee el residuo asfáltico de la emulsión modificada. Este ensayo se basa en sumergir una probeta de betún normada en agua a una temperatura determinada y estirla a una velocidad especificada. Luego, el hilo producido por este alargamiento se corta a los 20[cm] y luego de un tiempo determinado, se mide la disminución de longitud de los medios-hilos [22].

4.1.1.3.- Diferencias entre Artículo 216 y Artículo 214

A continuación, se resumen las diferencias más destacables, entre la antigua normativa española (normas NLT) y la actual normativa (UNE EN).

Estos cambios se debieron a la necesidad de crear una normativa armonizada y que sea válida para todos los países de la Comunidad Europea, con el fin de unificar los ensayos que permitan caracterizar a las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros [23].

1. En el artículo 214, los ensayos que caracterizan a las emulsiones asfálticas modificadas, se rigen por la normativa europea EN, válida para todos los países miembros de la Comunidad Europea. Mientras que anteriormente, en el artículo 216, los ensayos estaban determinados según la normativa NLT, que en su momento era válida sólo para España.
2. Dentro de los ensayos para la caracterización de la emulsión, se reemplaza el método *Viscosidad Saybolt-Furol* por el método *Tiempo de Fluencia* (Método STV), en lo que respecta a la obtención de la viscosidad de la emulsión.
3. Se agrega el ensayo *Índice de Rotura*, utilizado para determinar la cantidad de filler necesaria que se debe agregar a una emulsión para que ésta rompa. Con este ensayo se infiere que las emulsiones pueden clasificarse como rápidas, media o lentas, dependiendo de la cantidad de filler adicionada a la emulsión, siendo emulsiones rápidas las que necesiten menor cantidad de filler para romper y emulsiones lentas, las que necesiten mayor cantidad de filler.
En la nueva normativa, la viscosidad y tendencia a la rotura, son determinadas por dos ensayos diferentes. Mientras que, en la normativa anterior, estas características eran obtenidas por un mismo ensayo (Viscosidad Saybolt-Furol).
4. Con respecto a los ensayos a aplicar sobre el residuo de la emulsión, es necesario destacar que tanto la consistencia como la cohesión del asfalto residual, son propiedades importantes al momento de caracterizar una emulsión asfáltica modificada. Es por este motivo que se agrega como ensayo a la nueva normativa europea, la obtención de la Cohesión por medio del Ensayo del Péndulo (Vialit) [21].
5. Se elimina la recuperación del residuo de las emulsiones modificadas mediante el método de evaporación a 163°C (NLT –147, vigente hasta Oct.2011) y se reemplaza por nuevos procedimientos para la obtención del residuo, siempre por evaporación, pero a baja temperatura, homologando la temperatura del pavimento en servicio y seguido por un segundo ensayo, denominado de estabilización, que simula el comportamiento del residuo asfáltico de la emulsión a más de un año en servicio [21]. Estos nuevos métodos se describen en las normas UNE 13074-1 y UNE 13074-2, respectivamente. Este es uno de los cambios más significativos, ya que para la obtención de un residuo asfalto-polímero que sea lo más representativo a lo que ocurre en terreno y su real modificación, es necesario recuperar el asfalto de la emulsión someténdola a una cantidad de calentamiento lo más cercano a las altas temperaturas que se dan en el pavimento en servicio (50°C-60°C). Esto, debido a que someter una emulsión asfáltica modificada con polímero a altas temperaturas (163°C) dan como

resultado un residuo asfalto-polímero alterado en relación a las condiciones a que está expuesta la emulsión en terreno [24].

6. Una diferencia importante a destacar, es que la nueva normativa para la obtención del residuo asfáltico (UNE 13074 – 1 y UNE 13074 – 2) establece, con meticulosidad, el cálculo de la masa requerida de emulsión para llevar a cabo los ensayos posteriores. Para la determinación de dicha masa, es necesario primero calcular la cantidad exacta asfalto (en porcentaje) que posee la emulsión. Esto se realiza con la norma *UNE 1428: Betunes y ligantes bituminosos – Determinación del contenido en agua en las emulsiones bituminosas. Método de destilación azeotrópica* [25], y su valor es importante debido a que permite respetar el espesor exacto del residuo asfáltico de emulsión a ensayar (1 mm), valor que, de ser determinado erróneamente, influirá directamente en las características del residuo obtenido, pudiendo distorsionar los resultados en relación a lo especificado por la norma.

4.2.- Normativa Nacional

Al igual que en la sección anterior, se realizará un breve resumen acerca de los principales cambios que ha tenido la normativa nacional con respecto a las especificaciones que permiten caracterizar las emulsiones bituminosas modificadas con polímeros.

4.2.1.- Manual de Carreteras: Tratamientos Superficiales

En un inicio, las emulsiones bituminosas sólo eran utilizadas para aplicaciones de Sellos Bituminosos, puesto que según las especificaciones incluidas en el Volumen 5 del Manual de Carreteras (Junio 1997) se indicaban sólo dos tipos de emulsiones modificadas, las de quiebre Rápido y Lento, siendo las primeras las más utilizadas para la aplicación de Sellos Bituminosos (Tratamiento superficial simple TS, sobre pavimentos asfálticos en servicio).

A continuación, se contrastan las especificaciones para las emulsiones bituminosas modificadas con polímero en la aplicación de Sellos Bituminosos, indicadas en las versiones de Junio 1997 y de Junio 2015 del Manual de Carreteras.

Tabla 4-6: Emulsiones Asfálticas Modificadas con Elastómero, vol. 5 Manual de Carreteras 1997. Sellos Bituminosos.

ENSAYE	EXIGENCIA		METODO
	QUIEBRE RAPIDO	QUIEBRE LENTO	
Viscosidad 50°C, sSF	50 - 250	20 - 100	LNV 39
Sedimentación 7 días, %	Máx. 5	Máx. 5	LNV 42
Carga de Partícula	(Catiónica o aniónica)	(Catiónica o aniónica)	LNV 42
Residuo por Evaporación, %	Mín. 65	Mín. 57	LNV (1)
Ensaye en el Residuo:			
Penetración, 25°, 100 g, 5 seg., 0,1 mm	50 - 150	50 - 150	LNV 34
Punto de Ablandamiento, °C	Mín. 50	Mín. 53	LNV 48
Recuperación Elástica, 13°C, %	Mín. 50	Mín. 50	DIN 52013
Índice de Fraass, °C	Máx. -17	Máx. -17	NLT 182
Índice de Penetración	Mín. +1	Mín. +1	
Ensaye Placa Vialit, %	Mín. 90	---	NLT 313

(1) Norma LNV, Destilación por Evaporación:

El residuo se obtiene en horno a $T=110^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, hasta masa constante llegando a una temperatura máxima de 120°C durante los últimos 15 minutos. Para la evaporación se usa una bandeja plana, con la altura de la emulsión de 1 cm.

Tabla 4-7: Requerimientos para Emulsiones Asfálticas Modificadas con Polímeros, vol. 5 Manual de Carreteras 2015. Ref [8]. Sellos Bituminosos

ENSAYE	ESPECIFICACIÓN		MÉTODO
	Quiebre rápido	Quiebre lento	
Viscosidad Saybolt, 25°C, SFs		20 - 100	8.302.12
Viscosidad Saybolt, 50°C, SFs	50 - 250		8.302.12
Sedimentación, 7 días, %	Máx. 5	Máx. 5	8.302.5
Carga de Partícula	Catiónica o aniónica	Catiónica o aniónica	8.302.5
Residuo por Evaporación, %	Min 65	Min 57	(*)
Ensayes al residuo:			
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	50 - 150	50 - 150	8.302.3
Punto de Ablandamiento, °C	Mín 50	Mín 53	8.302.16
Recuperación Elástica a 13 °C, %	Mín 50	Mín 50	8.302.19
Índice de Penetración	Mín +1	Mín +1	8.302.21
Ensaye Placa Vialit, %	Mín 90	--	8.302.20

(*) Destilación por Evaporación. El residuo se obtiene en horno a $T=110^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$, hasta masa constante, llegando a una temperatura máxima de 120°C durante los últimos 15 minutos. Para la evaporación se usa una bandeja plana, con emulsión de 1 cm de altura.

Como se puede apreciar, desde 1997 a la fecha, las especificaciones para emulsiones modificadas con polímeros a emplearse en tratamientos superficiales (Sellos Bituminosos), prácticamente no han variado.

Sin embargo, cabe hacer notar que, en las especificaciones vigentes del Manual de Carreteras, versión 2015, se eliminó un parámetro importante como lo es el Índice Fraass, válido para caracterizar la resistencia de la emulsión frente a bajas temperaturas.

4.2.2.- Manual de Carreteras: Microaglomerados Asfálticos en Frío (MAF).

En la versión del Manual de Carreteras Vol.5, actualizado en Diciembre de 2003 se incorporan por primera vez las especificaciones para emulsiones de quiebre controlado modificadas con polímeros, a emplearse en Microaglomerados Asfálticos en Frío (MAF).

Las siguientes tablas indican la evolución que han tenido los requisitos para las emulsiones modificadas con polímeros descritos en las diferentes versiones del Manual de Carreteras (Versiones 2003, 2005 y 2015).

Tabla 4-8: Requisitos para Emulsiones de Quiebre Controlado Modificadas con Polímeros, Vol. 5 Manual de Carreteras 2003.

ENSAYE	EXIGENCIA	METODO	
Viscosidad Saybolt Furol (25°C)	20 – 50 Ssf	8.302.12	(LNV 39)
Sedimentación (7 días)	Máximo 5%	8.302.5	(LNV 42)
Tamizado	Máximo 0,1%	8.302.5	(LNV 42)
Carga de Partícula	Positiva / Negativa	8.302.5	(LNV 42)
Determinación del Residuo Asfáltico	Mínimo 62%		
RESIDUO ASFALTICO		8.302.24	
Viscosidad Brookfield (60°C)	Informar	8.302.3	
Penetración, 25°C, 100g, 5 s, 0,1mm	40 – 90	8.302.16	(LNV 34)
Punto de Ablandamiento	Informar	8.302.8	(LNV 48)
Ductilidad 25°C)	Mínimo 40 cm	8.302.17	(LNV 35)
Indice de Fraass	Máximo –17°C	NLT 329/91	(LNV 110)
Recuperación Elástica por Torsión	Mínimo 20%		

(1) Destilación por Evaporación. El residuo se obtiene en horno a $T=110^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$, hasta masa constante llegando a una temperatura máxima de 120°C durante los últimos 15 minutos. Para la evaporación se usa una bandeja plana, con la altura de la emulsión de 1 cm.

Tabla 4-9: Requisitos para Emulsiones de Quiebre Controlado Modificadas con Polímeros, Vol. 5 Manual de Carreteras 2005.

ENSAYE	EXIGENCIA	METODO	
Viscosidad Saybolt Furol (25°C)	20 – 50 sSF	8.302.12	(LNV 39)
Sedimentación (7 días)	Máximo 5%	8.302.5	(LNV 42)
Tamizado	Máximo 0.1%	8.302.5	(LNV 42)
Carga de Partícula	Positiva / Negativa	8.302.5	(LNV 42)
Determinación del Residuo Asfáltico	Mínimo 62%	(1)	
RESIDUO ASFALTICO			
Viscosidad Brookfiel (60°C)	Informar	8.302.24	
Penetración, 25°C, 100g, 5 s, 0.1 mm	40 – 90	8.302.3	(LNV 34)
Punto de Ablandamiento	Informar	8.302.16	(LNV 48)
Ductilidad (25°C)	Mínimo 40 cm	8.302.8	(LNV 35)
Indice de Fraass	Máximo –17°C	8.302.17	(NLT 182)
Recuperación Elástica por Torsión (%)	Informar	NLT 329/91	
Recuperación Elástica, 13°C, 20 cm, 1h	Mínimo 20%	8.302.19	

(1) Destilación por Evaporación. El residuo se obtiene en horno a $T = 110^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$, hasta masa constante llegando a una temperatura máxima de 120°C durante los últimos 15 minutos. Para la evaporación se usa una bandeja plana, con la altura de la emulsión de 1 cm.

Tabla 4-10: Requisitos para Emulsiones de Quiebre Controlado Modificadas con Polímeros, Vol. 5 Manual de Carreteras 2015.Ref [8].

ENSAYE	EXIGENCIA	MÉTODO
Viscosidad Saybolt Furol (25°C)	20 - 50 sSF	8.302.12
Sedimentación (7 días)	Máximo 5%	8.302.5
Tamizado	Máximo 0,1 %	8.302.5
Carga de partícula	Positiva / Negativa	8.302.5
Determinación del Residuo Asfáltico	Mínimo 62%	(*)
RESIDUO ASFÁLTICO		
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	40 - 90	8.302.3
Punto de Ablandamiento	Informar	8.302.16
Ductilidad (25°C)	Mínimo 40 cm	8.302.8
Índice de Fraass	Máximo -17°C	8.302.17
Recuperación Elástica por Torsión	Mín 20%	NLT 329/91

(*) Destilación por evaporación. El residuo se obtiene en horno a $T = 110^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$, hasta masa constante, llegando a una temperatura máxima de 120°C durante los últimos 15 minutos. Para la evaporación se usa una bandeja plana, con la altura de la emulsión de 1 cm.

Se observa que en la Tabla 4-8 (especificaciones para microaglomerados en frío, año 2003), existe un error de escritura al indicar el numeral del método de "Determinación del residuo Asfáltico" (8.302.24), situación que se corrige en la Tabla 4-9 (especificaciones para microaglomerados en frío, año 2005).

Ahora bien, observando la Tabla 4-9 y la Tabla 4-10, se aprecia que prácticamente no hay cambios relevantes, salvo que en la Tabla 4-10 (requisitos para microaglomerados en frío, año 2015) se eliminan dos ensayos a realizar sobre el residuo asfáltico. Desaparece el ensayo de Viscosidad Brookfield y Recuperación Elástica (13°C , 20cm, 1hr).

Por otro lado, si se hace una rápida comparación con las especificaciones para emulsiones modificadas con polímeros, indicadas en el Artículo 216 del PG-3 (vigentes hasta Octubre del año 2011, previo al ingreso del documento OC29/2011), se aprecia que la mayoría de los ensayos descritos en dicho artículo, son la base de los actuales requerimientos establecidos en la normativa nacional. Sólo existe diferencia con respecto a la obtención del residuo asfáltico de la emulsión.

En la normativa española NLT-147 (vigente hasta Octubre 2011), el residuo se obtenía por evaporación a 163°C , mientras que, en el caso de la normativa nacional, no existe una norma o método LNV, que describa explícitamente la obtención del residuo. Solo existe la recomendación de efectuar la recuperación del residuo, también por evaporación, en horno a 110°C hasta masa constante, llegando a una temperatura máxima de 120°C en los últimos 15 minutos. Para la evaporación se usa una bandeja plana, con una emulsión a ensayar de espesor 1cm (ver indicación bajo Tablas 4-6, 4-7, 4-8, 4-9 y 4-10 de esta memoria).

4.3.- Obtención del residuo asfáltico de las emulsiones modificadas

La incorporación de polímeros en las emulsiones asfálticas, vienen derivadas preferentemente del avance y desarrollo en Europa con el uso de los microaglomerados asfálticos en frío (MAF o Microsurfacing), empleados en la conservación de pavimentos de alto tráfico. Es así como los primeros tratamientos de este tipo se dan en Francia con el producto Seal Gum (1978), en Alemania con el Ralumac (1979) y en España con Macroseal (1982) [26]. Todos en base a emulsiones modificadas con polímeros.

Como consecuencia de lo anterior y al tener cada país su propia normativa para la elaboración de emulsiones modificadas con polímeros, es que nace en 1990 en la Comisión Europea de Normalización (CEN) el Comité Técnico TC19/SC1/WG3 [1], con el objeto de armonizar una norma para toda la Comunidad Europea, con el desafío de proponer una metodología única para lograr el residuo asfáltico en las emulsiones modificadas con polímeros. Esto se logra en 1999, con la formulación de la Norma pr. EN 13808 (norma preliminar a ser consensuada por la Comunidad Europea). La norma finalmente fue publicada en 2005, pero no fue hasta el año 2011 el obligado cumplimiento, al implementarse el Mercado CE en toda la comunidad europea [1]. En España, el Ministerio de Fomento, regulariza este paso en Octubre de 2011, con la oficialización de la Orden Circular OC29/11.

La normativa EN, en relación a la obtención del residuo asfáltico de las emulsiones modificadas con polímeros, queda oficializada al cabo de 20 años de estudio.

El consenso logrado tiene como fundamento que el residuo asfáltico de la emulsión modificada con polímero, sea lo más real y representativo de lo que ocurre en terreno [27], donde la superficie del pavimento en servicio está expuesta a temperaturas del orden de los 50°C a 60°C.

El uso de las técnicas tradicionales de obtención del residuo asfáltico por evaporación (sobre 100°C) o destilación (177°C) a altas temperaturas, dañan y/o alteran los polímeros usados en la fabricación de la emulsión modificada [24].

Por lo anterior, la obtención de este residuo queda plasmado por ensayos con temperaturas del orden de los 50°C (normas UNE EN 13074-1) y 85°C (norma UNE EN 13074-2), lo que deja, especialmente en España, de lado la normativa NLT-147 que indicaba la obtención del residuo por evaporación a 163°C.

Se han desarrollado, durante las dos décadas de estudio y consenso, numerosos procedimientos o métodos de ensayo para verificar la validez del residuo asfáltico, con respecto a una emulsión con un betún asfáltico patrón. Es así como al tener una emulsión monofásica, con betún asfáltico previamente modificado, la caracterización del residuo asfáltico de esta emulsión, debiera ser lo más cercano posible al betún asfáltico original modificado [24]. Entre los ensayos estudiados para la recuperación del asfalto desde emulsiones modificadas con polímeros, se pueden citar:

- Congelación rápida de la muestra, seguida de una destilación a vacío del residuo a baja temperatura, mediante Rotavapor.
- Evaporación a 163°C (Método NLT-147, normativa oficial española).

- Evaporación en dos fases: primero a 118°C y posteriormente a 138°C (método del Estado de California).
- Evaporación a 50°C durante 15 días (método AFNOR, T 66-031 francés).
- Destilación a 177°C (ASTM D6997).

Ahora bien, en el VI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, CILA, celebrado en Santiago de Chile en 1991 [24], a ocho años de la incorporación en el mercado español de las emulsiones modificadas con polímeros, se presentaron los resultados de una investigación hecha con los cuatro primeros ensayos indicados anteriormente, realizada por los investigadores españoles R. Iborra y F. Guzmán (PROBISA, España) [28] (A esa fecha no estaba disponible en Europa el ensayo americano de Destilación ASTM D6997).

Básicamente, los investigadores mencionados, mostraron en esa oportunidad, los resultados de la obtención de los residuos asfálticos de emulsiones modificadas con polímeros. Para esa investigación, PROBISA (España), elaboró una emulsión asfáltica modificada con polímeros del tipo monofásica (betún asfáltico modificado previamente y luego emulsionado) [24].

Esta investigación se realizó con el objetivo de poder comparar los resultados de caracterización del betún original (patrón), versus el residuo obtenido mediante los cuatro métodos mencionados, a través de los ensayos de Punto de Reblandecimiento (R&B) y Penetración [24].

En la siguiente Figura se muestran los resultados de la investigación [24].

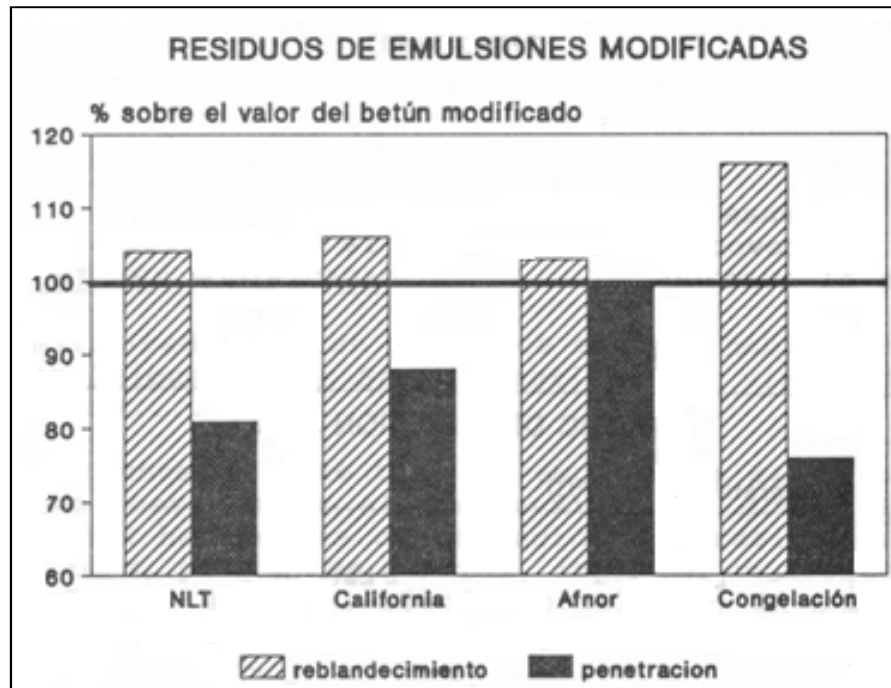


Figura 4-3: Gráfico comparación de residuos de emulsiones modificadas. Ref [24].

Como resultado de la investigación realizada en 1991, se observa que el método que entregaba un residuo asfáltico más cercano o similar al asfalto original modificado, y posteriormente emulsionado, es el AFNOR T 66-031 [20] o método francés. De esta investigación, se concluyó que los procedimientos de recuperación del asfalto residual debían ir por la línea de ensayos a baja temperatura (50°C) y lo más significativo a esa fecha, es que las películas de emulsión a ensayar debían tener un espesor de 1mm, al evaporarse el contenido de agua de la emulsión [20].

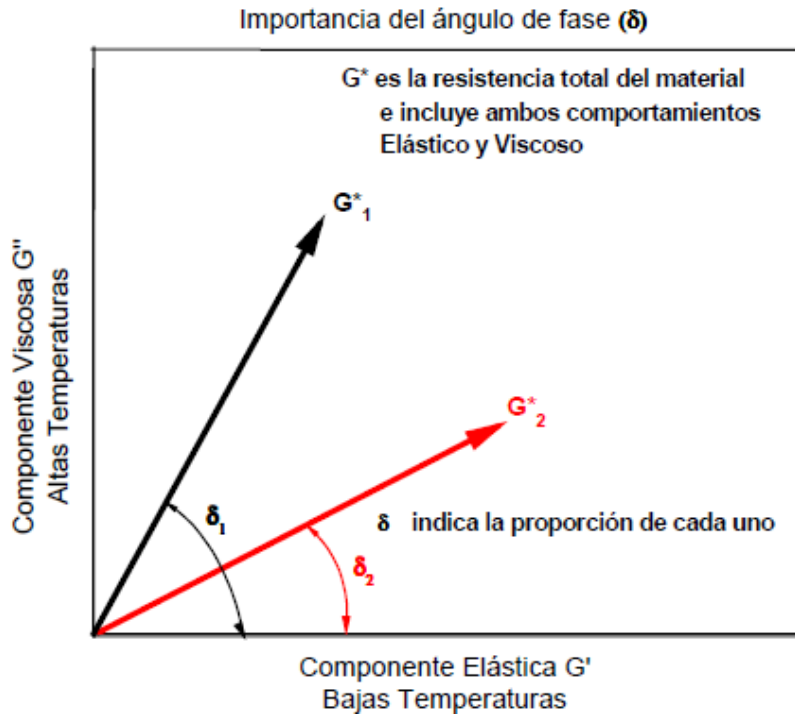
Por otra parte, en fecha más reciente, Estados Unidos también ha realizado ensayos en donde ha comparado residuos asfálticos obtenidos a través de distintos procedimientos [27]. En dichos ensayos se comparó el procedimiento de recuperación por Destilación a 177°C, descrito en su norma ASTM D6997, con el procedimiento de recuperación por Evaporación, descrito en su norma ASTM D7497. Este último procede a recuperar el asfalto, primero dejando la muestra a temperatura ambiente (25°C) por 24 horas y luego colocándola en un horno a 60°C por 24 horas adicionales. Este ensayo tal como lo indica el autor, se deriva del ensayo de recuperación por evaporación descrito en la norma europea UNE EN 13074-1 [27], (24 horas a temperatura ambiente (25°C) y luego 24 horas a 50°C en horno). En la normativa americana ASTM D7497 se adoptó la temperatura de campo igual a 60°C (140°F), como referencia para su ensayo en laboratorio.

Vale hacer mención, que la norma europea complementa este ensayo (UNE EN 13074-1) con un segundo ensayo, UNE- EN 13074-2 (24 horas adicionales a 85°C en horno), lo que correspondería a un residuo asfáltico estabilizado en terreno a más de un año en servicio [20].

Ahora bien, en el trabajo de Arlis Kadrmaz (BASF, USA) presentado en el VIII Congreso Mexicano del Asfalto, celebrado en Cancún el año 2013 [27], el autor desarrolló una investigación para comparar las características de los residuos asfálticos recuperados por el método de Destilación (ASTM D6997) y por el método de Evaporación (ASTM D7497) y, a diferencia de los ensayos tradicionales empíricos utilizados en la investigación de R. Iborra y F. Guzmán (Punto de Reblandecimiento, y Penetración), empleó básicamente el uso del equipo Reómetro de Corte Dinámico o DSR (por sus siglas en inglés). Este equipo es utilizado para determinar las propiedades de los asfaltos en el rango de temperaturas de trabajo intermedias y altas (52°C - 82°C) [29]. El DSR permite determinar el desempeño de los asfaltos vírgenes o modificados frente a la deformación permanente o ahuellamiento. Para esto, el DSR entrega como resultado el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ) [30].

El módulo complejo de corte es una medida de la resistencia total de un material a deformación, cuando éste se expone a repetitivas presiones de corte. Este módulo consta de dos componentes: una elástica (deformación recuperable) y otra viscosa (deformación no recuperable) [30]. Por su parte, el ángulo de fase es un indicador de la cantidad relativa de deformación, recuperable y no recuperable, que tiene el material [30]. Como resultado del ensayo, el DSR entrega el cociente entre G^* y seno (δ) y además entrega el ángulo de desfase.

Lo anterior puede ser resumido en la siguiente figura



De la figura anterior se extrae que si dos asfaltos tienen igual módulo complejo de corte (G^*), su diferencia estaría en la capacidad que tenga para recuperar las deformaciones generadas por las cargas asociadas [29]. A menor ángulo de fase, el material posee mayor capacidad elástica para recuperarse frente a las deformaciones.

En resumen, se puede decir que el DSR mide la inclinación visco-elástica del material analizado, determinado como el conjunto del módulo complejo de corte y del ángulo de fase [30].

Con respecto al ensayo comentado previamente, éste se basa en comparar los parámetros obtenidos mediante el DSR, de los residuos asfálticos determinados a través de los ensayos de destilación y evaporación descritos anteriormente, para una emulsión tradicional y otra modificada con látex.

El ensayo de DSR es dependiente de la temperatura de ensayo y de la frecuencia. En el caso de esta investigación, el ensayo se realizó para temperaturas entre 52°C y 82°C, inclusive ambos, incrementando la temperatura en 6°C, tal como lo indica la especificación Superpave [30]. Por otro lado, el ensayo se realizó a una frecuencia de 10rad/seg, ya que así se simula el efecto producido sobre el pavimento por un vehículo moviéndose entre 80 y 90 kilómetros por hora [29].

Arlis Kadrmas, para su investigación, comparó tres emulsiones conformadas con betunes categorizados según el sistema "Performance Grade" (PG). El sistema PG, caracteriza el asfalto según el desempeño a diferentes temperaturas. Los asfaltos categorizados por este sistema se representan de la siguiente manera: PGAA-BB, donde PG indica el sistema de caracterización (Performance Grade), AA indica la máxima temperatura que resiste el asfalto antes de sufrir deformaciones por ahuellamiento y BB indica la mínima temperatura de diseño que resiste el pavimento, antes de sufrir agrietamiento por fatiga.

Cabe destacar que, para la investigación, las emulsiones fueron modificadas utilizando 3.75% de látex (por peso de la emulsión). La cantidad de látex utilizada en el ensayo es consistente con la utilizada para aplicaciones de microaglomerados en frío [27].

La Tabla 4-11 indica los resultados obtenidos por la aplicación del DSR sobre el residuo de la emulsión base o convencional. Mientras que la Tabla 4-12 indica los resultados obtenidos por la aplicación del DSR sobre el residuo de la emulsión asfáltica modificada.

Tabla 4-11: Resultados del empleo del equipo DSR en el residuo asfáltico de emulsiones tradicionales, obtenido con las normas de Destilación ASTM D6997 y Evaporación ASTM D7497. Ref [27].

Original DSR Testing on Residue from Distillation (350°F/177°C) @ 10rad/sec @ test temperature											
Emulsion	% Latex	52°C		58°C		64°C		70°C		76°C	
		g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta
PGXX-34 base	0.0	0.95985	87.39								
PG58-28 base	0.0			1.5755	85.88	0.7777	86.49				
PG64-22 base	0.0			3.6575	84.22	1.6635	85.78	0.80495	86.93		

Original DSR Testing on Residue from Evaporation (25°C 24 hour & 60°C 24 hour) @ 10rad/sec @ test temperature											
Emulsion	% L/P	52°C		58°C		64°C		70°C		76°C	
		g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta
PGXX-34 base	0.0	2.0485	84.74	0.93585	86.14						
PG58-28 base	0.0			2.408	84.92	1.119	86.45	0.546	87.55		
PG64-22 base	0.0			6.4015	82.25	2.854	84.40	1.324	86.16	0.6475	87.49

Tabla 4-12: Resultados del empleo del equipo DSR en el residuo asfáltico de emulsiones modificadas, obtenido con las normas de Destilación ASTM D6997 y Evaporación ASTM D7497. Ref [27].

Original DSR Testing on Residue from Evaporation (25°C 24 hour & 60°C 24 hour) @ 10rad/sec @ test temperature													
Emulsion	% L/P	52°C		58°C		64°C		70°C		76°C		82°C	
		g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta
PGXX-34 base	3.75			3.283	67.79	1.913	67.96	1.174	66.98	0.772	64.70		
PG58-28 base	3.75			8.578	68.24	4.465	69.73	2.460	70.58	1.439	70.39	0.888	68.89
PG64-22 base	3.75			18.25	67.63	9.193	69.54	4.846	71.24	2.661	72.15	1.54	71.96

Original DSR Testing on Residue from Distillation (350°F/177°C) @ 10rad/sec @ test temperature													
Emulsion	% L/P	52°C		58°C		64°C		70°C		76°C		82°C	
		g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta	g*/sin delta	delta
PGXX-34 base	3.75			2.354	67.09	1.3515	68.04	0.811	68.71				
PG58-28 base	3.75			5.567	68.96	2.9725	70.44	1.667	71.77	0.979	72.49		
PG64-22 base	3.75			11.26	67.64	5.890	69.05	3.210	70.74	1.806	72.31	1.067	73.23

De las tablas anteriores, fijándose, por ejemplo, sólo en la emulsión con asfalto grado PG58-28 y para una misma temperatura de ensayo (por ejemplo 58°C), los parámetros obtenidos mediante el uso del equipo DSR, aplicado sobre el residuo determinado por el ensayo de evaporación, indican que éste tiene mejores propiedades elásticas, que el residuo determinado por el ensayo de destilación. Esto ya que el parámetro G^* es mayor, indicando una mayor resistencia frente a fuerzas de corte. Por otro lado, el ángulo de fase disminuye, lo que se traduce en una mayor capacidad elástica del residuo. Por lo tanto, preliminarmente, se podría concluir que un residuo obtenido por medio de ensayos a alta temperatura (Destilación, 177°C) se ve perjudicado, dado que pierde capacidad elástica frente a las deformaciones que sufre un pavimento en servicio.

La siguiente tabla compara el empleo del DSR sobre el residuo de la emulsión modificada con látex, obtenido por medio del ensayo de Evaporación ASTM D7497. La comparación se realiza entre la emulsión tradicional y modificada, que utiliza betún caracterizado por el tipo PG58-28.

Tabla 4-13: Resultados del empleo del equipo DSR en el residuo asfáltico de la emulsión tradicional y modificada con asfalto PG58-28, obtenido con las normas de Evaporación ASTM D7497. Ref [27].

Residuo Obtenido por Evaporación ASTMD7497	Temperaturas de Ensayo empleando el DSR					
	58°C		64°C		70°C	
	$G^*/\text{seno}(\delta)$	δ	$G^*/\text{seno}(\delta)$	δ	$G^*/\text{seno}(\delta)$	δ
PG58 – 28 (modificada)	8.578	68.24	4.465	69.73	2.460	70.58
PG58 – 28 (tradicional)	2.408	84.92	1.119	86.45	0.546	87.55

De la tabla anterior, obtenida como resultado de la investigación realizada por Arlis Kadrmas, se desprende que al modificar la emulsión mediante la inclusión de látex, en una cantidad de un 3.75% en peso de ella, el cociente $G^*/\text{sen}(\delta)$ aumenta y el ángulo de fase disminuye. Esto significa que la emulsión modificada tiene un comportamiento más elástico que la emulsión tradicional, es decir, puede resistir mayores deformaciones generadas por fuerzas de corte, permitiendo que la emulsión posea una mayor capacidad de recuperación.

Como conclusión de este ensayo, se puede decir que Estados Unidos (norma ASTM) persigue la misma línea que Europa (norma EN), con respecto a normativas de obtención del residuo asfáltico por métodos a bajas temperaturas que reflejen la realidad de las condiciones de campo (50°C), ya que se obtienen residuos con características menos alteradas que al utilizar los métodos convencionales de recuperación a altas temperaturas (Ver Tabla 4 – 10 y Figura 4 – 3).

4.4.- Recomendaciones a la Normativa Chilena para las especificaciones de Emulsiones Asfálticas Modificadas con Polímeros

El proceso de actualización de una normativa no es un proceso sencillo. Los miembros del Comité Técnico del CEN, han trabajado desde la década de los 90', en los métodos de ensayo y especificaciones para las emulsiones asfálticas catiónicas tradicionales y modificadas [29] para luego, en el año 2011, consensuar y poder publicar la normativa definitiva que rige para las emulsiones mencionadas (UNE-EN 13808).

Dentro de las dos décadas de estudios y ensayos desarrollados por el CEN, se destaca que ya desde el año 1991 [24], se estaba trabajando con la idea de que la obtención de los residuos asfálticos, debía realizarse con métodos que homologuen las temperaturas a las que se encuentran dichos residuos sobre un pavimento en servicio (50°C – 60°C). Esto, debido a que se intuía que la obtención del residuo asfáltico por métodos a altas temperaturas (por ejemplo, Destilación a 177°C) podía perjudicar a la emulsión, alterando el polímero y modificando las propiedades determinadas de dicho residuo.

Lo anterior, es para enfatizar que Europa nos lleva “más de veinte años de ventaja” en materias de investigación. Esto se aprecia en la sección 4.2 de esta memoria, en la que se analizan los cambios más significativos que tiene nuestra normativa en esta materia. Desde la versión de Junio del año 1997 a la del año 2015, el Manual de Carreteras no ha sufrido cambios sustanciales dentro de las especificaciones que caracterizan a las emulsiones asfálticas modificadas. Es decir, en casi el mismo tiempo que le tomó al CEN publicar la normativa definitiva acerca de los ensayos que caracterizan las emulsiones bituminosas catiónicas, en Chile no se han realizado nuevos estudios y/o ensayos, o por lo menos no se han publicado.

Para determinar la factibilidad de actualizar la normativa chilena, primero se entregan las diferencias más significativas entre la última versión de la normativa europea (UNE- EN 13808 o Artículo 214), con la última versión de la normativa nacional (Manual de Carreteras, 2015).

4.4.1.- Diferencias entre Normativa Europea y Normativa Chilena

A continuación, se enumeran las diferencias más relevantes entre ambas normativas.

1. Al observar ambas especificaciones, se puede notar que existe una diferencia en el número de ensayos que se realiza tanto a la emulsión original, como al residuo. Por parte de la normativa española se establecen siete (7) ensayos sobre la emulsión original y cuatro (4) ensayos sobre el residuo, mientras que la normativa chilena indica realizar cuatro (4) ensayos a la emulsión original y cinco (5) ensayos sobre el residuo.
2. En España, la velocidad de quiebre o rotura es fundamental para la clasificación de emulsiones asfálticas como: rápidas, medias y lentas. Por el contrario, la normativa nacional no especifica método para determinar la velocidad de rotura de una emulsión.

3. Por otro lado, en España ya no se realiza el ensayo de Carga de Partícula, como ensayo de caracterización, debido a que la mayor cantidad de emulsiones producidas son catiónicas [4]. Es por esto que todas las especificaciones descritas en el Artículo 214 son para emulsiones catiónicas.
En Chile es conveniente mantener el Ensayo de Carga de Partículas, ya que en algunas zonas geográficas de Chile (Principalmente en Norte Grande) existen agregados catiónicos.
4. El método de obtención del residuo de la emulsión es una de las diferencias más relevantes en el desarrollo de esta memoria. Mientras en España se utilizan normativas armonizadas en la Comunidad Europea, como son las normas UNE EN 13074 - 1 y UNE EN 13074 - 2, en Chile no existe una norma específica para la obtención del residuo asfáltico, sino que sólo se recomienda un método por evaporación a 110 °C para la obtención del residuo, quedando establecido con una nota u observación bajo las tablas de requisitos para las emulsiones modificadas.
Ahora bien, en Chile no se ha realizado una comparación entre el método UNE EN13074 – 1 (T° evaporación 50°C) versus la recomendación del Manual de Carreteras (T° 110°C). Sin embargo, la investigación de Arlis Kadrmaz [27] deja en claro que el método para la recuperación por normas ASTM D6997 (a 177°C), versus la recuperación por norma ASTM D7497 (a 60°C), muestran diferencias significativas, quedando demostrado que los métodos de recuperación de residuo asfáltico de emulsiones modificadas a altas temperaturas, alteran las propiedades del asfalto residual [24].
5. La cohesión es uno de los parámetros esenciales de las emulsiones asfálticas modificadas, ya que permite determinar la resistencia que tendrá el asfalto residual frente a fuerzas de corte [21]. Además, este ensayo permite inferir que, a mayor disipación de energía, el residuo asfáltico tendrá un mejor desempeño.
Para la obtención de ésta característica, en España se utiliza el Péndulo Vialit. En Chile no existe ensayo que permita medir la cohesión en el residuo de la emulsión.
6. En Chile se destaca la utilización del ensayo *Índice de Fraass*, tanto en betunes asfálticos modificados como en los residuos asfálticos de emulsiones modificadas. No se especifica en asfaltos tradicionales.
Este índice, que permite determinar la fragilidad del betún asfáltico a bajas temperaturas, es un parámetro relevante dado el clima más bien frío que tiene Chile, preferentemente en periodo invernal en caminos del centro sur como en sector cordillerano. En España, se especifica este ensayo a betunes asfálticos tradicionales como en los modificados [13]. Sin embargo, en las especificaciones de emulsiones modificadas con polímeros no se incluyó.

4.4.2.- Recomendaciones para la Normativa Chilena

Considerando las diferencias entre ambas normativas, descritas en la sección anterior, a continuación se entregan recomendaciones que podrían adoptarse en una futura actualización de la normativa chilena.

1. Se recomienda que la normativa nacional mantenga el ensayo *Índice de Fraass*, ya que es el único parámetro especificado que, dentro de sus requerimientos, determina la fragilidad del asfalto residual a bajas temperaturas. Este ensayo es necesario debido a que en período invernal, en las regiones del centro sur de Chile y particularmente en caminos cordilleranos de todo el país, se está constantemente expuesto a un clima frío.
2. Se aconseja mantener dentro de las especificaciones nacionales, la determinación de la viscosidad por medio del ensayo *Viscosidad Saybolt-Furol*, en vez del nuevo ensayo *Tiempo de Fluencia* publicado en la normativa europea (UNE-EN 13808). Esta recomendación se basa en que, el tiempo obtenido (en unidades sSF), a través del ensayo *Viscosidad Saybolt-Furol*, además de determinar la viscosidad de la emulsión, sirve para tener una estimación del tipo de emulsión ensayada (rápida, media, lenta) [31]. Por otro lado, dicho ensayo, está ya internalizado en los laboratorios nacionales y es un método simple y práctico [26].
3. Se propone incluir, dentro de las especificaciones nacionales para emulsiones asfálticas modificadas con polímeros, un método que permita medir o determinar la cohesión en el residuo asfáltico de las emulsiones modificadas con polímero, como es el *Ensayo del Péndulo*. Esta recomendación se debe a que en la normativa nacional no existe ningún ensayo que determine la cohesión, parámetro esencial en la caracterización de un asfalto [21], ya que a través de él se cuantifica la energía de rotura que disipa o resiste el residuo asfáltico de la emulsión, para temperaturas intermedias y altas [32].
4. Como cambio fundamental que se expone en esta memoria, se aconseja modificar la recomendación indicada por el Manual de Carreteras para la obtención del residuo asfáltico, de acuerdo a la metodología de recuperación expuesta en las normas *UNE EN 13074-1* [33] y *UNE EN 13074-2* [34]. Recomendación que se basa en lo ya mencionado en las secciones anteriores, con respecto a que no es recomendable obtener el residuo asfáltico por medio de métodos con temperaturas elevadas [24].

A continuación se dan a conocer los cambios más importantes que se deberían implementar en la normativa chilena, basándose en lo descrito por la norma *UNE EN 13074 – 1* (Norma completa en Anexo A).

a) Equipos [33]

- Estufa u Horno Ventilado
Debe contar con las siguientes características,
 1. Volumen mínimo 80 litros.
 2. Debe poder calentar a una temperatura de 50°C.
 3. Debe tener mínimo 2 ventiladores.
- Placas o bandejas planas
Las placas deben tener las siguientes características,
 1. Altura Interna máxima de 35 mm.
 2. Superficie mínima de 0.04 m².
 3. Deben ser de silicona o algún otro material antiadherente.

El número de placas depende de la cantidad de asfalto que quiera recuperarse.

En la siguiente figura se muestra el horno y las placas indicadas anteriormente



Figura 4-5: Horno Ventilado. Placas Planas de silicona, Ref [15].

b) Masa Requerida de Emulsión

Si bien lo esencial del método de recuperación del residuo asfáltico de una emulsión es su obtención a baja temperatura, no es menos importante también el concepto de que el espesor de la película del residuo de una emulsión asfáltica a ensayar debe ser de 1mm [20] (la recomendación indicada por el Manual de Carreteras es de 1cm.).

A continuación, se presenta el cálculo para la determinación de la masa mínima de una emulsión asfáltica a ensayar, para cumplir el requisito de un residuo asfáltico de espesor de 1mm en una superficie dada (placas o bandejas planas).

El asfalto residual requerido es (1 ± 0.05) $[\text{kg}/\text{m}^2]$ [33] y tomando la densidad de la emulsión como 1000 $[\text{kg}/\text{m}^3]$, se tiene que el espesor que se necesita en un área de 1 $[\text{m}^2]$, para obtener dicha cantidad de asfalto residual requerido es:

Área de superficie	As =	1	$[\text{m}^2]$
Asfalto residual	Ar =	1	$[\text{kg}/\text{m}^2]$
Densidad de asfalto	Da =	1000	$[\text{kg}/\text{m}^3]$

$$\boxed{Ar = Daxe}$$

Luego, si consideramos a manera de ejemplo, que la cantidad de asfalto mínima que tiene una emulsión es 65% (en peso), se tiene [33]

$$\boxed{M = 1 \times \frac{A}{B/100}}$$

Donde,

- M: Masa requerida de emulsión [kg].
- A: Área de la placa $[\text{m}^2]$.
- B: Contenido de Ligante [%].

Tomando los siguientes valores mínimos [2,32],

$$\left. \begin{array}{l} A_{\text{mínimo}} = 0.04 \text{ m}^2 \\ B_{\text{mínimo}} = 65 \% \end{array} \right\} M_{\text{mínima}} = 0.062 \text{ [kg]}$$

Por lo tanto, la masa mínima necesaria por m^2 es

$$\frac{M}{A} = \frac{0.062 \text{ [kg]}}{0.04 \text{ [m}^2]} = 1.55 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$$

Cabe destacar que en este cálculo se consideró que la emulsión posee una cantidad de asfalto mínima del 65% (en peso de la emulsión), cantidad que generalmente poseen este tipo de emulsiones [2]. Sin embargo, la norma es muy estricta en este requisito, debiéndose obtener previamente el porcentaje exacto del contenido de asfalto en la emulsión, mediante el procedimiento especificado en Norma UNE – EN1428: “Contenido de Ligante por contenido de agua” [25], norma que permite la determinación del contenido exacto de asfalto en emulsiones convencionales o modificadas.

Además, dentro de las recomendaciones para una futura actualización de la normativa nacional, también se aconseja incluir el método de estabilización, para un residuo de emulsión recuperado por evaporación, descrito en la norma UNE EN 13074 – 2 [34]. Este ensayo es importante adicionarlo a la normativa nacional, ya que permite determinar las propiedades del residuo de la emulsión simulando un envejecimiento del pavimento a más de un año en servicio [20].

5.- Microaglomerados Asfálticos en Frío (MAF)

En este capítulo se presentan los ensayos principales que se realizan en la producción de los microaglomerados en frío y se nombrarán algunos de los problemas que ocurren cuando esta mezcla es mal aplicada o no cumple los estándares mínimos.

5.1.- Ensayos Principales

5.1.1.- Determinación del Porcentaje Óptimo de Betún

El método más utilizado para determinar el contenido óptimo de betún en mezclas que utilicen emulsiones asfálticas modificadas, son los métodos basados en la pérdida por abrasión. En estos métodos se utilizan equipos empleados para trabajar bajo el principio de determinar las pérdidas en peso, que sufre la mezcla, bajo la acción abrasiva de una rueda metálica o de goma.

El proceso recomendado por ISSA (International Slurry Seal Association) y aceptado y normalizado por ASTM (American Society for Testing and Materials), en su norma *D 3910 80a* es el denominado *Wet Track Abrasion Testing (W.T.A.T)*, ensayo de abrasión por vía húmeda, que consiste en someter probetas circulares de lechada o microaglomerados, de 27 cm de diámetro y 5 mm de espesor, curadas previamente a 60°C hasta peso constante y sumergidas en agua, a la acción abrasiva de una goma de manguera de determinada dureza, durante cinco minutos [12].

El equipo utilizado para este ensayo se aprecia en la siguiente figura



Figura 5-1: Equipo utilizado para el ensayo W.T.A.T., Ref [12].

La pérdida en peso define la resistencia a la abrasión de la mezcla. En la siguiente figura se aprecia el gráfico obtenido al emplear este método.

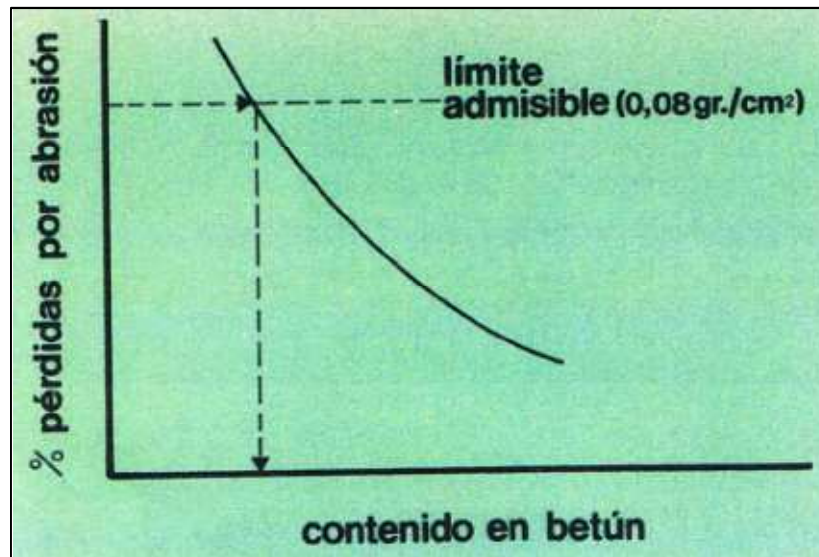


Figura 5-2: Curva Pérdida por Abrasión v/s Contenido de Betún, Ref [12].

Como se observa, este primer método entrega un valor mínimo de betún para el cual las pérdidas por abrasión no sobrepasen cierto límite (0.086 gr/cm^2). Para mezclas con valores de betún menores que el mínimo establecido, generará que las pérdidas por abrasión sean mayores, por lo que el comportamiento de la mezcla no será correcto [12].

Para definir el porcentaje máximo de betún en un microaglomerado en frío, se ha determinado el uso del *Ensayo de Rueda Cargada* o *Loaded Wheel Test* (L.W.T). Esta es una máquina simuladora de tráfico, con la que puede medirse la resistencia a la exudación y deformación de la lechada o microsurfacing (ahuellamiento).

El ensayo consiste, básicamente, en una rueda de caucho blando, de 25 mm (1 in) de ancho y 75 mm (3 in) de diámetro, que bajo cargas variables y a razón de 44 ciclos/min, se desplaza sobre una probeta de lechada con un determinado porcentaje de emulsión asfáltica, de 50 mm de ancho y 350 mm de longitud [12]. La muestra, luego, se cubre con arena caliente para posteriormente someterla a ciclos de carga.

En la siguiente figura se aprecia el equipo utilizado para este ensayo

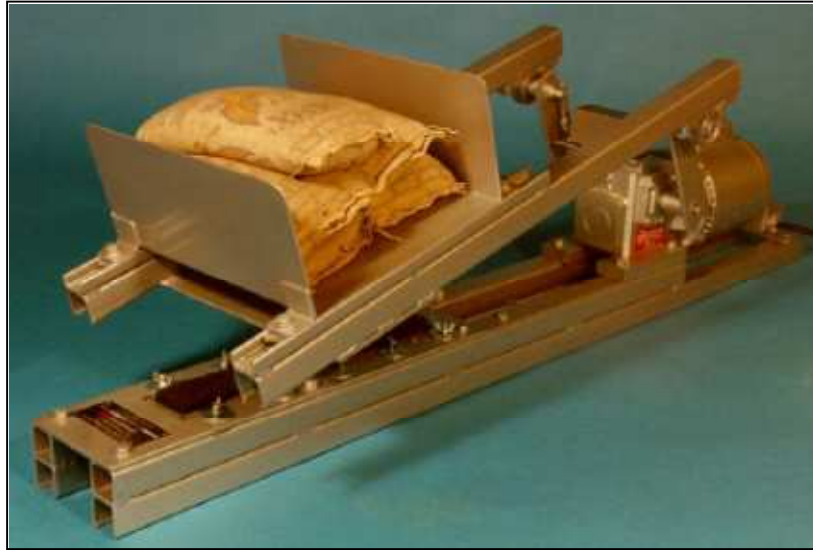


Figura 5-3: Equipo utilizado para el ensayo L.W.T., Ref [12].

El equipo L.W.T permite medir el asfalto exudado después de someter las probetas de lechada a un proceso de compactación de 1000 ciclos, pesando la arena absorbida por el exceso de asfalto en la muestra.

Realizando esto, se obtiene el siguiente gráfico [12].

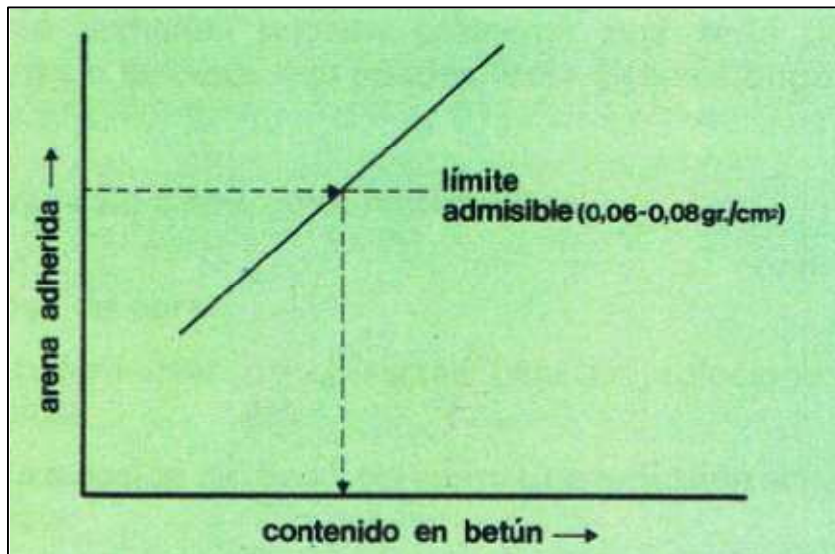


Figura 5-4: Curva Arena Adherida v/s Contenido de Betún, Ref [12].

De acuerdo con el tipo de tráfico, es posible definir valores máximos de absorción de arena, bajo las siguientes condiciones de ensayo: 18°C de temperatura, 1000 ciclos y cargas de 56.7 kg (125 lbs) [12]:

- Tráfico Ligero: 778 gr/m².
- Tráfico Medio: 667 gr/m².
- Tráfico Pesado: 611 gr/m².
- Tráfico muy Pesado: 556 gr/m².

Realizados estos dos ensayos, la determinación del contenido óptimo de betún quedará definida como la solución entre la pérdida de abrasión aceptable (betún mínimo, obtenido según W.T.A.T) y una baja absorción de arena (betún máximo, obtenido según L.W.T). Combinando ambas soluciones se obtiene la siguiente figura

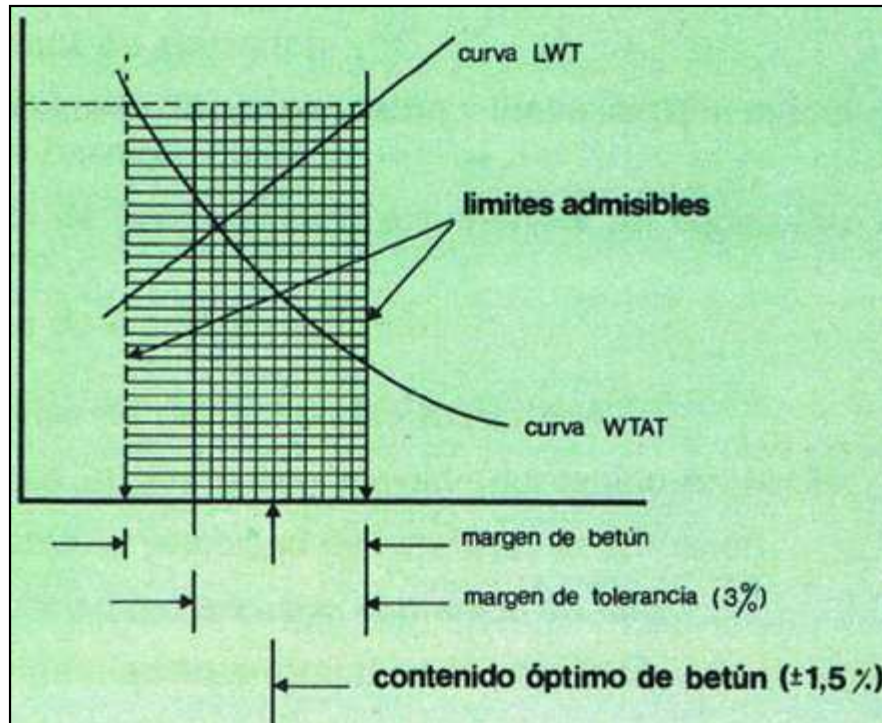


Figura 5-5: Curva que indica contenido óptimo de betún, Ref [12].

De esta manera, el contenido óptimo de betún para la mezcla se obtiene de la siguiente manera [12]:

1. Realizar el ensayo W.T.A.T y obtener la cantidad mínima de betún.
2. Realizar el ensayo L.W.T y obtener la cantidad máxima de betún.
3. El contenido óptimo de betún será el valor promedio entre ambos resultados.

5.1.2.- Consistencia de la Mezcla

La determinación de la consistencia de la mezcla (lechada o microaglomerado en frío) sirve para definir la cantidad de agua óptima para una correcta trabajabilidad de la misma. El método más utilizado es el realizado por el Departamento de Transporte de Kansas, denominado *Cono de Consistencia* [12].

Se trata de un cono metálico que tiene las siguientes dimensiones:

- 38mm (1.5 in) de diámetro superior.
- 89mm (3.5 in) de diámetro inferior.
- 74mm (2.9 in) de altura.

La escala de fluencia está constituida por siete círculos concéntricos, inscritos sobre un papel, donde el círculo más pequeño tiene 89mm de diámetro (calza con diámetro inferior del cono), incrementándose el radio de cada círculo en un centímetro respecto del más pequeño [12]. Se destaca que los círculos indicados en el papel, se indican los centímetros que la mezcla fluye con respecto al diámetro inferior del cono.

Situado el cono sobre el papel por su mayor diámetro y centrado el mismo, se sella con la mezcla a estudiar y, una vez levantado, la mezcla ocupará tanta superficie cuanto más fluida sea, como se observa en la Figura 5-6 [12].

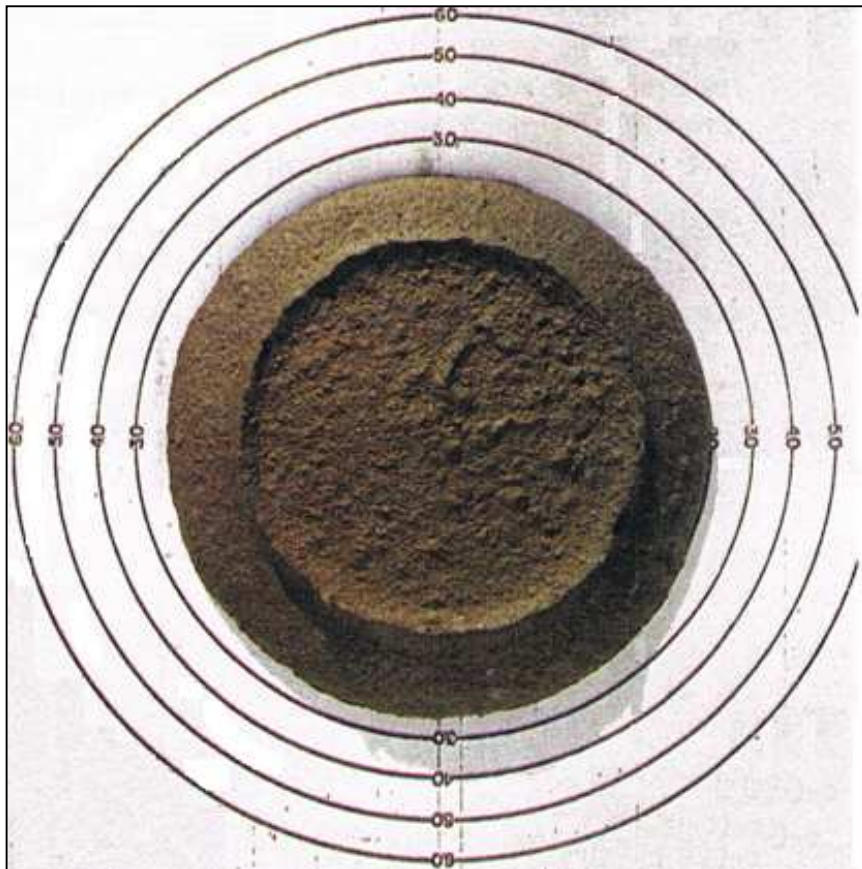


Figura 5-6: Esquema Cono de Consistencia. Escala en cm. Ref [12].

Se considera que el porcentaje óptimo de agua es aquel mediante el cual se consigue una fluencia de lechada o microaglomerado entre 2.0 y 3.0 cm mayores al diámetro inferior del cono, como el que se indica en la Figura 5-6 [12].

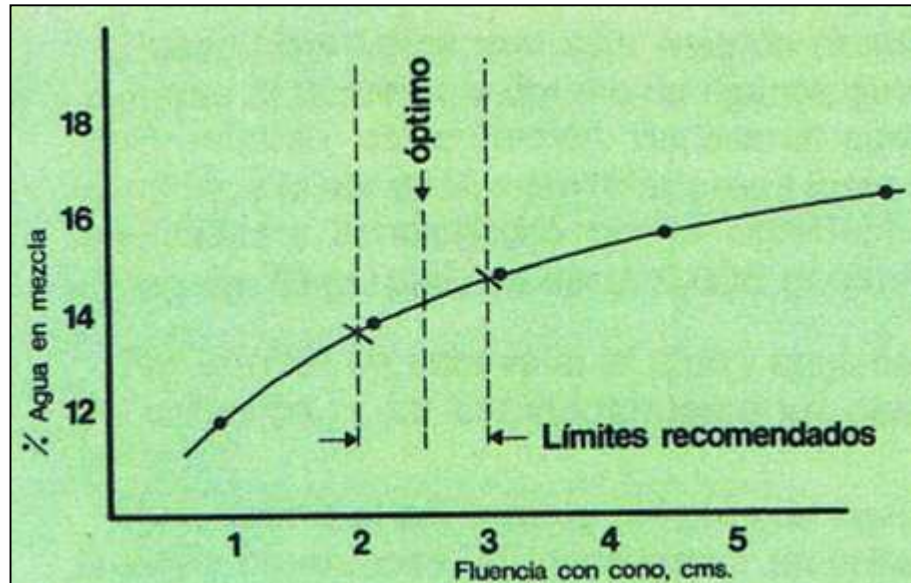


Figura 5-7: Límites aceptables para consistencia de la mezcla, Ref [12].

Si el conseguir esa fluencia trae consigo una segregación de la mezcla, se deberán añadir pequeños porcentajes de cemento o cal hidratada para reducir la segregación. Estas cantidades se deben tener en cuenta para corregir el contenido de betún, el que deberá incrementarse en 0.6% por cada porcentaje de cemento o cal añadida a la mezcla [12].

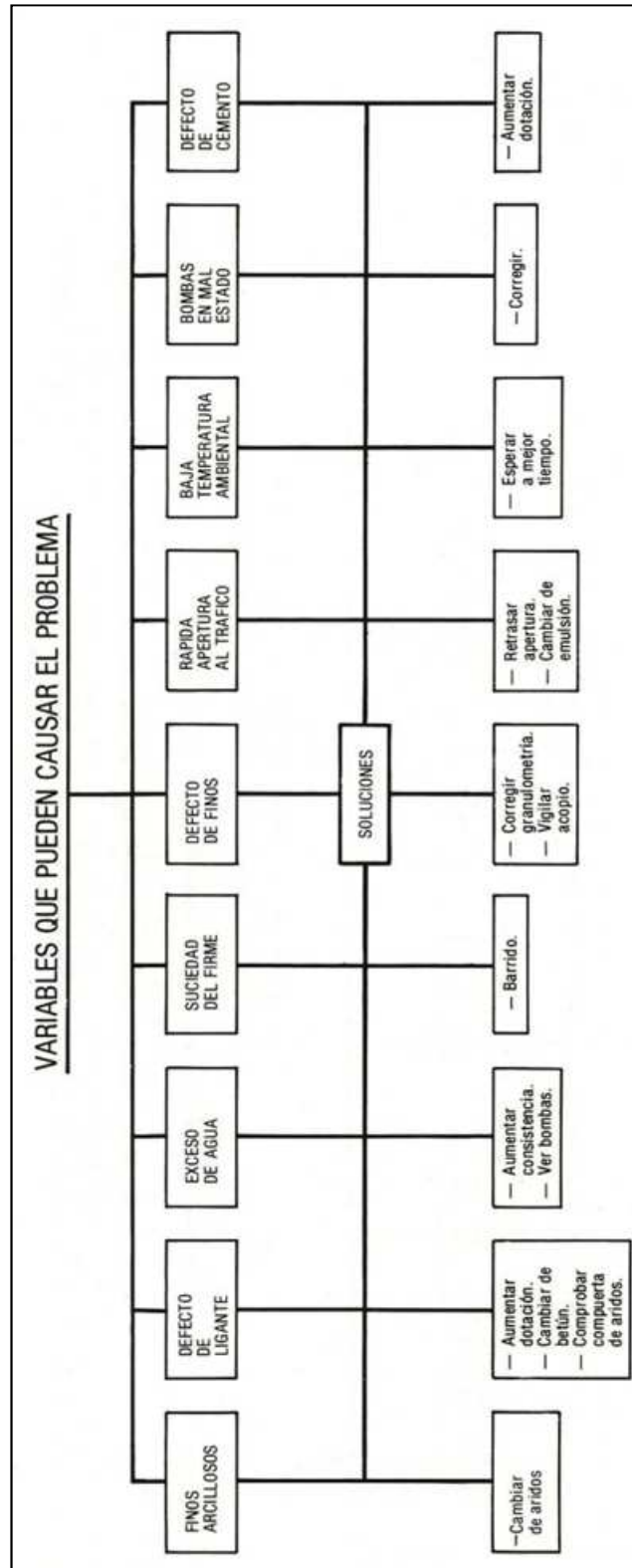
5.2.- Desprendimiento de Partículas

El desprendimiento de partículas en el microaglomerado en frío es un tema importante, que debe ser tratado con cautela, ya que éste se refiere a la pérdida de árido grueso en la mezcla que ha sido depositada en campo y ha sido desprendido prematuramente por efecto de tráfico, quedando como esqueleto mineral la mayor parte del agregado fino, lo que implica un menor coeficiente de fricción y al mismo tiempo un aumento de la cantidad de asfalto sobre el pavimento tratado, lo que puede dar lugar a exudación.

El desprendimiento de las partículas en la mezcla de un microaglomerado en frío (MAF) puede tener diversas causas, que pueden provenir del árido utilizado (caso de áridos con finos arcillosos o carentes de finos), del estado en que se encuentre el pavimento a revestir (suciedad), la temperatura ambiental, falta de cohesión producida por defecto del ligante en la lechada, de fallos mecánicos o, lo más corriente, de la rápida apertura al tráfico del tramo revestido [12].

En el siguiente cuadro se muestran las principales causas de desprendimiento junto con sus posibles soluciones.

Tabla 5-1: Variables que causan Desprendimiento de Pavimento. Ref [12].



Actualmente, dentro de los requisitos que la normativa española utiliza para caracterizar a las emulsiones modificadas con polímeros, se incluye la medida de la Adhesividad [35]. La adhesión se define como la capacidad de un ligante para permanecer fijado a un árido, recubriéndolo sin ningún riesgo de desplazamiento, aún en presencia de agua o tráfico. Mientras que la adhesividad es la prueba cualitativa de la medida de la adhesión [35].

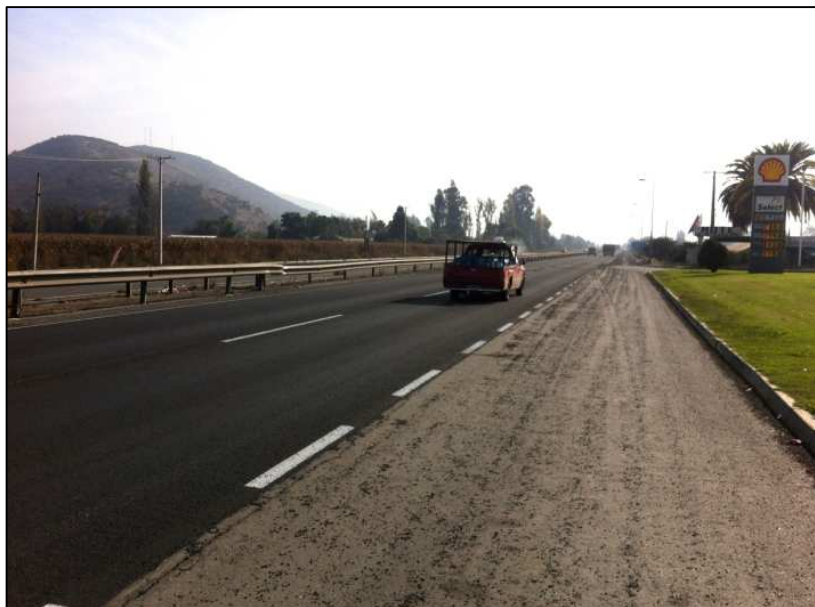
El ensayo para la determinación de la Adhesividad se basa en que la emulsión modificada con polímeros se mezcla con un árido de referencia. Después de que la emulsión se encuentre completamente rota, bajo condiciones especificadas, la mezcla se sumerge en agua en un recipiente de vidrio. Luego de un tiempo dado y bajo condiciones específicas, se valora visualmente el porcentaje de la superficie del árido cubierto con el ligante [35].

Por lo tanto, este ensayo no mide directamente el desprendimiento del agregado en los microaglomerados asfálticos en frío, que se aplican sobre el pavimento.

Por otro lado, el Manual de Carreteras en su Volumen 8, sólo indica el ensayo de Placa Vialit. Este ensayo permite valorar la adhesividad, así como la resistencia al desprendimiento existente entre los áridos y el residuo asfáltico de una emulsión asfáltica polimérica [28], pero sólo es válido para aplicaciones de sellos bituminosos en base a gravillados (ver Tabla 4-6 de esta memoria).

Es resumen, actualmente no existe una normativa específica que permita medir o estimar el desprendimiento del agregado utilizado en los microaglomerados asfálticos en frío.

A continuación, se muestran testimonios donde queda en evidencia el desprendimiento de partículas gruesas en algunos microaglomerados en frío ejecutados en Chile.



**Figura 5-8: Material Grueso Desprendido de Microaglomerado en Frío. Conservación Ruta 5.
Fuente: Elaboración Propia.**



**Figura 5-9: Material Grueso Desprendido de Microaglomerado en Frío.
Conservación Autopista Metropolitana.
Fuente: Elaboración Propia.**



**Figura 5-10: Material Grueso Desprendido de Microaglomerado en Frío.
Conservación Ruta de la Madera, VIII Región.
Fuente: Elaboración Propia.**

A modo de apreciación, la siguiente figura da una referencia del tamaño que puede llegar a tener el agregado desprendido, además de observarse que los áridos están con muy poco revestimiento de asfalto, motivo por el cual éstos se desprendieron de la mezcla.



**Figura 5-11: Material Grueso Desprendido de MAF.
Fuente: Elaboración Propia.**

6.- Proceso Constructivo de MAF

En la actualidad, a nivel internacional, no existe una regla general para la aplicación de un riego de liga de emulsión tradicional o modificada sobre una superficie pavimentada, previo a la colocación de un microaglomerado en frío. Sin embargo, la experiencia en Chile, donde ya se han colocado más de 5 millones de metros cuadrados de esta tecnología (mínimo un 15% del patrimonio actual de pavimentos de Autopistas Concesionadas), ha sido exitosa al colocar como riego de liga el mismo tipo de emulsión modificada empleada en los MAF, lo cual ha sido incorporado en la metodología de trabajo de microaglomerados en frío, de acuerdo a la sección 5.419 *Microaglomerados en Frío*, del Manual de Carreteras (a partir de la versión 2014).

6.1.- Aplicación del Riego de Liga: Análisis de Normativas

6.1.1.- Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA, USA)

Según el documento "*Recommended Performance Guideline*", desarrollado por la AEMA, en su sección 6.6.3 "*Preparación de Superficie Pavimentada*", dice que la emulsión debe ser esparcida a una dosis de 0.45 L/m² de emulsión y debe ser diluida en una relación de 50% (1+1) con agua [2]. Es decir, debe diluirse.

En este caso, no queda claro si la dosis de 0.45 L/m², es residual o si ya está diluida al 50%. Si estuviera ya diluida, la dosis de emulsión a aplicar sobre la superficie del pavimento sería de 0.225 L/m².

6.1.2.- International Slurry Surfacing Association (ISSA, USA)

Según el documento "*Recommended Guideline for Microsurfacing*", desarrollado por la ISSA, en su sección 10.2 "*Preparación de Superficie para Riego de Liga*", dice que en general no es necesario colocar Riego de Liga, a menos que la superficie sea extremadamente seca. En caso de requerirlo, el Riego de Liga puede consistir en una parte de emulsión asfáltica y 3 partes de agua, es decir, debe diluirse. Además el riego de liga debe aplicarse en una dosis de 0.68 L/m² de emulsión [19].

Al igual que en la recomendación anterior, tampoco queda claro si la dosis de 0.68 L/m² ya está diluida, o debe diluirse en las partes indicadas. Si estuviera ya diluida la dosis de emulsión a aplicar sobre la superficie del pavimento sería de 0,17 L/m².

6.1.3.- Pliego de Prescripciones Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3, España)

Según el PG-3 en su *Artículo 531: Riegos de Adherencia*, se recomienda aplicar una dotación mínima de emulsión, como riego de adherencia, de 200 g/m² de asfalto residual. Al mismo tiempo recomienda la colocación de la emulsión sin diluir para evitar derrames en las calzadas contiguas o bermas [36].

6.1.4.- Manual de Carreteras

El proceso constructivo para el tratamiento de pavimentos con lechadas o microaglomerados en frío se indica en el Volumen 5 “Especificaciones Técnicas Generales de Construcción”, donde se estipulan los requisitos de calidad, se establecen estándares y se describen los procedimientos más usuales de ejecución, para los trabajos que habitualmente se contemplan en la construcción, mejoramiento, reposición y ampliación de caminos y sus obras complementarias.

A continuación se enumeran las secciones de este volumen donde se indican las recomendaciones para aplicar el riego de liga.

a) Sección 5.402: Riego de Liga.

Referida al trabajo previo necesario para aplicar un riego de emulsión sobre una superficie pavimentada.

En el numeral 5.402.304 “Aplicación de Asfalto”, dice que las emulsiones asfálticas tradicionales o modificadas con polímeros, se deberán aplicar sin diluir y en una dosis entre 0.4 y 1 kg/m² de superficie.

b) Sección 5.406: Lechadas Asfálticas y Sección 5.419: Microaglomerados en Frío.

Referidas a la construcción de sellos mediante la aplicación de lechadas asfálticas y microaglomerados asfálticos, respectivamente, sobre superficies pavimentadas.

Antes de la aplicación de la lechada o del microaglomerado asfáltico, la superficie debe ser tratada con un riego de liga, según la siguiente tabla

Tabla 6-1: Aplicación de Riego de Liga. Ref [8].

Superficie Soportante	Dosis Riego de Liga Ligante residual kg/m ²
Mezcla asfáltica extendida reciente	Sin riego
Mezcla envejecida con presencia de microfisuración	Mín. 0,2 kg/m ²
Mezcla fisurada (previo sellado de grietas)	Mín. 0,3 kg/m ²

Como se observa, el Manual de Carreteras tiene un procedimiento claramente especificado con respecto a la colocación de riego de liga, éste es en base a ligante residual, por lo que la colocación de la emulsión es sin diluir. La dosis solo varía de acuerdo al estado del pavimento. Coincide en general con lo especificado en PG-3 español (Mínimo 0.200 gr/m² de asfalto residual, sin diluir).

De la experiencia chilena exitosa en la colocación de MAF, se puede indicar que, en la mayoría de los casos, por más de una década, se ha colocado una dosis mínima de riego de liga de asfalto residual de 0.2 kg/m² y que corresponde a lo recomendado en la Sección 5.406: Lechadas Asfálticas y Sección 5.419: Microaglomerados en Frío.

6.1.5.- Recomendaciones para aplicar el riego de liga

Uno de los más importantes deterioros que influyen sobre la vida en servicio de un pavimento asfáltico, es el reflejo de las grietas [37]. Este tipo de deterioro se genera cuando sobre un pavimento agrietado se coloca una nueva capa asfáltica de refuerzo o mejoramiento de estándar, como también cuando se colocan tratamientos superficiales de rejuvenecimiento, como son los MAF, en los que la grieta existente no ha sido tratada adecuadamente con un sello de grietas, por lo que vuelve a aparecer afectando el desempeño a largo plazo del pavimento tratado [37].

En las Figuras 6-1, 6-2 y 6-3 se muestran imágenes de un pavimento donde se ha aplicado un microaglomerado asfáltico en frío MAF, como tecnología de rejuvenecimiento con riego de liga previo, posiblemente diluido. Estas fotografías fueron tomadas en la Ruta 5 Norte (Km 118 aprox.) y constatan que a un corto plazo de haber sido aplicado el tratamiento, el agrietamiento existente en el pavimento tratado vuelve a aparecer.

En las siguientes figuras (6-2 y 6-3) se indican las grietas reflejadas en la capa de microaglomerado.



**Figura 6-1: Pavimento al que se le ha aplicado un micro en frío, MAF. Ruta 5.
Fuente: Elaboración Propia.**



**Figura 6-2: Pavimento al que se le ha aplicado Microaglomerado en Frío MAF, Ruta 5.
Fuente: Elaboración Propia.**



**Figura 6-3: Reflejo de grieta en pavimento con Microaglomerado en Frío, Ruta 5.
Fuente: Elaboración Propia.**

De las figuras anteriores, se aprecia que las grietas originales volvieron a aparecer sobre la superficie del pavimento, pudiendo cuestionarse la efectividad del tratamiento con MAF. Sin embargo, es interesante señalar, aparte de la importancia de la dosis de riego de liga aplicada sobre el pavimento, es que este riego debe propender al sellado del fisuramiento, que se logra mediante el uso de una tecnología innovadora, como lo es el Scrub Seal,

6.2.- Scrub Seal

Como se observó en el subcapítulo anterior, la aplicación del riego de liga es un tema importante al momento de iniciar el tratamiento de un pavimento existente.

Es por esto que en éste subcapítulo se describe el procedimiento llamado “Scrub Seal” [2], el que se recomienda utilizar en todo proceso de tratamiento de pavimentos con microaglomerados en frío o lechadas asfálticas.

El procedimiento Scrub Seal consiste en la aplicación uniforme de una emulsión asfáltica, de quiebre lento, sobre una superficie existente, seguido de un “barrido” de la emulsión con una escoba, la que sella las grietas o fisuras del pavimento, ya que su función es introducir la emulsión dentro de éstas. Luego se aplica el microaglomerado en frío, con los equipos tradicionales para esta tecnología (Camión Slurry) [2].

El uso del scrub seal da como resultado un tratamiento superficial que sella las grietas y fisuras de la superficie, entregando una buena cobertura del agrietamiento o fisuramiento existente [2].

En las siguientes figuras se puede apreciar el proceso de tratamiento de un pavimento, donde se indica cada uno de los equipos utilizados para lograrlo, junto con el resultado de la obra terminada.



Figura 6-4: Aplicación de Riego de Liga (sin diluir) y de Scrub Seal, Ruta 5.
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 6-5: Aplicación de Microaglomerado asfáltico (MAF), Ruta 5.
Fuente: Elaboración Propia.**

Se aprecia que no existe escurrimiento de la emulsión en el riego de liga, como tampoco se observa escurrimiento en la colocación del microaglomerado asfáltico o MAF.



**Figura 6-6: Obra terminada, Ruta 5.
Fuente: Elaboración Propia.**

En la imagen anterior es posible observar la obra de mantenimiento finalizada, donde se aplicó un riego de liga sin diluir y la tecnología del Scrub Seal. La fotografía del pavimento indicado en la Figura 6-6 fue tomada, aproximadamente, 30 días luego de haber terminado el 100% del tratamiento.

7.- Conclusiones

- El uso de emulsiones asfálticas modificadas con polímeros, en la mantención de pavimentos en servicio, involucra muchas ventajas comparado con tecnologías de conservación tradicionales. Al modificar con polímeros una emulsión, se aumentan las características de sus propiedades físico-químicas (sección 2.5.2 de esta memoria), dando como resultado mezclas de espesor del orden de 1cm, de alta performance con una mayor durabilidad por ser más resistentes al envejecimiento u oxidación [6].
- El proceso de fabricación de emulsiones monofásicas, al compararlo con el proceso para fabricar emulsiones bifásicas, es complejo y caro [4]. Para la fabricación de emulsiones monofásicas, el asfalto debe estar previamente modificado con el polímero, antes de pasar a la fase de emulsificación (mezcla con el agua y emulsificador). Por lo tanto, el asfalto en el proceso de emulsificación, debe ser calentado a temperaturas del orden de 155-165°C, para tener una viscosidad adecuada que permita un correcto bombeo y mezclado en el molino coloidal [4]. Derivado de lo anterior, es necesario la inclusión de un intercambiador de calor pos a la etapa de mezclado en el molino coloidal con el fin de disminuir la temperatura del asfalto, y así evitar la evaporación del agua en el proceso de emulsificación [4].
- El tiempo requerido (casi dos décadas) que le tomó al Comité Técnico de la Comisión Europea de Normalización (CEN), para la publicación de la normativa vigente de las emulsiones asfálticas catiónicas (UNE-EN 13808), fue derivado de la necesidad de consensuar dicha norma con las propias de los países miembros de la Comunidad Europea, que, al inicio del estudio, en 1999, integraban 12 países y al momento de publicación de la norma en 2005 alcanzaba los 28 países.
Dicho lo anterior, se requiere actualizar nuestras especificaciones de la normativa chilena, en el tema de emulsiones asfálticas modificadas ya que, desde la incorporación de los primeros requisitos para sellos bituminosos en nuestro Manual de Carreteras (Junio 1997) a la fecha de su última versión (Junio 2015), no han tenido actualizaciones basadas en las experiencias fuera de nuestras fronteras y especialmente con los avances tecnológicos logrados en Europa.
- Con respecto a los ensayos que permiten caracterizar las emulsiones asfálticas modificadas, se recomienda necesaria la inclusión del Ensayo del Péndulo, capaz de determinar la cohesión del residuo asfáltico de la emulsión. La normativa chilena no cuenta con este tipo de medición siendo la cohesión, la característica que permite establecer la temperatura y la energía de rotura máxima (esfuerzo de corte), que el material es capaz de resistir, manteniéndose flexible y tenaz.
- Se estima necesaria la actualización o modificación de la actual recomendación que establece la normativa nacional, para la obtención del residuo asfáltico, tomando como referencia lo indicado en la normativa española *UNE-EN 13074 – 1: Recuperación del ligante de las emulsiones bituminosas o de los ligantes bituminosos fluidificados o fluxados / Parte 1: Recuperación por Evaporación*, de acuerdo a los antecedentes expuestos en la presente memoria (sección 4.3), ya que la obtención del residuo asfáltico debe ir en la línea de ensayos que sometan a la emulsión a temperaturas similares a las que se tienen en pavimentos en servicio (50°C – 60°C) [24, 27]. Los

métodos de recuperación a altas temperaturas, como la recomendación nacional (110°C), afectan por envejecimiento tanto al betún asfáltico como al polímero, incidiendo en las características finales del asfalto residual [24]. Por otro lado, se recomienda la inclusión a la normativa nacional, la norma *UNE-EN 13074 – 2: Recuperación del ligante de las emulsiones bituminosas o de los ligantes bituminosos fluidificados o fluxados / Parte 2: Estabilización Post Evaporación*, ya que con ella es posible inferir las propiedades de la emulsión en campo, para un tiempo mayor a un año [20].

- La aplicación del ensayo de recuperación del residuo asfáltico, requiere previamente de la determinación exacta del contenido de asfalto en agua (en porcentaje), que tiene la emulsión a ensayar. Este valor permite definir la cantidad exacta de masa de emulsión necesaria para desarrollar el ensayo por evaporación, y cumplir con el requisito de que la película residual de asfalto modificado sobre las placas planas sea de 1mm. [33].
- Finalmente, en el riego de liga, previo a la colocación de los microaglomerados asfálticos en frío (MAF), se recomienda la incorporación del aditamento Scrub Seal. El Scrub Seal colabora en buena medida al sellado del fisuramiento existente en los pavimentos en servicio, convirtiéndolo en un método práctico y económico para aumentar la vida útil de los pavimentos [2].

8.- Referencias

- [1] COLÁS, María del Mar e IBAÑEZ Verónica. Normativa Europea y Mercado CE de emulsiones bituminosas catiónicas. Normativa Española de emulsiones bituminosas aniónicas. Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas, ATEB, España. 2012
- [2] Asphalt Emulsion Manufacturers Association, AEMA. A Basic Asphalt Emulsion Manual. Third Edition. March 2004.
- [3] Federal Highway Administration, FHWA. Polymer Modified Asphalt Emulsions: Composition, Uses and Specifications for Surface Treatments. January 2012.
- [4] Asociación técnica de Emulsiones Bituminosas, ATEB. Las Emulsiones de Betún: Su Química – Física. España. No indica año de publicación.
- [5] ENGMAN Mikael, JAMES Alan, NEEDHAM David y NG Tony. Specifying Slurry Surfacing Emulsion Quality: Particle Size and Size Distribution.
- [6] M.A. Shafii, M. Y. Rahman y J. Ahmad. Polymer Modified Asphalt Emulsion. En: International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS. Vol: 11, No: 06.
- [7] BAUGHMAN, Barry. Modified Asphalt Emulsions. En: AEMA Asphalt Emulsion Technologies Workshop. Indianapolis, IN. November 13 – 14, 2008.
- [8] Ministerio de Obras Públicas, MOP Chile. Manual de Carreteras, Volumen N°5: Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Junio 2015.
- [9] KUCHARREK, Tony. Micro Surfacing Emulsion Propierties Measured by Using Different Recovery Methods. En: AEMA Workshop. Niagara Falls, ON. November 2 – 3, 2010.
- [10] AkzoNobel. Documento Técnico. Emulsiones Bituminosas. No indica año de publicación.
- [11] CASTILLO Luer, Daniela Nora. Recuperación del Ligante de Emulsiones Asfálticas Modificadas. Tesis (Constructor Civil). Valparaíso. UTFSM, Departamento de Obras Civiles, Octubre 2007.
- [12] ELSAN S.A. Conservación de Carreteras. Lechadas Bituminosas: Slurry Seal. 1985.
- [13] Ministerio de Fomento, España. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Orden FOM/2523/2014. Diciembre, 2014.
- [14] Ministerio de Fomento, España. Artículo 216: Emulsiones Bituminosas Modificadas con Polímeros. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). 1999.

- [15] ANDALUZ Daniel. Tecnologías Asfálticas con Emulsión Bituminosa (presentación). En: Congreso Internacional – Pavimentos de Hormigón y Asfalto. Santiago de Chile, 26 al 28 de Mayo, 2015.
- [16] Norma NLT - 147. Residuo por Evaporación a 163°C de las Emulsiones Bituminosas España, 1991.
- [17] Ministerio de Fomento, España. Orden Circular 29/2011: Sobre el Pliego Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). 2011.
- [18] Ministerio de Fomento, España. Artículo 214: Emulsiones Bituminosas, Orden FOM/2523/2014. Actualización de Artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). 2015.
- [19] Association Francaise de Normalisation (AFNOR). Normalisation Francaise FD T 66 – 031. Produits bitumineux – Détermination de la cinétique de stabilisation des liants anhydres et des émulsions de bitume – Méthode par étuvage a 50 °C pendant 14 jours. Novembre 11, 2015. France.
- [20] International Slurry Surfacing Association, ISSA. Recommended Performance Guideline for Microsurfacing. Febrero 2010.
- [21] COLÁS, María del Mar y CABANILLAS Pilar. Métodos de Ensayo para valorar la cohesión del ligante residual de las emulsiones bituminosas modificadas. Dirección Técnica de PROAS. Alcalá de Henares, Madrid, España. 2014
- [22] Norma UNE EN 13398. Betunes y ligantes bituminosos – Determinación de la recuperación elástica de los betunes modificados. España, 2014.
- [23] TORRES Samuel, COLAS María del Mar y NEBREDA Javier. Marcado CE de Emulsiones Bituminosas. Nuevas Especificaciones. Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas. España.
- [24] IVORRA Rafael. y GUZMAN Francisco. Emulsiones de Betún Modificado. En: VI Congreso Ibero – Latinoamericano. Santiago de Chile. Noviembre 1991.
- [25] Norma UNE 1428: Betunes y ligantes bituminosos – Determinación del contenido en agua en las emulsiones bituminosas. Método de destilación azeotrópica. España, 2012.
- [26] GORDILLO JAIME. History and development of Slurry Seals and Microsurfacing in Western Europe. E.S.M Research Centre. Madrid. España. 1985
- [27] KADRMAS, Arlis. Use of Low Temperature Recovery Techniques for Latex – Modified Asphalt Emulsions. En: VIII Mexican Asphalt Congress. Cancún, México. August 28 – 30, 2013.
- [28] Ministerio de Obras Públicas, MOP Chile. Manual de Carreteras, Volumen N°8: Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensayo y Control. Junio 2015.

- [29] SANDOVAL Israel y CREMADES Ignacio. Caracterización de Asfaltos mediante Creep repetido Multi-esfuerzo en Reómetro de Corte Dinámico. SURFAX S.A.de C.V.
- [30] GARNICA Paul, Gómez José Antonio y DELGADO Horacio. Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio. Instituto Mexicano del Transporte. México. 2003.
- [31] MERCADO Ronald, BRACHO Carlos y AVENDAÑO Jorge. Emulsiones Asfálticas: Usos – Rompimiento. Cuaderno FIRP S265-A. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos. Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Mérida, Venezuela. 2008.
- [32] PEREZ Edmundo y BARDESI Alberto. Manual para la caracterización de ligantes y másticos bituminosos. Laboratorio de Caminos (Barcelona). Departamento de Infraestructura del Transporte y Territorio. Universitat Politècnica de Catalunya. 2010
- [33] Norma UNE EN 13074-1. Recuperación del ligante de las emulsiones bituminosas o de los ligantes bituminosos fluidificados o fluxados / Parte 1: Recuperación por Evaporación. España, 2014.
- [34] Norma UNE EN 13074-2. Recuperación del ligante de las emulsiones bituminosas o de los ligantes bituminosos fluidificados o fluxados / Parte 2: Estabilización después de la recuperación por evaporación. España, 2014.
- [35] Norma UNE EN 13614. Betunes y ligantes bituminosos – Determinación de la adhesividad de las emulsiones bituminosas por inmersión en agua. España, 2014.
- [36] Ministerio de Fomento, España. Artículo 531: Riegos de Adherencia. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). 2014.
- [37] LORIA Guillermo y ELIZONDO Fabián. Diseño de sobrecapas asfálticas anti-reflejo de grietas calibrada para Costa Rica. En: Tercer Congreso Regional Latinoamericano. Bogotá, Colombia, 8 y 9 de Noviembre. 2010.
- [38] RONI Castroviejo, Matías. Análisis Teórico y Experimental de la Adherencia entre Capas Asfálticas para Cargas de Aeronaves. Tesis (Ingeniero Civil). Valparaíso. UTFSM, Departamento de Obras Civiles, 2006.

9.- Anexo A: Norma UNE – EN 13074-1

UNE – EN 13074 - 1: "Recuperación del ligante de las emulsiones bituminosas o de los ligantes bituminosos fluidificados o fluxados / Parte 1: Recuperación por Evaporación".

Objetivo y Campo de Aplicación

Método para recuperar el ligante de las emulsiones bituminosas después de su acondicionamiento a temperatura ambiente durante un período de 24 hrs., seguido por otro de 24 hrs. a 50°C.

Aplica para todos los tipos de emulsiones bituminosas, modificadas con polímeros o convencionales.

Principio

Extender una capa delgada de emulsión asfáltica (1mm de espesor) sobre una lámina de material adecuado (silicona). Se acondiciona en el laboratorio durante 24 hrs. a temperatura ambiente y después se traslada a una estufa a 50°C durante otras 24 hrs.

Aparatos

1. Placas Planas
 - a. Altura Interna: 35 mm (máxima).
 - b. Superficie: 0.04 m² (mínima).
 - c. Número de Placas: Depende de la cantidad de asfalto que se quiera para realizar los ensayos posteriores.
 - d. Material: Silicona u otro material antiadherente.
2. Espátula.
3. Horno Ventilado.
 - a. Volumen: 80 Litros (mínimo).
 - b. Temperatura: 50°C.
 - c. Número de Ventiladores: 2 (mínimo).
4. Balanza.

Procedimiento

El objetivo es obtener el espesor de mezcla que debe aplicarse sobre la placa, que permita obtener la cantidad de masa necesaria para realizar los ensayos posteriores.

El asfalto residual requerido es (1 ± 0.05) [kg/m²] [32] y tomando la densidad de la emulsión como 1000[kg/m³], se tiene que el espesor que se necesita en un área de 1[m²], para obtener dicha cantidad de asfalto residual requerido es:

Área de superficie	As =	1	[m ²]
Asfalto residual	Ar =	1	[kg/m ²]
Densidad de asfalto	Da =	1000	[kg/m ³]

$$\boxed{Ar = Daxe}$$

Espesor de asfalto e = 1 [mm]

Por lo tanto, se concluye que para obtener una cantidad de residuo asfáltico de (1 ± 0.05) [kg/m²] en una bandeja de área 1[m²], la emulsión a ensayar debe tener un espesor mínimo de 1[mm].

Luego, es necesario determinar el contenido exacto de asfalto en la emulsión. Para esto se debe seguir el procedimiento indicado en la Norma UNE – EN 1428: “*Contenido de Ligante por contenido de agua*”. A modo de ejemplo, si se considera, que la cantidad de asfalto mínima que tiene una emulsión es 65% (en peso), se tiene

$$\boxed{M = 1 \times \frac{A}{B/100}}$$

Donde,

M: Masa requerida de emulsión [kg].

A: Área de la placa [m²].

B: Contenido de Ligante [%].

Tomando los siguientes valores mínimos,

$$\left. \begin{array}{l} A_{\text{mínimo}} = 0.04 \text{ m}^2 \\ B_{\text{mínimo}} = 65 \% \end{array} \right\} M_{\text{mínima}} = 0.062 \text{ [kg]}$$

Por lo tanto, la masa mínima necesaria por m² es

$$\frac{M}{A} = \frac{0.062 \text{ [kg]}}{0.04 \text{ [m}^2\text{]}} = 1.55 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$$

Utilizando la relación calculada anteriormente se tiene:

$$1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right] = 1 \text{ mm de espesor} \rightarrow 1.55 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right] = 1.55 \text{ mm de espesor}$$

Por lo tanto, se concluye que el espesor mínimo de emulsión que debe aplicarse sobre las placas planas de área 0.04 [m²], para obtener un residuo asfáltico mínimo de (1 ± 0.05) [kg/m²], es de 1.55 [mm].

Procedimiento de Recuperación

1. Colocar las placas sobre la balanza y aplicar la cantidad de emulsión calculada. Ayudarse con una espátula.
2. Colocar las placas con la emulsión sobre la superficie plana. Comprobar horizontalidad usando nivel de burbuja y acondicionar las placas durante (24 ± 1) hrs. a $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ bajo condiciones normales de laboratorio.
3. Trasladar las placas a estufa precalentada y mantener ahí durante (24 ± 1) hrs. a $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$. En caso de tener más de una placa, disponerlas de manera que no entorpezca la circulación de aire. La circulación de aire debe ser posible en cada lado de cada una de las placas.
4. Al final del período establecido, retirar las placas.

Recuperación y Almacenamiento del Ligante Recuperado

1. Recoger el ligante recuperado usando herramienta apropiada.
2. El ligante residual proveniente de una misma muestra, contenido en todas las placas, debe colocarse en el mismo recipiente.
3. En caso que se necesite ensayar nuevamente el ligante recuperado, éste debe guardarse en un recipiente sellado a una temperatura menor a 28°C .

Homogenización del Ligante Recuperado

Antes de realizar el ensayo posterior, el ligante procedente de cada placa debe homogeneizarse mediante mezclado. Si la muestra proviene de más de una placa, el ligante proveniente de todas las placas debe homogeneizarse.

Para evitar degradación excesiva, el calentamiento del ligante recuperado debe ser controlado estrictamente con la norma EN 12594 y su metodología. Los tiempos de calentamiento deben ser los mínimos posibles.

Cuando sea posible, la preparación para ensayos posteriores debe realizarse inmediatamente después de homogeneizar el ligante recuperado para evitar volverla a calentar.

10.- Anexo B: Norma UNE – EN 13074-2

UNE – EN 13074 - 2: "Recuperación del ligante de las emulsiones bituminosas o de los ligantes bituminosos fluidificados o fluxados / Parte 2: Estabilización después de la recuperación por evaporación".

Objetivo y Campo de Aplicación

Esta norma europea especifica un método de estabilización a 85°C durante 24 hrs de un ligante después de la recuperación a partir de una emulsión asfáltica o de un asfalto modificado o fluxado, para permitir la realización de ensayos posteriores.

Aplica a todos los tipos de emulsiones asfálticas, modificadas con polímeros o no modificadas, además de a todos los tipos de asfaltos fluidificados y fluxados, tanto modificados con polímeros como no modificados.

El método de ensayo de recuperación se especifica en la Norma EN 13074 – 1.

Términos y Definiciones

Asfalto recuperado: Material que queda después de haber tratado, conforme a las condiciones especificadas en la Norma EN 13074-1, una emulsión asfáltica o un asfalto fluidificado o fluxado.

Asfalto estabilizado: Asfalto libre de la mayoría de la parte volátil proveniente de los aceites fluxantes, obtenido del asfalto recuperado calentándolo a 85°C durante 24 hrs en las condiciones especificadas en este método.

Principio del Método

Se estabiliza a 85°C durante 24 hrs en un horno ventilado una fina capa de **asfalto recuperado** de una emulsión o de un asfalto fluidificado o fluxado.

Aparatos

Equipamiento y material de vidrio usual en el laboratorio, además de lo siguiente.

1. Placas Planas
 - a. Altura Interna: 35 mm (máxima).
 - b. Superficie: 0.04 m² (mínima).
 - c. Número de Placas: Depende de la cantidad de asfalto que se quiera para realizar los ensayos posteriores.
 - d. Material: Silicona u otro material antiadherente.

2. Horno Ventilado.
- a. Volumen: 80 Litros (mínimo).
 - b. Temperatura: $(85 \pm 2)^{\circ}\text{C}$.
 - c. Número de Ventiladores: 2 (mínimo).

Es aceptable usar el mismo horno para la etapa de recuperación (Norma EN 13074 – 1) como para la de estabilización, asumiendo que dicho horno es capaz de mantener la temperatura especificada alrededor de la muestra. En caso de que se use el mismo horno en las dos etapas, la muestra debe mantenerse en el horno durante el periodo de ajuste de la temperatura (desde los 50°C especificados en la Norma 13074-1 hasta los 85°C), asumiendo que este periodo no sobrepasa de 1 hr.

Procedimiento de Ensayo

Estabilización del asfalto

La estabilización del asfalto recuperado debe realizarse inmediatamente después del procedimiento de recuperación (Norma EN 13074-1).

Se colocan las placas con el asfalto recuperado en el horno y se dejan allí durante (24 ± 1) hr a $(85 \pm 2)^{\circ}\text{C}$. Si hubiera varas placas, se introducen simultáneamente. Los asfaltos no deberían agruparse cuando sus partes volátiles sean de diferente naturaleza. Se disponen las placas de manera que no entorpezca la circulación del aire dentro del horno. La circulación de aire debe ser posible en cada lado de cada una de las placas.

Al final del periodo especificado, se retira(n) la(s) placa(s) del horno.

Recuperación y almacenamiento del asfalto recuperado

Se recoge sin dilación el asfalto estabilizado de la(s) placa(s) usando una herramienta apropiada pero sin aplicar calor suplementario a la muestra. Para facilitar la recuperación de los ligantes que están sobre el material antiadherente, puede ser necesario enfriar las placas en un refrigerador o congelador.

El asfalto residual proveniente de una misma muestra contenido en todas las placas, debe colocarse en el mismo recipiente.

Si es necesario que el asfalto recuperado sea ensayado de nuevo en una fecha posterior, debe guardarse durante el menor tiempo posible, y nunca más de 28 días, en un recipiente sellado guardado a una temperatura inferior a 28°C .

Homogenización del asfalto estabilizado y preparación de la muestra para ensayo posterior

Antes de realizar cualquier ensayo posterior del asfalto estabilizado, el asfalto procedente de cada placa debe homogeneizarse mediante mezclado. Si la muestra del asfalto recuperado proviene de más de una placa, el asfalto proveniente de todas las placas debe mezclarse. El calentamiento del asfalto recuperado debe ser estrictamente controlado de acuerdo con la Norma EN 12594. Cuando sea posible, la preparación para ensayos posteriores debe realizarse inmediatamente después de homogeneizar el asfalto recuperado para evitar volver a calentar.

Cuando las muestras deban verterse en moldes para ensayos posteriores y para prevenir oxidaciones suplementarias, el asfalto estabilizado debe calentarse a una temperatura comprendida entre el punto de reblandecimiento esperado +80°C y el punto de reblandecimiento esperado + 100°C durante el mínimo de tiempo necesario. Los moldes a usar para los ensayos posteriores deben precalentarse de acuerdo con las recomendaciones recogidas en las normas apropiadas.

11.- Anexo C: Modelación del Efecto del Riego de Liga en el Comportamiento Estructural del Pavimento.

Las deformaciones y esfuerzos que se producen en la interfase entre las diferentes capas asfálticas es un tema de alta importancia, ya que si ambas capas están mal unidas, los esfuerzos no serán distribuidos de manera correcta, provocando que las capas superiores reciban mayores esfuerzos, generando así fallas mucho antes de alcanzar la vida útil del pavimento.

Para poder definir los espesores de las distintas capas que conforman un pavimento, es necesario primero, realizar una modelación definiendo el número de capas deseadas junto con sus propiedades (espesores y módulos) y también es necesario definir el tipo de carga que actuará sobre el pavimento.

Este anexo tiene como objetivo establecer un procedimiento que permita modelar un pavimento cualquiera, para luego determinar el efecto del riego de liga en el comportamiento estructural del pavimento, es decir, analizar la unión entre capas asfálticas y su influencia en el desempeño del pavimento.

Para realizar lo descrito anteriormente, se utiliza el programa BISAR, software desarrollado por Shell International Oil Products para el cálculo racional de los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos que actúan en los sistemas de capas debido a la acción de diferentes tipos de cargas [38].

El programa cuenta con las siguientes características:

- Sistema consistente en capas horizontales de espesor uniforme. Las capas superiores se apoyan una sobre otra, mientras que la última capa corresponde a un espacio semi-infinito.
- Las capas tienen una extensión infinita en el sentido horizontal.
- Los materiales de cada capa son homogéneos e isotrópicos.
- Los materiales son elásticos y tienen una relación esfuerzo-deformación de forma lineal.

El programa también cuenta con una opción especial, referida al tipo de adherencia que existe entre las capas. BISAR define dos estados de adherencia extremos: adherencia total o adherencia nula (desplazamiento libre). A partir de estos, es posible definir un estado intermedio: adherencia parcial [38].

Para el modelo, la adherencia parcial es definida físicamente como capas asfálticas despegadas parcialmente, que se mantienen adheridas por fricción y que sufren desplazamientos relativos a nivel de la interfase.

Debido a los diversos parámetros y variables que influyen en la transferencia de los esfuerzos y deformaciones de corte entre capas, no es posible considerarlos en la adherencia parcial usando BISAR. Los conceptos de fricción, cohesión interna, dilatancia y adhesión dada por el riego de liga no están al alcance de ningún software aún.

Para solucionar este inconveniente, BISAR define el parámetro AK (Shear Spring Compliance [m^3/N]) con objeto de evaluar el estado intermedio de adherencia. Este parámetro tiene la siguiente forma [38]:

$$AK = \frac{\text{Desplazamiento horizontal entre capas}}{\text{Esfuerzo de Corte actuando en la interfase}} \left[\frac{m^3}{N} \right]$$

El parámetro definido anteriormente se utiliza para definir el Parámetro de Fricción denominado por “ α ” y que tiene la siguiente forma [38]:

$$\alpha = \frac{AK}{AK + \frac{1+\nu}{E} a}$$

Donde:

- a: Radio de Carga, [m].
- E: Módulo de la capa sobre la interfase, [Pa].
- ν : Coeficiente de Poisson.
- α : Coeficiente de Fricción. Varía entre 0 (adherencia total) y 1 (deslizamiento total).

También es posible el uso de otro parámetro para analizar el tipo de desplazamiento que existe entre capas. Se denomina *Reduced Shear Spring Compliance* (ALK), se expresa en metros y se define como

$$ALK = \frac{\alpha}{1 - \alpha} a$$

BISAR utiliza los parámetros AK o ALK como datos de entrada para el análisis. El parámetro de fricción no debe confundirse con el coeficiente de fricción clásico, ya que el primero no sólo depende de las propiedades de los materiales, sino que además depende del radio de carga (a).

MODELACIÓN

La modelación consta básicamente la cantidad de capas asfálticas, sus propiedades y la carga que circulará sobre ellas.

A continuación se entrega un esquema con el número de capas que se modelarán, junto con sus respectivas propiedades.

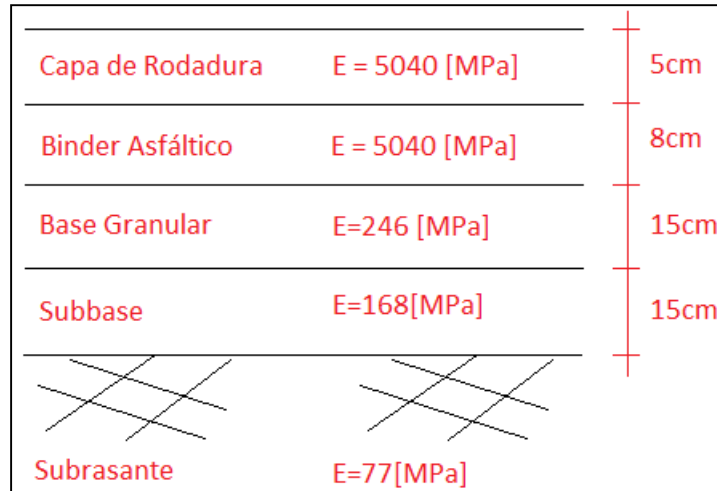


Figura 11-1: Esquema base para modelo.
Fuente: Elaboración propia.

Luego de definir la geometría del problema, se establecen las cargas que actuarán sobre el pavimento. Para este caso se considera el paso de un camión corriente, que cuenta con las siguientes características:

- Presión de Inflado: 750kPa.
- Peso por rueda: 29kN.
- Radio de influencia de carga: 11.05cm.

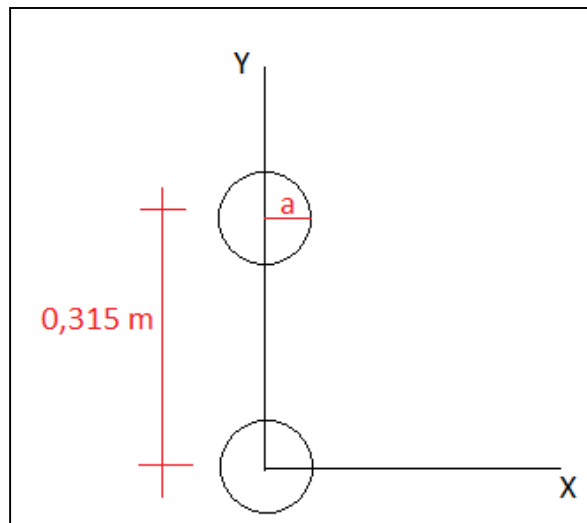


Figura 11-2: Esquema de cargas para modelo.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación se procede a describir el procedimiento de cálculo. Como se mencionó anteriormente, la idea es determinar la influencia que tiene el riego de liga sobre las capas asfálticas.

Para esto, se supondrá lo siguiente:

- **Caso 1:** Se asumirá que el camión se desplaza continuamente, analizando la influencia de su paso sobre un pavimento en el que la adhesión entre capas varía (fricción parcial). Es decir, se averiguará como influye el paso del camión sobre un pavimento que va perdiendo adherencia entre sus capas.
- **Caso 2:** Se supondrá el mismo camión sobre el mismo pavimento, pero ahora el camión frena debido a alguna circunstancia, generando una fuerza horizontal sobre el pavimento. Se realizarán dos suposiciones con respecto a la fuerza de frenado: en un primer ejercicio al 40% del peso del camión y, en un segundo ejercicio, al 60% del peso del camión.

Con este ejemplo se busca determinar la deformación entre capas debido al paso del camión y además calcular la fatiga asociada a esa deformación lo que permitirá concluir la influencia del riego de liga sobre un pavimento. Para el cálculo de la fatiga, se utilizará el programa BANDS 2.0, que entrega el número de ciclos máximo capaz de soportar el pavimento para un valor de deformación dado. Se analizará la relación entre el número de ciclos para el caso de adherencia total ($\alpha=0.1$) y desprendimiento total ($\alpha=0$).

Luego de explicar el procedimiento del ejercicio, se procede a analizar los resultados entregados. Cabe destacar que los resultados se analizarán a 5cm de profundidad, es decir, entre la capa de rodadura y el binder asfáltico.

RESULTADOS

Primer Caso: Camión sin freno

Tabla 11-1: Tabla comparativa de deformaciones para cada nivel de desprendimiento. Caso 1.

Profundidad [m]	α	ALK [m]	Strain YY [ustrain]	Strain XX [ustrain]
0,05	0	0,000	-19,91	-33,44
	0,1	0,012	24,40	39,10
	0,2	0,026	29,44	45,54
	0,3	0,045	35,86	53,83
	0,4	0,070	43,50	63,86
	0,5	0,105	52,75	76,35
	0,6	0,158	64,24	92,41
	0,7	0,245	78,59	113,40
	0,8	0,420	98,00	143,30
	0,9	0,945	127,70	191,80
	0,99	10,395	188,30	289,60

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 11-1 se aprecia la variación de las deformaciones entre las capas del pavimento (*Strain XX* y *Strain YY*) para cada nivel de desprendimiento (α). Se observa que a mayor desprendimiento (a mayor α) existe una mayor deformación entre capas.

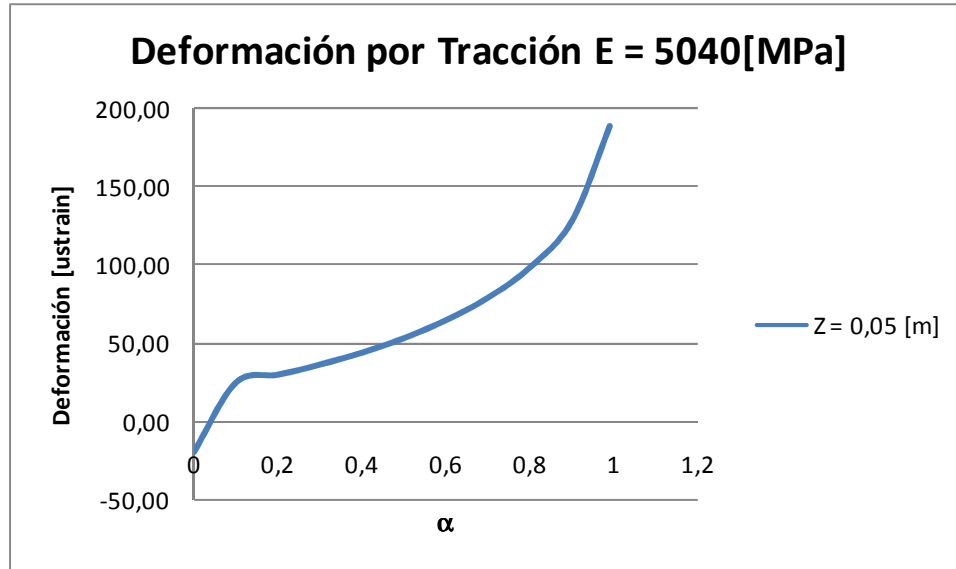


Figura 11-3: Gráfico Deformación por Tracción v/s Desprendimiento.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación se indica la relación entre los números de ciclos de fatiga.

Tabla 11-2: Relación entre Número de Ciclos de Fatiga. Caso 1.

α	Strain [ustrain]	Número de Ciclos de Fatiga [x 1000]	Relación entre Número de Ciclos de Fatiga
0,1	39,10	7080000	22056,07
0,99	289,600	321	

Fuente: Elaboración propia.

Segundo Caso: Camión con freno (40% del Peso)

Tabla 11-3: Tabla comparativa de deformaciones para cada nivel de desprendimiento. Caso 2.1.

α	ALK [m]	Strain YY [ustrain]	Strain XX [ustrain]
0	0,000	-19,91	-33,44
0,1	0,012	24,40	39,10
0,2	0,026	29,44	45,54
0,3	0,045	35,86	53,83
0,4	0,070	43,50	63,86
0,5	0,105	52,75	76,35
0,6	0,158	64,24	92,41
0,7	0,245	78,59	113,40
0,8	0,420	98,00	143,30
0,9	0,945	127,70	191,80
0,99	10,395	188,30	289,60

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11-3 se aprecia la variación de las deformaciones entre las capas del pavimento (*Strain XX* y *Strain YY*) para cada nivel de desprendimiento (α). Se observa que a mayor desprendimiento (a mayor α) existe una mayor deformación entre capas.

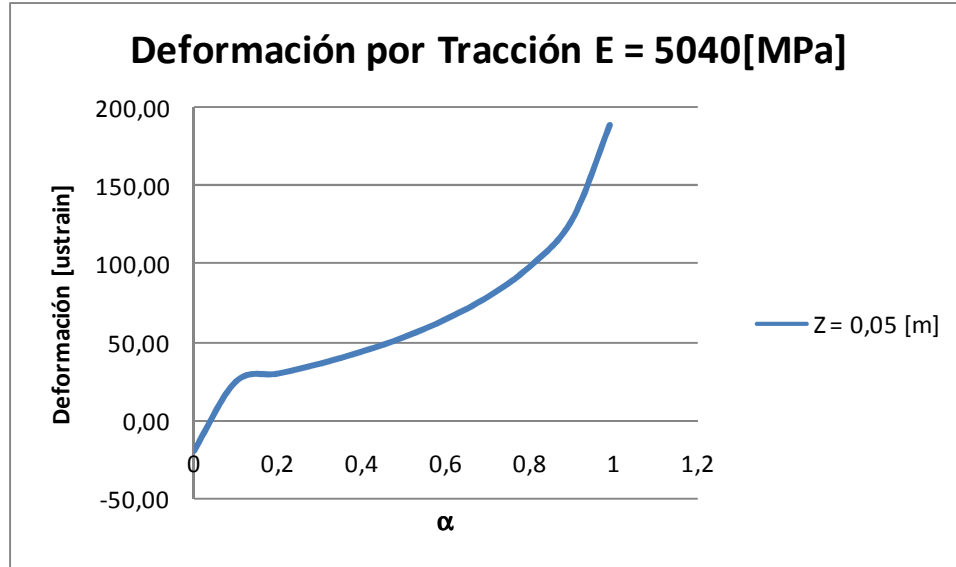


Figura 11-4: Gráfico Deformación por Tracción v/s Desprendimiento (40% de peso)
Fuente: Elaboración propia.

A continuación se indica la relación entre los números de ciclos de fatiga.

Tabla 11-4: Relación entre Número de Ciclos de Fatiga. Caso 2.1.

α	Strain [ustrain]	Número de Ciclos de Fatiga [x 1000]	Relación entre Número de Ciclos de Fatiga
0,1	39,10	7080000	22056,07
0,99	289,600	321	

Fuente: Elaboración propia.

Segundo Caso: Camión con freno (60% del Peso)

Tabla 11-5: Tabla comparativa de deformaciones para cada nivel de desprendimiento. Caso 2.2.

α	ALK [m]	Strain YY [ustrain]	Strain XX [ustrain]
0	0,000	-19,91	-33,44
0,1	0,012	24,40	39,10
0,2	0,026	29,44	45,54
0,3	0,045	35,86	53,83
0,4	0,070	43,50	63,86
0,5	0,105	52,75	76,35
0,6	0,158	64,24	92,41
0,7	0,245	78,59	113,40
0,8	0,420	98,00	143,30
0,9	0,945	127,70	191,80
0,99	10,395	188,30	289,60

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11-5 se aprecia la variación de las deformaciones entre las capas del pavimento (*Strain XX* y *Strain YY*) para cada nivel de desprendimiento (α). Se observa que a mayor desprendimiento (a mayor α) existe una mayor deformación entre capas.

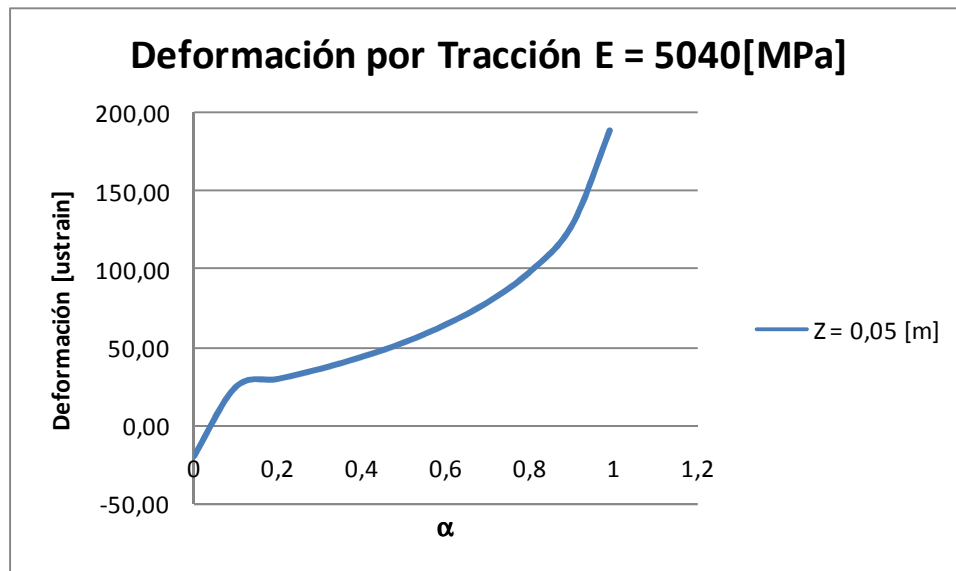


Figura 11-5: Gráfico Deformación por Tracción v/s Desprendimiento (60% de peso)
Fuente: Elaboración propia.

A continuación se indica la relación entre los números de ciclos de fatiga.

Tabla 11-6: Relación entre Número de Ciclos de Fatiga. Caso 2.2.

α	Strain [ustrain]	Número de Ciclos de Fatiga [x 1000]	Relación entre Número de Ciclos de Fatiga
0,1	39,10	7080000	22056,07
0,99	289,600	321	

Fuente: Elaboración propia.

Como conclusión de éste ejercicio puede decirse que en todos los casos se cumple la lógica de que a mayor desprendimiento entre las capas el funcionamiento del pavimento decrece, debido a que como aumentan las deformaciones entre las capas la fatiga del pavimento aumenta, es decir, disminuye el número de ciclos de fatiga.

Se aprecia que en todos los casos los resultados son los mismos. Esto puede deberse a que los valores adoptados para la modelación del pavimento son tales que no se ven afectados para los distintos análisis realizados (camión sin freno y con freno).

De todas maneras, queda demostrado que es imprescindible ejecutar la correcta aplicación del riego de liga, ya que de esta etapa depende en gran parte, que el pavimento cumpla con el desempeño esperado.

12.- Anexo D: Cotizaciones de Equipos

A continuación se entrega las cotizaciones de los principales equipos necesarios para el desarrollo de las emulsiones modificadas con polímeros.

Equipo	Marca / Modelo	Descripción	Uso	Distribuidor	Costo
Granulómetro Láser	Malvern / Mastersizer Micro	Equipo para la determinación de distribución de tamaño de partículas, en muestras húmedas, por Difracción Láser.	Lechadas y Microaglomerados	Melvyn Becerra y Cía. Ltda. Mail:ventas@melvynbecerra.cl	USD \$54.145
Pendolo de Cohesión	Vialit / CRT-VCP	Equipo para la determinación de la energía de rotura de una película de betún recuperado.	Lechadas y Microaglomerados	Index S.A. Mail: patricio.encina@indexsa.cl	USD \$29.394
Wet Track Abrasion Tester	Benedict	Equipo para determinar la cantidad mínima de betún en la mezcla, por medio del ensayo de abrasión.	Lechadas y Microaglomerados	Benedict Slurry Seal / Laboratory Equipments. Mail: sales@benedictslurry.com	USD \$5.881
Loaded Wheel Tester	Benedict	Equipo para determinar la cantidad máxima de betún en la mezcla, por medio de la medición de la resistencia de ésta al ahuellamiento.	Lechadas y Microaglomerados	Benedict Slurry Seal / Laboratory Equipments. Mail: sales@benedictslurry.com	USD \$3.986

***Nota: Se recomienda que el Péndulo Vialit sea de última tecnología, debido a su importancia en la caracterización del residuo asfáltico de las emulsiones.**

13.- Anexo E: Normas Actualizadas

A continuación se entregan las portadas de la última versión de las normas que se recomiendan para actualizar la normativa nacional.

Estas normas son las siguientes.

Norma UNE – EN 1428 (2012)	Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del contenido de agua en las emulsiones bituminosas. Método de destilación azeotrópica.
Norma UNE – EN 13074 - 1 (2011)	Recuperación del Ligante de Emulsiones Bituminosas. Parte 1: Recuperación por Evaporación.
Norma UNE – EN 13074 - 2 (2011)	Recuperación del Ligante de Emulsiones Bituminosas. Parte 2: Estabilización después de la recuperación por Evaporación.
Norma UNE – EN 13075 - 1 (2003)	Determinación del comportamiento a la rotura. Parte 1: Determinación del Índice de Rotura a las emulsiones bituminosas catiónicas.
Norma UNE – EN 13588 (2008)	Ensayo de Cohesión: Péndulo Vialit.

Mayo 2012

TÍTULO

Betunes y ligantes bituminosos

Determinación del contenido de agua en las emulsiones bituminosas

Método de destilación azeotrópica

Bitumen and bituminous binders. Determination of water content in bituminous emulsions. Azeotropic distillation method.

Bitumes et liants bitumineux. Détermination de la teneur en eau dans les émulsions de bitume. Méthode de distillation azeotropique.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 1428:2012.

OBSERVACIONES

Esta norma anula y sustituye a la Norma UNE-EN 1428:2000.

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 51 *Productos petrolíferos* cuya Secretaría desempeña AOP.

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 51 *Productos petrolíferos* cuya Secretaría desempeña AOP.

Editada e impresa por AENOR
Depósito legal: M 17056:2012

© AENOR 2012
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Génova, 6
28004 MADRID-España

info@aenor.es
www.aenor.es

Tel.: 902 102 201
Fax: 913 104 032

11 Páginas



Mayo 2011

TÍTULO

Betunes y ligantes bituminosos

Recuperación del ligante de las emulsiones bituminosas o de los ligantes bituminosos fluidificados o fluxados

Parte 1: Recuperación por evaporación

Bitumen and bituminous binders. Recovery of binder from bituminous emulsion or cut-back or fluxed bituminous binders. Part 1: Recovery by evaporation.

Bitumes et liants bitumineux. Récupération du liant d'une émulsion de bitume ou d'un bitume fluidifié ou fluxé par évaporation. Partie 1: Récupération par évaporation.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 13074-1:2011.

OBSERVACIONES

Esta norma anula y sustituye a la Norma UNE-EN 13074:2003.

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 51 *Productos petrolíferos* cuya Secretaría desempeña AOP.

Editada e impresa por AENOR
Depósito legal: M 21692:2011

© AENOR 2011
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Génova, 6
28004 MADRID-España

info@aenor.es
www.aenor.es

Tel.: 902 102 201
Fax: 913 104 032

12 Páginas

Grupo 10

AENOR. Esta copia ha sido realizada por INN con autorización de AENOR.
Queda prohibida su reproducción total o parcial

Mayo 2011

TÍTULO

Betunes y ligantes bituminosos

Recuperación del ligante de las emulsiones bituminosas o de los ligantes bituminosos fluidificados o fluxados

Parte 2: Estabilización después de la recuperación por evaporación

Bitumen and bituminous binders. Recovery of binder from bituminous emulsion or cut-back or fluxed bituminous binders. Part 2: Stabilisation after recovery by evaporation.

Bitumes et liants bitumineux. Récupération du liant d'une émulsion de bitume ou d'un bitume fluidifié ou fluxé. Partie 2: Stabilisation après récupération par évaporation.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 13074-2:2011.

OBSERVACIONES

Esta norma anula y sustituye a la Norma UNE-EN 14895:2006.

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 51 *Productos petrolíferos* cuya Secretaría desempeña AOP.

Editada e impresa por AENOR
Depósito legal: M 21693:2011

© AENOR 2011
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Génova, 6
28004 MADRID-España

info@aenor.es
www.aenor.es

Tel.: 902 102 201
Fax: 913 104 032

9 Páginas

Grupo 9

Octubre 2009

TÍTULO

Betunes y ligantes bituminosos

Determinación del comportamiento a la rotura

Parte 1: Determinación del índice de rotura de las emulsiones bituminosas catiónicas

Método de la carga mineral

Bitumen and bituminous binders. Determination of breaking behaviour. Part 1: Determination of breaking value of cationic bituminous emulsions, mineral filler method.

Bitumes et liants bitumineux. Détermination du comportement à la rupture. Partie 1: Détermination de l'indice de rupture des émulsions cationiques de bitume, méthode des fines minérales.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 13075-1:2009.

OBSERVACIONES

Esta norma anula y sustituye a la Norma UNE-EN 13075-1:2003.

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 51 *Productos petrolíferos* cuya Secretaria desempeña AOP.

Editada e impresa por AENOR
Depósito legal: M 45156:2009

© AENOR 2009
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Genova, 6
28004 MADRID-España

info@aenor.es
www.aenor.es

Tel.: 902 102 201
Fax: 913 104 032

15 Páginas

Grupo 12

Diciembre 2008

TÍTULO

Betunes y ligantes bituminosos

Determinación de la cohesión de los ligantes bituminosos mediante el ensayo del péndulo

Bitumen and bituminous binders. Determination of cohesion of bituminous binders with pendulum test.

Bitumes et liants bitumineux. Détermination de la cohésion des liants bitumineux par la méthode du mouton-pendule.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 13588:2008.

OBSERVACIONES

Esta norma anula y sustituye a la Norma UNE-EN 13588:2004.

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 51 *Productos petrolíferos* cuya Secretaría desempeña AOP.

Editada e impresa por AENOR
Depósito legal: M 58252:2008

© AENOR 2008
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Génova, 6
28004 MADRID-España

info@aenor.es
www.aenor.es

Tel.: 902 102 201
Fax: 913 104 032

20 Páginas

Grupo 14

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A REPSOL YPF, S.A.