

# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



## **EVALUACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS BASADAS EN ESPECIFICACIONES DE GRADO DE DESEMPEÑO Y DEL EFECTO DE LAS FIBRAS UTILIZADAS EN APLICACIONES DE MICROAGLOMERADOS**

Tesis que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA  
DE LAS VÍAS TERRESTRES**

Presenta:

**Ing. Ezequiel Cruz Chimal**

Asesor:

**Dr. Jorge Alarcón Ibarra**

Co-asesor:

**M.I. Eymard Ávila Vázquez**

Morelia, Michoacán, Enero de 2020.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres que siempre me han apoyado ante cualquier situación y que sin ellos no fuera posible este logro. Gracias, José Cruz Segura y Antonia Chimal Segura.

Al Dr. Jorge Alarcón Ibarra por la oportunidad que me dio para desarrollar esta investigación. Por la orientación y el apoyo brindados durante el desarrollo del presente documento.

Al área técnica de la empresa Ergon Asfalto México S. de R.L. de C.V., por ser parte fundamental en la elaboración de este trabajo. Gracias a: M.A. Rosita Martínez Arroyo, M.I. Eymard Ávila Vázquez, Ing. Jorge Mejía Rodríguez e Ing. Quím. Luis Antonio Bernal Vélez, quienes fueron colaboradores directos en la elaboración de esta tesis.

# CONTENIDO

RESUMEN .....	VI
ABSTRACT.....	VIII
NOTACIÓN.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABLAS .....	XII
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVACIÓN.....	3
1.2. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	4
1.3. OBJETIVOS.....	5
1.3.1. <i>Objetivo general</i> .....	5
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	5
1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	5
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
2.1. TRATAMIENTOS DE PRESERVACIÓN DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	7
2.2. MICROAGLOMERADO.....	9
2.3. CALIDAD DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA DE MICROAGLOMERADO .....	10
2.3.1. <i>Agregados pétreos</i> .....	10
2.3.1.1. Introducción.....	10
2.3.1.2. Pruebas de calidad.....	10
2.3.1.3. Distribución granulométrica.....	11
2.3.2. <i>Emulsión asfáltica</i> .....	12
2.3.2.1. Introducción.....	12
2.3.2.2. Propiedades de la emulsión asfáltica relacionadas con el desempeño, métodos de prueba y valores de cumplimiento utilizados en las especificaciones propuestas EPG.....	14
2.3.2.3. Pruebas establecidas EPG para la emulsión original.....	15
2.3.2.4. Pruebas establecidas EPG para el residuo asfáltico de la emulsión.....	18
2.3.3. <i>Filler de aportación</i> .....	19
2.3.4. <i>Agua</i> .....	20
2.3.5. <i>Aditivos</i> .....	20
2.3.6. <i>Fibra de vidrio</i> .....	20
2.4. DISEÑO DE LA MEZCLA DE MICROAGLOMERADO.....	21
2.4.1. <i>Introducción</i> .....	21
2.4.2. <i>Prueba de tiempo de mezclado</i> .....	22
2.4.3. <i>Prueba de cohesión</i> .....	22
2.4.4. <i>Prueba de pérdida por abrasión en vía húmeda</i> .....	23
2.4.5. <i>Prueba de rueda cargada</i> .....	24
2.4.6. <i>Determinación del contenido óptimo de emulsión</i> .....	25
2.4.7. <i>Prueba de desplazamiento lateral</i> .....	26
2.4.8. <i>Prueba a flexión para mezclas bituminosas</i> .....	26
2.5. GENERALIDADES DE LAS ESPECIFICACIONES EPG PARA EL RESIDUO ASFÁLTICO .....	27

2.5.1. Tipos de falla en microaglomerados con relación a propiedades del residuo asfáltico. ....	27
2.5.1.1. Fallas en microaglomerado .....	28
2.5.2. Intención del uso de especificaciones EPG de emulsiones para microaglomerados .....	28
2.5.3. Clasificación EPG por temperatura .....	29
2.5.3.1. Temperatura alta .....	29
2.5.3.2. Temperatura baja .....	30
2.5.4. Designaciones de tráfico en las especificaciones EPG .....	30
2.5.5. Designaciones para la clasificación de emulsiones en las especificaciones EPG .....	31
<b>CAPÍTULO 3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>32</b>
3.1. DERIVACIÓN DE LÍMITES DE ESPECIFICACIÓN EPG .....	32
3.1.1. Derivación de límites de prueba de la emulsión original .....	32
3.1.2. Derivación de límites de prueba del residuo asfáltico .....	33
3.1.2.1. Derivación de límites de prueba a temperatura alta .....	33
3.1.2.2. Pruebas de temperatura intermedia .....	35
3.1.2.3. Derivación del límite de prueba a temperatura baja .....	36
3.2. ESTUDIOS DEL EFECTO DE LA FIBRA DE VIDRIO EN EL MICROAGLOMERADO .....	40
3.2.1. Desprendimiento por abrasión en vía húmeda .....	40
3.2.2. Mediciones de la efectividad de la fibra en mezclas de microaglomerado .....	41
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EMPLEADA EN EL EXPERIMENTO DE LABORATORIO .....</b>	<b>43</b>
4.1. MATERIALES UTILIZADOS EN EL ESTUDIO .....	43
4.2. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO PÉTREO .....	43
4.3. ANÁLISIS EPG DE EMULSIONES ASFÁLTICAS .....	44
4.3.1. Pruebas a la emulsión asfáltica original .....	44
4.3.1.1. Retenido en malla .....	44
4.3.1.2. Contenido de residuo asfáltico .....	45
4.3.1.3. Estabilidad al almacenamiento .....	45
4.3.1.4. Manejabilidad .....	47
4.3.2. Pruebas al residuo asfáltico .....	48
4.3.2.1. Non-recoverable creep compliance, Jnr .....	48
4.3.2.2. Módulo de corte dinámico en valores de ángulos de fase críticos de residuos asfálticos. ....	48
4.4. FIBRA DE VIDRIO .....	53
4.5. DISEÑO DE LA MEZCLA DE MICROAGLOMERADO .....	53
4.5.1. Prueba de tiempo de mezclado .....	53
4.5.2. Prueba de cohesión .....	54
4.5.3. Prueba de pérdida por abrasión en húmedo (WTAT) .....	54
4.5.4. Prueba de rueda cargada (LWT) .....	55
4.5.5. Prueba de desplazamiento lateral .....	56
4.5.6. Prueba a tensión-flexión para microaglomerados .....	57
<b>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
5.1. AGREGADO PÉTREO .....	58
5.1.1. Distribución granulométrica .....	58
5.1.2. Calidad del agregado pétreo .....	59
5.2. EMULSIÓN ASFÁLTICA ORIGINAL .....	59
5.2.1. Retenido en malla .....	59
5.2.2. Contenido de residuo asfáltico .....	60

5.2.3. Estabilidad al almacenamiento .....	60
5.2.4. Manejabilidad .....	62
5.3. RESIDUO ASFÁLTICO.....	64
5.3.1. Clasificación EPG a temperatura alta.....	64
5.3.2. Clasificación EPG a temperatura baja .....	65
5.4. EVALUACIÓN DE EMULSIONES Y FIBRA EN MICROAGLOMERADOS .....	67
5.4.1. Selección de emulsiones .....	67
5.4.1.1. Tiempo de mezclado .....	68
5.4.1.2. Cohesión .....	68
5.4.2. Selección del contenido óptimo de emulsión mediante WTAT y LWT .....	70
5.4.3. Pruebas de desempeño en microaglomerados con y sin fibra de vidrio, con contenido óptimo de emulsión .....	73
5.4.3.1. Pérdida por abrasión en húmedo.....	73
5.4.3.2. Rueda cargada.....	75
5.4.3.3. Desplazamiento lateral .....	76
5.4.3.4. Tensión a flexión .....	77
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>81</b>
6.1. CONCLUSIONES .....	81
6.2. TRABAJOS FUTUROS .....	82
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>83</b>

## RESUMEN

Los Tratamientos Superficiales de Preservación (PST) utilizados en el momento correcto, incrementan la vida útil de los pavimentos al mínimo costo. El PST requerido sobre una superficie de rodadura se selecciona mediante un programa de preservación de pavimentos. El microaglomerado es utilizado como un PST. Las propiedades de las emulsiones asfálticas (AE) son de suma importancia en el desempeño del PST. Las AE utilizadas para elaborar microaglomerados, frecuentemente son seleccionadas en función de la disponibilidad y diversos factores no relacionados con el desempeño de este PST. La primera parte de la investigación consistió en evaluar emulsiones utilizadas en microaglomerados mediante especificaciones de *grado de desempeño para emulsiones asfálticas (EPG)*. Las especificaciones EPG están condicionadas por el clima y las cargas de tráfico que se esperan durante la vida útil del microaglomerado. La segunda parte del estudio consistió en evaluar el efecto de la fibra de vidrio en microaglomerados. Para el desarrollo de la tesis se utilizaron como elementos principales; un agregado pétreo, seis emulsiones asfálticas y fibra de vidrio.

Para lograr la evaluación de las emulsiones, se revisó la información disponible para identificar las causas y tipos de fallas críticas que se relacionan con el desempeño de las emulsiones y las mezclas de microaglomerado, además se investigaron los métodos de prueba para emulsiones y mezcla que abordan estos tipos de fallas. Las relaciones de separación (Rs) y estabilidad (Rd), y la viscosidad rotacional (VR) fueron determinadas para inferir la estabilidad al almacenamiento y la manejabilidad de la emulsión original, respectivamente. El parámetro Jnr de la prueba MSCR se usó para evaluar el desempeño del residuo asfáltico a temperatura alta. El valor del módulo de corte dinámico ( $G^*$ ) en un ángulo de fase crítico ( $\delta_c$ ) se utilizó para evaluar el desempeño del residuo asfáltico a temperatura baja.

El efecto de la fibra de vidrio se evaluó mediante una comparación entre el desempeño de especímenes de microaglomerado con y sin fibra. Los especímenes se sometieron a una serie de pruebas relacionadas con el desempeño, utilizando seis pruebas principales (TB 113, TB 139, TB 100, TB 109, TB 146 y TB 147) desarrolladas por la ISSA (International Slurry Surfacing Association). Se determinó que la temperatura y la fibra tienen un efecto significativo en la resistencia a flexión de la mezcla. Se identificó un incremento en el desarrollo de cohesión en un tiempo menor cuando se adiciona fibra al microaglomerado. Las muestras con fibra ensayadas en la prueba de abrasión en húmedo presentaron mayor pérdida de material con relación a las muestras sin fibra. En la prueba de rueda cargada no se notó ningún cambio significativo entre las mezclas de microaglomerado con y sin

fibra. Mientras que para la prueba de desplazamiento lateral se identificó una mejora al agregar fibra al microaglomerado.

**Palabras clave:** *Preservación de pavimentos, Análisis EPG, fibra de vidrio, pruebas de desempeño, diseño de la mezcla de microaglomerado en frío.*

## ABSTRACT

Preservation Surface Treatments (PST) used at the right time, increase the useful life of pavements at the minimum cost. The PST required on a rolling surface is selected by a pavement preservation program. The properties of asphalt emulsions (AE) are of paramount importance in the performance of the PST. The AE used to develop microsurfacing, are frequently selected based on availability and various factors not related to the performance of this PST. The first part of the research consisted of evaluating emulsions used in microsurfacing using performance grade specifications for asphalt emulsions (EPG). EPG specifications are conditioned by the weather and traffic loads expected during the life of the microsurfacing. The second part of the study consisted of evaluating the effect of fiberglass in microsurfacing. For the development of the thesis they were used as main elements; a stone aggregate, six asphalt emulsions and fiberglass.

In order to achieve the evaluation of the emulsions, the available information was reviewed to identify the causes and types of critical failures that are related to the performance of the emulsions and the microsurfacing mixtures, in addition the test methods for emulsions and mixtures that address these types of failures were investigated. The separation (Rs) and degradation (Rd) ratios, and the rotational viscosity (VR) were determined to infer to the storage stability and the mixability of the original emulsion, respectively. The Jnr parameter of the MSCR test was used to evaluate the performance of the asphalt residue to high temperature. The value of the dynamic shear modulus ( $G^*$ ) at a critical phase angle ( $\delta_c$ ) was used to the performance of the asphalt residue to low temperature.

The effect of fiberglass was evaluated by comparing the performance of microsurfacing specimens with and without fiber. The specimens underwent a series of performance-related tests, using six main tests (TB 113, TB 139, TB 100, TB 109, TB 146 and TB 147) developed by the ISSA (International Slurry Surfacing Association). It was determined that temperature and fiber have a significant effect on the flexural strength of the mixture. An increase in cohesion development was identified in a shorter time when fiber is added to the microsurfacing. The samples with fiber tested in the wet tract abrasion test showed greater material loss compared to the samples without fiber. In the loaded wheel test, no significant change was noted between the microsurfacing mixtures with and without fiber. While for the lateral displacement test an improvement was identified by adding fiber to the microsurfacing.

# NOTACIÓN

La notación empleada en esta investigación se resume en la Tabla 1.

*Tabla 1. Notación general.*

Nomenclatura	Significado
<i>EPG</i>	<i>Emulsion Performance Grade</i>
<i>PG</i>	<i>Performance Grade</i>
<i>PST</i>	<i>Preservation Surface Treatments</i>
<i>AE</i>	<i>Asphalt Emulsion</i>
<i>PCI</i>	<i>Pavement Condition Index</i>
<i>HMA</i>	<i>Hot Mix Asphalt</i>
<i>DSR</i>	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
<i>MSCR</i>	<i>Multiple Stress Creep and Recovery</i>
$G^*$	<i>Módulo de corte dinámico</i>
$\delta_c$	<i>Ángulo de fase crítico</i>
$J_{nr}$	<i>Non-recoverable creep compliance</i>
$\delta$	<i>Ángulo de fase</i>
$G_c$	<i>Módulo de cruce</i>
$G_g$	<i>Módulo de corte dinámico vítreo</i>
$w$	<i>Frecuencia de carga real</i>
$w_c$	<i>Frecuencia de cruce</i>
$w_R$	<i>Frecuencia reducida</i>
$a_T$	<i>Factor de cambio tiempo-temperatura</i>

## Lista de figuras

Figura 2.1: Uso de tratamientos de mantenimiento preventivo para diferir la necesidad de rehabilitación. (Extraído del Compendio de conservación de pavimentos, Departamento del Transporte de los EE. UU., Administración Federal de Carreteras (2006, p. 59)).	7
Figura 2.2: Curva de condición de pavimento (PCI = Pavement Condition Index). (Extraído del Compendio de preservación del pavimento, Departamento de Transporte de los EE. UU., Administración Federal de Carreteras, Larry Galehouse (2006, p. 71)).	8
Figura 2.3: Límites granulométricos para agregados pétreos utilizados en microaglomerados.	12
Figura 2.4: Pruebas especificadas EPG para emulsiones.	15
Figura 2.5: Pruebas utilizadas para la evaluación del microaglomerado.	21
Figura 2.6: Modos de ruptura de microaglomerados en la prueba de cohesión. (Extraído de Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Quimikao S.A. de C.V., 2017)	23
Figura 2.7: Determinación del contenido óptimo de emulsión.	25
Figura 3.1: Ejemplos de (a) identificación de valores atípicos para los datos de relación de separación, (b) determinación del límite de especificación de la relación de separación, (c) identificación de valores atípicos para datos de relación de estabilidad y (d) determinación del límite de especificación de la relación de estabilidad para emulsiones originales de microaglomerados. (Extraído de Y. Richard Kim, 2017, p. 24).	32
Figura 3.2: Ejemplos de (a) identificación de valores atípicos para datos de manejabilidad y (b) determinación del límite de especificación de manejabilidad de emulsiones originales para microaglomerados. (Extraído de Y. Richard Kim, 2017, p. 27).	33
Figura 3.3: Relación MSCR versus profundidad de rodera como una función del nivel de tráfico para microaglomerado. (Extraído de Y. Richard Kim, 2017, p. 36).	35
Figura 3.4: Energía de fractura de la mezcla de microaglomerado versus $G^*$ en $\delta_c$ del residuo asfáltico correspondiente a: (a) $\delta=45^\circ$ y (b) $\delta$ ajustado en función de la temperatura. (Extraído de Y. Richard Kim, 2017, p. 48).	39
Figura 3.5: Límite crítico máximo de $G^*$ para residuos asfálticos de microaglomerados. (Extraído de Y. Richard Kim, 2017, p. 49).	40
Figura 3.6: Pérdida de agregado pétreo por abrasión en húmedo versus % de fibras. (Extraído de Probits, 1994)	41
Figura 3.7: Flexión por carga versus desplazamiento vertical. (Extraído de Charmot, Ye, Zhu, & Yang, 2013, p. 15).	42
Figura 4.1: Filtración de la emulsión original a través de la malla N° 20.	44
Figura 4.2: Recuperación del residuo asfáltico mediante AASHTO PP72 método B.	45
Figura 4.3: Acondicionamiento de emulsiones	46
Figura 4.4: Equipo para medición de viscosidades.	47
Figura 4.5: Identificación de datos para determinar el factor tiempo-temperatura, $a_T$	50
Figura 4.6: Representación de la determinación de $a_T$ .	51
Figura 4.7: Mezclado de los componentes de la mezcla.	54
Figura 4.8: Ensayo de cohesión basado en el modo de ruptura.	54
Figura 4.9: Ensayo para determinar la pérdida por abrasión en húmedo.	55
Figura 4.10: Ensayo de rueda cargada para determinar la cantidad de arena adherida.	56
Figura 4.11: Espécimen después de 1000 ciclos en LWT para determinar el porcentaje de desplazamiento lateral.	56
Figura 4.12: Ensayo de especímenes, a) temperatura ambiente y b) $4^\circ\text{C}$ , para determinar la resistencia ante el agrietamiento de la mezcla de microaglomerado.	57

<i>Figura 5.1: Curva de distribución granulométrica del agregado pétreo.</i>	59
<i>Figura 5.2: Resultados de Rs en la prueba de estabilidad al almacenamiento.</i>	61
<i>Figura 5.3: Resultados de Rd en la prueba de estabilidad al almacenamiento.</i>	62
<i>Figura 5.4: Valores de viscosidad en la prueba de manejabilidad.</i>	63
<i>Figura 5.5: a) <math>G^*</math> versus ángulo de fase a 15°C y b) <math>G^*</math> vs ángulo de fase a 5°C</i>	65
<i>Figura 5.6: a) <math>G^*</math> versus <math>wR</math> y <math>\delta</math> versus <math>wR</math>, para las emulsiones tipo CQS-1hL.</i>	66
<i>Figura 5.7: Curvas maestras de residuos asfálticos de microaglomerados para determinar EPG a temperatura baja (<math>G^*</math> en <math>\delta c</math>).</i>	66
<i>Figura 5.8: Pérdida por abrasión en especímenes con y sin fibra, con contenido óptimo y <math>\pm</math> 2% de emulsión.</i>	71
<i>Figura 5.9 : Arena adherida de especímenes con y sin fibra, con contenido óptimo y <math>\pm</math> 2% de emulsión.</i>	73
<i>Figura 5.10: Pérdida por abrasión en húmedo a 1 hora en especímenes con y sin fibra, con contenido óptimo de emulsión.</i>	74
<i>Figura 5.11: Pérdida por abrasión en húmedo a 6 días en especímenes con y sin fibra, con contenido óptimo de emulsión.</i>	75
<i>Figura 5.12: Arena adherida en especímenes con y sin fibra, con contenido óptimo de emulsión.</i>	76
<i>Figura 5.13: Desplazamiento lateral después de 1000 ciclos, medido en especímenes con contenido óptimo de emulsión.</i>	77
<i>Figura 5.14: Flexión de especímenes con y sin fibra a temperatura ambiente.</i>	78
<i>Figura 5.15: Flexión de especímenes con y sin fibra a temperatura baja.</i>	79

## Lista de tablas

<i>Tabla 2.1: Ensayos para agregados pétreos utilizados en microaglomerados.</i>	11
<i>Tabla 2.2: Tipos de granulometrías para microaglomerados, ISSA A143 (2010).</i>	12
<i>Tabla 2.3: Métodos de prueba y especificaciones EPG para emulsiones originales.</i>	16
<i>Tabla 2.4: Métodos de prueba para residuo asfáltico en las especificaciones EPG.</i>	18
<i>Tabla 2.5: Valores de ángulos de fase críticos para residuo asfáltico de microaglomerado.</i>	19
<i>Tabla 5.1: Distribución granulométrica del agregado pétreo.</i>	58
<i>Tabla 5.2: Pruebas de calidad realizadas al material pétreo.</i>	59
<i>Tabla 5.3: Resultado de la prueba de retenido en malla.</i>	60
<i>Tabla 5.4: Resultados de la prueba de contenido de residuo asfáltico.</i>	60
<i>Tabla 5.5: Resultados de la prueba de relación de separación.</i>	61
<i>Tabla 5.6: Resultados de la prueba de relación de estabilidad.</i>	61
<i>Tabla 5.7: Viscosidades determinadas en la prueba de manejabilidad para emulsiones asfálticas originales.</i>	63
<i>Tabla 5.8: Resultados del valor <math>J_{nr}</math>, para EPG a temperatura alta.</i>	64
<i>Tabla 5.9: Clasificación EPG de emulsiones a temperatura baja.</i>	67
<i>Tabla 5.10: Resultados de tiempo de mezclado en microaglomerados</i>	68
<i>Tabla 5.11: Resultados en la prueba de cohesión, emulsión 070-T.</i>	69
<i>Tabla 5.12: Resultados en la prueba de cohesión, emulsión 137-S.</i>	69
<i>Tabla 5.13: Resultados en la prueba de cohesión, emulsión 159-S.</i>	69
<i>Tabla 5.14: Resultados en la prueba de cohesión, emulsión ESS-1hP.</i>	69
<i>Tabla 5.15: Pérdida por abrasión en vía húmeda, especímenes sin fibra.</i>	70
<i>Tabla 5.16: Pérdida por abrasión en vía húmeda, especímenes con fibra.</i>	71
<i>Tabla 5.17: Prueba LWT, especímenes sin fibra.</i>	72
<i>Tabla 5.18: Prueba LWT, especímenes con fibra.</i>	72
<i>Tabla 5.19: Pérdida por abrasión en húmedo a 1 hora.</i>	73
<i>Tabla 5.20: Pérdida por abrasión en húmedo a 6 días.</i>	74
<i>Tabla 5.21: Arena adherida en especímenes.</i>	75
<i>Tabla 5.22: Prueba de desplazamiento lateral en microaglomerados</i>	76
<i>Tabla 5.23: Prueba de tensión a flexión a temperatura ambiente para microaglomerados.</i>	78
<i>Tabla 5.24: Prueba de tensión a flexión a temperatura baja para microaglomerados.</i>	78

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La conservación de los activos carreteros es una necesidad imperante, se estima que la contribución de la infraestructura carretera al Producto Interno Bruto (PIB) de un país oscila entre el 5 y 15% (PIARC, 2016). Para realizar la preservación de dichos activos en México se han utilizado mezclas de microaglomerados en frío como PST. El microaglomerado consiste en una mezcla de emulsión asfáltica modificada con polímero, agregado pétreo y agua, adicionalmente si se requiere se pueden agregar; filler mineral o de aportación, aditivos o fibras, individualmente o una combinación de ellos. Los componentes del microaglomerado son mezclados y distribuidos uniformemente sobre una superficie del pavimento previamente preparada.

Entre las principales ventajas que aporta el microaglomerado podemos mencionar la mejora en la característica funcional de fricción, impermeabiliza, protege las capas subyacentes del efecto de envejecimiento, presenta bajo riesgo de desprendimiento de material pétreo, permite diseñarse controlando los tiempos de apertura al tráfico, puede ser utilizado para reparar problemas de roderas. El microaglomerado es un PST con un costo efectivo dada su durabilidad, según Gransberg (2010) si se aplica al camino correcto en el momento adecuado, se espera una extensión de vida útil de servicio de seis a siete años. Se utiliza en superficies de ruedo que no tienen un nivel avanzado de deterioro. La fatiga o deformación permanente se consideran como deterioros avanzados.

Los principales problemas, en la práctica del uso de microaglomerados en México, han estado asociados a:

- Selección inadecuada de los componentes
- Uso de materiales reactivos
- Uso de emulsiones asfálticas desestabilizadas
- Deficiencias en las proporciones de los componentes

Los problemas anteriores provocan que al realizarse el proceso de mezclado de los diversos componentes en la máquina de aplicación, la emulsión rompa de forma acelerada evitando que la mezcla de microaglomerado pueda ser descargada y aplicada o bien provocando que la emulsión en la mezcla aplicada presente un rompimiento “falso” que se traduce como el desprendimiento parcial o total de la aplicación de microaglomerado.

Por otra parte, la deformación permanente, el agrietamiento térmico, el agrietamiento reflexivo y el desprendimiento de material pétreo son las fallas críticas que se presentan durante la vida útil de los microaglomerados.

Para resolver los problemas antes citados durante la etapa constructiva y en la vida útil del microaglomerado en frío, un componente clave en el sistema es la emulsión asfáltica utilizada, sin embargo, las propiedades especificadas actuales en este tipo de materiales, no están directamente relacionadas con el desempeño. Este problema ha sido abordado en estudios recientes dentro del programa de investigación administrado por el TRB (Transportation Research Board) en cooperación con la FHWA (Federal Highway Administration) de Estados Unidos y cuyos avances son mostrados en el Reporte NCHRP 837 "Performance-Graded Specifications for Asphalt Emulsions Used in Pavement Preservation Surface Treatments" (2017). En dicho reporte se presenta una serie de modificaciones a métodos de pruebas y pruebas adicionales a evaluar en las emulsiones asfálticas que permiten, basado en sus investigaciones, tener una mejor correlación con el desempeño esperado del microaglomerado.

Las fibras son otro de los componentes que pueden ser adicionadas o no a un microaglomerado. Desde el punto de vista de la mejora del material, la adición de fibra se ha utilizado durante muchos años en las mezclas asfálticas de carreteras (Charmot, Ye, Zhu, & Yang, 2013). Por lo que, es necesario cuantificar la efectividad de la adición de fibra en microaglomerados.

El agrietamiento reflexivo y el desprendimiento de agregado se identificaron en la literatura como las fallas críticas que no están relacionadas propiamente con el desempeño del residuo asfáltico en la mezcla de microaglomerado. Por lo tanto, tendría un impacto significativo el tratar de mitigar estos tipos de falla crítica en el microaglomerado mediante la adición de fibra de vidrio, para ello es necesario evaluar el efecto que aporta la fibra en el sistema, utilizando pruebas como ISSA TB-146 "Flexural Tension Test Method for Determination of Cracking Resistance of Slurry Mixes at Ambient and 4°C". Considerando el efecto que tienen variables como; el porcentaje adicionado y la longitud de la fibra, en la trabajabilidad y desempeño de la mezcla de microaglomerado. La aportación de la fibra en el sistema tratando de retrasar la propagación de grietas tendría un impacto importante en la durabilidad del microaglomerado y por consecuencia en los pavimentos del país, por lo que, se considera una vía de investigación que también contribuye a la aplicación de este tipo de tratamiento superficial maximizando la relación costo-beneficio en el ciclo de vida útil de un pavimento.

La implementación de nuevas tecnologías, siempre sugiere cambios en la forma en la que se plantean y se llevan a cabo, por esta razón, esta investigación brindará las bases para que esta alternativa de preservación influya de manera positiva en la infraestructura vial de México.

### **1.1. Motivación**

Los microaglomerados en frío, son un medio eficaz para mejorar la calidad de la superficie y prolongar la vida útil de los pavimentos. Los PST se aplican en una capa delgada sobre una superficie existente de la carretera para reducir el deterioro y para mantener o mejorar la superficie de la carretera, sin aumentar su capacidad estructural.

Uno de los constituyentes principales del microaglomerado es la emulsión asfáltica. Las propiedades de la emulsión y de su residuo asfáltico son críticas para el desempeño de los microaglomerados, sin embargo, las especificaciones actuales para estos materiales no están basadas en el desempeño esperado del microaglomerado. Incluyen pruebas que se evalúan a una sola temperatura, no brindan información del comportamiento de la emulsión y su residuo en otras temperaturas (principalmente a bajas temperaturas) y no se basan en las propiedades que se relacionan directamente con el desempeño del microaglomerado. Por ejemplo, el residuo de la emulsión se clasifica según el llamado sistema de penetración, un sistema que se eliminó de forma gradual para los aglutinantes de asfalto de mezcla en caliente (HMA) en los Estados Unidos en la década de 1960 y casi fue completamente abandonado a mediados de 1980 (Y. Richard Kim, 2017).

Las EPG que especifican las propiedades del material asfáltico que se relacionan directamente con el desempeño, mejorarán el proceso de selección de emulsiones asfálticas utilizadas en aplicaciones de microaglomerados para prevenir fallas prematuras.

Por lo tanto, las nuevas especificaciones EPG deben abarcar las propiedades del residuo asfáltico que se correlacionan con medidas críticas de desempeño de la mezcla de microaglomerado. También deben tener en cuenta las condiciones climáticas y de carga de tráfico que un microaglomerado experimentará durante su tiempo previsto de vida de servicio. Los métodos de prueba incluidos para la emulsión asfáltica en las especificaciones EPG deben evaluar tanto las propiedades de la emulsión original y de los residuos de emulsión que se relacionan con la

capacidad de construcción y las condiciones de servicio, respectivamente. Se denomina emulsión original a la emulsión asfáltica hasta antes de su ruptura.

El microaglomerado es muy susceptible al agrietamiento reflexivo debido a que se construye en espesores delgados, el espesor de aplicación depende de la irregularidad del camino. Cuando los planes del proyecto lo requieran, el microaglomerado se puede usar para rellenar roderas o depresiones existentes en la superficie de ruedo. Las roderas de 0.5 pulgadas (12.7 mm), o más en profundidad, se llenarán de manera independiente con una caja de relleno de roderas, ya sea de 5 pies (1,5 m) o 6 pies (1,8 m) de ancho. Las roderas con una profundidad superior a 1.5 pulgadas (38.1 mm) pueden requerir múltiples aplicaciones con la caja de relleno de roderas para restaurar la sección transversal. Cuando la rodera o la deformación es menor que 0.5 pulgadas (12.7 mm), se puede aplicar un recorrido de ancho completo con la caja del esparcidor (ISSA\_A143, 2010). Esta última modalidad es la más utilizada en la práctica en México. Todo el material de relleno de rodera y material de nivelación debe curarse bajo el tráfico durante al menos veinticuatro (24) horas antes de colocar material adicional (ISSA\_A143, 2010).

El tratar de reducir el agrietamiento reflexivo mediante la aplicación de la fibra de vidrio en el microaglomerado tendría un impacto significativo, incrementado la relación costo beneficio del microaglomerado. No obstante, es importante realizar una evaluación completa del efecto de la fibra en la mezcla de microaglomerado mediante las pruebas de desempeño de la mezcla que se establecen en esta investigación.

### **1.2. Descripción de la propuesta de solución**

En la presente investigación se abordan nuevos métodos y cambios a métodos existentes de prueba para emulsiones asfálticas, tanto en la emulsión original como en el residuo asfáltico de la misma. Contribuyendo a mejorar la producción, aplicación y el desempeño de microaglomerados, en un amplio rango de temperaturas. La deformación permanente a temperatura alta y el agrietamiento térmico a temperatura baja, son fallas críticas que comúnmente presentan los microaglomerados, por lo tanto, es necesario solucionar dichos temas mediante las nuevas especificaciones EPG.

En el rango de temperaturas de intermedias a bajas, los microaglomerados presentan fallas como el agrietamiento reflexivo y el desprendimiento de agregado. Las fallas críticas anteriores no se cubren mediante las pruebas especificadas

EPG. Por lo que, son necesarias la incorporación de la fibra al sistema para reducir el agrietamiento reflexivo y la implementación de pruebas de desempeño para evaluar del desempeño del microaglomerado.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar el comportamiento de diferentes emulsiones asfálticas basadas en especificaciones de grado de desempeño (EPG) y el efecto del uso de fibra de vidrio en aplicaciones de microaglomerados en frío, a nivel laboratorio.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Evaluar un sistema de pruebas en la emulsión asfáltica y entender su relación con las propiedades de desempeño y estabilidad de dichos materiales.
- Determinar la relación entre las propiedades medidas a la emulsión asfáltica usando las especificaciones propuestas EPG (Clasificación Grado PG para emulsiones) y las propiedades críticas de desempeño del microaglomerado en función a la temperatura.
- Evaluar el efecto de las fibras adicionadas al sistema de microaglomerado mediante una serie de pruebas establecidas por la ISSA, enfatizando en la prueba de tensión a flexión.

### **1.4. Estructura de la Tesis**

Esta tesis se divide en 6 capítulos. El capítulo 1 es una introducción al estudio donde se aborda el porqué es importante esta investigación y cómo se puede contribuir en la preservación de los pavimentos del país de una mejor manera mediante un microaglomerado mejorado. Se describen las principales fallas de este tipo de PST y cómo se pretende corregirlas mediante especificaciones EPG y el uso de fibra de vidrio. En el capítulo 2 se describen el concepto de preservación de pavimento, los beneficios del mantenimiento preventivo, antecedentes del microaglomerado. También trata sobre una amplia revisión de la literatura, se describen ampliamente las especificaciones EPG, el uso de la fibra de vidrio, y el diseño de la mezcla de microaglomerado. El capítulo 3 incluye el estado del arte, aquí se describe cómo se derivaron los límites especificados en las especificaciones EPG, así como los beneficios que ha tenido la fibra en estudios similares a este. El

capítulo 4 describe la metodología usada para llevar a cabo el estudio de laboratorio, es decir, como se logró la evaluación de emulsiones y fibra en microaglomerados. El capítulo 5 presenta el análisis de resultados, se describe qué beneficios o perjuicios se presentan en cada prueba realizada. El capítulo 6 presenta las conclusiones derivadas de esta investigación

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Tratamientos de preservación de pavimentos asfálticos

La preservación de pavimentos es un sistema de planificación de tratamientos de pavimentos en el momento óptimo para maximizar su vida útil (Robati M. , 2012). La preservación mejora la longevidad del pavimento al mínimo costo. Tanto el pavimento rígido como el flexible deben soportar cargas de tráfico, efectos ambientales y variaciones de temperatura. Los factores que deterioran los pavimentos asfálticos incluyen el medio ambiente y factores relacionados con el tráfico. Los esfuerzos relacionados con la carga vehicular desarrollan el agrietamiento por fatiga y la deformación permanente, mientras que los factores ambientales inducen el agrietamiento térmico y el agrietamiento de bloque. Además, en tratamientos superficiales influyen factores químicos los cuales provocan el desprendimiento de agregado (raveling). Los pavimentos deben ser tratados a tiempo para evitar incrementos de las tasas de deterioro presentes en los mismos (Robati M. , 2012).

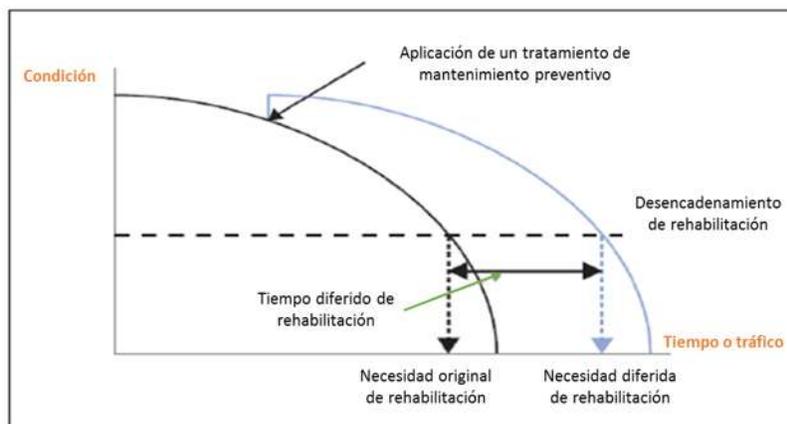


Figura 2.1: Uso de tratamientos de mantenimiento preventivo para diferir la necesidad de rehabilitación. (Extraído del Compendio de conservación de pavimentos, Departamento del Transporte de los EE. UU., Administración Federal de Carreteras (2006, p. 59)).

La Figura 2.1 muestra cómo la condición del pavimento cambia con el tiempo y requiere de diferentes tipos de tratamientos para restaurarla a su estado original. El índice de condición del pavimento (PCI) es un índice numérico entre 0 a 100 y se utiliza para indicar el estado de una calzada. El PCI proporciona una calificación numérica para la condición de los segmentos de carretera dentro de la red de

carreteras, donde 0 es la peor condición posible y 100 es lo mejor. Si el pavimento está seriamente agrietado, se requiere una rehabilitación mayor.

La Figura 2.2 muestra cómo la aplicación oportuna de los tratamientos correctos en el camino correcto en el tiempo correcto puede reducir el costo del tratamiento del pavimento. Esta figura es representativa de una carretera con una vida de diseño de unos 20 años. Si el tratamiento de preservación del pavimento se aplica antes del año 15, este tipo de tratamiento generalmente restaurará la condición del pavimento. En este caso, el tratamiento de preservación de pavimento cuesta \$1.0 por m<sup>2</sup>. Sin embargo, si el tratamiento se retrasa, se debe aplicar un tratamiento de rehabilitación, que generalmente cuesta entre 6 y 10 veces más (\$6 a \$10 por m<sup>2</sup>) que el costo del tratamiento superficial de pavimento.

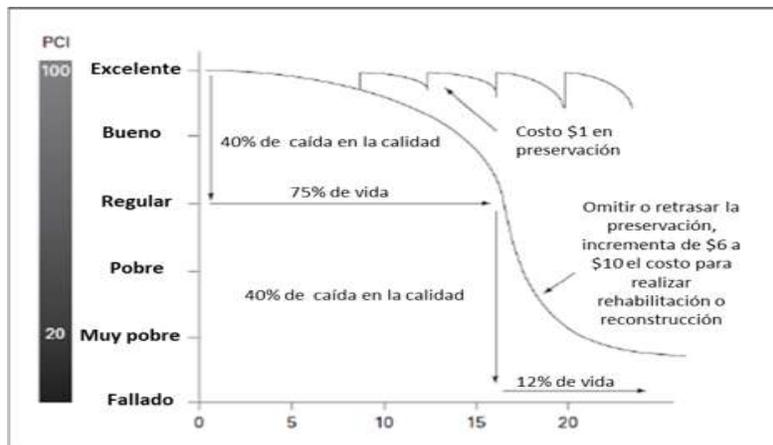


Figura 2.2: Curva de condición de pavimento (PCI = Pavement Condition Index). (Extraído del Compendio de preservación del pavimento, Departamento de Transporte de los EE. UU., Administración Federal de Carreteras, Larry Galehouse (2006, p. 71)).

Las actividades de preservación del pavimento asfáltico se dividen en tres categorías principales (Uzarowski & Bashir, 2007):

1. Tratamiento de mantenimiento de rutina:
  - Relleno o sellado de grietas
  - Bacheo
2. Tratamiento de mantenimiento preventivo:
  - Riegos de taponamiento
  - Rejuvenecedor de superficies
  - Microfresado
  - Superficie delgada:
    - Riego de sello
    - Slurry seal

- Microaglomerado
- Cape seal
- Superposición de capas delgadas de mezcla en caliente
- Entre otras

### 3. Mantenimiento correctivo:

- Bacheo profundo
- Fresado
- Superposiciones de capas gruesas de mezcla en caliente o en frío

## 2.2. Microaglomerado

El microaglomerado fue desarrollado en un intento por formar un slurry seal más grueso que podría usarse en carriles completos y roderas para evitar trabajos de rehabilitación prolongados en carreteras con mucho tráfico (Robati M. , 2012). Para ello se incorporaron agregados de alta calidad y emulsiones avanzadas (modificadas con polímero) para obtener un producto estable que se aplica en un espesor ligeramente superior al tamaño máximo del agregado (depende de la uniformidad de la superficie de la carretera existente) y proporciona resistencia a la deformación permanente. La distribución granulométrica tipo II con un tamaño máximo de agregado de 6.4 mm se usa comúnmente para áreas con tráfico moderado a pesado. La distribución granulométrica tipo III con un tamaño máximo de agregado de 9.5 mm proporciona una mejor macro-textura y se usa típicamente en carreteras con mucho tráfico. El microaglomerado fue pionero en Alemania, a finales de los años 60 y principios de los 70 (ISSA, 2011). El microaglomerado fue el resultado de la combinación de agregados y asfaltos altamente seleccionados, y luego incorporando polímeros especiales y emulsionantes que permitieron que el producto permaneciera estable incluso cuando se aplicaba en espesores múltiples (Robati M. , 2012). El microaglomerado se introdujo en los Estados Unidos en 1980, como una solución rentable para tratar el problema de roderas en la superficie y una variedad de otros problemas de la superficie de la carretera (ISSA, 2011). En México ha tomado auge durante los últimos años, por lo que, en 2017 se incorporó la Recomendación AMAAC REA XXX/2017 como guía de diseño para microaglomerados en frío. El microaglomerado puede ser aplicado en doble capa para abordar las irregularidades de la superficie. Además, tiene variedad de aplicaciones donde los tiempos rápidos de apertura al tráfico son motivo de preocupación. También puede aplicarse en cubiertas de puentes de hormigón, aeropuertos, pistas de rodaje, en trabajos diurnos y nocturnos, por lo que, reduce la interrupción del tráfico, lo que no es posible para el slurry seal (Gransberg, 2010).

El microaglomerado es diferente al slurry seal en muchas áreas. El uso de componentes químicos en la emulsión asfáltica utilizada en el microaglomerado permite una ruptura más rápida de este producto que el slurry seal. Esta habilidad hace que el microaglomerado sea capaz de soportar tráfico tan rápido como una hora después de la colocación, mientras que el slurry seal requiere más tiempo para soportar el tráfico (Robati M. , 2012). Este tipo de PST requiere de agregados de más alta calidad que el slurry seal y esto proporciona una mayor resistencia al deslizamiento, lo que permite su uso en roderas del pavimento.

Actualmente existen varios procedimientos, lineamientos y especificaciones para slurry seal y microaglomerado, desarrollados por agencias como: ASTM (American Society for Testing and Materials), TTI (Texas Transport Institute), AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto A.C.), Caltrans (California Department of Transportation) y European Union la cual tiene un conjunto similar de especificaciones, directrices y procedimientos sobre el diseño y uso de slurry seal y microaglomerado. No obstante, la norma y especificación ISSA A143 es la guía de diseño de mezcla de microaglomerado más utilizada (Robati M. , 2012).

### **2.3. Calidad de los componentes de la mezcla de microaglomerado**

#### **2.3.1. Agregados pétreos**

##### *2.3.1.1. Introducción*

Los métodos de ensayo para la caracterización y el control de calidad de los materiales para microaglomerados se basan en normas internacionales AASHTO, ASTM e ISSA, esta última es la organización encargada del tema a nivel internacional. Existen ensayos para los componentes principales de los microaglomerados, es decir, emulsiones y agregados, así también otros que tienen que ver directamente con la mezcla.

##### *2.3.1.2. Pruebas de calidad*

Los agregados pétreos son los materiales minerales que representan el mayor volumen de la mezcla de microaglomerados (Gransberg, 2010). Para esta investigación los agregados pétreos utilizados en microaglomerados deben cumplir con parámetros establecidos en ISSA A143 (2010) y en la Recomendación AMAAC para microaglomerados (2017). La Tabla 2.1 recoge las pruebas y especificaciones de cumplimiento utilizadas en este estudio para caracterizar el material pétreo. Las pruebas mostradas en la Tabla 2.1 tienen que ver con el tamaño y forma de las partículas, la resistencia a la abrasión y a agentes atmosféricos, limpieza de finos y

durabilidad. La forma ideal del agregado es que sea cúbico, evitar las partículas alargadas y planas debido a que se alinean en su lado plano y quedan sueltas al no estar totalmente cubiertas con el asfalto. El agregado redondo carece de aristas, lo que reduce la trabazón entre partículas, esto provoca que las mezclas sean susceptibles a desprendimientos y deformaciones por la acción del tráfico.

El agregado pétreo que se utiliza para aplicaciones de microaglomerados está expuesto a la acción abrasiva del tránsito vehicular y agentes atmosféricos. Si no es lo suficientemente resistente entonces se deteriorará de manera muy rápida y provocará que la capa de microaglomerado aplicada en el pavimento se deteriore más rápidamente, con la consecuente pérdida de funcionalidad, principalmente la resistencia a la fricción, siendo más crítica esta última cuando el pavimento se encuentra mojado.

*Tabla 2.1: Ensayos para agregados pétreos utilizados en microaglomerados.*

Prueba	Método			Valor especificado
	ISSA	AASHTO	ASTM	
Granulometría por lavado	-	T 11	C 117	Tipo II o III.
Equivalente de arena	-	T 176	D2419	65%, mín
Intemperismo acelerado, sulfato de sodio	-	T 104	C88	15%, máx
Resistencia a la degradación por medio del Desgaste de Los Ángeles	-	T 96	C131	30%, máx
Angularidad del agregado fino	-	T 304-96	-	40%, mín
Azul de metileno	TB-145	TP 57	C 837	15mg/g, máx

La limpieza del agregado es muy importante. Si las partículas están total o parcialmente cubiertas con arcilla o limo (material que pasa la malla N°200), la emulsión no tendrá una buena adherencia con los agregados. En 2011 Wu, Yu y Tan encontraron que el daño causado por el agua dependía de la limpieza de los agregados minerales. Se recomienda la prueba del valor del azul de metileno (MBV) para evaluar la limpieza y predecir el desempeño (Wu, Yu, & W., 2011). El agregado pétreo a utilizar será del tipo especificado para la aplicación particular. Este deberá ser producto 100% triturado de roca sana como el granito, escoria, piedra caliza u otro agregado de alta calidad, o una combinación de ellos.

### *2.3.1.3. Distribución granulométrica*

Cuando se analice de acuerdo con AASHTO T 27 (ASTM C 136) o AASHTO T 11 (ASTM C 117), la granulometría del material pétreo de diseño de la mezcla debe

estar dentro de una de las categorías mostradas en la Tabla 2.2 (o una reconocida por la autoridad de pavimentación local (ISSA\_A143, 2010)).

Tabla 2.2: Tipos de granulometrías para microaglomerados, ISSA A143 (2010).

Abertura de malla	Tipo II Porcentaje que pasa	Tipo III Porcentaje que pasa	Tolerancia en acopios
3/8'' (9.5 mm)	100	100	
#4 (4.75 mm)	90 - 100	70 - 90	± 5%
#8 (2.36 mm)	65 - 90	45 - 70	± 5%
#16 (1,18 mm)	45 - 70	28 - 50	± 5%
#30 (600 μm)	30 - 50	19 - 34	± 5%
#50 (330 μm)	18 - 30	12 - 25	± 4%
#100 (150 μm)	10 - 21	7 - 18	± 3%
#200 (75 μm)	5 - 15	5 - 15	± 2%

La granulometría del agregado en campo no debe variar más que la tolerancia de acopio (indicada en la tabla anterior), mientras que también se mantiene dentro del mismo tipo de granulometría de la especificación. El porcentaje de agregado que pase dos tamices sucesivos no cambiará de un extremo a otro del rango especificado (ISSA\_A143, 2010). La Figura 2.3 muestra gráficamente los límites granulométricos de las gradaciones tipo II y tipo III.

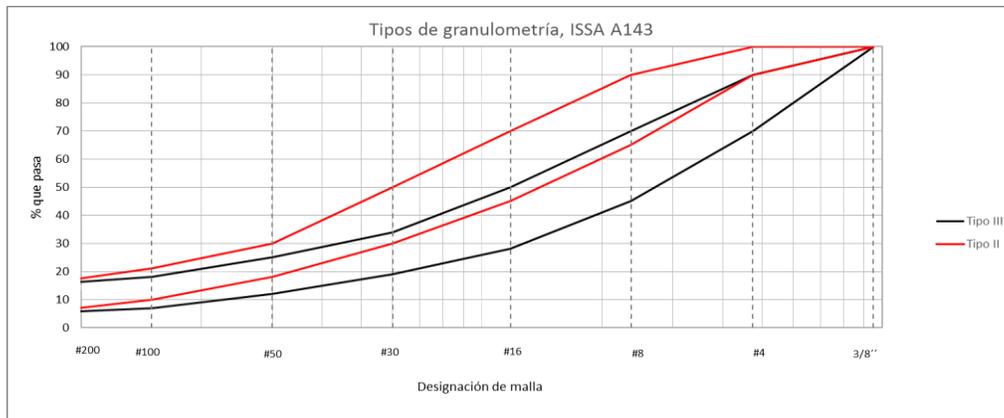


Figura 2.3: Límites granulométricos para agregados pétreos utilizados en microaglomerados.

### 2.3.2. Emulsión asfáltica

#### 2.3.2.1. Introducción

La emulsión asfáltica deberá ser modificada con polímeros. El material polimérico debe molerse o mezclarse en el asfalto o en la solución jabonosa antes del proceso de emulsificación (ISSA\_A143, 2010).

La emulsión es un sistema compuesto de dos fases, asfalto y agua, como fases dispersa y continua, respectivamente. Los componentes típicamente utilizados para la fabricación de emulsiones son asfalto, agua, emulsionante, aditivos, solventes, promotores de la adherencia como; cloruro de calcio o cloruro de sodio (James, 2006).

Las propiedades del asfalto desempeñan un papel fundamental en la producción de emulsiones estables (MS-19, 1997). La modificación del asfalto con polímeros permite secciones más gruesas, efectivas para su empleo en roderas, reduce la susceptibilidad a la temperatura y la pérdida de agregados, mejora las propiedades de elasticidad y fluidez, las propiedades de adhesión y cohesión, y la resistencia al agrietamiento y roderas (Hogendoorn, 2016). El agua es el segundo ingrediente de la emulsión, la estabilidad de la emulsión se ve afectada por los minerales u otras materias presentes en el agua (MS-19, 1997). El agente emulsionante o emulsificante, son moléculas orgánicas grandes con una parte de la cabeza y la cola que son hidrófilas (solubles en agua) y lipófilas (solubles en aceite) respectivamente (James, 2006). El emulsionante reduce la tensión superficial por adsorción preferencial en la superficie del asfalto (Baumgardner, 2006).

Se utilizan componentes adicionales que incluyen solventes de hidrocarburos y flujos como gasolina o queroseno para mejorar la emulsificación y la velocidad de curado a una temperatura más baja, reducir la viscosidad del residuo de emulsión y proporcionar trabajabilidad a la mezcla de microaglomerados. Además, los aditivos y las sales se utilizan para mejorar la estabilidad de almacenamiento y controlar los cambios de viscosidad al reducir la ósmosis del agua en asfalto (Hogendoorn, 2016).

Las emulsiones catiónicas son las más comúnmente fabricadas en todo el mundo. Generalmente se encuentran en forma neutra básica y deben hacerse reaccionar con un ácido (comúnmente HCl) para que sea soluble en agua y cargado positivamente en la naturaleza (Baumgardner, 2006). Por lo regular, el rango de pH para la emulsión catiónica está entre 2 y 3 (Hunter, 2015). Los parámetros que influyen en la fabricación de la emulsión incluyen la energía de dispersión, la distribución del tamaño de las partículas, la viscosidad y temperatura del asfalto, así como la temperatura de la emulsión (Baumgardner, 2006).

Bajo el sistema de clasificación actual, las emulsiones se nombran según su carga eléctrica, configuración de rompimiento, viscosidad y propiedades de los residuos. Las emulsiones catiónicas comienzan con "C" seguida de su configuración de rompimiento, que podría ser rompimiento lento (slow-setting) "SS", rompimiento controlado rápido (quick-setting) "QS", rompimiento medio (medium-setting) "MS", o

rompimiento rápido (rapid-setting) “RS”. Sin embargo, los nombres de las emulsiones aniónicas comienzan con el modo o configuración de rompimiento. Las designaciones de tiempo de ruptura y carga se mantienen en las especificaciones EPG propuestas. El número después de la configuración de ruptura indica la viscosidad de la emulsión: “1” para viscosidad baja de la emulsión o “2” para viscosidad alta de la emulsión. Al final del nombre de una emulsión, “h” indica que contiene residuo asfáltico duro.

Por ejemplo, la emulsión CQS-1h es catiónica (C), quick-setting (rompimiento controlado rápido rápido) (QS), tiene viscosidad baja (1) y el residuo asfáltico es duro (h).

Además, “P” o “L” al final del nombre de una emulsión indica que ha sido modificada con polímeros o con látex, respectivamente.

Actualmente existen especificaciones para emulsiones asfálticas utilizadas en microaglomerados, establecidas en ISSA A143 y ASTM D 2397. Sin embargo, las emulsiones que cumplen con las especificaciones existentes, a menudo muestran problemas de desempeño debidos a diversas deficiencias en los requisitos de prueba de especificación (Y. Richard Kim, 2017). Por ejemplo, las especificaciones actuales (1) no clasifican los residuos asfálticos según las propiedades del material que están relacionadas directamente a las medidas críticas del microaglomerado (por ejemplo, formación de roderas y agrietamiento térmico); (2) no abordan completamente las propiedades de la emulsión original, que están relacionadas con la capacidad de construcción (maneabilidad y estabilidad); (3) no prueban los materiales en todo el rango de temperatura al que pueden estar expuestos (por ejemplo, no realizan pruebas por debajo de 25°C o por encima de 50°C, por lo que no logran abordar los grados de desempeño típicos de baja y alta temperatura basados en el clima); y (4) no clasifican los aglutinantes basados en el nivel de tráfico esperado (Y. Richard Kim, 2017).

### *2.3.2.2. Propiedades de la emulsión asfáltica relacionadas con el desempeño, métodos de prueba y valores de cumplimiento utilizados en las especificaciones propuestas EPG*

En las especificaciones propuestas EPG para microaglomerado, según Y. Richard Kim (2017), se identificaron métodos de prueba que abordan las propiedades de la emulsión original que están relacionadas con el almacenamiento y la capacidad de construcción, asimismo se identificaron las propiedades del residuo asfáltico que están relacionadas con el desempeño de la mezcla de microaglomerado. Esta sección detalla las propiedades del material y los métodos de prueba asociados, recomendados en las especificaciones propuestas EPG. La

Figura 2.4 presenta los métodos de prueba para emulsiones utilizadas en microaglomerados.

Los métodos de prueba que se identificaron en la literatura para evaluar el desempeño de residuos asfálticos en microaglomerados son la prueba MSCR para la formación de roderas y la prueba de barrido de frecuencia en el reómetro de corte dinámico (DSR) para el agrietamiento térmico. Las propiedades de la emulsión original que se relacionan con la capacidad de construcción del microaglomerado, incluye la estabilidad al almacenamiento y la manejabilidad, evaluadas a partir de la viscosidad medida a una tasa de corte establecida de 30 rpm.

Por lo tanto, los únicos elementos necesarios de equipo para usar en las especificaciones EPG son un DSR y un viscosímetro rotacional.

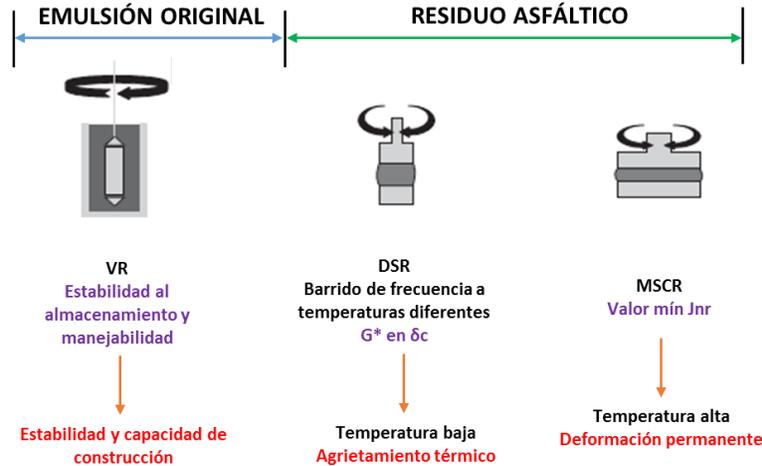


Figura 2.4: Pruebas especificadas EPG para emulsiones.

### 2.3.2.3. Pruebas establecidas EPG para la emulsión original

La Tabla 2.3 recoge los métodos de prueba y especificaciones que se modificaron y los que se conservan de ISSA A143 y ASTM D2397 en las especificaciones EPG, para evaluar las propiedades de las emulsiones asfálticas originales.

Tabla 2.3: Métodos de prueba y especificaciones EPG para emulsiones originales.

Propiedad	Método de prueba	Parámetro medido	Especificación propuesta
Estabilidad al almacenamiento 24 h, 25°C	ASTM D6930 modificado	Rs, relación de separación Rd, relación de estabilidad	Rs 0.2 – 1.5 Rd 1.5 máximo $\mu = 600$ cP máximo @ 30rpm
Manejabilidad, 25°C	AASHTO TP48 Modificado Viscosímetro Rotacional	Viscosidad rotacional, @ 30 rpm	$\mu = 600$ cP máximo @ 30rpm
Retenido en malla N° 20	AASHTO T59	-	0.1 máx.
Residuo por recuperación Porcentaje de residuo	AASHTO PP72 Método B	-	Mínimo 57%

Rs: relación de la viscosidad de las partes superior e inferior de la muestra acondicionada.

Rd: relación de la viscosidad de la muestra original y la muestra acondicionada remezclada.

Los métodos modificados son estabilidad al almacenamiento y manejabilidad. Los métodos que se conservan son, porcentaje de retenido en malla y porcentaje de residuo asfáltico recuperado.

Se requiere que las emulsiones asfálticas permanezcan estables durante las diferentes fases de almacenamiento, bombeo, transporte y construcción. La estabilidad al almacenamiento se define como la capacidad de una emulsión para resistir cambios significativos en las propiedades a lo largo del tiempo (Redelius & Walter, 2006). En las especificaciones EPG, la estabilidad al almacenamiento es medida utilizando una versión modificada de ASTM D6930 en la que las condiciones son consistentes con ASTM D6930, pero en lugar de comparar el contenido de asfalto de la emulsión que se extrae desde las partes superior e inferior de la muestra después del almacenamiento, la viscosidad de las partes superior e inferior de la muestra almacenada se evalúan utilizando un viscosímetro rotacional, ya que la viscosidad está relacionada directamente al desempeño de las emulsiones originales (Y. Richard Kim, 2017).

Además, la porción media de la muestra se remezcla, y la viscosidad medida se compara con una muestra de referencia no acondicionada (original) para evaluar la estabilidad. Se reportan dos parámetros: (1) la relación de separación (Rs), que es la relación de la viscosidad de las partes superior e inferior de la muestra y se utiliza para evaluar la resistencia de la emulsión a la sedimentación y la formación de grumos (Bahia, 2001) y (2) la relación de estabilidad (Rd), que es la relación de la viscosidad de las partes de emulsión original y remezclada después del

almacenamiento y se utiliza para evaluar la capacidad de la emulsión para ser remezclada después del almacenamiento (Y. Richard Kim, 2017). Si una emulsión no es estable al almacenamiento, se encontrarán dificultades durante la construcción y un producto no uniforme.

En 2017 Y. Richard Kim et al., propusieron evaluar  $R_s$  y  $R_d$  usando una velocidad de corte de 5 rpm en el viscosímetro rotacional, no obstante, con base en los resultados encontrados en esta investigación para la medición de la estabilidad al almacenamiento de las emulsiones utilizadas en microaglomerados, se propone evaluar  $R_s$  y  $R_d$ , utilizando una velocidad de corte de 30 rpm (cambios en el equipo de medición requiere cambios en los valores especificados), empleando un viscosímetro rotacional Brookfield con la aguja N° 2 (geometría). La velocidad de corte de 30 rpm representa la energía mecánica que se aplica a las emulsiones originales para ser remezcladas, la emulsión debe ser lo suficientemente estable durante este proceso para evitar la rotura prematura de la misma.

Para emulsiones usadas en microaglomerados, la manejabilidad se caracteriza por la capacidad que tiene la emulsión original de ser mezclada con los demás componentes del microaglomerado y se determina con la viscosidad de la emulsión medida a 25°C mediante un viscosímetro rotacional. Con base en los resultados encontrados en este estudio, se propone que la manejabilidad sea evaluada a una velocidad de corte de 30 rpm, medida con la aguja N° 2 en un viscosímetro rotacional Brookfield. La velocidad de corte de 30 rpm representa la energía que se aplica a las emulsiones asfálticas para ser mezcladas en el sistema de microaglomerado, la emulsión debe ser lo suficientemente estable durante este proceso para evitar la rotura prematura de la misma. Debido a que durante la construcción de microaglomerados las emulsiones empleadas se mezclan a temperatura ambiente con agregado húmedo y agua, se utiliza una temperatura conservadora de 25°C para esta prueba (es decir, los valores de viscosidad serían más bajos a temperaturas más altas). Y. Richard Kim et al. (2017), propuso un valor máximo de 600 cP (centipoises) para garantizar manejabilidad en la emulsión durante el mezclado.

La prueba de estabilidad al almacenamiento incluye la medición de la viscosidad a 30 rpm de una muestra de referencia (no condicionada). Por lo tanto, la medición de la viscosidad de la muestra de referencia obtenida durante la prueba de estabilidad de almacenamiento se puede utilizar para evaluar la manejabilidad sin conducir a pruebas adicionales (Y. Richard Kim, 2017).

#### 2.3.2.4. Pruebas establecidas EPG para el residuo asfáltico de la emulsión

La Tabla 2.4 proporciona un resumen de las características críticas de desempeño para los tratamientos de microaglomerado, así como los métodos de prueba y sus especificaciones EPG para la evaluación de los residuos asfálticos. Los métodos seleccionados de prueba del residuo asfáltico permiten evaluar las propiedades de falla de las emulsiones asfálticas a temperaturas altas y bajas bajo condiciones que simulan las diversas condiciones climáticas y de tráfico.

Tabla 2.4: Métodos de prueba para residuo asfáltico en las especificaciones EPG.

Propiedad	Método de prueba	Parámetro medido	Nivel de tráfico	Especificación
Deformación permanente a alta temperatura EPG	AASHTO T350 MultiStress Creep and Recovery Test (geometría 25mm)	Non-recoverable creep compliance, Jnr @ 3.2kPa	Tráfico bajo	<5 kPa <sup>-1</sup>
			Tráfico medio y alto	<1.5 kPa <sup>-1</sup>
Agrietamiento térmico a baja temperatura EPG	Barrido de frecuencia en DSR (geometría 8 mm) (5°C y 15°C)	Módulo de corte dinámico, G* en δc	Tráfico bajo, medio y alto	<16MPa

#### Temperatura alta

La prueba MSCR, especificada en AASHTO T 350, fue empleada en 2017 por Y. Richard Kim et al, para evaluar la resistencia a la deformación permanente de los residuos asfálticos a alta temperatura. Este método de prueba se utiliza para determinar el valor de la deformación no recuperable (Jnr) del residuo asfáltico para cuantificar la resistencia a la deformación permanente del residuo.

Se incluyen dos niveles de esfuerzo en el procedimiento: 0.1 kPa y 3.2 kPa. El nivel de esfuerzo de 3.2 kPa somete el residuo asfáltico a condiciones de alto esfuerzo, similares a los experimentados en campo por el tráfico pesado; por lo tanto, este nivel de esfuerzo se incorpora en las especificaciones propuestas EPG. En adición, los residuos asfálticos utilizados para las pruebas MSCR son recuperados utilizando el método B de AASHTO PP 72 porque este método requiere sólo una pequeña cantidad de residuo asfáltico para las pruebas MSCR. Dicho método requiere una película delgada que permita recuperar el residuo utilizando una temperatura baja de curado (60°C) y sólo 6 horas de curado (Y. Richard Kim, 2017). Además, durante la recuperación, el residuo asfáltico conserva la estructura del polímero o látex que se utilizó para la modificación de la emulsión debido a que no se requiere un envejecimiento significativo del material (Kadmas, 2010).

A temperaturas altas, la deformación permanente aunada a la exudación son problemas críticos en los tratamientos de microaglomerados. Sin embargo, la deformación permanente se identificó como el problema crítico de desempeño a alta temperatura en tratamientos de microaglomerados que se relaciona con el desempeño de los residuos de emulsión (Y. Richard Kim, 2017). La prueba MSCR es utilizada en las especificaciones EPG para caracterizar la deformación permanente del ligante de microaglomerado

### Temperatura baja

Para temperaturas bajas, el agrietamiento térmico se identificó como la falla crítica para tratamientos de microaglomerado (Y. Richard Kim, 2017). Para evaluar el potencial de agrietamiento térmico, es necesario realizar pruebas de barrido de frecuencia en DSR utilizando el residuo de emulsión en el rango de temperatura de 5°C y 15°C. Los resultados se utilizan para determinar el valor del módulo de corte dinámico ( $G^*$ ) en el ángulo de fase crítico ( $\delta_c$ ).

$G^*$  en  $\delta_c$  se correlaciona bien con el agrietamiento térmico en la mezcla de microaglomerado (Y. Richard Kim, 2017). Los valores de  $\delta_c$  que corresponden a todas las bajas temperaturas de EPG se muestran en la Tabla 2.5.

*Tabla 2.5: Valores de ángulos de fase críticos para residuo asfáltico de microaglomerado.*

Temperatura baja EPG (°C)	$\delta_c$ (°)
-7	50
-13	48
-19	46
-25	44
-31	42
-37	40

### 2.3.3. Filler de aportación

El relleno mineral o filler de aportación se puede utilizar para mejorar la consistencia, la resistencia a la fractura y la propagación de grietas, aumentar la rigidez del mástico asfáltico, minimizar la segregación y, ajustar las propiedades de rotura y curado de la mezcla. Si lo requiere el diseño de la mezcla, se debe usar cemento Portland, cal hidratada, polvo de piedra caliza, cenizas volantes u otro relleno aprobado que cumpla con los requisitos de ASTM D 242. Los niveles típicos de uso son normalmente de 0.0 a 3.0 por ciento y pueden considerarse parte de la granulometría. El filler de aportación influye en gran medida en el desempeño de la mezcla de microaglomerados (Gransberg, 2010). El agua evaporable de la mezcla

de emulsión es consumida por el filler mineral para la hidratación y para acelerar el mecanismo de ruptura. Robati, Carter y Perraton (2015) describieron la interacción filler-mástico como un parámetro crítico para el desarrollo de la cohesión, ya que una mayor tasa de rigidez representa un desarrollo de cohesión más rápido.

#### **2.3.4. Agua**

El agua deberá estar libre de sales nocivas y contaminantes. Si se cuestiona la calidad del agua, debe enviarse al laboratorio con las otras materias primas para el diseño de la mezcla (ISSA\_A143, 2010). El agua se introduce en la mezcla de microaglomerado de tres formas, es decir, la humedad presente en el agregado, el agua adicionada a la mezcla y el agua presente en la emulsión (Raza, 1994). El propósito principal del agua es humedecer, disolver y adherirse a otros componentes y moderar la reacción química (MS-19, 1997), además ayuda a proporcionar una consistencia adecuada a la mezcla de microaglomerado. Por lo tanto, el agua utilizada para el microaglomerado debe ser compatible con otros componentes (Patrick, 2018).

#### **2.3.5. Aditivos**

Cuando se requiera en el diseño de la mezcla de microaglomerado, se pueden usar aditivos para acelerar o retardar el tiempo de ruptura de la emulsión de microaglomerado. Los aditivos apropiados, y su rango de uso aplicable, deben ser aprobados por el laboratorio como parte del diseño de la mezcla (ISSA\_A143, 2010).

#### **2.3.6. Fibra de vidrio**

De manera similar a cualquier PST, existe un gran interés por parte de agencias y usuarios específicos para mejorar la durabilidad y la vida del diseño para que el microaglomerado pueda durar más tiempo. La resistencia al agrietamiento es a menudo un desafío ya que la propagación de grietas del pavimento existente es difícil de mitigar. Por lo tanto, sería de gran valor encontrar formas de mejorar la durabilidad y la resistencia al agrietamiento de los microaglomerados.

La adición de fibra da como resultado beneficios a corto y largo plazo. Inicialmente aumenta la viscosidad de la emulsión, por lo que es posible utilizar una granulometría continua o discontinua sin que exista separación o escurrimiento de la emulsión. Después del curado, la red de fibra refuerza la mezcla de microaglomerado, lo que aumenta la resistencia al corte y la resistencia al desgaste.

La prueba de tensión a flexión se puede realizar como un indicador de la resistencia al agrietamiento reflexivo. Esta es una prueba empírica que mide qué tan lejos debe doblarse la muestra antes de la fisuración. Posiblemente podrían adaptarse otros métodos de prueba que se realizan típicamente en vigas de concreto para medir la resistencia a la flexión y la tenacidad de las mezclas de microaglomerados para la evaluación de la resistencia al agrietamiento reflexivo.

La fibra de vidrio se puede utilizar, si así lo requiere el diseño de la mezcla, en concentraciones de 0.1 a 0.4% respecto al peso seco del agregado pétreo. El uso de concentraciones de fibra mayores a 0.4%, puede incrementar el valor de pérdida de agregado por desprendimiento, además de aumentar significativamente el costo del microaglomerado.

## 2.4. Diseño de la mezcla de microaglomerado

### 2.4.1. Introducción

En el microaglomerado, cada formulación establecida es un sistema químico que se ve afectado por varias variables como el tipo de emulsión y agregados, la distribución granulométrica, el contenido de agua y emulsión, junto cuando así se requiera con el filler de aportación, fibras o aditivos. Para determinar el diseño de la fórmula de trabajo de la mezcla de microaglomerado, en esta investigación, se utilizó una secuencia de pruebas especificadas en ISSA A143 (2010) que se muestran en la Figura 2.5.

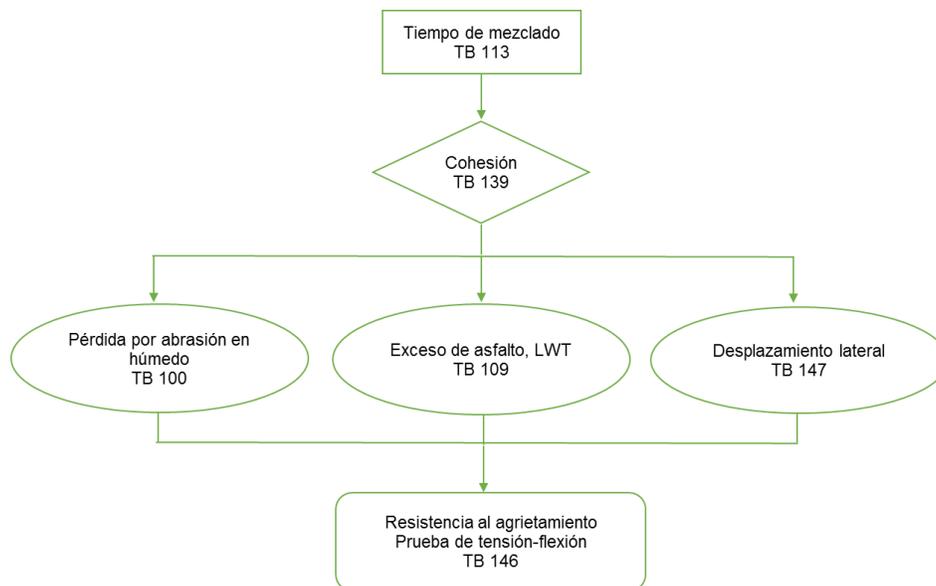


Figura 2.5: Pruebas utilizadas para la evaluación del microaglomerado.

### **2.4.2. Prueba de tiempo de mezclado**

Este método hace uso de mezclas de prueba para identificar si los materiales se pueden mezclar a la temperatura de diseño durante al menos 120 segundos (ISSA TB No. 113, 2017). Es una buena práctica de referencia para verificar fuentes de materiales consistentes.

Las formulaciones de prueba (pre-diseños) se evalúan utilizando esta prueba. Se mezclan entre 100 y 400 g de agregado pétreo seco con una cantidad deseable de filler minera, agua, aditivo líquido y fibra hasta una homogeneización uniforme de los componentes. Posteriormente, se agrega la emulsión y se mezcla, el operador evalúa visualmente el tiempo de mezclado y el tiempo de fraguado “tiempo set”.

En el microaglomerado, es esencial mantener un tiempo de mezclado adecuado para evitar la rotura prematura de la emulsión. Además, IRC (2008) y ASTM (2015) propusieron el uso del método de transferencia de papel para examinar el tiempo establecido de fraguado. En esta prueba, la muestra se deja curar durante 15 minutos a temperatura ambiente, después de lo cual se presiona ligeramente con una toalla de papel blanco sobre la superficie de la muestra a intervalos de cada 15 minutos. El tiempo mínimo establecido se define como el tiempo en el cual se pudo observar que no se mancha la toalla con emulsión asfáltica.

### **2.4.3. Prueba de cohesión**

Los sistemas de microaglomerado conformados por materiales compatibles se someten luego a una prueba de cohesión para garantizar un desarrollo adecuado de cohesión antes de su apertura al tráfico (ISSA TB No. 139, 2017). Se analizan las medidas de torque de las diversas combinaciones de materiales que se seleccionaron en la prueba de tiempo de mezclado para determinar las medidas de cohesión desarrollada. El microaglomerado cumple esta prueba cuando los valores de torque son superiores de 12 y 20 kg-cm después de 30 y 60 minutos de curado, respectivamente. La principal dificultad con el procedimiento es la dependencia del operador de la aplicación del torque. Por lo tanto, para minimizar la variabilidad, se recomienda usar la prueba de cohesión automatizada en la que la cantidad de rotación del vástago del torque se controla mediante un software y las mediciones de torque correspondientes se muestran gráficamente en la computadora (Caltrans, 2010).

Otro método para la evaluación del desarrollo de cohesión de microaglomerados, es el que se establece en ISSA A143 (2010). El cual consiste en evaluar el modo de ruptura del espécimen ensayado. La especificación establece que al menos se

presenten los modos de ruptura N y NS para 30 minutos y 1 hora, respectivamente. Este resulta ser un método bastante efectivo cuando no se cuenta con un equipo automatizado para la prueba de cohesión. La Figura 2.6 muestra los modos de ruptura que presentan los microaglomerados.



Figura 2.6: Modos de ruptura de microaglomerados en la prueba de cohesión. (Extraído de Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Quimikao S.A. de C.V.,2017)

#### 2.4.4. Prueba de pérdida por abrasión en vía húmeda

Es una prueba de desempeño de la mezcla de microaglomerado. La prueba de abrasión en pista húmeda es un método de simulación de campo para medir las cualidades de desgaste de la mezcla de microaglomerado bajo condiciones de abrasión en vía húmeda (ISSA TB No. 100, 2018). Esta prueba establece el contenido mínimo necesario de emulsión asfáltica para evitar el desprendimiento excesivo de agregado pétreo de mezclas curadas de microaglomerado. Esta prueba se realiza después de curar las muestras. Se realiza en una muestra remojada de 1 hora o 6 días para determinar la susceptibilidad a la exposición a la humedad a corto y largo plazo, respectivamente. El resultado de la prueba es la pérdida de peso del espécimen expresado en gramos por metro cuadrado y se reporta como el valor de desgaste, también se denota como pérdida de “Wet Track Abrasion Test” (WTAT, por sus siglas en inglés). Para que un diseño sea aceptable, el valor de desgaste de una hora debe ser menor de 538 g/m<sup>2</sup> y menor de 807 g/m<sup>2</sup> para seis días.

La preparación de la muestra se lleva a cabo mezclando 700 gramos de agregados secos con los demás componentes determinados en pre-diseños y que hayan cumplido con el valor de cohesión (pruebas ISSA TB No.113; ISSA TB No. 139). Luego, la emulsión se agrega a la mezcla y se agita durante aproximadamente 30 segundos y se vierte sobre el papel “roofing felt” con un molde de muestra en la parte superior. Una vez que la muestra alcanza el ajuste inicial, se retira el molde y

se deja curar al aire durante 3 horas a temperatura ambiente. A continuación, las muestras se curan en horno durante 24 horas a  $60^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ . Después del curado, las muestras se mantienen en un baño de agua a  $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  durante 60 a 75 min o durante 6 días (cuando sea a 6 días, la muestra debe ensayarse dentro de las dos primeras horas después de cumplir con el tiempo de acondicionamiento). Posteriormente, para probar las muestras preparadas, se permite que la cabeza de abrasión de la manguera de goma erosione la superficie de la muestra preparada durante  $405 \pm 2$  segundos (equipo Hobart A-120). La muestra desgastada luego se lava de los residuos sueltos y se anota el cambio en el peso de la muestra debido a la abrasión. La pérdida por abrasión se evalúa utilizando la Ecuación 2.1 en la que el factor de corrección de pérdida (FCP), depende de la máquina utilizada para la prueba. En la Ecuación 2.1, A y B son el peso de las muestras antes y después de la abrasión.

$$\text{Pérdida por abrasión} = (A - B) \times \text{FCP} \qquad \text{Ec. 2.1}$$

#### **2.4.5. Prueba de rueda cargada**

También considerada como una prueba de desempeño de la mezcla de microaglomerado. La prueba de rueda cargada mide la resistencia de la mezcla contra la exudación bajo tráfico intenso. Esta prueba establece el contenido máximo de emulsión asfáltica necesaria para evitar la exudación de mezclas de microaglomerado curadas (ISSA TB No. 109, 2005). La mezcla se compacta por medio de una rueda, de caucho y cargada que oscila sobre la muestra. El parámetro medido es la adherencia de arena que es una medida indirecta de la cantidad de asfalto en exceso en la mezcla. El valor de adherencia de arena es una función del número de ciclos (generalmente 1,000 ciclos de acondicionamiento y 100 para la prueba) y carga (56.7 kg más el peso del marco). Para que un diseño sea aceptable, la adherencia de la arena en la prueba "Loaded Wheel Tester" (LWT, por sus siglas en inglés) debe ser inferior a  $538 \text{ g/m}^2$ .

En la prueba LWT, después de preparar la mezcla como se describe para la prueba de abrasión en húmedo (con la excepción que en lugar de 700 g se usan 300-400 g de agregado pétreo seco), la mezcla se vierte en un molde para obtener las dimensiones recomendadas, las cuales están en función del tamaño máximo del material pétreo. Después de la fabricación, la muestra se cura al aire a temperatura ambiente durante 24 h, y luego se cura al horno a  $60^{\circ}\text{C}$  durante 18 a 24 h. La muestra curada se enfría luego a temperatura ambiente durante 2 h y se monta en la máquina de prueba. En la prueba, se aplican 56,7 kg de carga y la muestra se compacta a una velocidad de 44 ciclos/minuto por 1000 ciclos. Las muestras se

montan en la máquina de prueba y el marco que sostiene a la arena se centra sobre la muestra. Luego, 300 g de arena caliente (82.2°C) (rango de tamaño de 0.15 mm a 0.6 mm) se extienden uniformemente sobre la muestra y la compactación para 100 ciclos se inicia de inmediato. La adhesión de arena se determina luego utilizando la Ecuación 2.2.

$$\text{Arena adherida} = (D - C) \times FC \quad \text{Ec. 2.2}$$

En la Ecuación 2.2, C y D son el peso de la muestra antes y después de la adhesión de arena, respectivamente. El factor de corrección (FC) para LWT se puede determinar usando el área a la que se adhiere la arena.

#### 2.4.6. Determinación del contenido óptimo de emulsión

Con las dos pruebas anteriores (WTAT a una hora y LWT) se puede determinar el contenido óptimo de emulsión (COE) trazando la curva de pérdida por abrasión en vía húmeda y la curva de arena adherida como se muestra en la Figura 2.7 (ISSA TB No. 111, 2005). Generalmente, un aumento en la arena adherida y una disminución en la pérdida de agregados se observa cuando se incrementa el contenido de emulsión. Por lo tanto, para evitar simultáneamente la pérdida de agregado y minimizar la exudación (fenómeno contribuyente a la deformación permanente), es fundamental asignar un rango aceptable de contenido de emulsión y proporcionar límites de tolerancia adecuados para garantizar un desempeño satisfactorio del microaglomerado. Actualmente, un rango de tolerancia del 3% se deduce a partir del contenido máximo de emulsión permisible en LWT y el punto medio del rango de tolerancia del contenido óptimo de emulsión COE (Andrews, 1994).

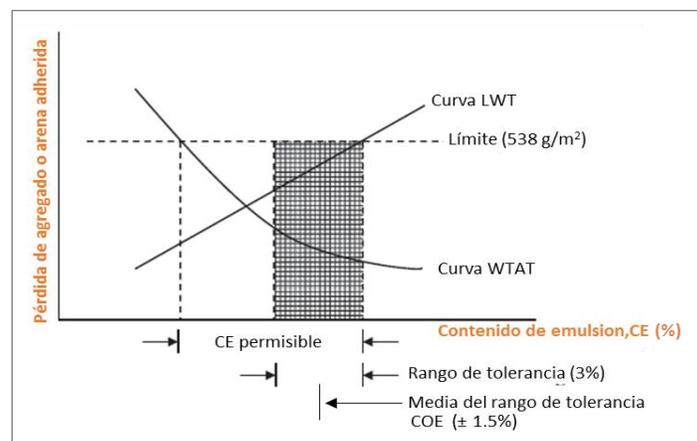


Figura 2.7: Determinación del contenido óptimo de emulsión.

### 2.4.7. Prueba de desplazamiento lateral

Usada para evaluar parte del desempeño de la mezcla de microaglomerado. La prueba de la rueda cargada de múltiples capas mide la cantidad de compactación o las características de desplazamiento del microaglomerado en la compactación simulada de tráfico rodante (ISSA TB No. 147 método A, 2005). Debido a que el microaglomerado se puede usar para rellenar roderas, debe tener una resistencia adecuada contra las deformaciones laterales provocadas por el tráfico pesado. Esta prueba establece el contenido mínimo de emulsión asfáltica necesario para evitar la deformación excesiva de la mezcla de microaglomerado. Existen tres procedimientos de prueba que se utilizan para medir la cantidad de compactación o las características de desplazamiento en la compactación simulada de tráfico rodante en el microaglomerado.

1. La prueba de la rueda cargada (LWT).
2. La prueba británica modificada de seguimiento de ruedas.
3. La prueba de la rueda cargada modificada C-LAI/GA.DOT

A continuación se presenta una breve descripción de la prueba de rueda cargada (LWT), método que se utilizó en esta investigación.

La prueba de la rueda cargada se describe en la Sección 2.4.5. Además del procedimiento regular, el ancho de la muestra se mide (en la trayectoria de la rueda) antes y después de 1000 ciclos de compactación de LWT, y se calcula el desplazamiento lateral. La densidad (antes y después de la compactación) también se puede ser calculada. Para que un diseño sea aceptable, la deformación lateral debe ser inferior al 5%, respecto al ancho original de la muestra, medida en la longitud media de la muestra. El cambio en el ancho del espécimen se anota para evaluar el desplazamiento lateral mediante la Ecuación 2.3, donde E y F son los valores del ancho de la muestra antes y después de la compactación, respectivamente.

$$\text{Desplazamiento lateral} = \frac{F - E}{E} \times 100 \quad \text{Ec. 2.3}$$

### 2.4.8. Prueba a flexión para mezclas bituminosas

Este método de ensayo se utiliza para evaluar el desempeño de la resistencia a agrietarse de mezclas asfálticas emulsionadas delgadas como el slurry seal y el microaglomerado (ISSA TB No. 146, 1989). Se usa una máquina de ensayo a flexión para la medición de grietas de las mezclas a temperatura ambiente y a 4°C.

El aparato de tensión a flexión es capaz de flexionar por compresión una placa de muestra formando un arco hacia arriba a una velocidad lineal de  $25\pm 1$  mm por minuto. Las muestras a ensayar proceden de la compactación de la máquina de ensayo de rueda cargada (LWT) durante 1000 ciclos. La muestra compactada de la rueda cargada se coloca longitudinalmente en la máquina de ensayo a flexión y se comprime en un arco hacia arriba hasta que aparece la primera grieta. Se apaga inmediatamente la máquina y se lee el recorrido de la regla y se anota.

Cuando se utilice una cámara refrigerada, el aparato debe colocarse 100 mm por encima de la parte inferior de la cámara y se debe mantener una temperatura de  $4^{\circ}\text{C}$ . El aparato y muestra deben estar al menos 8 horas dentro de la cámara antes de ensayar. Cuando se monte la muestra en la máquina de flexión, se debería flexionar la muestra 1 mm para asegurarse una operación suave.

### **2.5. Generalidades de las especificaciones EPG para el residuo asfáltico**

Las especificaciones EPG para el residuo asfáltico se desarrollaron definiendo relaciones independientes de la temperatura entre las propiedades medidas a residuos de emulsión y el desempeño del microaglomerado que correspondió a cada falla crítica (Y. Richard Kim, 2017). Los límites preliminares de especificación se basan en los valores de las propiedades del aglutinante que corresponden a los umbrales de desempeño críticos de la mezcla de microaglomerado.

En 2017 Y. Richard Kim et al., establecieron límites de especificación para diferentes clasificaciones de tráfico siguiendo una metodología similar a la utilizada en la norma estándar AASHTO M 332 para aglutinantes asfálticos en mezclas asfálticas en caliente (HMA).

#### **2.5.1. Tipos de falla en microaglomerados con relación a propiedades del residuo asfáltico.**

Basado en la revisión de la literatura, una lista de características clave de desempeño del residuo asfáltico que se relacionan con el desempeño de la mezcla de microaglomerado fue compilado.

### *2.5.1.1. Fallas en microaglomerado*

Las fallas críticas de desempeño para la evaluación de la mezcla de microaglomerado son las siguientes:

1. Deformación permanente
2. Agrietamiento térmico
3. Agrietamiento reflexivo
4. Desprendimiento de agregado

Para la priorización de las características de desempeño de mezclas de microaglomerado, sólo se consideraron las fallas que se relacionan directamente entre el desempeño del residuo asfáltico y la mezcla de microaglomerado. Si bien el desprendimiento de agregado se ha identificado como un problema crítico para el microaglomerado, este fenómeno es impulsado por la interacción química entre la emulsión asfáltica y el agregado, por lo tanto, no puede ser capturado por pruebas solamente del residuo (Y. Richard Kim, 2017). Este hecho fue confirmado a través de pruebas para microaglomerado (resumidas en el Apéndice D, NCHRP 837). El agrietamiento reflexivo tampoco se considera una falla crítica para el microaglomerado porque se relaciona con la integridad estructural existente del pavimento y no tanto con las propiedades del residuo asfáltico (Y. Richard Kim, 2017).

La deformación permanente en el microaglomerado está relacionada con la viscoplasticidad del residuo asfáltico a altas temperaturas y el agrietamiento térmico en la mezcla está relacionado a la rigidez y la capacidad de resistencia del residuo asfáltico a cambios térmicos a bajas temperaturas invernales.

### **2.5.2. Intención del uso de especificaciones EPG de emulsiones para microaglomerados**

Debido a que los microaglomerados no contribuyen a la capacidad estructural de los pavimentos, las especificaciones EPG no incluyen pruebas de propiedades del material para detectar daños críticos, como fatiga y agrietamiento por reflexión que están relacionados con la resistencia y la integridad de la estructura del pavimento. Las únicas fallas que se abordan en estas especificaciones EPG son aquellas que no están relacionadas directamente con la integridad estructural del pavimento, que no son el resultado de problemas preexistentes del pavimento, o que no son causadas por malas prácticas de construcción (Y. Richard Kim, 2017).

Además, las especificaciones EPG no proporcionan recomendaciones para el diseño y construcción del microaglomerado. El usuario de las especificaciones EPG es responsable de determinar el diseño apropiado y las prácticas de construcción para el microaglomerado y la ubicación donde se aplicará.

### **2.5.3. Clasificación EPG por temperatura**

#### *2.5.3.1. Temperatura alta*

Los requisitos de grado PG climáticos de alta temperatura de HMA para una ubicación determinada se calculan utilizando un modelo basado en una profundidad de 20 mm. Sin embargo, los microaglomerados se colocan en la superficie de los pavimentos. Por lo tanto, el grado PG climático de la emulsión para una ubicación determinada debe calcularse en función de la temperatura de la superficie del pavimento, considerando días del año con grados por encima de 10°C y un umbral supuesto para profundidad de rodera permitida de 12.7 mm (Mohseni, 2005). Los grados climáticos son típicamente determinados basados en un 98% de confiabilidad estadística utilizando datos climáticos de un conjunto representativo de años (Y. Richard Kim, 2017). La confiabilidad, se define como la probabilidad de que en un solo año la temperatura real de la superficie del pavimento no supere la temperatura de la superficie del pavimento de diseño. Con base en las relaciones de profundidad de pavimento, los umbrales EPG climáticos a alta temperatura deben desplazarse 3°C por encima de los umbrales PG (Y. Richard Kim, 2017).

Debido a que las especificaciones EPG propuestas utilizan la temperatura de la superficie en lugar de la temperatura medida a una profundidad de 20 mm, como se recomienda en las especificaciones PG existentes para HMA. El enfoque del modelo usado de deformación permanente para determinar los requisitos PG de alta temperatura en HMA no incluye disposiciones para la corrección por profundidad. Sin embargo, el modelo de desempeño del pavimento a largo plazo “Long-Term Pavement Performance” (LTPP), de alta temperatura “High Pavement Temperature Model” según Mohseni (1998) indica que la diferencia entre la temperatura de un pavimento en su superficie y a una profundidad de 20 mm es de 3,9°C. Por lo tanto, Y. Richard Kim et al. (2017) sugirieron que en las especificaciones EPG, los incrementos de grado de temperatura en la superficie deben cambiar en incrementos de 3°C a partir de la especificación PG existente para HMA. Mientras que un cambio de 4°C se adhiere más al gradiente de temperatura esperado, se consideró más práctico usar un cambio de 3°C ya que las especificaciones PG existentes para HMA se basan en incrementos de 6°C. Por ejemplo, en lugar de mantener los grados de desempeño existentes para HMA a alta temperatura de PG

58, PG 64, PG 70, etc., las especificaciones EPG recomiendan el uso de grados de alta temperatura EPG 61, EPG 67, EPG 73, etc.

Es importante tener en cuenta que este cambio en el grado de especificación no significa que el asfalto base PG utilizado para fabricar la emulsión debe ser necesariamente más alto que el PG del asfalto que se usa actualmente con éxito en el campo.

#### *2.5.3.2. Temperatura baja*

El grado de temperatura baja en las especificaciones EPG se define como la temperatura mínima anual registrada en un día sobre la superficie del pavimento (especificaciones similares a las PG usadas para ligante asfáltico en HMA) (Y. Richard Kim, 2017)

Por lo tanto, la corrección de profundidad requerida a alta temperatura no se aplica a la determinación del grado a temperaturas bajas. Sin embargo, por simplicidad tendría sentido cambiar los grados tanto de temperatura alta como de temperatura baja desde las especificaciones PG de HMA hasta las especificaciones EPG. Al determinar el requisito de grado para una ubicación determinada, el grado continuo se redondea de forma conservadora al grado disponible más cercano.

Por ejemplo, si se determina que el grado continuo de temperatura baja es de -18°C, el requisito de grado de temperatura baja de HMA es de -22°C. El grado requerido correspondiente EPG de baja temperatura será de -19°C considerando que los grados PG's de baja temperatura disponibles aumentaron 3°C. Como resultado de este redondeo, la mayoría de las ubicaciones tendrán una clasificación de temperatura baja EPG que es 3°C más alto que su correspondiente clasificación PG de temperatura baja.

#### **2.5.4. Designaciones de tráfico en las especificaciones EPG**

Debido a que el desempeño del microaglomerado, también depende de las condiciones de tráfico a las que se somete, las especificaciones desarrolladas EPG proporcionan límites en las pruebas de material para la clasificación del residuo asfáltico en función el tráfico esperado. Las clases de tráfico que se proponen en las especificaciones EPG, se establecieron en función del Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) esperado sobre el microaglomerado, según se indica a continuación:

- Tráfico bajo: 0–500 TDPA
- Tráfico medio: 501–2,500 TDPA

- Tráfico alto: 2,501–20,000 TDPA

El límite superior seleccionado de alto tráfico se aplica a microaglomerados donde se tienen volúmenes de tráfico de hasta 20,000 vehículos en California (Caltrans, 2009).

Los niveles de tráfico del model mobile load simulator (MMLS3) equivalentes que se utilizaron para desarrollar los límites de desempeño de temperatura alta del residuo asfáltico en los tres niveles de tráfico de las especificaciones EPG, están representados, como sigue:

- Tráfico bajo (L): 3,000 cargas de rueda MMLS3
- Tráfico medio (M): 13,000 cargas de rueda MMLS3
- Tráfico alto (H): 18,000 cargas de rueda MMLS3

#### **2.5.5. Designaciones para la clasificación de emulsiones en las especificaciones EPG**

El desarrollo de especificaciones de grado EPG de emulsiones como parte de un sistema de clasificación de desempeño que consiste en designaciones de grado de alta y baja temperatura relacionadas con el clima. Además, el sistema de clasificación utiliza una designación de tráfico con una sola letra para indicar el rango de TDPA en el que el grado de desempeño de la emulsión se encuentra aceptable. Las especificaciones EPG conservan las designaciones utilizadas actualmente para la carga de emulsionante y la tasa de fraguado.

- 67 = Temperatura máxima anual promedio de la superficie del pavimento de 7 días (°C)
- -19 = Temperatura mínima de la superficie del pavimento (°C)
- L = Volumen de tráfico bajo (Low)
- M = Volumen de tráfico medio (Medium)
- H = volumen de tráfico alto (High)

# CAPÍTULO 3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

## 3.1. Derivación de límites de especificación EPG

Esta sección presenta la metodología utilizada para derivar los límites de especificación de las pruebas de emulsiones asfálticas utilizadas en tratamientos de microaglomerados.

### 3.1.1. Derivación de límites de prueba de la emulsión original

La Figura 3.1 muestra el ejemplo de cómo los límites especificados de prueba de la emulsión original se determinaron utilizando los datos de prueba obtenidos de las pruebas de estabilidad al almacenamiento (relación de separación y relación de estabilidad) utilizando emulsiones para microaglomerado (Y. Richard Kim, 2017). Los límites de especificación se determinaron según el concepto de confiabilidad del 98% y Juicio de Ingeniería de U.S.A [ver Figura 3.1 (b) y (d)].

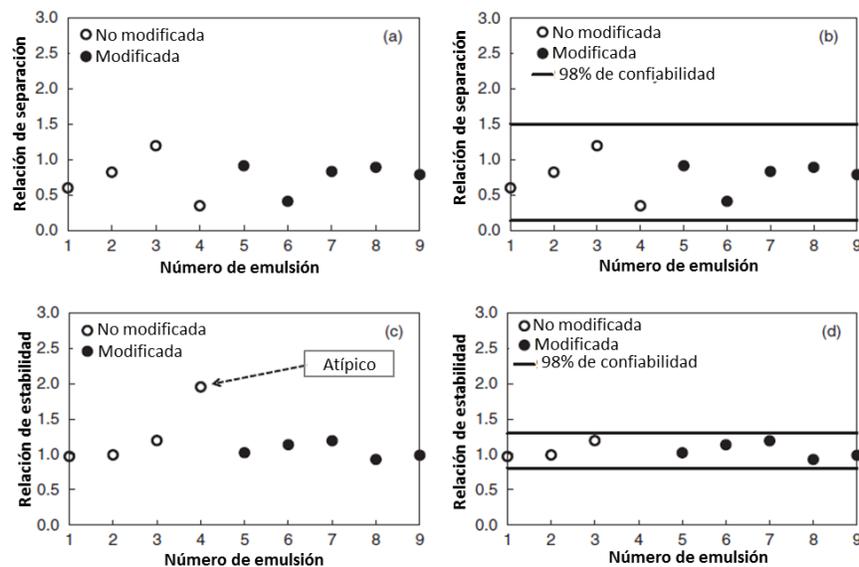


Figura 3.1: Ejemplos de (a) identificación de valores atípicos para los datos de relación de separación, (b) determinación del límite de especificación de la relación de separación, (c) identificación de valores atípicos para datos de relación de estabilidad y (d) determinación del límite de especificación de la relación de estabilidad para emulsiones originales de microaglomerados. (Extraído de Y. Richard Kim, 2017, p. 24).

El Juicio de Ingeniería fue utilizado para determinar los límites de especificación de la relación de estabilidad para las emulsiones de microaglomerado, como sólo

un límite máximo era necesario porque una relación de estabilidad cercana a 1 es deseable (Y. Richard Kim, 2017). Establecieron un límite de relación de estabilidad máximo de 1.5 para emulsiones utilizadas en microaglomerados con base en los datos presentados en la Figura 3.1. Desde este enfoque de derivación de límite, el rango aceptable de las relaciones de separación para las emulsiones de microaglomerado se determinó que era de 0.2 a 1.5.

La Figura 3.2 muestra la determinación del límite de especificación para la manejabilidad de la emulsión, parámetro requerido para garantizar la trabajabilidad de la emulsión durante el bombeo y el mezclado en el sistema de microaglomerado. Debido a que las emulsiones utilizadas en microaglomerados se mezclan con los otros componentes antes de la aplicación, se requiere calcular el valor máximo permitido de viscosidad para garantizar una buena capacidad de manejabilidad durante la construcción del microaglomerado. El valor del límite máximo de viscosidad rotacional es de 600 cP.

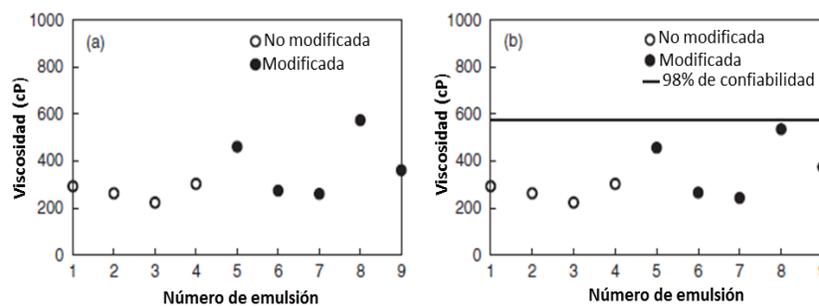


Figura 3.2: Ejemplos de (a) identificación de valores atípicos para datos de manejabilidad y (b) determinación del límite de especificación de manejabilidad de emulsiones originales para microaglomerados. (Extraído de Y. Richard Kim, 2017, p. 27).

### 3.1.2. Derivación de límites de prueba del residuo asfáltico

Esta sección describe la metodología para derivar los criterios de especificación del residuo asfáltico que se relacionan con el desempeño de los tratamientos de microaglomerado con respecto a las fallas críticas. Se utilizaron relaciones entre las propiedades del residuo asfáltico y el desempeño de la mezcla de microaglomerado para establecer los criterios de especificación.

#### 3.1.2.1. Derivación de límites de prueba a temperatura alta

A temperatura alta, deformación permanente es el principal tipo de falla para los tratamientos de microaglomerados. Estos tratamientos a menudo se aplican en capas gruesas. Estas capas gruesas son susceptibles a la formación de roderas.

Los residuos asfálticos con resistencia superior a la deformación permanente darán como resultado mezclas de microaglomerado que son resistentes a este fenómeno.

#### **Límite de la prueba MSCR para evaluar la deformación permanente a temperatura alta en microaglomerados**

La resistencia a la formación de roderas del residuo asfáltico de microaglomerados se caracterizó utilizando el valor  $J_{nr}$  en el nivel de esfuerzo de 3.2 kPa en la prueba MSCR (Y. Richard Kim, 2017). Los resultados  $J_{nr}$  del ligante se correlacionaron con las mediciones tomadas de deformación permanente de la mezcla ensayada en el MMLS3 en volúmenes de tráfico bajo, medio y alto. Para verificar que el valor  $J_{nr}$  es un buen indicador de la resistencia a la formación de roderas del microaglomerado y, posteriormente, para establecer límites de especificación. El umbral máximo de deformación permanente permitido es de 5 mm para mezclas probadas en laboratorio, según los resultados determinados por Y. Richard Kim et al. (2017) en especímenes probados. Debido a que no existía un valor en el límite de profundidad de rodera en mezclas de microaglomerado antes de la investigación de dicha investigación, el límite máximo de 5 mm de deformación permanente se deriva del hecho de que cada carga de rueda MMLS3 aplicada es un tercio de carga de un eje típico con doble rueda (Lee S, 2003). Por lo tanto, el límite de deformación permanente para el microaglomerado fue determinado para ser aproximadamente un tercio del límite aceptable de profundidad de la rodera para pavimentos de HMA, es decir, un tercio de 12.7 mm o aproximadamente 5 mm para microaglomerados sometidos a tráfico MMLS3 (Mohseni et al. 2005).

No obstante, la validación a largo plazo de las especificaciones EPG verificará si los límites máximos de  $J_{nr}$  que se determinaron utilizando este umbral máximo de profundidad de rodera de 5 mm son apropiados para el desempeño especificando de microaglomerado a temperatura alta o si estos límites deben ser ajustados (Y. Richard Kim, 2017).

Los límites de especificación preliminares derivados para los volúmenes de tráfico medio y alto eran similares (es decir,  $1.75 \text{ kPa}^{-1}$  para tráfico medio y  $1.25 \text{ kPa}^{-1}$  para tráfico alto) debido a que las profundidades de rodera del microaglomerado son similares en volúmenes de tráfico medio y alto, como se muestra en la Figura 3.3. El aumento limitado en el valor de la profundidad de rodera en volúmenes de tráfico medio a alto se debe a limitaciones en cuanto a la profundidad de rodera. Inicialmente ocurre una densificación por el tráfico en microaglomerados no compactados a medida que aumentan las repeticiones de tráfico. Sin embargo, después de un gran volumen de repeticiones de tráfico, la mezcla delgada de microaglomerado ya no puede continuar densificándose y la

profundidad de rodera se aproxima a ser asintótica, que se logró para la mayoría de las mezclas con nivel medio de tráfico en el trabajo de Y. Richard Kim et al. (2017). Por lo tanto, un límite máximo de  $J_{nr}$  en las especificaciones EPG definirá un desempeño aceptable de microaglomerados para volúmenes de tráfico medio y alto. El límite máximo permitido de  $J_{nr}$  para volúmenes de tráfico medio y alto se seleccionó para ser  $1.5 \text{ kPa}^{-1}$ , ya que este valor es el promedio de los dos límites. El límite máximo de  $J_{nr}$  que se estableció para volúmenes de tráfico bajo es de  $5.0 \text{ kPa}^{-1}$ .

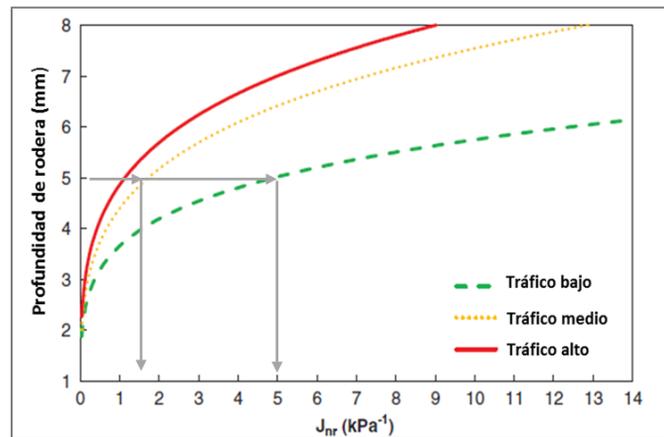


Figura 3.3: Relación MSCR versus profundidad de rodera como una función del nivel de tráfico para microaglomerado. (Extraído de Y. Richard Kim, 2017, p. 36).

### 3.1.2.2. Pruebas de temperatura intermedia

Esta sección explica las razones para no incluir las pruebas de temperatura intermedia en las especificaciones propuestas EPG para evaluar el potencial de desprendimiento de agregado. En su lugar, pruebas de temperatura intermedia, impulsadas por la química y la compatibilidad entre el agregado y la emulsión, deben ser evaluadas durante la etapa de diseño de mezcla para microaglomerados.

Para las temperaturas intermedias en tratamientos de microaglomerado, se identificaron como los tipos de falla más notorios el desprendimiento de agregado y el agrietamiento por reflexión. Sin embargo, el desprendimiento de agregado de la mezcla de microaglomerado, se determinó que se deben a la interacción química entre la emulsión y otros constituyentes de la mezcla (es decir, agregado, cemento, cal) como se muestra en los resultados presentados en el Apéndice D, NCHRP 837. Por lo tanto, la resistencia al desprendimiento de agregado no puede vincularse únicamente a la calidad del residuo asfáltico. De hecho, los fabricantes de emulsiones de microaglomerados formulan emulsiones específicamente para el agregado con el cual se va a mezclar la emulsión. El agrietamiento reflexivo está

relacionado con la estructura del pavimento y es impulsado en gran parte por la condición de la superficie del pavimento subyacente y por lo tanto tampoco está relacionado directamente con la calidad del residuo de la emulsión.

Las especificaciones EPG recomiendan realizar la prueba de abrasión en vía húmeda (de acuerdo con ASTM D3910 o ISSA TB 100) durante la etapa de diseño de la mezcla, después de combinar la emulsión con el agregado, para asegurar una adecuada resistencia al desprendimiento de agregado a temperaturas intermedias (Y. Richard Kim, 2017).

#### *3.1.2.3. Derivación del límite de prueba a temperatura baja*

El agrietamiento térmico es la principal falla en los microaglomerados a temperaturas bajas (Y. Richard Kim, 2017). Este fenómeno está relacionado con la capacidad del asfalto residual para soportar la contracción térmica por enfriamiento sin presentar fractura. Las fallas críticas de microaglomerados a temperatura baja, típicamente ocurren durante el primer invierno después de la construcción del mismo. Debido a que las bajas temperaturas invernales ocurren sólo unos meses después de la construcción inicial, se asumió que las fallas críticas a baja temperatura se presentaban antes del envejecimiento significativo del residuo asfáltico (Y. Richard Kim, 2017). Por lo tanto, se usó un residuo no envejecido para la clasificación EPG a baja temperatura.

#### **Parámetro recomendado de temperatura baja para especificaciones EPG**

Para establecer especificaciones EPG de temperatura baja. Y. Richard Kim et al. (2017) evaluaron las propiedades del residuo asfáltico basado en la reología y la energía de fractura en mezclas de microaglomerados. La fuerza de correlación entre el desempeño de la mezcla y las propiedades del residuo asfáltico se usó para evaluar la adecuación del parámetro para especificaciones de temperatura baja.

La resistencia de la mezcla de microaglomerado al agrietamiento térmico se cuantificó utilizando la energía de fractura medida mediante la prueba SENB a -16°C, -22°C y -28°C. Las propiedades de energía fractura de los residuos asfálticos se obtuvieron a través de la prueba SENB a -16°C, -22°C, y -28°C. Además las propiedades reológicas del residuo asfáltico se obtuvieron mediante la prueba de barrido de frecuencia DSR a temperaturas que van desde los 5°C hasta los 15°C. Aunque tanto las propiedades del residuo asfáltico basadas en la reología como la energía de fractura relacionan con el desempeño de las mezclas de microaglomerados a temperaturas bajas, las propiedades reológicas demostraron una relación más fuerte con el desempeño de la mezcla, estas fueron finalmente

seleccionadas para las especificaciones sobre la base de la eficiencia y rentabilidad. La prueba en DSR también se requiere para la determinación de EPG a alta temperatura, y por lo tanto, el uso del DSR en oposición a la configuración de prueba SENB minimiza los requisitos del equipo. Además, las pruebas en DSR requieren menos residuo asfáltico, implican una preparación de muestras más simple y toma menos tiempo que las pruebas SENB (Y. Richard Kim, 2017). (Más detalles se proporcionan en el Apéndice D, NCHRP 837).

La propiedad reológica del residuo asfáltico que demostró la relación más fuerte con la energía de fractura de microaglomerados es el módulo de corte dinámico ( $G^*$ ) en un ángulo de fase crítico ( $\delta_c$ ). Los valores del ángulo de fase crítico variaron en función del PG de baja temperatura de interés. El uso de  $G^*$  en valores de ángulo de fase críticos para especificaciones de temperatura baja fueron motivadas por el descubrimiento de una fuerte relación entre el módulo cruce ( $G^*c$ ) y desempeño de la mezcla a temperatura baja. Se define el módulo de cruce como el valor de  $G^*$  que corresponde a la frecuencia reducida donde el ángulo de fase es igual a  $45^\circ$ . ( $G^*c$ ) está estrechamente relacionado con un parámetro de forma de la curva maestra ( $G^*$  versus  $\delta$ ), el valor R. El valor R es igual a la diferencia logarítmica entre el valor del módulo de corte dinámico vítreo ( $G_g$ ) vítreo y el valor del módulo de cruce ( $G^*c$ ) y es proporcional al ancho del espectro de relajación de un material asfáltico (Anderson et al. 1994). Para la mayoría de los ligantes, el módulo vítreo es aproximadamente  $10^9$  Pa (Anderson et al. 1994). Por lo tanto, el valor R es esencialmente un indicador del módulo de cruce del ligante asfáltico (es decir, el valor  $G^*$  en un ángulo de fase crítico). A frecuencias reducidas más bajas que la frecuencia de cruce (es decir, temperaturas más altas o velocidades más lentas), el componente de pérdida (viscoso) del  $G^*$  excede al componente de almacenamiento (elástico). En el estudio de polímeros y otros materiales viscoelásticos, se ha postulado que el módulo cruce es un indicador de fuerzas intermoleculares que comprenden la microestructura de un material (Winter, 1987). A temperaturas inferiores o frecuencias superiores al punto de cruce, la excitación aplicada al material es insuficiente para superar las fuerzas de interacción molecular contenidas dentro de la microestructura del material. Sin embargo, una vez que se excede el punto de cruce (ya sea aumentando la temperatura o disminuyendo la velocidad), la excitación supera las fuerzas de la microestructura del material, y por lo tanto, se produce una tendencia hacia el comportamiento fluido. Así, un menor valor del módulo de cruce en ligantes asfálticos implica teóricamente un mayor grado de compatibilidad (es decir, menos estructura). Los materiales que están estructurados son inherentemente más frágiles y susceptibles al agrietamiento que los materiales más compatibles. Por lo tanto, es intuitivo que un valor de módulo de cruce menor se relaciona con una mejor resistencia a la fractura (Y. Richard Kim, 2017)

Sin embargo, el módulo de cruce y el valor R son parámetros independientes de la temperatura. Debido a que el módulo de cruce es un parámetro independiente de la temperatura, mientras que el desempeño de la mezcla cambia en función de la temperatura (Vijaykumar, 2013), el módulo de cruce no se podría utilizar en el marco del desarrollo de EPG. Por lo tanto, para adaptar el concepto del módulo de cruce para permitir su incorporación en el marco de especificaciones EPG, Y. Richard Kim et al. (2017) determinaron los valores de ángulos de fase críticos en función de las temperaturas de prueba de la mezcla para producir una relación independiente de la temperatura entre el desempeño de la mezcla a baja temperatura y los valores  $G^*$  correspondientes. Asimismo determinaron los valores de  $G^*$  en los valores de ángulo de fase críticos de interés, realizando pruebas de barrido de frecuencia en DSR a 5°C y 15°C independientemente de PG, es decir, los valores de ángulo de fase críticos para los cuales el valor de  $G^*$  se evalúa, varían en función de PG de baja temperatura en lugar de la temperatura de prueba.

Para determinar los límites de especificación, se determinaron los valores de los umbrales de las propiedades del residuo asfáltico que corresponden al desempeño crítico de la mezcla. Los umbrales del desempeño de la mezcla se determinaron con base a los resultados del informe NCHRP 837. El agrietamiento térmico del microaglomerado es inducido por el clima más que por la carga vehicular. Por lo tanto, las especificaciones de baja temperatura para microaglomerados contienen un único límite de especificación que es independiente del nivel de tráfico.

#### **Valores de ángulos de fase críticos y límite de prueba de módulo de corte dinámico para evaluar el agrietamiento térmico a temperatura baja en microaglomerados**

Los resultados obtenidos por Y. Richard Kim et al. (2017) muestran que la energía de fractura disminuye para cada mezcla de microaglomerado ensayada a medida que la temperatura disminuye. La falta de sensibilidad de la energía de fractura a la temperatura implica que la temperatura de prueba esté por debajo de la temperatura de transición vítrea. Los materiales vítreos son inherentemente quebradizos y susceptibles de agrietarse. Por lo tanto, una mezcla no debe colocarse en un clima donde estará expuesta a temperaturas por debajo de su transición vítrea. Basado en los resultados de energía de fractura de microaglomerados, el valor de la energía de fractura en o por debajo de la temperatura de transición vítrea es inferior a 0.0010 J (Joules). Por lo tanto, el límite de desempeño crítico de la mezcla de microaglomerado se estableció en 0.0010 J.

Los valores de ángulo de fase utilizados para cada temperatura de prueba de desempeño de la mezcla se ajustaron hasta una relación independiente de la

temperatura entre la energía de fractura de la mezcla y el  $G^*$  obtenido del residuo asfáltico (Y. Richard Kim, 2017). La Figura 3.4 presenta los resultados. La Figura 3.4 (a) muestra que la relación entre la energía de fractura y el módulo de cruce no dependen de la temperatura porque el desempeño de la mezcla cambia en función de la temperatura, pero el módulo de cruce no lo hace. La Figura 3.4 (b) muestra la relación entre la energía de fractura y el valor de  $G^*$  cuando los valores de ángulo de fase críticos para los valores determinados de  $G^*$  se ajustan como una función de la temperatura. El valor de  $\delta_c$  que corresponde a  $-22^\circ\text{C}$  permanece a  $45^\circ$ , mientras que los valores de  $\delta_c$  que corresponden a  $-16^\circ\text{C}$  y  $-28^\circ\text{C}$  son  $47^\circ$  y  $43^\circ$ , respectivamente. Estos resultados demuestran buena concordancia entre la energía de fractura y los valores de  $G^*$  independientemente de la temperatura de prueba de la mezcla ( $R^2 = 0,85$ ).

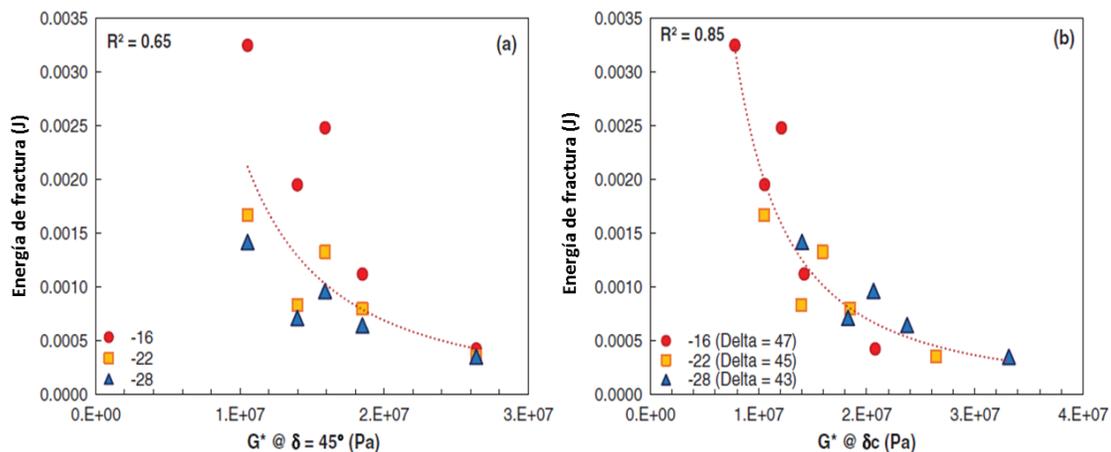


Figura 3.4: Energía de fractura de la mezcla de microaglomerado versus  $G^*$  en  $\delta_c$  del residuo asfáltico correspondiente a: (a)  $\delta_c=45^\circ$  y (b)  $\delta_c$  ajustado en función de la temperatura. (Extraído de Y. Richard Kim, 2017, p. 48).

Las relaciones entre las EPG a baja temperatura y los valores de  $\delta_c$  que se muestran en la Figura 3.4 (b) se utilizaron para determinar los valores de  $\delta_c$  que corresponden a todas las temperaturas bajas EPG.

El límite de especificación para el residuo asfáltico se definió en función de las relaciones entre la energía de fractura de la mezcla con los valores de  $G^*$  que corresponden a los valores de  $\delta_c$  del residuo asfáltico y los umbrales de energía de fractura permitidos establecidos. La Figura 3.5 presenta los resultados. El límite máximo establecido de  $G^*$  es igual a 16 MPa para todos los niveles de tráfico.

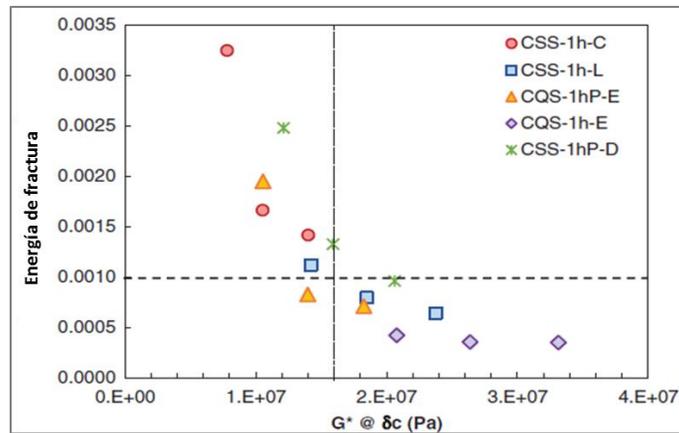


Figura 3.5: Límite crítico máximo de  $G^*$  para residuos asfálticos de microaglomerados. (Extraído de Y. Richard Kim, 2017, p. 49).

## 3.2. Estudios del efecto de la fibra de vidrio en el microaglomerado

### 3.2.1. Desprendimiento por abrasión en vía húmeda

Desde hace algunos años se han empleado fibras como refuerzo de materiales bituminosos. Por ejemplo, la empresa PROBISA las ha venido empleando de un modo sistemático en los másticos de impermeabilización de tableros de puentes y a partir de 1984 se emplearon combinaciones de fibras como solución impermeabilizante en zonas agrietadas de la autopista A-2, en el tramo Zaragoza - El Vendrell, en España.

En las lechadas bituminosas, la adición de fibras fija una cantidad considerable de emulsión asfáltica, lo que permite fabricar mezclas con alto contenido de ligante sin riesgo de exudaciones en climas con temperaturas elevadas, obteniéndose mezclas muy flexibles y con un alto grado de durabilidad frente al agua y resistencia al envejecimiento.

Una vez endurecida la lechada (mezcla asfáltica de poco espesor) las fibras forman una armadura tridimensional en el seno de la mezcla aumentando de forma notable su resistencia a la tensión (Probisa, 1994).

Empleando 4 tipos diferentes de fibras (celulosa, acrílica, de vidrio y amianto), no se han observado diferencias muy notables entre las 4 fibras, ni tampoco pueden sacarse conclusiones claras respecto a la influencia del % de la fibra sobre la cohesión (Probisa, 1994).

Respecto a la abrasión, sí se nota la influencia del tipo de fibra empleada, aumentando la abrasión con el contenido de fibra. Con un tipo adecuado de fibra, la pérdida por abrasión disminuye ligeramente para contenidos pequeños de la misma, como se pone de manifiesto en la Figura 3.6.

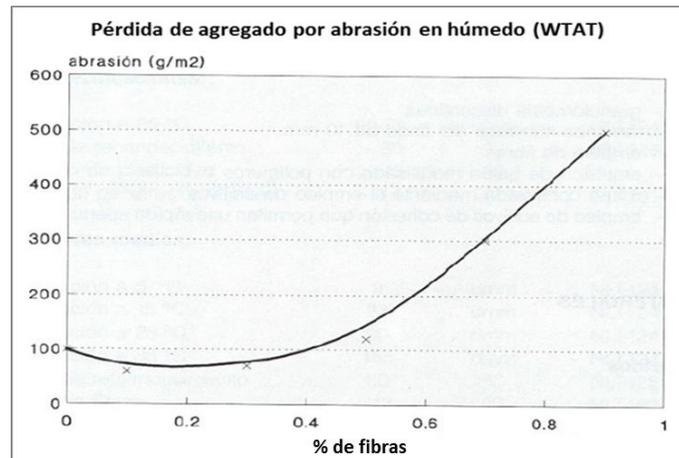


Figura 3.6: Pérdida de agregado pétreo por abrasión en húmedo versus % de fibras. (Extraído de Probisa, 1994)

### 3.2.2. Mediciones de la efectividad de la fibra en mezclas de microaglomerado

Hay investigaciones en curso para mejorar las mezclas de microaglomerado. Se ha intentado el uso de un asfalto de grado más suave para crear mezclas de microaglomerados más flexibles (Charmot, Ye, Zhu, & Yang, 2013).

El trabajo desarrollado por Charmot, Ye, Zhu, & Yang (2013) presenta la capacidad para optimizar y cuantificar las propiedades de los materiales de los microaglomerados en términos de resistencia a la fisuración. En dicha investigación se desarrollaron métodos de preparación de muestras y de prueba de viga de flexión para cuantificar las mejoras potenciales de la mezcla de microaglomerados a partir de la adición de fibra de vidrio. Se construyeron secciones de prueba de campo para validar también el efecto de la adición de fibra de vidrio. En dicho trabajo, la resistencia a la flexión se seleccionó como el parámetro de prueba más adecuado para coincidir con las observaciones de desempeño en el campo y cuantificar el efecto de la fibra en el laboratorio.

En la Figura 3.7 se muestran los resultados de tal estudio, se puede ver que, para una temperatura dada, el efecto de la fibra se debe principalmente a un cambio en el área bajo la curva como una indicación de la energía absorbida, en lugar de un cambio en la fuerza máxima. Las vigas que contienen fibra experimentaron un

mayor comportamiento de fluencia (una caída más lenta en el valor de carga después de alcanzar la carga máxima) que las muestras sin fibra.

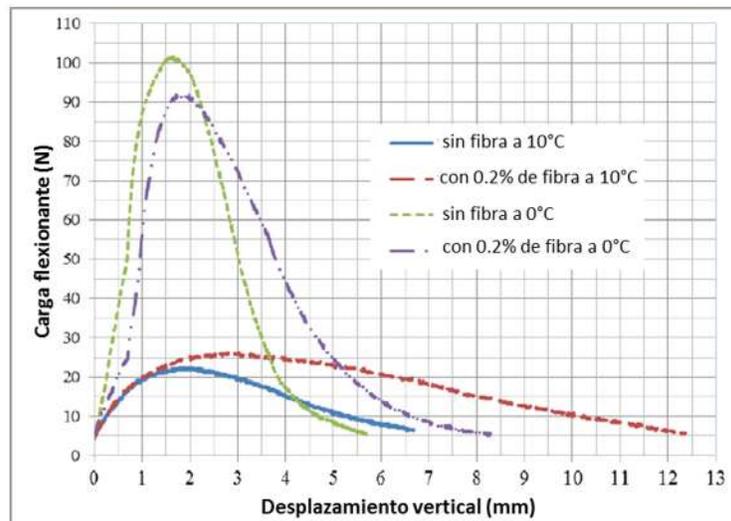


Figura 3.7: Flexión por carga versus desplazamiento vertical. (Extraído de Charmot, Ye, Zhu, & Yang, 2013, p. 15).

# **CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EMPLEADA EN EL EXPERIMENTO DE LABORATORIO**

## **4.1. Materiales utilizados en el estudio**

En el presente trabajo se utilizó un agregado pétreo, el cual fue muestreado del banco de agregados “Domin” en el estado de Durango en México. El material pétreo es producto 100% triturado de roca sana. Además como objetivos principales de estudio en el desempeño del microaglomerado, se utilizaron 6 emulsiones asfálticas con características propias para ser usadas en microaglomerados y fibra de vidrio.

El asfalto base utilizado para la fabricación de emulsiones es un PG 64-22, el cual se adquirió de la refinería de Tula, Hidalgo.

Se realizó el análisis detallado EPG a las 6 emulsiones asfálticas. Sin embargo, sólo 4 emulsiones funcionaron para el diseño de la mezcla. Las otras 2 emulsiones no cumplieron con la prueba de tiempo de mezclado y no fue posible usarlas para continuar el estudio después del análisis EPG. Por lo tanto, resultaron 4 diseños de microaglomerado (sin fibra) para la evaluación las emulsiones asfálticas. Para evaluar el efecto de la fibra, esta se adicionó a cada uno de los 4 diseños anteriores, obteniendo 4 diseños más, llegando así a un total de 8 diseños de microaglomerado.

## **4.2. Caracterización del agregado pétreo**

La caracterización consistió en determinar la distribución granulométrica o gradación y la calidad del agregado pétreo.

Para determinar la gradación se empleó el método de prueba ASTM C117. El agregado pétreo se lavó a través del tamiz N° 200 para eliminar todas las partículas de menor tamaño que 0.075 mm. Posteriormente, se realizó el análisis por cribado del material seco mediante el arreglo de mallas que se establece en la guía de diseño para microaglomerados ISSA A143 (2010).

La calidad del pétreo se evaluó mediante las pruebas de: equivalente de arena, intemperismo acelerado (en sulfato de sodio), desgaste de Los Ángeles, azul de metileno y angularidad del agregado fino.

### **4.3. Análisis EPG de emulsiones asfálticas**

Para evaluar esta parte del estudio se utilizaron 2 tipos de emulsiones asfálticas, los cuales son CQS-1hL y CSS-1hP. El término CQS-1hL o en su caso CQS-1hP, es el nombre estándar en la industria para las emulsiones utilizadas en microaglomerados. La emulsión tipo CSS-1hP, debido a su modo de ruptura, no es propiamente una emulsión para microaglomerados, no obstante, por ser una emulsión bastante utilizada en el país para la construcción de slurry seal y microaglomerados se decidió evaluar su comportamiento en este estudio.

A cada emulsión se le asignó una clave de identificación (ID) para tener control sobre su información. Las emulsiones 070-T, 141-S, 137-S, 158-S y 159-S son del tipo CQS-1hL. La emulsión ESS-1hP es del tipo CSS-1hP.

Además, para facilitar la comprensión del lector, se asignó un color a cada emulsión para identificarla de forma directa en gráficas y tablas. Color azul para 070-T, amarillo para 141-S, verde para 137-S, morado para 158-S, negro para 159-S y rojo para ESS-1hP.

#### **4.3.1. Pruebas a la emulsión asfáltica original**

##### *4.3.1.1. Retenido en malla*

La prueba de retenido en malla se utiliza para medir la cantidad de partículas de asfalto presentes en la emulsión que son mayores a 0.85 mm. Las partículas con esta característica pueden causar problemas de estabilidad de la emulsión, así como derivar problemas durante el bombeo de emulsiones, por lo que, se consideran indeseables. La Figura 4.1 muestra el proceso de filtración de la emulsión a través de la malla N° 20.



*Figura 4.1: Filtración de la emulsión original a través de la malla N° 20.*

Esta prueba se conserva de las guías de diseño de microaglomerados ISSA A143 y ASTM D2397 en las especificaciones EPG para el análisis de emulsiones asfálticas originales.

### 4.3.1.2. Contenido de residuo asfáltico

Este método se conserva de ASTM D 2397 en las especificaciones EPG. La prueba de contenido de residuo asfáltico se realizó mediante AASHTO PP72 método B. Dicho método es utilizado porque conserva las propiedades del residuo asfáltico, es decir, no envejece el residuo durante la prueba. La Figura 4.2 ilustra el residuo asfáltico recuperado durante la prueba.

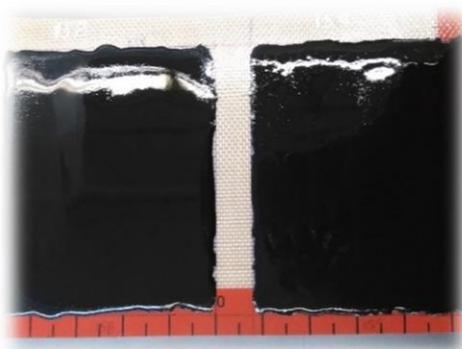


Figura 4.2: Recuperación del residuo asfáltico mediante AASHTO PP72 método B.

### 4.3.1.3. Estabilidad al almacenamiento

El método de prueba de estabilidad al almacenamiento (ASTM D6930 modificado) no ha sido aprobado por el NCHRP o ningún comité de AASHTO, ni ha sido aceptado formalmente para las especificaciones de AASHTO.

Para evaluar la estabilidad al almacenamiento de las emulsiones se utilizan 2 parámetros:  $R_s$  y  $R_d$ , que se definen como la relación de separación y la relación de estabilidad, respectivamente.

El procedimiento de prueba consiste en medir en un inicio la viscosidad rotacional (VR) de la emulsión, posteriormente se vierten cuidadosamente dos muestras representativas de 500 ml cada una en dos probetas de vidrio y se tapan las probetas para iniciar el acondicionamiento. Después se colocan las dos probetas en un horno de tiro forzado o en un lugar apropiado que conserve la temperatura de acondicionamiento especificada. La temperatura recomendada para emulsiones utilizadas en slurry seals y aplicaciones de microaglomerado es de 25°C. La Figura 4.3 muestra el acondicionamiento de las emulsiones utilizadas en este estudio. El

proceso se realiza por 24 horas para evaluar la estabilidad al almacenamiento a corto plazo.

Enseguida de una de las probetas, se retiran con cuidado aproximadamente  $50 \pm 5$  ml de emulsión asfáltica desde la parte superior con una pipeta o sifón sin perturbar el resto de la muestra, para evaluar la viscosidad superior de la muestra y utilizarla en el cálculo de  $R_s$ .

Después de retirar la parte superior, se sacan con cuidado los siguientes 390 ml (aproximadamente) de la probeta, teniendo cuidado de no perturbar la emulsión en el parte inferior del cilindro. Es necesario agitar bien la emulsión asfáltica que queda en la probeta y verterla en un recipiente de dimensiones adecuadas para medir la viscosidad de la parte inferior de la muestra y usarla en el cálculo de  $R_s$ .



Figura 4.3: Acondicionamiento de emulsiones

Para la segunda probeta, la emulsión asfáltica se remezcla con cuidado y a fondo, sacudiendo e invirtiendo suavemente la probeta o agitando la emulsión con una varilla de vidrio que pueda llegar al fondo de la probeta. Se registra cualquier evidencia anormal que presente la emulsión en la parte inferior de la probeta. Después de mezclar la emulsión, se coloca una muestra de aproximadamente 100 ml en un recipiente de dimensiones adecuadas para su análisis. La medición de viscosidad medida en esta etapa y la medida al inicio se utilizan para calcular  $R_d$ .

Con las mediciones realizadas de viscosidad rotacional se procede a calcular  $R_s$ , con la cual se evalúa la susceptibilidad de las emulsiones a presentar cambios físicos durante el almacenamiento (asentamiento o formación de cremas) y se calcula como la relación de las viscosidades ( $\eta$ ) medidas de las partes superior e inferior de una muestra. La Ecuación 4.1 se utiliza para calcular el valor de  $R_s$ .

$$\text{Relación de separación, } R_s = \frac{\eta_{\text{parte superior}}}{\eta_{\text{parte inferior}}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

El segundo parámetro por evaluar es  $R_d$ , el cual se utiliza para evaluar la capacidad que tienen las emulsiones para reincorporarse cuando son remezcladas y medir cambios reológicos de las mismas después de un periodo de tiempo de almacenamiento establecido de 24 horas. La viscosidad de la muestra se mide en la condición original (no acondicionada) y en la muestra remezclada después de 24 horas de almacenamiento. La Ecuación 4.2 se emplea para el cálculo de  $R_d$ .

$$\text{Relación de estabilidad, } R_d = \frac{\eta_{\text{muestra original}}}{\eta_{\text{muestra acondicionada}}} \quad \text{Ec. 4.2}$$

En las pruebas para determinar  $R_s$  y  $R_d$  es importante seleccionar una geometría de medición del aparato que desarrolle un torque de resistencia entre el 10% y el 98% de la capacidad del instrumento a la velocidad seleccionada. Generalmente, las mediciones serán más precisas en lecturas de torque más altas. Para este estudio se utilizó como geometría la aguja número 2 y un recipiente de 100 ml. La viscosidad se midió a 30 rpm con un viscosímetro rotacional tipo Brookfield como el que se muestra en la Figura 4.4. Para controlar la temperatura de prueba de 25°C se utilizó un baño María para sumergir la muestra, debido a que no fue posible utilizar la celda de temperatura del equipo porque no registraba lecturas apropiadas de torque cuando se usaban geometrías más pequeñas.



Figura 4.4: Equipo para medición de viscosidades.

#### 4.3.1.4. Manejabilidad

El método de prueba de manejabilidad (AASHTO TP48 modificado) no ha sido aprobado por el NCHRP o ningún comité de AASHTO, ni ha sido aceptado formalmente para las especificaciones de AASHTO.

Los resultados de viscosidad para evaluar la manejabilidad se obtienen directamente de las mediciones realizadas a las emulsiones originales no acondicionadas en la prueba  $R_d$ .

### 4.3.2. Pruebas al residuo asfáltico

#### 4.3.2.1. Non-recoverable creep compliance, $J_{nr}$

El  $J_{nr}$  se estableció en las EPG como el parámetro adecuado para evaluar la deformación permanente de residuos asfálticos a temperatura alta. La evaluación del  $J_{nr}$  para residuos asfálticos se realiza de forma similar a los asfaltos utilizados en HMA utilizando el método de prueba AASHTO T350.

Debido a que el asfalto base no sufre ninguna modificación, las pruebas se realizan a temperatura PG, sin embargo, los resultados son reportados a la temperatura EPG correspondiente.

Por ejemplo, para una región determinada con PG igual a 64°C. La prueba es ensayada a 64°C pero, el valor determinado corresponde a EPG de 61°C. Por lo tanto, un asfalto base PG 64 que es empleado en la producción de emulsiones que se usarán en microaglomerados, deberá utilizarse en un pavimento con EPG 61. Lo anterior es para la clasificación por clima de la emulsión asfáltica.

Para determinar la clasificación EPG por tránsito de la emulsión, es necesario conocer los valores de  $J_{nr}$ .

La Ecuación 4.3 es utilizada por el DSR para calcular el valor  $J_{nr}$ . Para cada 10 ciclos de esfuerzo aplicado de 3.2 kPa, se calcula la deformación no recuperable,  $J_{nr}(3.2, N)$ ,  $\text{kPa}^{-1}$ , como deformación/esfuerzo, para  $N = 1$  a 20

$$J_{nr}(3.2, N) = \frac{\epsilon_{10}}{3.2} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Con la Ecuación 4.4, se calcula el promedio de la deformación no recuperable a 3.2 kPa,  $J_{nr3.2}$ ,  $\text{kPa}^{-1}$ . Donde  $N$  corresponde a las últimas 10 mediciones.

$$J_{nr} = \frac{\text{SUMA}[J_{nr}(3.2, N)]}{10} \quad \text{Ec. 4.4}$$

#### 4.3.2.2. Módulo de corte dinámico en valores de ángulos de fase críticos de residuos asfálticos.

El presente método de prueba (AASHTO TP-XX) no ha sido aprobado por el NCHRP o ningún comité de AASHTO, ni ha sido aceptado formalmente para las especificaciones de AASHTO.

Este método de prueba cubre el procedimiento para determinar el módulo de corte dinámico de residuos asfálticos en valores de ángulos de fase críticos mediante la realización de pruebas de barrido de frecuencia en DSR a temperaturas intermedias. Se utiliza para evaluar la resistencia al agrietamiento térmico de los residuos de emulsiones utilizadas en microaglomerados.

Las muestras de ensayo con una altura de 2.0 mm se forman entre placas paralelas de 8 mm de diámetro. Durante la prueba, las muestras se someten a oscilación torsional en frecuencias y amplitudes de deformación rotacional preseleccionadas. El módulo de corte dinámico ( $|G^*|$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) se calculan automáticamente como parte de la operación del DSR utilizando un software informático propio suministrado por el fabricante del equipo.

Se pueden desarrollar curvas maestras de  $G^*$  y  $\delta$  a temperaturas seleccionadas al implementar la superposición tiempo-temperatura. Las curvas maestras se pueden usar para calcular los criterios relacionados con el desempeño a baja temperatura propuestos en AASHTO M 320.

#### **Procedimiento de prueba**

La muestra se acondiciona a la temperatura de prueba  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  y se espera 15 minutos para alcanzar el equilibrio térmico. Después de este tiempo se realiza una prueba de barrido de frecuencia logarítmica de 0.1 a 100 rad/s con 10 frecuencias de carga por cada frecuencia, manteniendo una amplitud de deformación del 1% a dos temperaturas diferentes:  $15^\circ\text{C}$  y  $5^\circ\text{C}$ , comenzando desde  $15^\circ\text{C}$  seguido de  $5^\circ\text{C}$ .

El sistema de adquisición de datos registra automáticamente los valores de  $|G^*|$  y  $\delta$  en cada frecuencia de carga.

Al finalizar la prueba de barrido de frecuencia-temperatura, se aumenta la temperatura a  $60^\circ\text{C}$  o más para que el residuo se suavice y se facilite la limpieza.

#### **Análisis de resultados**

Para analizar los resultados, se aplica la superposición tiempo-temperatura para desplazar los datos adquiridos de  $|G^*|$  y  $\delta$  a  $5^\circ\text{C}$  a una temperatura de referencia de  $15^\circ\text{C}$ . Para hacerlo, las frecuencias de carga reales ( $\omega$ ) a  $5^\circ\text{C}$  se convierten a frecuencia reducida ( $\omega_R$ ) utilizando un factor de cambio de tiempo-temperatura ( $a_T$ ) mediante la Ecuación 4.5, de modo que la relación entre  $|G^*|$  y  $\omega_R$ , y la relación entre  $\delta$  y  $\omega_R$  de  $15^\circ\text{C}$  y  $5^\circ\text{C}$  se alinean para formar una sola curva.

$$\omega_R = \omega * a_T$$

*Ec. 4.5*

Para determinar  $a_T$ , primero se identifica la parte de datos de  $|G^*|$  de 15°C y 5°C con valores de  $G^*$  superpuestos como se muestra gráficamente en la Figura 4.5 (ejemplo, de la emulsión 070-T). Estos datos serán utilizados para determinar el  $a_T$ .

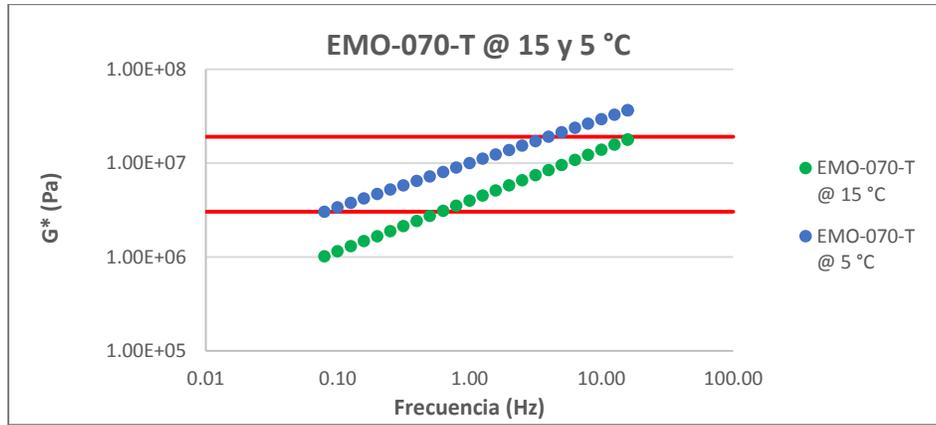


Figura 4.5: Identificación de datos para determinar el factor tiempo-temperatura,  $a_T$

Para cada punto de datos identificado,  $i$ , a 5°C, se calcula el factor de cambio de tiempo-temperatura ( $a_{T,i}$ ) requerido para alinear el valor  $G^*$  correspondiente ( $G^*_{5^\circ C, i}$ ) con el valor de  $G^*$  a 15°C, versus la frecuencia ( $\omega$ ). Para hacerlo, primero se determina el valor de  $\omega$  a 15°C ( $\omega_{i, 15^\circ C}$ ) con el valor  $G^*$  equivalente como  $G^*_{5^\circ C, i}$  mediante interpolación entre el punto de datos de 15°C y el valor  $G^*$  más cercano pero menor que  $G^*_{5^\circ C, i}$  ( $G^*_{i-, 15^\circ C}$ ) y el punto de datos de 15°C con el valor  $G^*$  más cercano pero mayor que  $G^*_{5^\circ C, i}$  ( $G^*_{i+, 15^\circ C}$ ) utilizando la Ecuación 4.6 (ilustrada esquemáticamente en la Figura 4.6).

$$\log(\omega_{i,15^\circ C}) = \frac{(\log(G^*_{i,5^\circ C}) - \log(G^*_{i-,15^\circ C}))(\log(\omega_{i+,15^\circ C}) - \log(\omega_{i-,15^\circ C}))}{\log(G^*_{i+,15^\circ C}) - \log(G^*_{i-,15^\circ C})} + \log(\omega_{i-,15^\circ C})$$

Ec. 4.6

Una vez que se calcula cada  $\omega_{i, 15^\circ C}$ , se calculan los valores correspondientes de  $a_{T,i}$  utilizando la Ecuación 4.7.

$$\log(a_{T,i}) = \log(\omega_{i,15^\circ C}) - \log(\omega_{i,5^\circ C})$$

Ec. 4.7

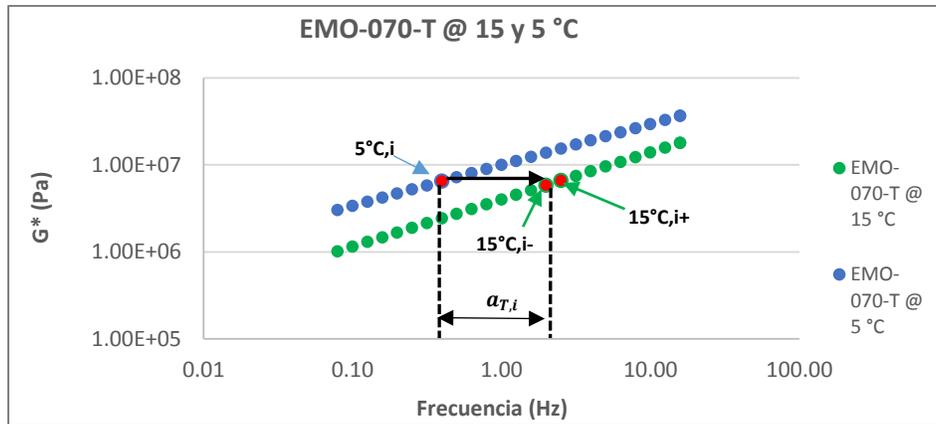


Figura 4.6: Representación de la determinación de  $a_T$ .

Posteriormente, se cambian los valores de 5°C a 15°C con la Ecuación 4.5 convirtiendo la frecuencia a una frecuencia reducida utilizando el  $a_T$  calculado. (Tenga en cuenta que el factor de cambio de tiempo-temperatura para 15°C es 1.)

Con las frecuencias reducidas calculadas, se construye la curva maestra mediante el modelo de Christensen-Anderson Marasteanu (CAM, 1999), usando las Ecuaciones 4.8 y 4.9.

$$G^* = G_g \left[ 1 + \left( \frac{\omega_c}{\omega_R} \right)^v \right]^{-\frac{w}{v}} \quad \text{Ec. 4.8}$$

$$\delta(\omega_R) = \frac{90 * w}{1 + \left( \frac{\omega_R}{\omega_c} \right)^v} \quad \text{Ec. 4.9}$$

donde:

- $G^*$  = módulo de corte dinámico
- $G_g$  = módulo de corte dinámico vítreo, igual a  $10^9$  Pa
- $\omega_R$  = frecuencia reducida
- $\omega_c$  = frecuencia de cruce, igual a la frecuencia reducida correspondiente a un valor de ángulo de fase de  $45^\circ$
- $v, w$  = parámetros de forma

Para determinar  $\omega_c$ , una línea se ajusta a  $\log(\omega_R)$  versus  $\log(\tan(\delta))$  utilizando el formulario que se proporciona en la Ecuación 4.10.

$$\log(\omega_R) = a + b * \log(\tan(\delta)) \quad \text{Ec. 4.10}$$

En la Ecuación 4.10 **a** y **b** son los mejores parámetros de ajuste. La frecuencia de cruce se calcula utilizando la Ecuación 4.11.

$$\omega_c = 10^a \quad \text{Ec. 4.11}$$

Para determinar **v**, una línea se ajusta a  $\log(\log(G_g/G^*))$  versus  $\log(\tan(\delta))$  usando el formulario dado en la Ecuación 4.12.

$$\log\left(\log\left(\frac{G_g}{G^*}\right)\right) = c + d * \log(\tan(\delta)) \quad \text{Ec. 4.12}$$

donde **c** y **d** son los mejores parámetros de ajuste. El parámetro **v** se calcula utilizando la Ecuación 4.13.

$$v = \frac{\log(2)}{10^c} \quad \text{Ec. 4.13}$$

Para el cálculo de **w**, una línea se ajusta a  $\log(G^*)$  versus  $\log(G_g(1+(\omega_c/\omega_R)^v)^{1/v})$ , utilizando el formulario que se proporciona en la Ecuación 4.14. El parámetro **w** es la pendiente de la recta.

$$\log(G^*) = e + w * \log\left[G_g \left(1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega_R}\right)^v\right)^{\frac{1}{v}}\right] \quad \text{Ec. 4.14}$$

donde **e** y **w** son los mejores parámetros de ajuste.

Puede calcularse el valor de  $G^*$  en cualquier valor de  $\delta_c$  de interés dentro del rango de datos medidos, calculando primero la  $\omega_R$  correspondiente a  $\delta_c$ , utilizando la Ecuación 4.9. Luego, el  $G^*$  correspondiente se determina sustituyendo el valor calculado de  $\omega_R$  en la Ecuación 4.8.

#### **4.4. Fibra de vidrio**

Para evaluar el efecto de la fibra de vidrio en microaglomerados, se consideraron las siguientes propiedades:

- La longitud de la fibra varió de 1.5 a 3.0 cm
- La dosificación fue del 3% respecto al peso seco del agregado pétreo

#### **4.5. Diseño de la mezcla de microaglomerado**

Esta sección describe la metodología utilizada para diseñar la mezcla de microaglomerado. Para cada una de las 4 emulsiones que funcionaron en la prueba de tiempo de mezclado, primero se encontró la fórmula de trabajo del microaglomerado sin fibra. Posteriormente se adicionó fibra a estos mismos diseños para evaluar su efecto. Se utilizaron pruebas para identificar las proporciones adecuadas de los componentes en la mezcla y pruebas de desempeño para evaluar el comportamiento del microaglomerado.

Las pruebas de tiempo de mezclado y cohesión se utilizan para seleccionar la emulsión que se usará en el diseño de microaglomerado, es necesario que la mezcla cumpla ambas pruebas para poder continuar con la evaluación de las pruebas de desempeño. Además a través de estas pruebas se puede determinar preliminarmente el contenido óptimo de emulsión para cada diseño.

Para verificar que el contenido de emulsión determinado en la prueba de tiempo de mezclado es el óptimo, se utilizan las pruebas de pérdida por abrasión a 1 hora y rueda cargada.

Una vez que se seleccionó el contenido óptimo de emulsión, este se utilizó para la fabricación y evaluación de especímenes en las pruebas de: pérdida por abrasión a 6 días, desplazamiento lateral después de 1000 ciclos y tensión a flexión.

##### **4.5.1. Prueba de tiempo de mezclado**

Mediante esta prueba se identificaron las proporciones adecuadas de los componentes del microaglomerado. Se realizaron distintas combinaciones de los componentes (filler de aportación, agua, fibra, emulsión asfáltica), sus porcentajes variaron con respecto al peso seco del agregado pétreo. Para cada mezcla se evaluó visual y manualmente, la manejabilidad y la consistencia, así como el cubrimiento de las partículas de pétreo. Mediante esta prueba se seleccionaron

preliminarmente los contenidos óptimos de emulsión. La Figura 4.7 muestra la mezcla de componentes del microaglomerado después de la rotura de la emulsión.



*Figura 4.7: Mezclado de los componentes de la mezcla.*

### 4.5.2. Prueba de cohesión

Después de establecer la fórmula de trabajo de las mezclas con y sin fibra para cada emulsión usada, se procedió a medir la cohesión desarrollada de las mezclas de diseño, utilizando el método de modo de ruptura. Aunque el tiempo máximo establecido para medir la cohesión en microaglomerados es de 1 hora, se decidió hacer la evaluación hasta las 2 horas en intervalos de 30 minutos para verificar que la cohesión medida a 1 hora no sea aparente. En la Figura 4.8 se puede apreciar que la mezcla ensayada corresponde a un modo de ruptura N.



*Figura 4.8: Ensayo de cohesión basado en el modo de ruptura.*

### 4.5.3. Prueba de pérdida por abrasión en húmedo (WTAT)

Con esta prueba se determina el contenido mínimo de emulsión requerido en el microaglomerado. Para verificar que el contenido de emulsión determinado mediante la prueba de tiempo de mezclado es el óptimo, se fabricaron y probaron

especímenes con y sin fibra de vidrio, con ese contenido y  $\pm 2\%$  de emulsión con respecto al peso seco del agregado. Las pruebas se realizaron de acuerdo al procedimiento de prueba para 1 hora. La Figura 4.9 muestra un espécimen en la prueba de pérdida por abrasión en húmedo para 1 hora de remojo a 25°C.



*Figura 4.9: Ensayo para determinar la pérdida por abrasión en húmedo.*

Una vez que se determinó el contenido óptimo de emulsión para cada diseño, se procedió a fabricar y probar especímenes a 6 días únicamente con el contenido óptimo de emulsión.

#### **4.5.4. Prueba de rueda cargada (LWT)**

A continuación se realizó la prueba de rueda cargada (LWT) para determinar el contenido máximo de emulsión en la mezcla. Esta prueba es importante porque permite identificar la presencia de exceso de asfalto en la mezcla. El exceso de asfalto puede derivar en riesgos de exudación o deformación permanente de los microaglomerados. Al igual que en la prueba de pérdida por abrasión en húmedo, se probaron especímenes con y sin fibra de vidrio, con el contenido de emulsión determinado en la prueba de tiempo de mezclado y  $\pm 2\%$  de emulsión para determinar el contenido óptimo de emulsión. La Figura 4.10 muestra la prueba LWT durante los 100 ciclos para la adhesión de arena, después de los 1000 ciclos de compactación. |



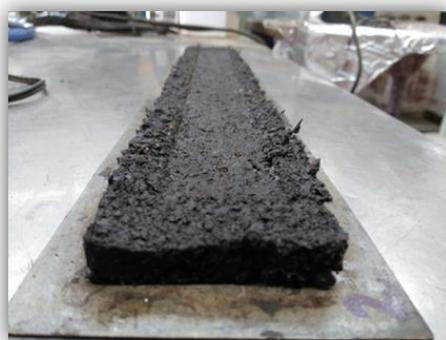
*Figura 4.10: Ensayo de rueda cargada para determinar la cantidad de arena adherida.*

### 4.5.5. Prueba de desplazamiento lateral

Esta prueba sirve para medir la susceptibilidad de microaglomerados a la deformación por la acción del tráfico pesado. Para evaluar esta parte del estudio, se fabricaron y ensayaron especímenes con y sin fibra de vidrio, con contenido óptimo de emulsión.

Se determinó el promedio de desplazamiento lateral de 4 muestras ensayadas para cada diseño de microaglomerado.

Las mediciones pertinentes a esta prueba se realizaron sobre muestras ensayadas en LWT después de 1,000 ciclos y posteriormente estas muestras sirvieron para evaluar la resistencia de los microaglomerados al agrietamiento mediante la prueba de tensión a flexión. La Figura 4.11 muestra un espécimen después de ser sometido a 1000 ciclos en LWT.



*Figura 4.11: Especimen después de 1000 ciclos en LWT para determinar el porcentaje de desplazamiento lateral.*

### 4.5.6. Prueba a tensión-flexión para microaglomerados

Para evaluar la resistencia al agrietamiento reflexivo de microaglomerados, se fabricaron especímenes con y sin fibra de vidrio, con contenido óptimo de emulsión. De las 4 muestras que se fabricaron en la prueba anterior, 2 se ensayaron a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) y 2 a temperatura baja (4°C), para cada diseño.

El efecto de la fibra se evaluó mediante una comparación entre los especímenes con y sin fibra para cada emulsión, utilizando las mismas condiciones de temperatura. La Figura 4.12 a) muestra la manera en que llevaron a cabo las pruebas a temperatura ambiente y la Figura 4.12 b) muestra el ensayo de especímenes a 4°C.



*Figura 4.12: Ensayo de especímenes, a) temperatura ambiente y b) 4°C, para determinar la resistencia ante el agrietamiento de las mezcla de microaglomerado.*

# CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

## 5.1. Agregado pétreo

### 5.1.1. Distribución granulométrica

La Tabla 5.1 presenta el porcentaje de agregados que pasa a través de cada tamiz. De acuerdo con las especificaciones de la ISSA, el agregado pétreo tiene gradación tipo III que es adecuada para áreas con mucho tráfico. La Figura 5.1 muestra la curva de distribución granulométrica.

Tabla 5.1: Distribución granulométrica del agregado pétreo.

Granulometría del material por lavado						
Masa inicial de la muestra, g		1348.1				
Masa final de la muestra, g		1273.8				
Pérdida de masa, g		74.3				
Pérdida de masa (%)=						0.02
Tamaño abertura de malla		Peso retenido (g)	Peso retenido ajustado (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
(mm)	(plg)					
9.50	3/8"	0.0	0.0	0.0	0.0	100
4.75	No. 4	146.8	146.8	10.9	10.9	89
2.36	No. 8	350.1	350.1	26.0	36.9	63
1.18	No. 16	296.6	296.6	22.0	58.9	41
0.60	No. 30	192.7	192.7	14.3	73.2	27
0.30	No. 50	141.3	141.3	10.5	83.6	16
0.15	No. 100	88.0	88.0	6.5	90.2	10
0.075	No. 200	51.0	51.0	3.8	94.0	6
	Pasa No. 200	7.1	81.4	6.0	100.0	0
	Total:	1273.6	1348.1	100.0		

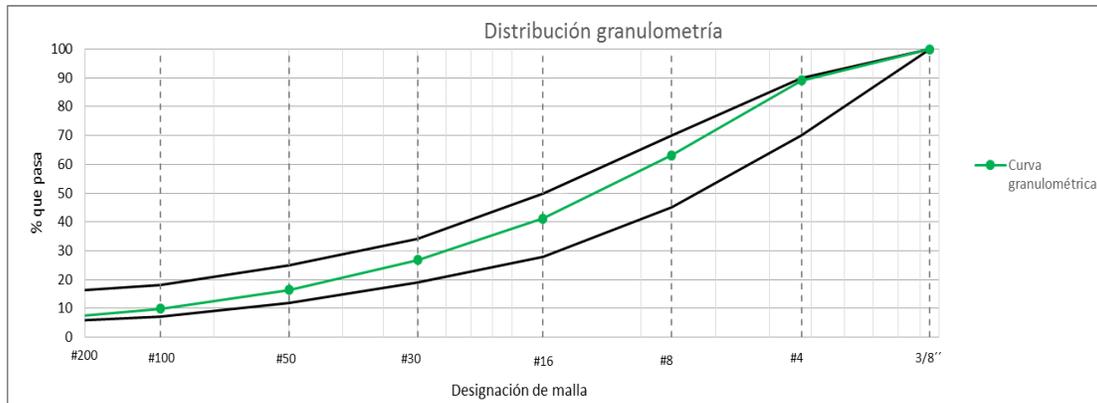


Figura 5.1: Curva de distribución granulométrica del agregado pétreo.

### 5.1.2. Calidad del agregado pétreo

La Tabla 5.2 recoge los resultados de las pruebas de calidad realizadas al material pétreo, así como los métodos de prueba utilizados. Para el conjunto de pruebas realizadas los valores medidos cumplen con las especificaciones, por lo que, el material pétreo utilizado tiene la calidad requerida para microaglomerados.

Tabla 5.2: Pruebas de calidad realizadas al material pétreo.

Prueba	Método utilizado	Valor especificado	Valor medido
Granulometría por lavado	ASTM C117	Tipo II o III	III
Equivalente de arena (%), mín	ASTM D2419	65	71.0
Intemperismo acelerado, sulfato de sodio (%), máx	ASTM C88	15	7.7
Desgaste de Los Ángeles (%), máx	ASTM C131	30	23.0
Azul de metileno (mg/g), máx	TB-145	15	12.0
Angularidad del agregado fino (%), mín	ASTM C1252	40	48.8

## 5.2. Emulsión asfáltica original

### 5.2.1. Retenido en malla

Las emulsiones analizadas cumplen con la especificación establecida en la prueba de porcentaje de retenido en malla N° 20. La emulsión ESS-1hP presentó el contenido más alto de partículas con tamaño mayor que la abertura de dicha malla, sin embargo, al igual que para el total de emulsiones, fue necesario continuar con su análisis EPG para conocer su desempeño. La Tabla 5.3 recoge los resultados determinados para las emulsiones analizadas. Los resultados indican que ninguna emulsión presentó exceso de retenido en malla N° 20.

Tabla 5.3: Resultado de la prueba de retenido en malla.

Tipo emulsión	ID emulsión	Método utilizado	Especificación	Retenido en malla N° 20 (%)
CQS-1hL	070-T	AASHTO T59	0.1%, máx.	0.03
CQS-1hL	141-S			0.02
CQS-1hL	137-S			0.04
CQS-1hL	158-S			0.03
CQS-1hL	159-S			0.06
CSS-1hP	ESS-1hP			0.06

### 5.2.2. Contenido de residuo asfáltico

Durante la producción no fue posible obtener un contenido igual de residuo asfáltico para todas las emulsiones. Sin embargo, el contenido óptimo de residuo asfáltico se selecciona con base en las pruebas de tiempo de mezclado, cohesión y pruebas de desempeño, por lo que, esta ligera variación en el contenido de residuo no afecta en el diseño de la mezcla, más bien el contenido óptimo de emulsión o de residuo asfáltico debe seleccionarse de acuerdo al desempeño del microaglomerado. En otras palabras, el desempeño de una emulsión cambia con respecto a otra en el microaglomerado, por lo tanto, el contenido óptimo de residuo asfáltico puede variar al cambiar de emulsión en el diseño de la mezcla. La Tabla 5.4 muestra los resultados determinados en el estudio.

Tabla 5.4: Resultados de la prueba de contenido de residuo asfáltico.

Tipo emulsión	ID emulsión	Método utilizado	Especificación	Residuo asfáltico (%)
CQS-1hL	070-T	AASHTO PP72 Método B	57%, mín	62.4
CQS-1hL	141-S			62.4
CQS-1hL	137-S			62.8
CQS-1hL	158-S			62.4
CQS-1hL	159-S			62.4
CSS-1hP	ESS-1hP			60.2

### 5.2.3. Estabilidad al almacenamiento

La Tabla 5.5 presenta los resultados de Rs en la prueba de estabilidad al almacenamiento para emulsiones asfálticas. Los resultados fueron determinados según la Ecuación 4.1.

Tabla 5.5: Resultados de la prueba de relación de separación.

Emulsión	Propiedad	Método utilizado	VR, superior (cP)	VR, inferior (cP)	Valor especificado	Rs
070-T	Estabilidad al almacenamiento 24 h, 25°C	ASTM D6930 modificado	125.3	290.7	0.2 a 1.5	0.43
141-S			150.7	246.7		0.61
137-S			136.0	249.3		0.55
158-S			174.7	289.3		0.60
159-S			285.3	377.0		0.76
ESS-1hP			73.3	76.0		0.96

La Figura 5.2 presenta gráficamente los resultados obtenidos de Rs en la prueba de estabilidad al almacenamiento de las emulsiones asfálticas analizadas.

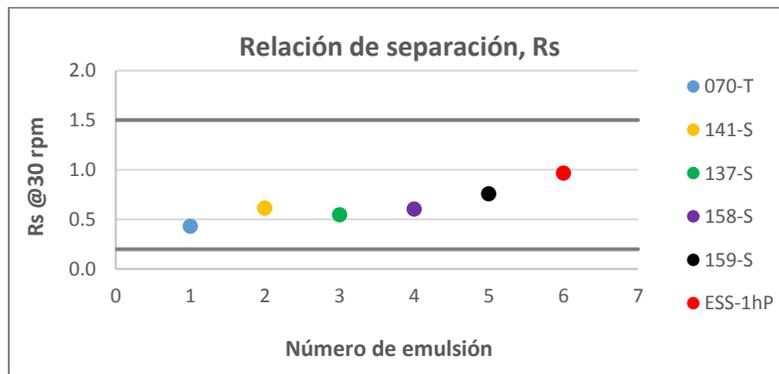


Figura 5.2: Resultados de Rs en la prueba de estabilidad al almacenamiento.

La emulsión asfáltica con Rs mayor que la unidad se considera susceptible a la formación de cremas, mientras que la emulsión asfáltica con Rs menor que la unidad tiene susceptibilidad a la sedimentación. Una relación de separación cercana a la unidad se considera estable frente a la separación física.

La Tabla 5.6 presenta los resultados de Rd en la prueba de estabilidad al almacenamiento.

Tabla 5.6: Resultados de la prueba de relación de estabilidad.

Emulsión	Propiedad	Método utilizado	VR, original (cP)	VR, acondicionada (cP)	Valor especificado	Rd
070-T	Estabilidad al almacenamiento 24 h, 25°C	ASTM D6930 modificado	272.0	270.7	1.5 máx	1.00
141-S			233.0	228.0		1.02
137-S			235.0	235.0		1.00
158-S			240.0	241.3		0.99
159-S			349.3	345.3		1.01
ESS-1hP			65.3	66.7		0.98

La Figura 5.3 presenta gráficamente los resultados obtenidos de  $R_d$  en la prueba de estabilidad al almacenamiento de las emulsiones asfálticas analizadas.

Las emulsiones asfálticas con  $R_d$  mayor o menor que la unidad se consideran susceptibles a la inestabilidad reológica y, por tanto, propensas a cambios en las propiedades reológicas durante el almacenamiento.

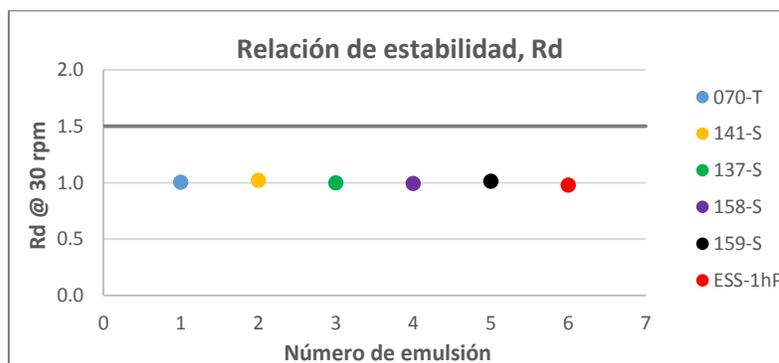


Figura 5.3: Resultados de  $R_d$  en la prueba de estabilidad al almacenamiento.

Los resultados determinados muestran que las emulsiones del tipo CQS-1hL son propensas a presentar asentamientos, mientras que la emulsión con mayor resistencia a cambios físicos es la ESS-1hP, sin embargo todas las emulsiones se encuentran dentro de los límites especificados.

Por otra parte, el total de las emulsiones se reincorporan fácilmente durante el remezclado, es decir, no presentan cambios reológicos durante el tiempo de almacenamiento de 24 horas.

Por lo tanto, para el tiempo de almacenamiento establecido las emulsiones presentan asentamientos debido a los gradientes de densidad del agua y el asfalto y no por aspectos de floculación, coalescencia, ni mucho menos rompimiento de la emulsión, lo cual se pudo verificar por medio de la prueba  $R_d$  porque las emulsiones se reincorporan fácilmente al ser remezcladas.

#### 5.2.4. Manejabilidad

Se requiere que las emulsiones presenten trabajabilidad y estabilidad para su transporte, bombeo y construcción del microaglomerado. Durante la producción de la mezcla de microaglomerado la manejabilidad también se ve afectada por factores químicos existentes entre los componentes del microaglomerado. Sin embargo, en este contexto, la manejabilidad tiene que ver con la facilidad con la que la emulsión

asfáltica puede ser mezclada con los otros componentes antes de su rompimiento. La Tabla 5.7 compila los resultados medidos de VR en las emulsiones utilizadas en este trabajo.

Tabla 5.7: Viscosidades determinadas en la prueba de manejabilidad para emulsiones asfálticas originales.

Emulsión	Propiedad	Método utilizado	Valor especificado	Viscosidad
070-T	Manejabilidad, 25°C	AASHTO TP48 modificado	600 cP máx	272.0
141-S				233.0
137-S				235.0
158-S				240.0
159-S				349.3
ESS-1hP				65.3

Los resultados determinados en esta prueba se muestran gráficamente en la Figura 5.4, todas las emulsiones cumplen con la especificación debido a que presentan valores de VR por debajo de los 600 cP.

Para las emulsiones del tipo CQS-1hL las viscosidades rotacionales son muy similares. Mientras que para la emulsión del tipo CSS-1hP la VR es bastante baja. Este cambio tan abrupto se puede atribuir a que el contenido de residuo asfáltico de la emulsión ESS-1hP es menor que el de las demás emulsiones. No obstante, partiendo de que todas las emulsiones se produjeron a partir del mismo asfalto, la emulsión 137-S debería tener el valor más alto de VR por tener mayor contenido de residuo asfáltico pero, este principio no se cumple. Por lo tanto, la manejabilidad de una emulsión se ve afectada no sólo por el residuo asfáltico, también influyen otros componente de la emulsión como el tipo de emulsificante y los contenidos de este último.

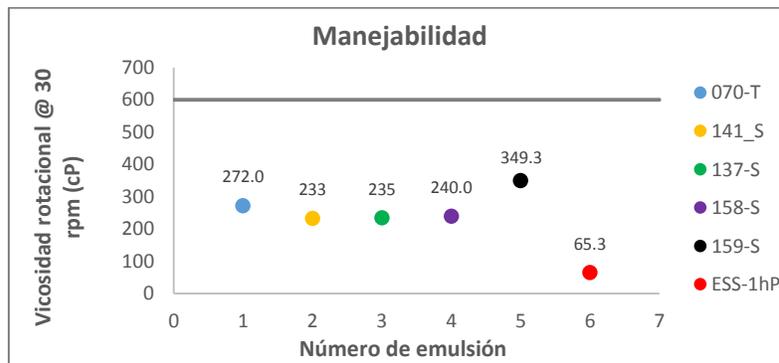


Figura 5.4: Valores de viscosidad en la prueba de manejabilidad.

Por ejemplo las emulsiones 070-T, 141-S, 158-S y 159-S tienen contenidos iguales de residuo asfáltico y sus VR son distintas.

### 5.3. Residuo asfáltico

#### 5.3.1. Clasificación EPG a temperatura alta

El envejecimiento que se presenta en el asfalto durante la producción de la emulsión es casi nulo, mientras que en la construcción del microaglomerado no se presenta, entonces, la evaluación del Jnr se realiza en un residuo no envejecido. La Tabla 5.8 presenta los resultados de Jnr en la prueba MSCR para cada una de las emulsiones del estudio. Entre menor sea el valor de Jnr el residuo asfáltico tendrá mayor resistencia a la deformación permanente. Los recuadros en color verde indican que la emulsión asfáltica puede ser utilizada en caminos con tráfico medio (M) y alto (H) en la temperatura EPG señalada. El color amarillo se refiere a que la emulsión asfáltica sólo puede ser usada en pavimentos con tráfico bajo (L). El color rojo es indicativo de que la emulsión falla la especificación en la temperatura EPG correspondiente indicada.

Se esperaba que por lo menos todas las emulsiones cumplieran la especificación para tráfico medio y alto en la EPG del asfalto base, es decir, para 61°C (o PG 64). Sin embargo las emulsiones 070-T y ESS-1hP presentaron pobre valor de Jnr en esta temperatura. Las emulsiones 137-S y 159-S tienen el mejor desempeño ante la formación de roderas ya que presentan los valores menores de Jnr en EPG de 61°C y, se pueden utilizar también en condiciones de tráfico bajo a temperatura EPG de 73°C.

Tabla 5.8: Resultados del valor Jnr, para EPG a temperatura alta.

ID emulsión	Temperatura alta EPG				
	Jnr @ 3.2 kPa				
	55°C	61°C	67°C	73°C	79°C
070-T	0.46 kPa <sup>-1</sup> (M/H)	1.52 kPa <sup>-1</sup> (L)	3.35 kPa <sup>-1</sup> (L)	8.69 kPa <sup>-1</sup> (F)	-
141-S	-	1.32 kPa <sup>-1</sup> (M/H)	2.46 kPa <sup>-1</sup> (L)	5.90 kPa <sup>-1</sup> (F)	-
137-S	-	1.00 kPa <sup>-1</sup> (M/H)	2.04 kPa <sup>-1</sup> (L)	4.50 kPa <sup>-1</sup> (L)	14.01 kPa <sup>-1</sup> (F)
158-S	-	1.02 kPa <sup>-1</sup> (M/H)	2.45 kPa <sup>-1</sup> (L)	5.90 kPa <sup>-1</sup> (F)	-
159-S	-	0.78 kPa <sup>-1</sup> (M/H)	2.05 kPa <sup>-1</sup> (L)	4.60 kPa <sup>-1</sup> (L)	9.16 kPa <sup>-1</sup> (F)
ESS1hP	1.42 kPa <sup>-1</sup> (M/H)	4.04 kPa <sup>-1</sup> (L)	8.79kPa <sup>-1</sup> (F)	-	-

Para las emulsiones del tipo CQS-1hL las únicas variables en la composición de las emulsiones son el tipo de emulsificante y el contenido del mismo. Por lo tanto,

podemos concluir que estas dos variables afectan el comportamiento del residuo asfáltico porque siguen presentes en él después de la rotura de la emulsión.

### 5.3.2. Clasificación EPG a temperatura baja

El valor de  $G^*$  en  $\delta_c$  se usa para clasificar las emulsiones asfálticas a temperatura baja EPG. La Figura 5.5 muestra gráficamente los resultados de  $G^*$  versus  $\delta$  en las temperaturas de 5 y 15°C, en el rango de frecuencias de 0.1 a 100 rad/s, para las 6 emulsiones analizadas.

La emulsión ESS-1hP muestra un comportamiento bastante distinto a las otras emulsiones. Para 15°C (Figura 5.5 a) dicha emulsión presenta valores de  $G^*$  muy similares que las demás emulsiones, sin embargo, los valores de  $\delta$  son muy grandes, lo que indica un comportamiento dúctil del residuo asfáltico. Para 5°C (Figura 5.5 b) se observan cambios abruptos en los valores:  $G^*$  (crece) y  $\delta$  (decrece), lo que se traduce como un cambio rápido en la rigidez del residuo al disminuir la temperatura de 15 a 5°C. Debido a lo anterior no existe superposición entre datos y por lo tanto, no es posible calcular los  $a_T$  para construir la curva maestra y realizar la clasificación EPG por temperatura baja para esta emulsión.

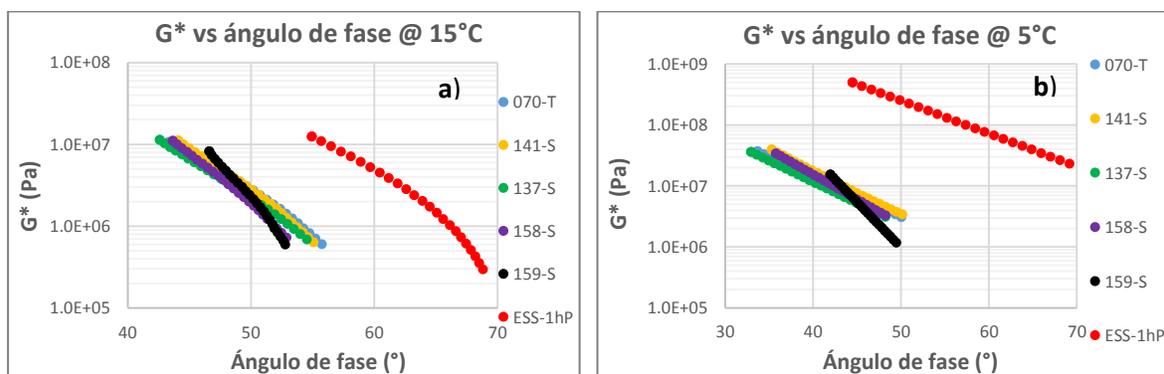


Figura 5.5: a)  $G^*$  versus ángulo de fase a 15°C y b)  $G^*$  vs ángulo de fase a 5°C

Para las emulsiones del tipo CQS-1hL, se construyeron las curvas maestras. La Figura 5.6 muestra la alineación de los valores de  $G^*$  y  $\delta$  en las frecuencias reducidas. Las Figuras 5.6 a) y 5.6 b) muestran las curvas maestra de  $G^*$  versus  $\omega_R$  y  $\delta$  versus  $\omega_R$ , respectivamente, de las emulsiones 070-T, 141-S, 137-S, 158-S y 159-S.

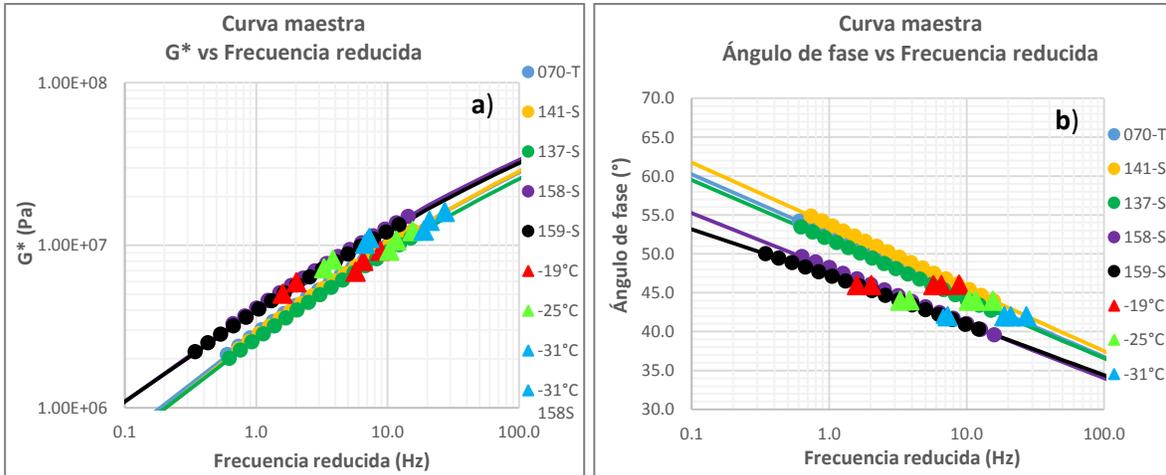


Figura 5.6: a)  $G^*$  versus  $wR$  y  $\delta$  versus  $wR$ , para las emulsiones tipo CQS-1hL.

Las emulsiones se evaluaron para las temperaturas EPG de  $-19^\circ\text{C}$ ,  $-25^\circ\text{C}$  y  $-31^\circ\text{C}$ , por lo tanto, los valores de  $\delta_c$  que corresponden a esas temperaturas son  $46^\circ$ ,  $44^\circ$  y  $42^\circ$ , respectivamente. Como se puede ver en las Figuras 5.6 a) y 5.6 b), los valores de  $\delta_c$  se encuentran dentro de los datos medidos de  $G^*$  y  $\delta$ .

Posteriormente, como se muestra gráficamente en la Figura 5.7, los valores de  $G^*$  y  $\delta$  en las frecuencias reducidas, se alinean en una sola curva para calcular los valores de  $G^*$  que corresponden a los valores de  $\delta_c$  de interés.

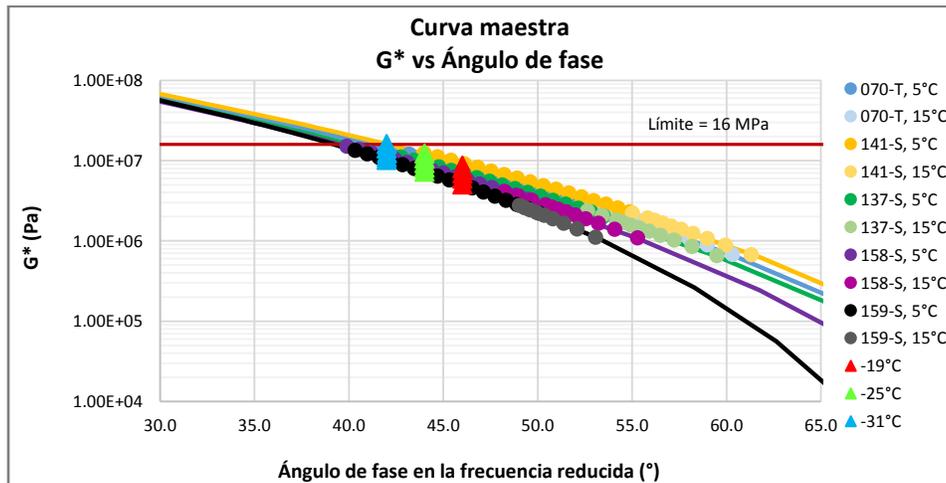


Figura 5.7: Curvas maestras de residuos asfálticos de microaglomerados para determinar EPG a temperatura baja ( $G^*$  en  $\delta_c$ ).

La Tabla 5.9 muestra los resultados determinados para la clasificación EPG a temperatura baja del conjunto de emulsiones asfálticas analizadas.

Tabla 5.9: Clasificación EPG de emulsiones a temperatura baja.

ID emulsión	Temperatura baja EPG		
	G* (MPa)		
	-19°C	-25°C	-31°C
070-T	8.0	10.7	14.2
141-S	9.3	12.3	16.1
137-S	6.9	9.3	12.4
158-S	5.9	8.2	11.1
159-S	5.0	7.3	10.2
ESS-1hP	-	-	-

Las emulsiones 070-T, 137-S, 158-S y 159-S tienen una EPG por clima de -31°C. La emulsión 141-S tiene una EPG de -25°C. Para la emulsión ESS-1hP, no fue posible determinar la clasificación EPG de temperatura baja.

Además la emulsión 159-S presenta el valor más bajo de rigidez, por lo tanto, es menos susceptible a presentar agrietamiento térmico.

## 5.4. Evaluación de emulsiones y fibra en microaglomerados

### 5.4.1. Selección de emulsiones

Después del análisis EPG, las emulsiones se seleccionaron mediante las pruebas de tiempo de mezclado y cohesión, antes de pasar a las pruebas de desempeño de la mezcla. Mediante las dos pruebas mencionadas anteriormente, se logró determinar los contenidos de emulsión que hasta ese momento se podían considerar como óptimos, no obstante, estos resultados determinados de contenidos de emulsión debían verificarse mediante las prueba de pérdida por abrasión a 1 hora y la prueba de rueda cargada.

Las emulsiones 0-70 T, 137-S, 159-S y ESS-1hP cumplieron con las especificaciones en las pruebas de tiempo de mezclado y cohesión. Por lo tanto se obtuvieron 4 diseños sin fibra y 4 con fibra. Las pruebas se realizaron a temperaturas de laboratorio, se procuró que la temperatura fuera muy similar en todos los ensayos.

No fue posible evaluar el desempeño de las emulsiones 141-S y 158-S porque no funcionaron en la prueba de tiempo de mezclado, no se encontró una combinación de los componentes de la mezcla que cumpliera con la especificación de más de 120 segundos de mezclado antes de la rotura de la emulsión.

5.4.1.1. *Tiempo de mezclado*

Los materiales que se utilizaron en las mezclas son: cemento portland (C.P.) como filler de aportación, agua fibra de vidrio y emulsión. Sus proporciones variaron en función del peso del material pétreo seco. La Tabla 5.10 muestra las combinaciones óptimas de materiales para establecer la fórmula de trabajo en cada diseño de microaglomerado. Mediante la prueba de tiempo de mezclado es posible optimizar el contenido de emulsión para el buen desempeño de la mezcla.

Tabla 5.10: Resultados de tiempo de mezclado en microaglomerados

ID emulsión	Temp. de mezclado (°C)	Tipo filler	Filler (%)	Agua (%)	Fibra	Fibra (%)	Emulsión (%)	Tiempo de mezclado (s)
070-T	24.0	C.P	1.0	8	No	-	12	165
	24.0	C.P	1.0	10	Sí	0.3%	12	165
137-S	23.0	-	-	9	No	-	13	140
	23.3	-	-	11	Sí	0.3%	13	145
159-S	23.5	C.P.	1.0	13	No	-	12	125
	23.7	C.P.	1.0	15	Sí	0.3%	12	125
ESS-1hP	23.4	C.P.	1.0	12	No	-	13	550
	23.0	C.P.	1.0	14	Sí	0.3%	13	240

Se observó un decremento en el tiempo de mezclado para las mezclas de microaglomerado con fibra, por lo que, fue necesario agregar 2% de agua adicional para igualar o superar el tiempo mínimo de manejabilidad establecido de 120 segundos.

Los únicos diseños de mezcla que no requirieron de cemento portland fueron los producidos con emulsión 137-S, tanto con fibra como sin fibra.

Los contenidos de emulsión que se presentan en la Tabla 5.10 fueron seleccionados preliminarmente como óptimos para los diseños de microaglomerados. Estos contenidos son 12% para 070-T, 13% para 137-S, 12% para 159-S y 13% para ESS-1hP. Sin embargo, fue necesario realizar la evaluación de pruebas sucesivas para confirmar lo anterior.

5.4.1.2. *Cohesión*

Los resultados de cohesión medidos de las mezcla con y sin fibra para cada emulsión de muestran en las Tablas 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14. Las pruebas se realizaron a temperaturas de laboratorio.

Tabla 5.11: Resultados en la prueba de cohesión, emulsión 070-T.

Emulsión 070-T						
Fibra	Parámetro	Tiempo (minutos)				Cumple
		30	60	90	120	
No	Modo de ruptura	NS	S	SS	SS	✓
	Temperatura de ensayo (°C)	22.6	23.9	24.4	25.4	
Si	Modo de ruptura	NS	SS	SS	SS	✓
	Temperatura de ensayo (°C)	23.8	24.2	25.3	25.5	

Tabla 5.12: Resultados en la prueba de cohesión, emulsión 137-S.

Emulsión 137-S						
Fibra	Parámetro	Tiempo (minutos)				Cumple
		30	60	90	120	
No	Modo de ruptura	N	NS	S	SS	✓
	Temperatura de ensayo (°C)	26.3	25.7	23.8	23.0	
Si	Modo de ruptura	NS	S	SS	SS	✓
	Temperatura de ensayo (°C)	25.0	26.0	25.0	25.0	

Tabla 5.13: Resultados en la prueba de cohesión, emulsión 159-S.

Emulsión 159-S						
Fibra	Parámetro	Tiempo (minutos)				Cumple
		30	60	90	120	
No	Modo de ruptura	N	N	NS	S	X
	Temperatura de ensayo (°C)	24	25.5	26	24	
Si	Modo de ruptura	N	S	SS	SS	✓
	Temperatura de ensayo (°C)	26.0	25.0	25.0	25.5	

Tabla 5.14: Resultados en la prueba de cohesión, emulsión ESS-1hP.

Emulsión ESS-1hP						
Fibra	Parámetro	Tiempo (minutos)				Cumple
		30	60	90	120	
No	Modo de ruptura	N	S	S	S	✓
	Temperatura de ensayo (°C)	24.5	25.0	26.0	26.5	
Si	Modo de ruptura	N	S	S	SS	✓
	Temperatura de ensayo (°C)	25.0	26.0	26.5	26.5	

Los contenidos de emulsión seleccionados en la prueba de tiempo de mezclado funcionaron en esta prueba, todas las mezclas cumplieron con al menos el modo de

ruptura especificado (NS) a 1 hora después de su producción, con excepción de la mezcla fabricada sin fibra y con emulsión 159-S, para esta mezcla se requirió de 30 minutos extras para su cumplimiento. Esta característica no elimina dicho diseño, es necesario tener la evaluación completa de cada microaglomerado para conocer su comportamiento integro.

Se notó un incremento en el desarrollo de cohesión en un tiempo menor para los microaglomerados con fibra en comparación con los que no la contienen.

#### 5.4.2. Selección del contenido óptimo de emulsión mediante WTAT y LWT

Para verificar que los contenidos de emulsión seleccionados mediante la prueba de tiempo de mezclado son los óptimos, se fabricaron y probaron especímenes con y sin fibra de vidrio, utilizando esos contenidos y  $\pm 2\%$  de emulsión con respecto al peso seco del agregado, para las pruebas de WTAT y LWT.

Los resultados medidos de pérdida por abrasión a 1 hora en las mezcla sin fibra para cada emulsión se recogen en la Tabla 5.15. La Tabla 5.16 muestra resultados medidos de pérdida por abrasión a 1 hora en las mezcla con fibra. Los resultados de ambas tablas se muestran gráficamente en la Figura 5.8.

Tabla 5.15: Pérdida por abrasión en vía húmeda, especímenes sin fibra.

ENSAYE DE ABRASIÓN EN HÚMEDO (1 hora)					
Emulsión	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Peso Inicial (g)	Peso final (g)	Pérdida por abrasión (g/m <sup>2</sup> )
070-T	10.0%	6.2%	785.8	775.7	353
	12.0%	7.5%	805.1	802.4	94
	14.0%	8.7%	793.2	791.4	63
137-S	11.0%	6.9%	771.6	765.6	210
	13.0%	8.2%	755.3	752.2	108
	15.0%	9.4%	786.1	782.3	133
159-S	10.0%	6.2%	785.4	779.2	217
	12.0%	7.5%	803.5	798.8	164
	14.0%	8.7%	795.8	791.6	147
ESS-1hP	11.0%	6.6%	785.3	783.5	63
	13.0%	7.8%	793.0	792.0	35
	15.0%	9.0%	801.9	800.7	42

Tabla 5.16: Pérdida por abrasión en vía húmeda, especímenes con fibra.

ENSAYE DE ABRASIÓN EN HÚMEDO (1 hora)					
Emulsión	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Peso Inicial (g)	Peso final (g)	Pérdida por abrasión (g/m <sup>2</sup> )
070-T	10.0%	6.2%	782.4	765.2	602
	12.0%	7.5%	802.8	799.3	122
	14.0%	8.7%	789.3	786.0	115
137-S	11.0%	6.9%	765.1	758.8	220
	13.0%	8.2%	785.5	780.2	185
	15.0%	9.4%	781.9	775.1	238
159-S	10.0%	6.2%	697.6	659.2	1343
	12.0%	7.5%	793.9	784.7	322
	14.0%	8.7%	804.3	798.9	189
ESS-1hP	11.0%	6.6%	795.3	787.4	276
	13.0%	7.8%	799.4	794.3	178
	15.0%	9.0%	817.5	812.8	164

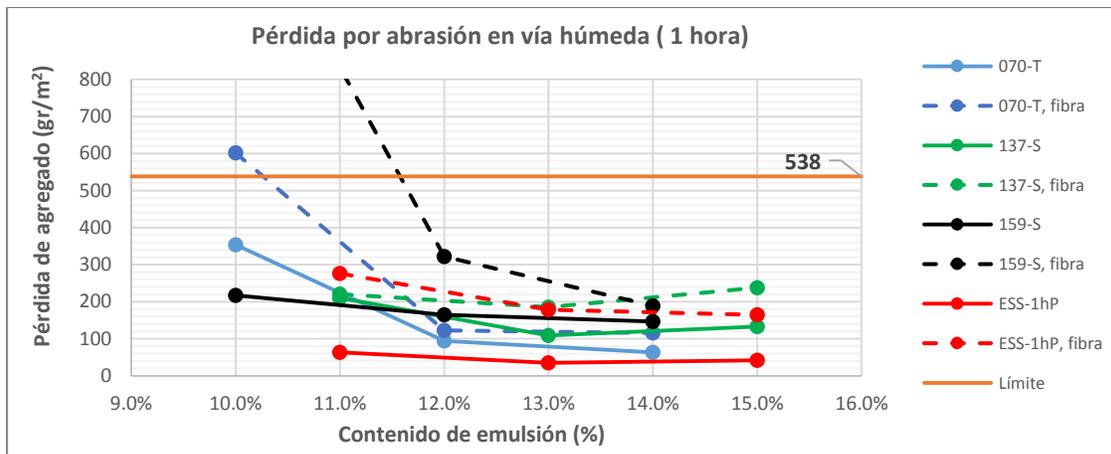


Figura 5.8: Pérdida por abrasión en especímenes con y sin fibra, con contenido óptimo y  $\pm 2\%$  de emulsión.

La Tabla 5.17 muestra los resultados determinados de arena adherida en la prueba de LWT para especímenes sin fibra. La Tabla 5.18 compila los resultados para especímenes con fibra. La Figura 5.9 muestra gráficamente los resultados de arena adherida de ambas tablas.

Mediante las pruebas de WTAT y LWT se verificó que los contenidos de emulsión determinados en las pruebas de tiempo de mezclado y cohesión sí corresponden con el óptimo. Ya que con estos contenidos de emulsión, simultáneamente, no se supera el límite máximo permitido de arena adherida y se cumple con la especificación para la prueba de pérdida por abrasión en húmedo.

Entonces, los contenidos de emulsión óptimos son: 12% para 070-T, 13% para 137-S, 12% para 159-S y 13% para ESS-1hP.

Tabla 5.17: Prueba LWT, especímenes sin fibra.

RUEDA CARGADA (LWT)					
Emulsión	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Peso Inicial (g)	Peso final (g)	Arena adherida (g/m <sup>2</sup> )
070-T	10.0%	6.2%	394.0	398.0	207
	12.0%	7.5%	387.3	396.7	486
	14.0%	8.7%	397.8	408.5	553
137-S	11.0%	6.9%	399.6	408.2	444
	13.0%	8.2%	398.4	407.5	470
	15.0%	9.4%	403.3	415.4	625
159-S	10.0%	6.2%	394.2	402.0	403
	12.0%	7.5%	392.1	401.8	501
	14.0%	8.7%	414.4	426.0	599
ESS-1hP	11.0%	6.6%	427.6	435.0	382
	13.0%	7.8%	425.2	433.0	403
	15.0%	9.0%	428.0	439.2	579

Tabla 5.18: Prueba LWT, especímenes con fibra.

RUEDA CARGADA (LWT)					
Emulsión	Emulsión (%)	Asfalto (%)	Peso Inicial (g)	Peso final (g)	Arena adherida (g/m <sup>2</sup> )
070-T	10.0%	6.2%	382.1	390.0	408
	12.0%	7.5%	375.5	384.3	455
	14.0%	8.7%	365.0	375.8	558
137-S	11.0%	6.9%	392.2	401.5	481
	13.0%	8.2%	394.0	403.8	506
	15.0%	9.4%	396.5	408.4	615
159-S	10.0%	6.2%	392.2	400.0	403
	12.0%	7.5%	395.8	405.0	475
	14.0%	8.7%	383.7	394.6	563
ESS-1hP	11.0%	6.6%	414.3	421.8	388
	13.0%	7.8%	423.0	432.0	465
	15.0%	9.0%	423.4	435.2	610

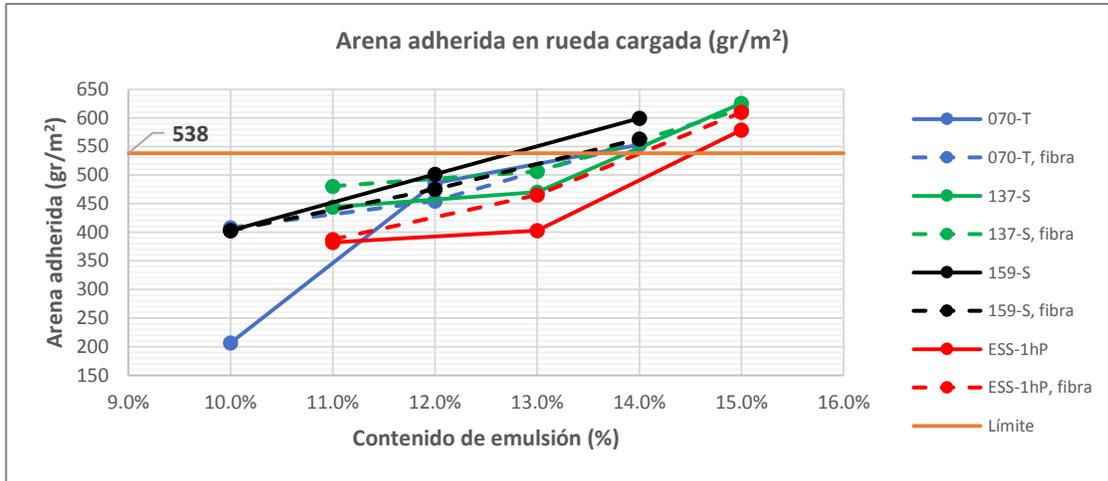


Figura 5.9 : Arena adherida de especímenes con y sin fibra, con contenido óptimo y  $\pm 2\%$  de emulsión.

### 5.4.3. Pruebas de desempeño en microaglomerados con y sin fibra de vidrio, con contenido óptimo de emulsión

El presente apartado cubre la parte de análisis de resultados de las pruebas de desempeño de la mezcla que incluyen únicamente especímenes fabricados con el contenido óptimo de emulsión, ya que este último es el que se utiliza para el diseño de microaglomerados.

#### 5.4.3.1. Pérdida por abrasión en húmedo

La Tabla 5.19 muestra un resumen de los resultados determinados en esta prueba para cada diseño de microaglomerado. La Tabla 5.20 muestra los resultados determinados a 6 días para especímenes con y sin fibra de vidrio.

Tabla 5.19: Pérdida por abrasión en húmedo a 1 hora.

Tipo de emulsión	ID emulsión	Fibra	Abrasión, 1 h (g/m <sup>2</sup> )
CQS-1hL	070-T	No	94
CQS-1hL	070-T	Si	122
CQS-1hL	137-S	No	108
CQS-1hL	137-S	Si	185
CQS-1hL	159-S	No	164
CQS-1hL	159-S	Si	322
CSS-1hP	ESS-1hP	No	35
CSS-1hP	ESS-1hP	Si	178

Tabla 5.20: Pérdida por abrasión en húmedo a 6 días.

Tipo de emulsión	ID emulsión	Fibra	Abrasión, 6 días (g/m <sup>2</sup> )
CQS-1hL	070-T	No	189
CQS-1hL	070-T	Si	472
CQS-1hL	137-S	No	185
CQS-1hL	137-S	Si	388
CQS-1hL	159-S	No	101
CQS-1hL	159-S	Si	252
CSS-1hP	ESS-1hP	No	126
CSS-1hP	ESS-1hP	Si	157

Los resultados indican que para todos los casos, la pérdida por abrasión disminuyó con el incremento del contenido de emulsión, lo contrario ocurrió al disminuir el contenido de emulsión. Por otra parte, la pérdida por abrasión incrementó con la adición de la fibra.

Los resultados medidos de pérdida por abrasión a 1 hora en las mezcla con y sin fibra de vidrio se muestran gráficamente en la Figura 5.10. Asimismo, los resultados para 6 días se muestran en la Figura 5.11.

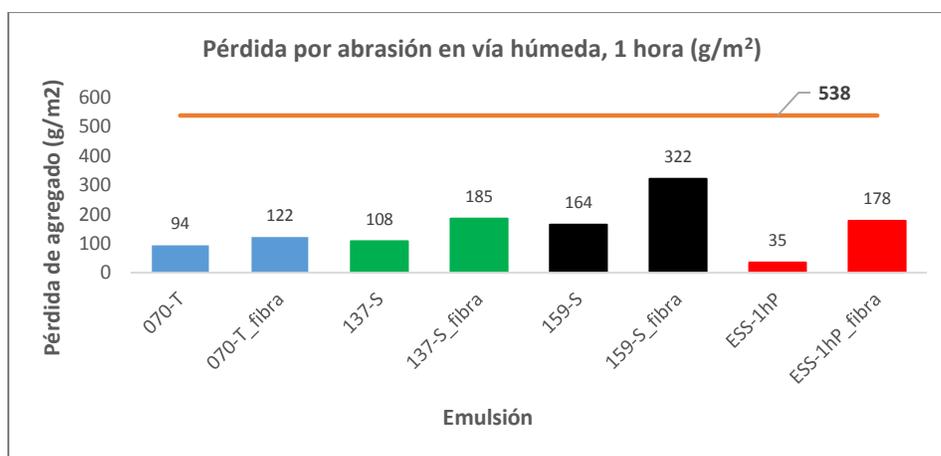


Figura 5.10: Pérdida por abrasión en húmedo a 1 hora en especímenes con y sin fibra, con contenido óptimo de emulsión.

Para las mezclas con y sin fibra se presentó un incremento en el valor de pérdida por abrasión a 6 días con respecto al de 1 hora. Excepto para las mezclas con y sin fibra, y emulsión 159-S donde ocurrió un decremento. De manera análoga la mezcla con fibra y emulsión ESS-1hP presentó también una reducción en la pérdida de material. Por lo tanto, estas 2 emulsiones en conjunto con la fibra de vidrio mejoran su desempeño en el microaglomerado con el paso del tiempo.

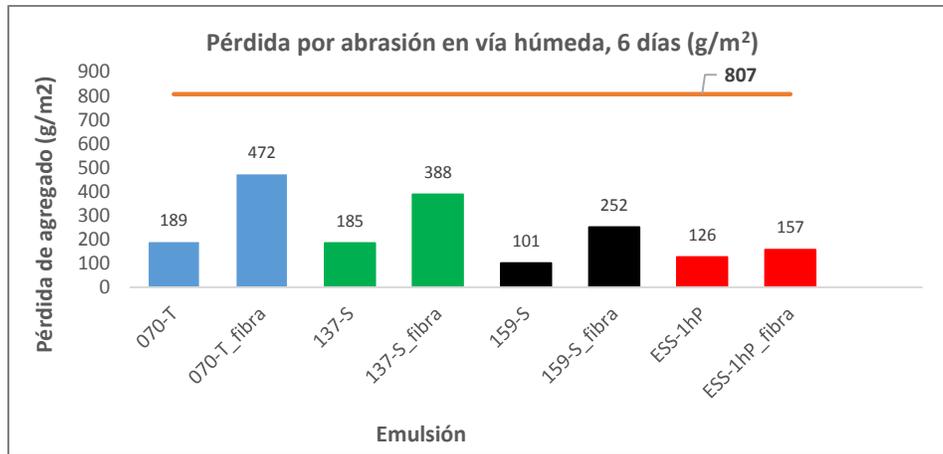


Figura 5.11: Pérdida por abrasión en húmedo a 6 días en especímenes con y sin fibra, con contenido óptimo de emulsión.

El incremento en la pérdida por abrasión por causa de la adición de fibra no descalifica los diseños de los microaglomerados, por lo tanto, es necesaria la evaluación de las pruebas complementarias establecidas en este estudio para conocer el desempeño íntegro de las mezclas.

#### 5.4.3.2. Rueda cargada

La Tabla 5.21 muestra un resumen de los resultados de arena adherida en especímenes con y sin fibra de vidrio en cada diseño de microaglomerado

Tabla 5.21: Arena adherida en especímenes.

Tipo de emulsión	ID emulsión	Fibra	Arena adherida (g/m²)
CQS-1hL	070-T	No	486
CQS-1hL	070-T	Si	455
CQS-1hL	137-S	No	470
CQS-1hL	137-S	Si	506
CQS-1hL	159-S	No	501
CQS-1hL	159-S	Si	475
CSS-1hP	ESS-1hP	No	403
CSS-1hP	ESS-1hP	Si	465

En la prueba de rueda cargada no se logró identificar claramente el beneficio o perjuicio de la fibra. Como se puede ver en la Figura 5.12, no existe una tendencia en la cantidad de arena adherida con el cambio de emulsión y la adición de la fibra. Aunque los especímenes ensayados cumplen con la especificación, es necesario mencionar que este ensaye es muy subjetivo, además depende mucho de la manipulación del diseñador.

Según los resultados medidos, no existe exceso de emulsión en los diseños, por lo que, se descarta el riesgo de exudación de residuo asfáltico en los microaglomerados.

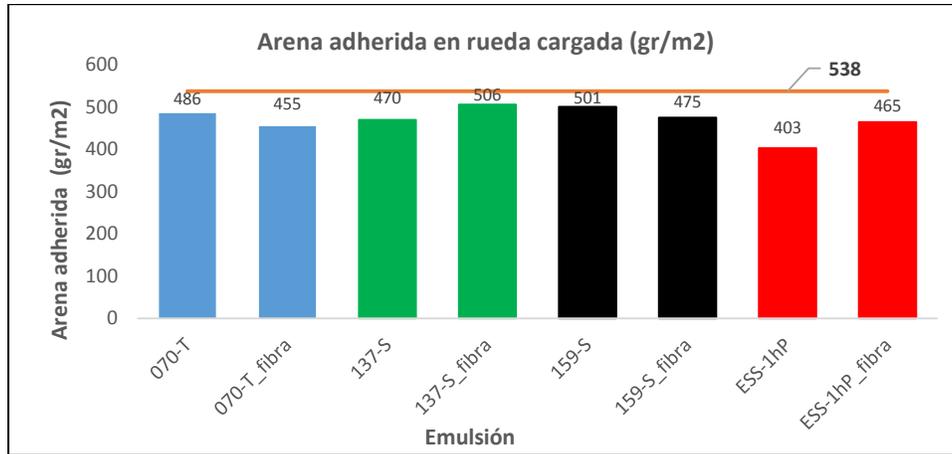


Figura 5.12: Arena adherida en especímenes con y sin fibra, con contenido óptimo de emulsión.

#### 5.4.3.3. Desplazamiento lateral

Se determinó el promedio de desplazamiento lateral de 4 muestras ensayadas para cada diseño de microaglomerado. Los resultados de los ensayos se muestran en la Tabla 5.22.

Tabla 5.22: Prueba de desplazamiento lateral en microaglomerados

ID emulsión	Fibra	Desplazamiento lateral (%)				Promedio	Desviación estándar
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4		
070-T	No	11.93%	13.81%	11.97%	10.97%	12.17%	0.012
070-T	Si	11.82%	10.63%	10.36%	10.06%	10.72%	0.008
137-S	No	13.98%	10.92%	12.79%	18.00%	13.92%	0.030
137-S	Si	3.63%	9.06%	12.52%	10.48%	8.92%	0.038
159-S	No	5.74%	6.04%	5.01%	10.56%	6.84%	0.025
159-S	Si	4.43%	3.66%	3.94%	3.51%	3.88%	0.004
ESS-1hP	No	8.65%	8.08%	6.65%	8.56%	7.98%	0.009
ESS-1hP	Si	3.42%	2.80%	5.43%	5.28%	4.23%	0.013

Por medio de esta prueba se midió la resistencia de los microaglomerados a ser deformados por la acción del tráfico pesado. En la Figura 5.13 se puede observar que la adición de fibra mejora la resistencia de la mezcla a la deformación lateral y por consecuencia a la deformación permanente.

El desplazamiento lateral en los microaglomerados fue diferente para cada emulsión, por lo tanto, cada emulsión se desempeña de forma particular en el microaglomerado. En esta parte como en otras, la compatibilidad química juega un papel importante entre los componentes de la mezcla.

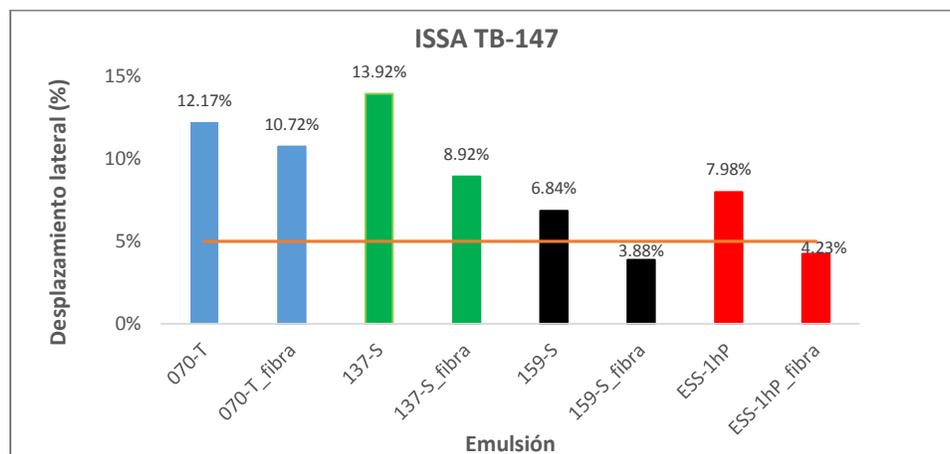


Figura 5.13: Desplazamiento lateral después de 1000 ciclos, medido en especímenes con contenido óptimo de emulsión.

Sólo los especímenes fabricados con fibra, con las emulsiones 159-S y ESS-1hP cumplieron la especificación establecida, es decir, presentaron desplazamientos laterales menores al 5% con respecto al ancho original de la muestra.

#### 5.4.3.4. Tensión a flexión

Una de las partes medulares de esta investigación consistió en evaluar la prueba de tensión a flexión para evaluar el efecto de la fibra de vidrio en la mezcla de microaglomerado. Esta prueba permite medir la resistencia de la mezcla ante el agrietamiento reflexivo. La Tabla 5.23 muestra los resultados medidos de flexión para los especímenes con y sin fibra ensayados a temperatura ambiente. La Tabla 5.24 muestra los datos medidos de flexión para especímenes con y sin fibra probados a 4°C para cada emulsión.

Los resultados determinados que se presentan gráficamente en la Figura 5.14 muestran que a temperatura ambiente existe un ligero incremento de aproximadamente 10% en el valor de flexión en la mezcla con la adición de la fibra. Sin embargo, un claro aumento en la flexión se presentó para los especímenes de microaglomerado probados a 4°C, en promedio 130% más con respecto a los especímenes sin fibra, los resultados se pueden ver gráficamente en la Figura 5.15.

Tabla 5.23: Prueba de tensión a flexión a temperatura ambiente para microaglomerados.

Temperatura ambiente						
ID emulsión	Fibra	Flexión (cm)	Flexión (cm)	Temperatura (°C)	Flexión promedio (cm)	Desviación estándar
070-T	No	7.3	7.5	24.0	7.40	0.14
070-T	Si	8.2	8.0	24.0	8.10	0.14
137-S	No	7.8	7.2	26.0	7.50	0.42
137-S	Si	8.1	7.9	26.0	8.00	0.14
159-S	No	7.7	7.1	25.2	7.40	0.42
159-S	Si	7.8	8.3	25.2	8.05	0.35
ESS-1hP	No	7.5	7.8	24.5	7.65	0.21
ESS-1hP	Si	8.2	8.4	24.6	8.30	0.14

Tabla 5.24: Prueba de tensión a flexión a temperatura baja para microaglomerados.

Temperatura baja (4°C)						
ID emulsión	Fibra	Flexión (cm)	Flexión (cm)	Temperatura (°C)	Flexión promedio (cm)	Desviación estándar
070-T	no	0.6	0.7	4.0	0.65	0.07
070-T	si	1.3	1.7	4.0	1.50	0.28
137-S	no	0.3	0.4	4.0	0.35	0.07
137-S	si	0.8	0.8	4.0	0.80	0.00
159-S	no	0.7	0.7	4.0	0.70	0.00
159-S	si	1.6	1.6	4.0	1.60	0.00
ESS-1hP	no	0.6	0.7	4.0	0.65	0.07
ESS-1hP	si	1.5	1.6	4.0	1.55	0.07

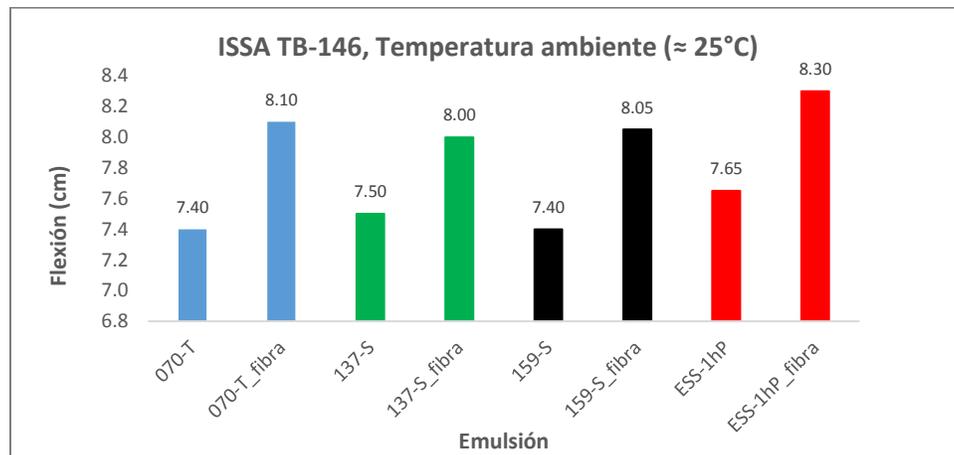


Figura 5.14: Flexión de especímenes con y sin fibra a temperatura ambiente.

Por lo tanto, el efecto que tiene la fibra en el microaglomerado se traduce como un incremento en la flexión. El porcentaje de flexión es mayor cuando la temperatura decrece, lo cual es bastante beneficioso para los fines del estudio, ya que el

agrietamiento se presenta con mayor probabilidad en cuerpos frágiles. Las capas asfálticas tienen propiedades viscoelásticas y tienden a rigidizarse a temperaturas bajas. Por lo tanto, el beneficio de la fibra debe presentarse en estas temperaturas. A temperaturas altas o intermedias, las mismas propiedades viscoelásticas de la mezcla reducen el efecto de fibra, haciendo que la flexión no sea tan notoria con la adición de la fibra.

Por otra parte la emulsión también juega un papel importante, pues el valor medido de flexión varió al cambiar únicamente la emulsión. Las emulsiones 159-S y ESS-1hP tienen el mejor desempeño en esta prueba.

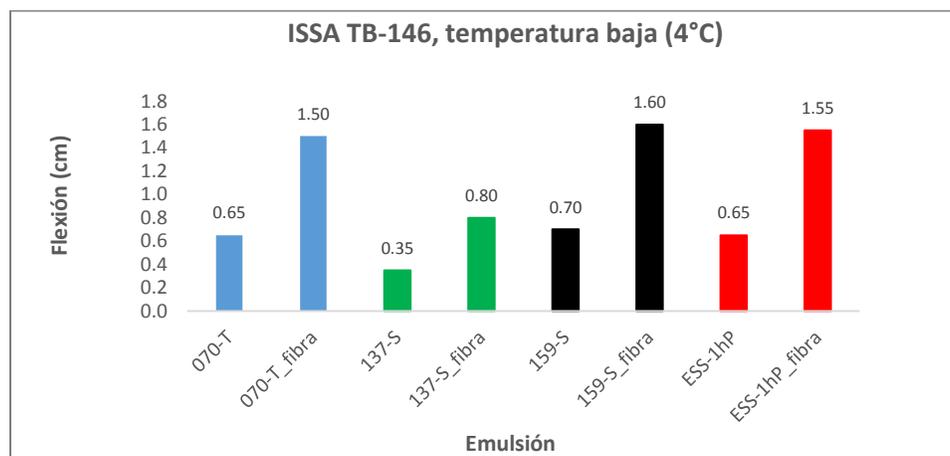


Figura 5.15: Flexión de especímenes con y sin fibra a temperatura baja.

En conclusión, con base en lo mencionado en este capítulo. La emulsión 159-S presentó el mejor desempeño en el análisis EPG, debido a que desarrolló mayor resistencia a la deformación permanente y al agrietamiento térmico, asimismo cumplió con las especificaciones establecida en las pruebas de estabilidad al almacenamiento y manejabilidad.

Durante las pruebas de desempeño del microaglomerado, las emulsiones ESS-1hP y 159-S presentaron el mejor desempeño. Sin embargo la emulsión ESS-1hP no debería utilizarse en el diseño debido a su mal desempeño en las pruebas *MSCR* y *módulo de corte dinámico en valores de ángulos de fase críticos*. Esta última es susceptible a presentar deformación permanente y agrietamiento térmico.

La emulsión 159-S mostró el mejor desempeño tanto individualmente como en la mezcla, por lo tanto, para este estudio el diseño de microaglomerado se optimiza con su uso.

Con respecto a la fibra de vidrio se determinó que aporta resistencia adicional al microaglomerado, lo cual se demuestra con los resultados determinados en las pruebas en las que se evaluó, con excepción de la prueba de pérdida por abrasión en húmedo. No obstante, cuando existe buena compatibilidad entre los componentes la pérdida por abrasión se ve reducida con el paso del tiempo como se pudo observar en el diseño de microaglomerado que contiene fibra de vidrio y emulsión 159-S.

La adición de la fibra en el sistema de microaglomerado mejoró la resistencia al agrietamiento reflexivo y a desplazamientos laterales. Además los especímenes con fibra de vidrio presentaron un desarrollo de cohesión más alto en un tiempo menor, lo que permite una pronta apertura al tráfico.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 6.1. Conclusiones

Actualmente en México, una normativa o metodología regulada es necesaria para la correcta selección de materiales y diseño de la mezcla de microaglomerado en frío.

El microaglomerado en frío es un tratamiento de preservación usado para mejorar fallas en la superficie del pavimento. Un buen diseño de mezcla y una producción sistemática son las claves para garantizar la efectividad y durabilidad del microaglomerado. La guía de diseño para microaglomerados ISSA A143 (2010) cubre una amplia gama de parámetros de desempeño, que incluyen compatibilidad entre emulsión y agregados, daños tempranos por acción de tráfico, daños causados por la humedad, formación de roderas, exudación y resistencia al agrietamiento reflexivo.

La investigación actual tuvo el objetivo de sentar las bases para la implementación del sistema EPG.

El análisis EPG demostró ser una metodología efectiva para valorar el comportamiento de emulsiones tanto individualmente como en mezclas de microaglomerado ante diferentes espectros de carga y temperatura. Las pruebas MSCR y  $G^*$  en  $\delta c$  son determinantes en el análisis EPG porque a través de estas se puede estimar el desempeño esperado de las emulsiones asfálticas en los microaglomerados a alta y baja temperatura, respectivamente.

Basado en los resultados de esta investigación, las emulsiones que cumplen con las especificaciones del análisis EPG se desempeñan mejor en las pruebas de la mezcla.

La compatibilidad química juega un papel importante entre los componentes del microaglomerado. Esto implica la necesidad de evaluar varias emulsiones para optimizar el diseño de microaglomerados. Más allá del comportamiento individual, es de suma importancia el trabajo en conjunto de los componentes del microaglomerado para el buen desempeño de la mezcla.

Se encontró un efecto positivo de la fibra de vidrio que contribuye al desempeño y a la vida útil de los microaglomerados. La adición de la fibra contribuye en la resistencia de los microaglomerados a presentar deformaciones por acción del tráfico, mejora la resistencia de las mezclas frente al agrietamiento reflexivo y disminuye el tiempo de apertura al tráfico.

La metodología utilizada en esta investigación representa una forma completa de evaluar a corto plazo y en un amplio rango de temperatura el desempeño de microaglomerados ante las condiciones ambientales y de tráfico que se esperan en la vida útil de este tipo de PST, asimismo permite evaluar la compatibilidad química que existe entre los componentes del sistema de microaglomerado.

### **6.2. Trabajos futuros**

El análisis EPG utilizado para la evaluación es apropiado para determinar el desempeño a corto plazo de las emulsiones y su residuo asfáltico. Sin embargo, en estudios posteriores, sería fundamental realizar la evaluación de las pruebas MCSR y  $G^*$  en  $\delta c$  sobre un residuo asfáltico envejecido para la evaluación del desempeño de las emulsiones a largo plazo.

Se podría realizar un barrido más amplio del contenido de fibra agregado a las mezclas y de temperaturas de evaluación, con el fin de optimizar los diseños de microaglomerados.

## BIBLIOGRAFÍA

- AMAAC, R. (2017). *REA XXX/2017 "Aplicación de microaglomerado en frío"*.
- Anderson, D. A. (1994). *Binder Characterization and Evaluation Volume 3: Physical Characterization*. Washington, DC: SHRP A-369. Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- Anderson, D. A., & Marasteanu, M. O. (2011). *Continuous Models for Characterizing Linear Viscoelastic Behavior of Asphalt Binders*. Madison, WI: In International Society for Asphalt Pavements. Workshop on Asphalt Binders and Mastics.
- Andrews, E. M. (1994). *The evaluation of micro-surfacing mixture design procedures and the effects of material variation on the test responses*. Texas A&M University: (Doctoral dissertation).
- ASTM\_D2397. (2012). *Standard Specification for Cationic Emulsified Asphalt*. American Society for Testing and Materials.
- Bahia, H. U. (2001). *Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design*. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council, p. 176.
- Baumgardner, G. L. (2006). *Asphalt emulsion manufacturing today and tomorrow. In Asphalt emulsion technology (pp. 15–26)*. Transportation Research Circular E-C102.
- Caltrans, C. D. (2009). *Maintenance Technical Advisory Guide Volume I. Flexible Pavement Preservation Second Edition*. 2009, pp. 9–10.
- Charmot, S., Ye, C., Zhu, Z., & Yang, Y. (2013). *Measurements of the Effectiveness of Fiber Reinforced Microsurfacing Mixtures*.
- D'Angelo, J. A., Anderson, M., & Walker, a. D. (2016). *A Better Tool for Characterizing High Temperature Performance Properties*. <http://asphaltmagazine.com/mscr-a-better-tool-for-characterizing-high-temperature-performanceproperties/>.
- Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic Propertis of Polymers*. New York: John Wiley and Sons.
- Gransberg, D. D. (2010). *"NCHRP Synthesis 411: Microsurfacing - A Synthesis of Highway Practice,"*. Washington, D.C: Transportation Research Board, National Research Council.
- Hogendoorn, S. (2016). *Chemistry of Asphalt Emulsion and Emulsion Systems*. Las Vegas, Nevada: 31 Annual Slurry Systems Workshop.
- Hunter, R. N. (2015). *The Shell Bitumen (6th ed.)*. London: ICE Publishing.
- IRC SP, 8. (2008). *Tentative specifications for slurry seal and microsurfacing*. Indian Roads Congress.
- ISSA, «. I. (2011). <<http://www.slurry.org.History>>.

- ISSA\_A143. (2010). *Recommended performance guideline For Micro Surfacing*. . International Slurry Surfacing Association.
- James, A. (2006). *Overview of asphalt emulsion*. In *Asphalt emulsion technology* (pp. 1–15). Transportation Research Circular E-C102.
- Kadrmaz, A. (2010). *Asphalt Emulsion Residue Recovery and Rheological Testing Update*. Technical Presentation Presented at the Asphalt Emulsion Manufacturers Association Annual Meeting.
- Lee S. (2003). *Long-Term Performance Assessment of Asphalt Concrete Pavement Using the Third Scale Model Mobile Loading Simulator and Fiber Reinforced Asphalt Concrete*. Raleigh, NC: Ph.D. Dissertation. North Carolina State University.
- Lee, J. J., & Kim., Y. R. (2010). “*Evaluation of Performance and Cost-Effectiveness of Polymer-Modified Chip Seals.*”. Washington, D.C: In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2150, Transportation Research Board of the National Academies pp. 79–86.
- Lee, J. S. (2006). “*Performance Evaluation of Bituminous Surface Treatment Using the Third-Scale Model Mobile Loading Simulator.*”. Washington, D.C: In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1958, Transportation Research Board of the National Academies.
- Mohammad, I. (2015). *Development of Performance -Related Specification for Fresh Emulsions Used for Surface Treatments and Performance Study of Chip Seals and Microsurfacing*. Raleigh, North Carolina.
- Mohseni, A. S. (2005). “*Development of Superpave High-Temperature Performance Grade (PG) Based on Rutting Damage (With Discussion and Closure).*”. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 74, No. 1.
- MS-19. (1997). *A basic asphalt emulsion manual*. Ibadan, Nigeria: Asphalt Institute Manual Series No. 19, Third Edition.
- Patrick, S. (2018). *Guidelines and specifications for microsurfacing*. . Austroads Research Report AP-R569-18.
- PIARC. (2016). *Conservar las carreteras de su país para fomentar el desarrollo, s.l.* World Road Association.
- Probisa. (1994). *Lechadas asfálticas con fibra*.
- Raza, H. (1994). *state-of-practice design, construction, and performance of micro-surfacing*. Final Report. No. FHWA-SA-94-051.
- Redelius, P., & Walter, J. (2006). “*Bitumen Emulsions.*” *Emulsions and Emulsions Stability*”. CRC Taylor and Francis.
- Robati, M. (2012). *Evaluation of a modification of current micro-surfacing mix design procedures*. Montreal.

- Robati, M. C. (2015). *New conceptual model for filler stiffening effect on asphalt mastic of microsurfacing*. Journal of Materials in Civil Engineering, 27(11), 04015033.
- Rowe, G. M. (2016). "Cracking and Linear Viscoelastic Binder Properties". 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements, Vol. 13.
- Uzarowski, L., & Bashir, I. (2007). « *A Rational Approach for Selecting the Optimum Asphalt Pavement Preventive and Rehabilitation Treatments—Two Practical Examples from Ontario* ». Annual Conference of the Transportation Association of Canada.
- Vijaykumar, A. A. (2013). "Revision and Further Validation of Surface Performance-Graded Specification for Chip Seal Binders.". Washington, DC: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2370.
- Walubita, L. A.-M. (2005). *A Surface Performance Graded (SPG) Specification for Surface Treatment Binders: Development and Initial Validation*. Publication FHWA-TX-05/1710-2. FHWA, U.S. Department of Transportation.
- Winter, H. H. (1987). "Can the Gel Point of a Crosslinking Polymer be Detected by  $G' - G''$  Crossover?". Polymer Engineering and Science, Vol. 27, No. 22.
- Wu, G., Yu, M., & W., & T. (2011). *Study on the water damage resistance performance of micro-surfacing*. Applied Mechanics and Materials, 97, 162–166.
- Y. Richard Kim, J. A. (2017). *Performance-Related Specifications for Emulsified Asphaltic Binders Used in Preservation Surface Treatments*. North Carolina State University, Raleigh, NC: NCHRP RESEARCH REPORT 837.