

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



Tesis

“Análisis de desempeño de mezclas en frío utilizando distintas emulsiones, bajo el protocolo AMAAC”

Para obtener el grado de  
Maestro en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres

Presenta:

ING. ANTONIO VALDEZ PONCE

ASESOR DE TESIS

DR. JORGE ALARCÓN IBARRA

Morelia, Michoacán. Febrero de 2016.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres Francisco e Isabel por darme la oportunidad de estudiar, apoyarme incondicionalmente durante toda mi vida y por la educación que recibí de ambos.

A mis hermanos Francisco, Aníbal, Jorge por ser quienes me impulsan a seguir adelante con mis metas y brindarme su apoyo en los momentos más difíciles.

A mi novia Pao por aconsejarme y apoyarme durante todo este tiempo que hemos estado juntos y darme ánimos para cumplir con los objetivos que me he marcado.

A mi asesor de tesis el Dr. Jorge Alarcón por guiarme en este proceso de aprendizaje y por el apoyo brindado en esta investigación.

A mi co-asesora M.A Rosita Martínez por el apoyo recibido y por darme la oportunidad de participar en el presente proyecto.

Al M. en I. Jesús Espinosa por su amistad y por transmitirme sus conocimientos en el desarrollo de pruebas.

Al M. en I. Eymard Ávila por el apoyo brindado en el desarrollo de la pruebas de laboratorio.

A la empresa SemMaterials México por brindarme el apoyo necesario con su personal de laboratorio, además de la utilización del equipo para el desarrollo de pruebas.

A mis amigos que me dan su amistad y que siempre han estado conmigo para apoyarme.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>I</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>IV</b>
OBJETIVO GENERAL.....	IV
OBJETIVOS PARTICULARES .....	IV
<b>CAPITULO 1 PAVIMENTOS .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 FUNCIONES DE LAS CAPAS Y MATERIALES QUE COMPONEN LOS PAVIMENTOS.....	2
1.3 TIPOS DE PAVIMENTOS. ....	4
1.4 COMPOSICIÓN DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.....	4
1.4.1 Terracerías. ....	4
1.4.2 Sub-base.....	7
1.4.3 Base.....	9
1.4.4 Carpeta.....	10
1.5 DETERIORO Y TIPOS DE FALLAS EN LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES. ....	10
1.5.1 Deterioro de los Pavimentos Flexibles.....	14
1.5.1.1 La Fisuración.....	14
1.5.1.2 Deformación en la Superficie de la Carretera. ....	15
1.5.2 Tipos de deterioros en los Pavimentos Flexibles. ....	16
<b>CAPÍTULO 2 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO. ....</b>	<b>31</b>
2.1 EMULSIONES ASFÁLTICAS. ....	32
2.1.1 Componentes de una emulsión. ....	34
2.1.2 Elaboración de la Emulsión. ....	37
2.1.3 Proceso de rompimiento de las emulsiones. ....	38
2.1.4 Clasificación de las emulsiones. ....	39
2.1.5 Rompimiento y Curado.....	41
2.1.5.1 Rompimiento.....	41
2.1.5.2 Curado. ....	42
2.1.5.3 Factores que afectan el rompimiento y el curado.....	42
<b>CAPITULO 3 MÉTODO DE DISEÑO BAJO PROTOCOLO AMAAC. ....</b>	<b>43</b>
3.1 MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES. ....	43
3.2 ESFUERZO PRODUCIDOS EN LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	44
3.3 DISEÑO DE MEZCLAS BAJO PROTOCOLO AMAAC. ....	48
3.3.1 Componentes del protocolo. ....	48
3.3.2 Selección del agregado pétreo. ....	50
3.3.2.1 Pruebas al agregado pétreo. ....	52
3.3.3 Pruebas de desempeño en la mezcla asfáltica.....	53
3.3.3.1 Ensayo de Tensión Indirecta (TSR).....	53
3.3.3.2 Ensayo de Módulo Dinámico.....	54
<b>CAPITULO 4 PRUEBAS DE DESEMPEÑO EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS. ....</b>	<b>70</b>
4.1 AGREGADO PÉTREO.....	70
4.1.1 Granulometría.....	70
4.1.2 Desgaste de los Ángeles.....	74
4.1.3 Microdeval. ....	75
4.1.4 Densidad y Absorción. ....	76

4.1.5 Pesos Volumétricos .....	78
4.1.6 Equivalente de Arena .....	79
4.1.7 Azul de Metileno .....	80
4.1.8 Angularidad del agregado fino .....	80
4.1.9 Forma de la partícula .....	81
4.1.10 Caras fracturadas .....	82
4.2 PRUEBA PROCTOR MODIFICADA .....	84
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS .....	86
4.3.1 Residuo asfáltico por evaporación .....	87
4.3.2 Tamaño de partícula .....	87
4.3.3 Viscosidad Saybolt Furol .....	88
4.3.4 Asentamiento a 5 días .....	88
4.3.5 Retenido en la malla No. 20 .....	88
4.3.6 Carga eléctrica de la partícula .....	88
4.4 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN .....	89
4.5 PRUEBAS DE DESEMPEÑO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA .....	91
4.5.1 Ensayo de Tensión Indirecta (TSR) .....	91
4.5.1.1 Emulsión Catiónica de Rompimiento Lento (ECL) .....	93
4.5.1.2 Emulsión Catiónica Superestable (ECS) .....	101
4.5.1.3 Emulsión Catiónica de Rompimiento Lento modificada con Polímero (ECLP) .....	112
4.5.2 ENSAYO MÓDULO DINÁMICO .....	124
4.5.2.1 Módulo Dinámico Emulsión Catiónica de Rompimiento Lento (ECL) .....	125
4.5.2.2 Módulo Dinámico Emulsión Catiónica Superestable (ECS) .....	128
4.5.2.3 Módulo Dinámico Emulsión Catiónica de Rompimiento Lento modificada con Polímero (ECLP) .....	131
<b>CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE DATOS .....</b>	<b>134</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>156</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>158</b>

## Índice de figuras

FIGURA TIPOS DE EMULSIÓN .....	II
FIGURA 1.1 ESTRUCTURA TÍPICA DE UN PAVIMENTO.....	1
FIGURA 1.2 SECCIÓN GEOMÉTRICA TIPO DE UNA TERRACERÍA EN TERRAPLÉN.....	7
FIGURA 1.3 FISURACIÓN EN PIEL DE COCODRILO (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	17
FIGURA 1.4 FISURACIÓN EN BLOQUE (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	18
FIGURA 1.5 FISURACIÓN DE BORDE (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	19
FIGURA 1.6 FISURACIÓN LONGITUDINAL (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	20
FIGURA 1.7 FISURACIÓN TRANSVERSAL (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	20
FIGURA 1.8 FISURACIÓN EN MEDIA LUNA (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	21
FIGURA 1.9 DEFORMACIÓN EN FORMA DE ONDULACIÓN (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	22
FIGURA 1.10 DEFORMACIONES POR ABULTAMIENTO (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA) .....	23
FIGURA 1.11 DEFORMACIONES POR HUNDIMIENTO (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	24
FIGURA 1.12 DEFORMACIONES POR AHUELLAMIENTO (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	25
FIGURA 1.13 DESCASCARAMIENTO (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	26
FIGURA 1.14 BACHE EN UNA CARRETERA (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	26
FIGURA 1.15 DESGASTE SUPERFICIAL DE UNA CARRETERA (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	27
FIGURA 1.16 PÉRDIDA DEL AGREGADO (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	28
FIGURA 1.17 PULIMENTO DEL AGREGADO (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA) .....	29
FIGURA 1.18 EXUDACIÓN DE UNA CAPA ASFÁLTICA (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	29
FIGURA 1.19 AFLORAMIENTO DE FINOS (FUENTE: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA).....	30
FIGURA 2.1 CLASIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON BASE EN SU TEMPERATURA DE APLICACIÓN.....	31
FIGURA 2.2 DIAGRAMA DE UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA (FUENTE: MANUAL TÉCNICO BÁSICO SEMMATERIALS) .....	33
FIGURA 2.3 DIAGRAMA TÍPICO DE PRODUCCIÓN (FUENTE: LES EMULSIONS DE BITUME ROUTES DE FRANCE) .....	38
FIGURA 2.4 DECANTACIÓN (FUENTE: LES EMULSIONES DE BITUME ROUTES DE FRANCE) .....	38
FIGURA 2.5 FLOCULACIÓN (FUENTE: LES EMULSIONES DE BITUME ROUTES DE FRANCE).....	39
FIGURA 2.6 COAGULACIÓN (FUENTE: LES EMULSIONES DE BITUME ROUTES DE FRANCE).....	39
FIGURA 2.7 ROMPIMIENTO (FUENTE: LES EMULSIONES DE BITUME ROUTES DE FRANCE) .....	39
FIGURA 2.8 CURADO (FUENTE: LES EMULSIONES DE BITUME ROUTES DE FRANCE).....	39
FIGURA 2.9 EMULSIÓN DIRECTA (FUENTE: MANUAL TÉCNICO BÁSICO SEMMATERIALS) .....	40
FIGURA 2.10 EMULSIÓN INVERSA (FUENTE: MANUAL TÉCNICO BÁSICO SEMMATERIALS) .....	40
FIGURA 2.11 EMULSIÓN MÚLTIPLE (FUENTE: MANUAL TÉCNICO BÁSICO SEMMATERIALS) .....	40
FIGURA 3.1 ESTADO DE ESFUERZOS EN UNA SECCIÓN LONGITUDINAL DE UN PAVIMENTO (FUENTE: PANDEY ET AL, 1987).....	45
FIGURA 3.2 RELACIÓN ENTRE LA PRESIÓN DE CONTACTO Y LA PRESIÓN DE LA LLANTA (FUENTE: HUANG, 1993).....	46
FIGURA 3.3 ESTADO DE ESFUERZOS EN UN PAVIMENTO DEBIDO AL MOVIMIENTO DE UNA RUEDA CARGADA (FUENTE: PANDEY ET AL, 1987).....	47
FIGURA 3.4 NIVELES DE DISEÑO (FUENTE: PROTOCOLO AMAAC).....	49
FIGURA 3.5 ESQUEMA GENERAL DEL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO (FUENTE: INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE) .....	55
FIGURA 3.6 ESQUEMA GENERAL DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN (FUENTE: IMT).....	58
FIGURA 3.7 DETALLE DEL MONTAJE DEL HARDWARE (FUENTE: IIMT).....	61
FIGURA 4.1 GRANULOMETRÍA Y PUNTOS DE CONTROL AMAAC.....	73
FIGURA 4.2 CURVA DE COMPACTACIÓN.....	86
FIGURA 4.3 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA.....	87
FIGURA 4.4 GRÁFICAS TSR ECL.....	96
FIGURA 4.6 GRÁFICAS TSR ECS.....	107
FIGURA 4.7 GRÁFICAS TSR ECS SIN CICLO DE CONGELAMIENTO.....	111
FIGURA 4.8 GRÁFICAS TSR ECLP.....	119
FIGURA 4.9 GRÁFICAS TSR ECLP SIN CICLO DE CONGELAMIENTO.....	123

FIGURA 4.10 GRÁFICA VALORES MÓDULO DINÁMICO 7.5 Y 9.5% ECL. ....	127
FIGURA 4.11 GRÁFICA VALORES ÁNGULO DE FASE 7.5 Y 9.5% ECL. ....	127
FIGURA 4.12 GRÁFICA VALORES MÓDULO DINÁMICO 7.5 Y 9.5% ECS. ....	130
FIGURA 4.13 GRÁFICA VALORES ÁNGULO DE FASE 7.5 Y 9.5% ECS. ....	130
FIGURA 4.14 GRÁFICA VALORES MÓDULOS 7.5 Y 9.5% ECLP. ....	133
FIGURA 4.15 GRÁFICA VALORES ÁNGULO DE FASE 7.5 Y 9.5% ECLP. ....	133
FIGURA 5.1 VALORES TSR 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	134
FIGURA 5.2 VALORES TSR 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	134
FIGURA 5.3 VALORES TSR 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD SIN CICLO DE CONGELAMIENTO.....	135
FIGURA 5.4 VALORES TSR 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD SIN CICLO DE CONGELAMIENTO.....	136
FIGURA 5.5 VALORES DE MÓDULOS DINÁMICOS CON 7.5% DE EMULSIÓN Y 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	137
FIGURA 5.6 VALORES DE MÓDULOS DINÁMICOS CON 7.5% DE EMULSIÓN Y 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	137
FIGURA 5.7 VALORES DE MÓDULOS DINÁMICOS CON 9.5% DE EMULSIÓN Y 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	138
FIGURA 5.8 VALORES DE MÓDULOS DINÁMICOS CON 9.5% DE EMULSIÓN Y 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	138
FIGURA 5.9 VALORES DE ÁNGULO DE FASE CON 7.5% DE EMULSIÓN Y 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	139
FIGURA 5.10 VALORES DE ÁNGULO DE FASE CON 7.5% DE EMULSIÓN Y 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	139
FIGURA 5.11 VALORES DE ÁNGULO DE FASE CON 9.5% DE EMULSIÓN Y 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	140
FIGURA 5.12 VALORES DE ÁNGULO DE FASE CON 9.5% DE EMULSIÓN Y 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	140
FIGURA 5.13 MÓDULOS CON DIFERENTE TEMPERATURA DE CURADO. ....	141
FIGURA 5.14 ÁNGULO DE FASE CON DIFERENTE TEMPERATURA DE CURADO. ....	142
FIGURA 5.15 DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL ESFUERZO APLICADO ECL. ....	143
FIGURA 5.16 DESVIACIÓN ESTÁNDAR PROMEDIO DE DEFORMACIONES ECL. ....	144
FIGURA 5.17 COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE DEFORMACIÓN ECL. ....	144
FIGURA 5.18 COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ÁNGULO DE FASE ECL. ....	145
FIGURA 5.19 MICRODEFORMACIÓN AXIAL ECL. ....	145
FIGURA 5.20 DEFORMACIÓN NO RECUPERABLE ECL. ....	146
FIGURA 5.21 DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL ESFUERZO APLICADO ECS. ....	147
FIGURA 5.22 DESVIACIÓN ESTÁNDAR PROMEDIO DE DEFORMACIONES ECS. ....	147
FIGURA 5.23 COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE DEFORMACIÓN ECS. ....	148
FIGURA 5.24 COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ÁNGULO DE FASE ECS. ....	148
FIGURA 5.25 MICORDEFORMACIÓN AXIAL ECS. ....	149
FIGURA 5.26 DEFORMACIÓN NO RECUPERABLE ECS. ....	149
FIGURA 5.27 DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL ESFUERZO APLICADO ECLP. ....	150
FIGURA 5.28 DESVIACIÓN ESTÁNDAR PROMEDIO DE LAS DEFORMACIONES ECLP. ....	150
FIGURA 5.29 COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE DEFORMACIÓN ECLP. ....	151
FIGURA 5.30 COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ÁNGULO DE FASE ECLP. ....	151
FIGURA 5.31 MICRODEFORMACIÓN AXIAL ECLP. ....	152
FIGURA 5.32 DEFORMACIÓN NO RECUPERABLE ECLP. ....	152
FIGURA 5.33 GRÁFICA DE MÓDULO DINÁMICO (FUENTE: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA). ....	155

## Índice de tablas

TABLA 1.1 REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIALES PARA TERRAPLÉN.....	5
TABLA 1.2 REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIALES PARA SUBYACENTE .....	6
TABLA 1.3 REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIALES PARA SUBRASANTE .....	7
TABLA 1.4 REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DE MATERIALES PARA SUBBASES .....	8
TABLA 1.5 REQUISITOS DE CALIDAD DE LOS MATERIALES PARA SUBBASES.....	9
TABLA 1.6 REQUISITOS DE CALIDAD DE LOS MATERIALES PARA BASES.....	10
TABLA 1.7 REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES PARA BASES.....	10
TABLA.1.8 CLASIFICACIÓN DE EMULSIONES DE ACUERDO AL TAMAÑO DE PARTÍCULA.....	41
TABLA 3.1 PUNTOS DE CONTROL (FUENTE: PROTOCOLO AMAAC).....	50
TABLA 3.2 ESPECIFICACIONES PARA EL AGREGADO GRUESO (FUENTE: PROTOCOLO AMAAC).....	52
TABLA 3.3 ESPECIFICACIONES PARA EL AGREGADO FINO (FUENTE: PROTOCOLO AMAAC).....	52
TABLA 3.4 EXACTITUD Y RESOLUCIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN (FUENTE: IMT).....	57
TABLA 3.5 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACIÓN (FUENTE: IMT).....	57
TABLA 3.6 EXACTITUD ESTIMADA RELACIONADA CON EL NÚMERO DE ESPECÍMENES (FUENTE: IMT).....	60
TABLA 3.7 TIEMPOS DE EQUILIBRIO RECOMENDADOS (FUENTE: IMT).....	62
TABLA 3.8 NIVELES DE ESFUERZO DINÁMICO TÍPICOS (FUENTE: IMT).....	62
TABLA 3.9 NÚMERO DE CICLOS PARA LA SECUENCIA DE ENSAYO (FUENTE: IMT).....	63
TABLA 3.10 LÍMITES RECOMENDADOS PARA INDICADORES DE CALIDAD (FUENTE: IMT).....	69
TABLA 4.1 GRANULOMETRÍA ARENA.....	71
TABLA 4.2 GRANULOMETRÍA GRAVA.....	71
TABLA 4.3 GRANULOMETRÍA SELLO.....	72
TABLA 4.4 GRANULOMETRÍA DE LA MEZCLA.....	73
TABLA 4.5 TIPO DE MUESTRA.....	74
TABLA 4.6 COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA.....	74
TABLA 4.7 RESULTADOS GRAVA DESGASTE DE LOS ÁNGELES.....	74
TABLA 4.8 RESULTADOS SELLO DESGASTE DE LOS ÁNGELES.....	74
TABLA 4.9 COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA POR TAMAÑO NOMINAL Y NUMERO DE REVOLUCIONES.....	75
TABLA 4.10 EVALUACIÓN MICRO-DEVAL GRAVA.....	76
TABLA 4.11 EVALUACIÓN MICRO-DEVAL SELLO.....	76
TABLA 4.12 GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA GRAVA.....	77
TABLA 4.13 GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL SELLO.....	77
TABLA 4.14 GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA ARENA.....	78
TABLA 4.15 PESO VOLUMÉTRICO DE LA GRAVA.....	78
TABLA 4.16 PESO VOLUMÉTRICO DEL SELLO.....	79
TABLA 4.17 PESO VOLUMÉTRICO DE LA ARENA.....	79
TABLA 4.18 EQUIVALENTE DE ARENA.....	79
TABLA 4.19 AZUL DE METILENO.....	80
TABLA 4.20 ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO.....	80
TABLA 4.21 PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS DE LA GRAVA.....	81
TABLA 4.22 PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS DEL SELLO.....	81
TABLA 4.23 CARAS FRACTURADAS DE LA GRAVA.....	82
TABLA 4.24 CARAS FRACTURADAS DEL SELLO.....	82
TABLA 4.25 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AGREGADOS.....	83
TABLA 4.26 DIMENSIONES DEL PISÓN.....	84
TABLA 4.27 VARIANTES DE COMPACTACIÓN.....	84
TABLA 4.28 CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA.....	85
TABLA 4.29 CÁLCULO MASA VOLUMÉTRICA SECA.....	85

TABLA 4.30 CARACTERIZACIÓN DE LAS EMULSIONES.....	89
TABLA 4.31 VALOR DE LA GRAVEDAD MÁXIMA TEÓRICA 7.5% ECL.....	93
TABLA 4.32 TSR 7.5% ECL CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	93
TABLA 4.33 VALORES DE ESFUERZO 7.5% ECL CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	93
TABLA 4.34 TSR 7.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	93
TABLA 4.35 VALORES DE ESFUERZO ECL 7.5% CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	94
TABLA 4.36 VALOR DE LA GRAVEDAD MÁXIMA TEÓRICA 8.5% ECL.....	94
TABLA 4.37 TSR 8.5% ECL CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	94
TABLA 4.38 VALORES DE ESFUERZO 8.5% ECL CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	94
TABLA 4.39 TSR 8.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	94
TABLA 4.40 VALORES DE ESFUERZO 8.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	94
TABLA 4.41 VALOR DE LA GRAVEDAD MÁXIMA TEÓRICA 9.5% ECL.....	95
TABLA 4.42 TSR 9.5% ECL CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	95
TABLA 4.42 VALORES DE ESFUERZO 9.5% ECL CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	95
TABLA 4.43 TSR 9.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	95
TABLA 4.44 VALORES DE ESFUERZO 9.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA.....	95
TABLA 4.45 RESUMEN DE VALORES TSR ECL.....	96
TABLA 4.46 TSR 7.5% ECL CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	97
TABLA 4.47 VALORES DE ESFUERZO 7.5% ECL CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	97
TABLA 4.48 TSR 7.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	97
TABLA 4.49 VALORES DE ESFUERZO 7.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	97
TABLA 4.50 TSR 8.5% ECL CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	98
TABLA 4.51 VALORES DE ESFUERZO 8.5% ECL CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	98
TABLA 4.52 TSR 8.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	98
TABLA 4.53 VALORES DE ESFUERZO 8.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	98
TABLA 4.54 TSR 9.5% ECL CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	99
TABLA 4.55 VALORES DE ESFUERZO 9.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	99
TABLA 4.56 TSR 9.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	99
TABLA 4.57 VALORES DE ESFUERZO 9.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	99
TABLA 4.58 RESUMEN DE VALORES TSR ECL SIN CICLO DE CONGELAMIENTO.....	100
FIGURA 4.5 GRÁFICAS TSR ECL SIN CICLO DE CONGELAMIENTO.....	100
TABLA 4.59 VALOR DE LA GRAVEDAD MÁXIMA TEÓRICA ECS 7.5%.....	101
TABLA 4.60 VOLUMETRÍAS TSR 7.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	101
TABLA 4.61 TSR 7.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	101
TABLA 4.62 VALORES DE ESFUERZO ECS 7.5% CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	101
TABLA 4.63 VOLUMETRÍA TSR 7.5% CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	102
TABLA 4.64 TSR 7.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	102
TABLA 4.65 VALORES ESFUERZOS ECS 7.5% CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	102
TABLA 4.66 VALOR DE LA GRAVEDAD MÁXIMA TEÓRICA 8.5% ECS.....	103
TABLA 4.67 VOLUMETRÍA 8.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	103
TABLA 4.68 TSR 8.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	103
TABLA 4.69 VALORES ESFUERZO 8.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	103
TABLA 4.70 VOLUMETRÍA 8.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	104
TABLA 4.71 TSR 8.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	104
TABLA 4.72 VALORES ESFUERZO 8.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	104
TABLA 4.73 VALOR DE LA GRAVEDAD MÁXIMA TEÓRICA 9.5% ECS.....	105
TABLA 4.74 VOLUMETRÍA TSR 9.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	105
TABLA 4.75 TSR 9.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	105
TABLA 4.76 VALORES ESFUERZO 9.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	105

TABLA 4.77 VOLUMETRÍA TSR 9.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	106
TABLA 4.78 TSR 9.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	106
TABLA 4.79 VALORES ESFUERZO 9.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	106
TABLA 4.80 RESUMEN VALORES TSR ECS. ....	107
TABLA 4.81 TSR 7.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	108
TABLA 4.82 VALORES DE ESFUERZO 7.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	108
TABLA 4.83 TSR 7.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	108
TABLA 4.84 VALORES DE ESFUERZO 7.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	108
TABLA 4.85 TSR 8.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	109
TABLA 4.86 VALORES DE ESFUERZO 8.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	109
TABLA 4.87 TSR 8.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	109
TABLA 4.88 VALORES DE ESFUERZO 8.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	109
TABLA 4.89 TSR 9.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	110
TABLA 4.90 VALORES DE ESFUERZO 9.5% CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	110
TABLA 4.91 TSR 9.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	110
TABLA 4.92 VALORES DE ESFUERZO 9.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	110
TABLA 4.93 RESUMEN VALORES TSR ECS SIN CICLO DE CONGELAMIENTO. ....	111
TABLA 4.94 VALORES DE LA GRAVEDAD MÁXIMA TEÓRICA ECLP. ....	112
TABLA 4.95 VOLUMETRÍA TSR 7.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	113
TABLA 4.96 TSR 7.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	113
TABLA 4.97 VALORES ESFUERZO 7.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	113
TABLA 4.98 VOLUMETRÍA TSR 7.5% ECLP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	114
TABLA 4.99 TSR 7.5% ECLP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	114
TABLA 4.100 VALORES ESFUERZO 7.5% ECLP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	114
TABLA 4.101 VOLUMETRÍAS TSR 8.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	115
TABLA 4.102 TSR 8.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	115
TABLA 4.103 VALORES ESFUERZO 8.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	115
TABLA 4.104 VOLUMETRÍAS TSR 8.5% ECLP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	116
TABLA 4.105 TSR 8.5% ECLP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	116
TABLA 4.106 VALORES ESFUERZO 8.5% ELCP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	116
TABLA 4.107 VOLUMETRÍA TSR 9.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	117
TABLA 4.108 TSR 9.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	117
TABLA 4.109 VALORES ESFUERZO 9.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	117
TABLA 4.110 VOLUMETRÍA TSR 9.5% ELP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	118
TABLA 4.111 TSR 9.5% ECLP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	118
TABLA 4.112 VALORES ESFUERZO 9.5% ELP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	118
TABLA 4.113 RESUMEN VALORES TSR ECLP. ....	119
TABLA 4.114 TSR 7.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	120
TABLA 4.115 VALORES DE ESFUERZO 7.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	120
TABLA 4.116 TSR 7.5% ECLP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	120
TABLA 4.117 VALORES DE ESFUERZO 7.5% ECLP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	120
TABLA 4.118 TSR 8.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	121
TABLA 4.119 VALORES DE ESFUERZO 8.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	121
TABLA 4.120 TSR 8.5% ECLP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	121
TABLA 4.121 VALORES DE ESFUERZO 8.5% ECLP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	121
TABLA 4.122 TSR 9.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	122
TABLA 4.123 VALORES DE ESFUERZO 9.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	122
TABLA 4.124 TSR 9.5% ECLP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	122
TABLA 4.125 VALORES DE ESFUERZO 9.5% ELCP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	122

TABLA 4.126 RESUMEN TSR ECLP SIN CICLO DE CONGELAMIENTO. ....	123
TABLA 4.127 VOLUMETRÍA MÓDULOS 7.5% ECL CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	125
TABLA 4.128 VOLUMETRÍA MÓDULOS 7.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	125
TABLA 4.129 VOLUMETRÍA MÓDULOS 9.5% ECL CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	125
TABLA 4.130 VOLUMETRÍA MÓDULOS 9.5% ECL CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	125
TABLA 4.131 VALORES DE MÓDULO DINÁMICO 7.5 Y 9.5% ECL CON 60 Y 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	126
TABLA 4.132 VOLUMETRÍA MÓDULOS 7.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	128
TABLA 4.133 VOLUMETRÍA MÓDULOS 7.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	128
TABLA 4.134 VOLUMETRÍA MÓDULOS 9.5% ECS CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	128
TABLA 4.135 VOLUMETRÍA MÓDULOS 9.5% ECS CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	128
TABLA 4.136 VALORES DE MÓDULO DINÁMICO 7.5 Y 9.5% ECS CON 60 Y 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.....	129
TABLA 4.137 VOLUMETRÍA MÓDULOS 7.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	131
TABLA 4.138 VOLUMETRÍA MÓDULOS 7.5% ECLP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	131
TABLA 4.139 VOLUMETRÍA MÓDULOS 9.5% ECLP CON 60% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	131
TABLA 4.140 VOLUMETRÍA MÓDULOS 9.5% ECLP CON 70% DE PÉRDIDA DE HUMEDAD. ....	131
TABLA 4.141 VALORES MÓDULOS 7.5 Y 9.5% ECLP. ....	132
TABLA 5.1 INDICADORES DE CALIDAD (FUENTE: IMT).....	143
TABLA 5.2 GRANULOMETRÍAS (FUENTE: INVIAS, 2007).....	153
TABLA 5.3 ESPECIFICACIONES PARA EMULSIONES (FUENTE: INVIAS, 2007). ....	153
TABLA 5.4 VALORES MÓDULO DINÁMICO (FUENTE: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA). ....	154
TABLA 5.5 COMPARACIÓN VALORES MÓDULO DINÁMICO A 42 DÍAS. ....	155
TABLA 5.6 COMPARACIÓN VALORES MÓDULO DINÁMICO A 57 DÍAS. ....	155

## RESUMEN

En México las mezclas asfálticas en frío han disminuido su utilización. Debido a esto ha surgido la necesidad de retomar ésta técnica de elaboración de mezclas. Las cuales pueden ser usadas como una carpeta asfáltica para carreteras de bajo a tránsito medio.

Con el fin de garantizar un correcto desempeño de las mezclas que utilizan emulsiones asfálticas, es necesario la utilización de una normativa.

No habiendo una normativa para mezclas en frío en nuestro país, se tomará en cuenta la existente para mezclas en caliente, denominada Protocolo AMAAC. El cual se desarrolla en 4 niveles, que dependen del número de ejes equivalentes (8.2 toneladas para un eje sencillo dual) esperados durante la vida útil del pavimento en diseño.

Palabras Claves: Mezclas asfálticas en frío, emulsiones asfálticas, normativa, Protocolo AMAAC, 4 Niveles, ejes equivalentes, desempeño.

## ABSTRACT

In Mexico the asphalt cold mixtures have decreased their use. Because of this there has been the need to return to this technique of preparation of mixtures. Which can be used as an asphalt road from low to medium traffic.

The use of a regulation is necessary in order to ensure a correct performance of mixtures using asphalt emulsions.

Not having a rules for mixtures in cold in our country, will be considered the existing mixtures in hot, called Protocol AMAAC. It which develops in 4 levels, which depend on the number of equivalent axes (8.2 tonnes for a single-dual axis) expected during the service life of the pavement design.

**KEYWORDS:** Asphalt mixtures in cold, asphalt emulsions, rules, Protocol AMAAC, 4 levels, equivalent axis, performance.

## INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de las primeras civilizaciones el ser humano ha tenido la necesidad de comunicarse, trasladarse o transportar mercancías de un lugar a otro; ante esta necesidad surgieron los primeros caminos. Los cuales a lo largo del tiempo han ido mejorando con los avances tecnológicos, buscando satisfacer sus prestaciones tales como, lo son garantizar un traslado seguro, con la menor distancia, el menor tiempo posible y de una manera confortable para el usuario.

Las carreteras constituyen uno de los factores más importantes para el desarrollo económico y social de un país; además de ser la principal forma de comunicación. Los caminos y carreteras generan el tráfico de mercancías entre una región y otra, lo cual impulsa el comercio y la producción industrial. Por lo anterior es importante la construcción de vías que cumplan con las necesidades de los usuarios y que tenga una larga vida útil, menores costos de mantenimiento y de operación.

Existen diversas maneras de clasificar los pavimentos, una de ella es por la forma en que distribuyen los esfuerzo; flexibles o rígidos.

En lo que respecta a los pavimentos flexibles estos se encuentran constituidos por capas granulares y una mezcla asfáltica.

La mezcla asfáltica se puede clasificar en base a su temperatura de mezclado en:

- Mezcla en frío, de 0°C a 60°C
- Mezcla semi-templada, 60°C a 100°C
- Mezcla tibia, 100°C a 140°C
- Mezcla en caliente, 140°C a 180°C

En el presente trabajo nos enfocaremos a las mezclas asfálticas en frío.

Las mezclas asfálticas en frío pueden utilizarse en zonas alejadas, con precipitaciones medias a altas, en donde existen grandes distancias de acarreo de la mezcla o donde haya complicaciones para el traslado de equipos.

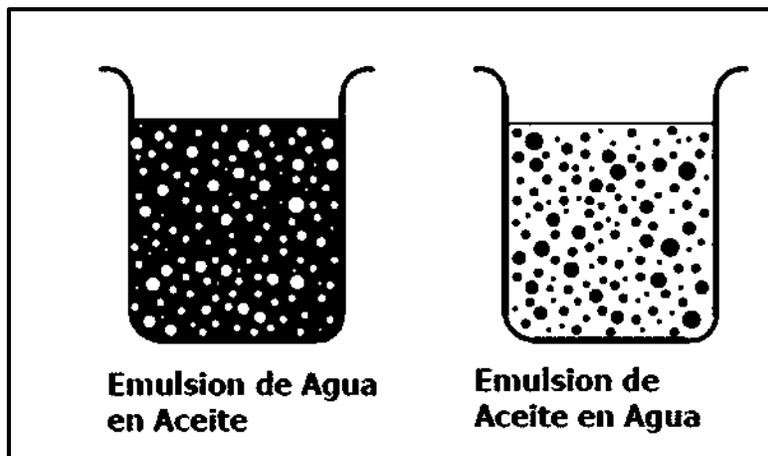
En México las dependencias de Gobierno dedicadas a la construcción y conservación de la red carretera nacional tienen la necesidad de utilizar mezclas asfálticas en zonas con las características antes mencionadas. Por lo que la utilización de las mezclas en frío es una buena opción.

Existen diferentes métodos de diseño de mezclas asfálticas, para la elaboración de la presente investigación nos basaremos en el diseño de mezclas bajo el Protocolo AMAAC.

En el diseño de una mezcla asfáltica se involucran principalmente 2 partes, la parte sólida (agregado pétreo) y una parte líquida (asfalto).

Para una mezcla en frío la parte líquida está constituida por una Emulsión de tipo directa, la cual es una dispersión de un líquido en otro líquido que no son

miscibles. La definición científica es “Es un sistema heterogéneo termodinámicamente inestable que está conformado de al menos dos líquidos inmiscibles entre ellos; en el cual uno de ellos forma la fase continua y al menos una segunda fase dispersa en forma de glóbulos dispersos. En esta investigación se utilizaron solo emulsiones del tipo aceite en agua por ser las más utilizadas en el país, en las cuales la fase dispersa está conformada por una solución jabonosa y la fase discontinua o dispersa por glóbulos de asfalto.



1 Figura Tipos de emulsión.

Para realizar el diseño de mezcla se deben de analizar las características de cada uno de los componentes que conformaran la mezcla asfáltica, las cuales estarán basadas en la propuesta de Protocolo de Mezclas en Frío de la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC).

Para la parte sólida que es el agregado pétreo se determinaran los siguientes parámetros:

- Granulometría
- Desgaste de los Ángeles
- Microdeval
- Densidad y Absorción
- Pesos Volumétricos
- Equivalente de arena
- Angularidad del agregado fino
- Azul de metileno
- Caras y forma de la partícula.

Estos parámetros deberán cumplir con los valores establecidos en las normas de la ASTM, AASHTO y AMAAC.

Para la fase líquida la cual es representada por la emulsión se le realizarán las pruebas establecidas en el Protocolo AMAAC; las cuales son:

- Residuo asfáltico por evaporación.
- Residuo asfáltico por destilación a 260°C.
- Residuo asfáltico por envejecimiento a largo plazo, 14 días a 50°C.
- Tamaño de partícula después de almacenamiento en horno a 60°C una noche.
- Tamaño de la partícula después de almacenamiento en horno a 60°C a 48 horas.
- Asentamiento a 5 días.
- Retenido en malla no. 20.
- Carga eléctrica de la partícula.

El diseño de una mezcla asfáltica bajo el protocolo AMAAC se basa en 2 niveles:

- I. Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad.
- II. Nivel I + Módulo Dinámico

## **Objetivos.**

### **Objetivo General**

Entender mediante pruebas de desempeño como lo son el ensayo de Tensión Indirecta (TSR) y el Módulo Dinámico, las características que puede aportar una mezcla en frío, haciendo una revisión de metodología de diseño propuesto por la AMAAC, así como evaluar el incremento en rigidez de este tipo de mezclas a través del tiempo. Utilizando un agregado con 3 emulsiones diferente; Emulsión Catiónica de Rompimiento Lento (ECL), Emulsión Catiónica Superestable (ECS) y Emulsión Catiónica de Rompimiento Lento Modificada con Polímero (ECLP).

### **Objetivos Particulares**

1. Realizar el diseño de las mezclas mediante la propuesta de Protocolo de diseño de mezclas en frío (Protocolo AMAAC) y establecer las posibles mejoras.
2. Caracterizar el material pétreo utilizado, cumpliendo con los valores establecidos en el Protocolo AMAAC.
3. Evaluar las características de las emulsiones de acuerdo al Protocolo AMAAC.
4. Realizar pruebas de desempeño a la mezcla asfáltica (TSR, Módulo Dinámico).
5. Establecer las diferencias en la prueba de tensión indirecta en este tipo de mezclas considerando lo establecido en la propuesta de Protocolo de Mezclas en Frío de la AMAAC y considerando una condición más crítica incluyendo un ciclo de congelamiento.
6. Evaluar si la mezcla en frío puede alcanzar resistencias similares a una mezcla en caliente y la evaluación de dicha resistencia en el tiempo.
7. Realizar una comparativa de 3 mezclas asfálticas utilizando un mismo agregado pétreo y diferente emulsión para cada caso, Emulsión de rompimiento lento, Emulsión Superestable y Emulsión modificada con polímero y entender la afectación de esta variable en las pruebas de desempeño propuestas.

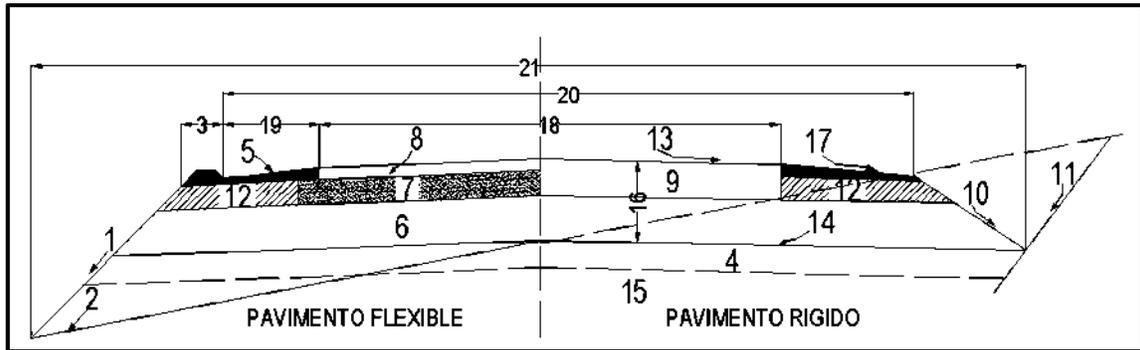
# CAPITULO 1 PAVIMENTOS

## 1.1 INTRODUCCIÓN.

La infraestructura carretera, resulta de modificar el terreno natural, construyendo las obras necesarias para garantizar una superficie adecuada donde se desplantara el pavimento. Las cuales incluyen el movimiento de tierras, cortes y terraplenes, obras de drenaje y las necesarias para asegurar la estabilidad de la obra.

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas de forma horizontal, diseñados y construidos con materiales apropiados, caracterizados por las propiedades y espesores de los mismos, con el fin de recibir de forma directa las cargas del tránsito y transmitir las a los estratos inferiores de manera uniforme.

Estructura típica de un pavimento.



2 Figura 1.1 Estructura típica de un pavimento

En la Figura 1.1 se tienen los siguientes elementos constitutivos, que conforman la sección de construcción de un camino:

- |   |  |
|---|--|
| 1. Talud en terraplén                           | 6. Subbase                                   |
| 12. Material de base en el acotamiento          | 17. Superficie asfáltica para el acotamiento |
| 2. Nivel de la superficie natural de terreno    | 7. Base granular                             |
| 13. Bombeo de la corona                         | 18. Carriles de circulación ancho de calzada |
| 3. Bordillo                                     | 8. Carpeta asfáltica                         |
| 14. Nivel de la subrasante                      | 19. Acotamientos                             |
| 4. Capa subrasante                              | 9. Losa de concreto hidráulico               |
| 15. Nivel de las terracerías                    | 20. Ancho de corona                          |
| 5. Material asfáltico en el acotamiento lateral | 10. Cuneta de la sección en corte            |
| 16. Estructura del pavimento                    | 21. Ancho total del camino                   |

Un pavimento es un elemento estructural monocapa o multicapa, apoyado en toda su superficie, diseñado y construido para soportar cargas estáticas y móviles durante un periodo determinado, en el que tendrá que recibir algún tipo de tipo de conservación para prolongar su vida de servicio. Debido a que se encuentra conformado por varias capas de espesores y calidades diferentes que se colocan sobre el terreno natural.

Este conjunto de capas proporciona también la superficie de rodamiento y permite por un periodo de tiempo determinado la circulación de vehículos en condiciones de comodidad y seguridad aceptables bajo las distintas condiciones ambientales que se presenten.

Para que un pavimento cumpla adecuadamente sus funciones de cumplir:

- Ser resistente a la acción de las cargas por el tránsito.
- Ser resistente a los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades de circulación de los vehículos.
- Debe tener una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, para brindar una adecuada comodidad a los usuarios.
- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- El ruido de rodadura, ocasionado por la interacción del neumático con la capa de rodadura, debe ser moderado.
- Económico.
- Poseer un color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos.

Al actuar sobre los pavimentos las cargas aplicadas por los vehículos, el sistema genera respuestas mecánicas inmediatas, derivadas de las leyes físicas involucradas y que se identifican como estados de esfuerzo, de deformaciones unitarias y de deflexiones, a los cuales están asociados determinados efectos, conocidos como deterioros, los cuales se encuentran en función del tiempo y que se caracterizan por ser acumulativos, permanentes, identificados como agrietamientos, deformaciones, desintegración y reducción de la resistencia al derrapamiento.

## **1.2 FUNCIONES DE LAS CAPAS Y MATERIALES QUE COMPONEN LOS PAVIMENTOS.**

El pavimento tiene diversas funciones como son:

- Proporcionar una superficie de rodamiento seguro, cómodo y de características permanentes, bajo las cargas repetidas del tránsito a lo largo de la vida útil a la que fue diseñado.

- Resistir el tránsito previsto para el periodo de vida útil y distribuir las presiones verticales producidas por las cargas del tránsito, de tal forma que solo llegue una mínima porción de estas cargas a la capa subrasante, para que esta sea capaz de soportarlas.
- Construir una estructura que sea capaz de resistir los factores climatológicos del lugar en el que es construido; en especial factores como el agua y la temperatura, ya que son estos los que producen los efectos más desfavorables en el comportamiento de los materiales que conforman el pavimento.

Los pavimentos deben contar con una serie de características funcionales y estructurales; las funcionales corresponden a la superficie de rodamiento, y las estructurales, a las capas inferiores como son mezcla densa, base, subbase, rasante, subrasante, terraplén.

En lo referente a las características funcionales se puede mencionar:

- Resistencia al derrapamiento: Ésta se obtiene a través de una adecuada textura en la superficie de rodamiento, la cual se encuentra en función de las velocidades de circulación previstas en el diseño.
- Regularidad transversal y longitudinal en la superficie de rodamiento: Ésta característica afecta directamente la comodidad del usuario y en la medida de la severidad de las deformaciones presentes en el pavimento, se podrá o no alcanzar la velocidad propuesta en el proyecto.
- Propiedades de reflexión luminosa: estas propiedades son importantes para la conducción nocturna y para el diseño apropiado de las instalaciones de iluminación.
- Drenaje superficial: Ésta evita que el espesor de la película de agua que escurre sobre la superficie de rodamiento sea considerable, con lo que se impide el acuaplaneo.

Por otra parte, las características estructurales están relacionadas con las características mecánicas de los materiales utilizados para la construcción de las diferentes capas que conforman el pavimento. Estas características mecánicas definen el espesor que tendrá cada capa. En este sentido, el análisis mecánico da una idea de los efectos producidos por las cargas del tránsito, en cuanto a estados de esfuerzos y deformaciones.

Lo cual quiere decir que, la vida útil de los pavimentos, depende en gran medida, de las características estructurales. Además de las consideraciones funcionales y estructurales, en los pavimentos se requieren que sean considerados los aspectos constructivos, para poder realizar un análisis de costos y este debe ser sustentado con la previsión del comportamiento de los pavimentos durante el periodo de vida útil al cual fue diseñado, la conservación necesaria y la estimación de refuerzos estructurales después del periodo de vida útil diseñado.

### **1.3 TIPOS DE PAVIMENTOS.**

En términos muy generales, los pavimentos se pueden clasificar de acuerdo a algunas características que estos presenten, como son:

- De acuerdo a los materiales empleados para su construcción: estabilizados, empedrados y aglomerados, mezclas asfálticas o mezclas de cemento Portland.
- Su estructura: simples o reforzados.
- El uso al que estarán destinados a lo largo de su vida útil: urbanos, industriales, carreteros, aeropistas, entre otros.
- El periodo de vida para el que fueron diseñados y construidos: temporales o permanentes.
- La forma en que distribuyen la carga al terreno: flexibles o rígidos.

Comúnmente los pavimentos se clasifican de acuerdo al último criterio descrito, que adicionalmente de considerar la distribución de cargas, también considera las características de las capas de que está constituido el pavimento, con base en esto tenemos:

- Pavimentos flexibles: cuentan con una capa de rodamiento constituida por mezcla asfáltica, por lo que también se les conocen como pavimentos asfálticos.
- Pavimentos semiflexibles: compuestos por una base y una carpeta asfáltica, estando constituidos por una intermedia y otra de rodadura; cuentan con una sub-base granular.
- Pavimentos semirrígidos: están constituidos por una capa tratada por un ligante hidráulico, la sub-base generalmente es de material granular y la superficie de rodamiento está compuesta por una mezcla asfáltica.
- Pavimentos rígidos: la superficie de rodamiento es proporcionada por losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presentan un armado de acero. Por su mayor rigidez distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las losas adyacentes que trabajan en conjunto con la que recibe directamente la carga.

### **1.4 COMPOSICIÓN DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.**

#### *1.4.1 Terracerías.*

Pueden definirse como los volúmenes de material que se extraen o que sirven de relleno en la construcción de una vía terrestre. También conocidas como infraestructura, las terracerías son la estructura donde se apoya el pavimento, de ahí la importancia de mencionarlas, además de describir algunas de sus funciones más importantes y mencionar sus principales características; las terracerías se

conforman al igual que los pavimentos por diversas capas las cuales se mencionarán a continuación:

1. Cuerpo del terraplén. La función de esta parte de las terracerías es:
  - Alcanzar la altura necesaria para satisfacer las especificaciones geométricas en lo que respecta a la pendiente longitudinal.
  - Resistir las cargas del tránsito trasferidas por las capas superiores y distribuir los esfuerzos a través de su espesor transmitirlos en forma adecuada al terreno natural, de acuerdo a su calidad.

Los materiales empleados para la construcción de un terraplén pueden ser suelos y fragmentos de roca. Los cuales se dividen en materiales compactables y materiales no compactables.

Un material es compactable cuando, se retiene máximo el 20% de fragmentos de roca chica (7.5 cm a 20 cm) y de ese 20% solo el 5% o menos son partículas mayores a los 15 cm. Los materiales no compactables carecen de estas características.

Además los materiales utilizados deberán cumplir con los requisitos de la Tabla 1.1

<b>Tabla 1.1 Requisitos de calidad de materiales para terraplén</b>	
Característica	Valor
Límite líquido máximo (%)	50
Valor de Soporte California (CBR) mínimo (%)	5
Expansión máxima (%)	5
Grado de compactación (%)	90 ± 2

*1Tabla 1.1 Requisitos de calidad de materiales para terraplén*

2. Capa Subyacente. Los materiales utilizados para esta capa son suelos y fragmentos de roca, producto de los cortes o de la extracción en bancos, que se utilizan para formar dicha capa inmediatamente encima del cuerpo del terraplén.

Cuando la intensidad del tránsito ( $\Sigma L$ ) sea menor a diez mil ejes equivalentes, no se requiere capa subyacente. Para una intensidad de diez mil a un millón de ejes equivalentes, tendrá un espesor mínimo de 30 cm. Y si la intensidad es de un millón a diez millones de ejes equivalentes, el espesor mínimo será de 70cm.

El material utilizado en dicha capa, cumplirá con los requisitos establecidos en la Tabla 1.2.

<b>Tabla 1.2 Requisitos de calidad de materiales para subyacente</b>	
Característica	Valor
Tamaño máximo y granulometría	Que sea compactable
Limite Liquido Máximo (%)	50

Valor Soporte California (CBR) mínimo (%)	10
Expansión máximo (%)	3
Compactación (%)	95 ± 2

2Tabla 1.2 Requisitos de calidad de materiales para subyacente

3. Capa Subrasante. Es la capa de cimentación, la estructura que soporta finalmente todas las cargas que actúan sobre el pavimento, en algunos casos, esta capa estará formada solo por la superficie natural del terreno.

Las principales funciones son:

- Recibir y resistir las cargas del tránsito que le son transmitidas por el pavimento.
- Transmitir y distribuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén.
- Evitar que los materiales finos plásticos que formen el cuerpo del terraplén contaminen al pavimento. El tamaño de las partículas debe ser intermedio entre los finos correspondiente al cuerpo del terraplén y los granulares del pavimento.
- Evitar que las terracerías, cuando estén formadas por fragmentos de roca, absorban el pavimento. En este caso la granulometría debe ser intermedia entre los fragmentos de roca del cuerpo del terraplén y los granulares del pavimento.
- Evitar que las imperfecciones de la cama de los cortes se reflejen en la superficie de rodamiento.
- Economizar los espesores de pavimento, en especial cuando los materiales de las terracerías requieren un espesor grande.
- Uniformizar los espesores del pavimento, sobre todo cuando varían mucho los materiales de terracerías a lo largo del camino.

Los espesores de esta capa varían de acuerdo al número de ejes equivalentes acumulados a lo largo de la vida útil. Para un millón o menos de ejes equivalentes tendrá un espesor mínimo de 20 cm. Cuando sea de un millón a diez millones de ejes equivalentes será un espesor mínimo de 30 cm.

Los materiales empleados en esta capa, cumplirán con los requisitos establecidos en la Tabla 1.3.

Característica	Valor
Tamaño máximo (mm)	76
Límite Líquido máximo (%)	40
Índice Plástico Máximo (%)	12
Valor Soporte California (CBR)	20

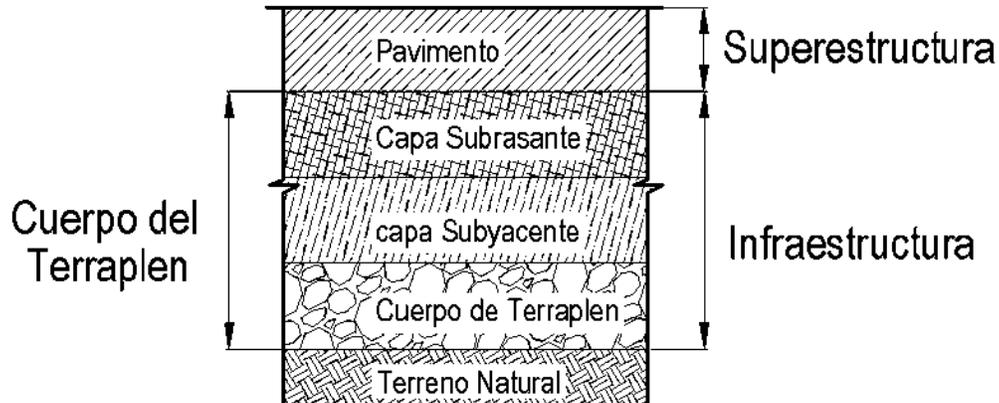
mínimo (%)	
Expansión máxima (%)	2
Compactación (%)	100 ± 2

3Tabla 1.3 Requisitos de calidad de materiales para subrasante

Esta capa es considerada como la cimentación del pavimento y en ocasiones puede estar constituida por el terreno natural, cuando este es de buena calidad, o bien, por un material seleccionado.

La parte superior de la capa subrasante coincide con la línea subrasante del proyecto geométrico, la cual debe cumplir con las especificaciones de pendiente longitudinal para la obra. Esta línea marca la altura para las terracerías y por lo tanto su espesor, que en ocasiones es mayor que el necesario en la estructura. En el proyecto geométrico de la subrasante económica es preciso tomar en cuenta:

- Las especificaciones de la pendiente longitudinal de la obra.
- Que la subrasante tenga la altura necesaria, para que la capilaridad del agua no afecte el pavimento.
- Que la subrasante presente los acarrees más económicos posibles.



3Figura 1.2 Sección geométrica tipo de una terracería en terraplén.

#### 1.4.2 Sub-base.

La subbase es la capa que se construye por debajo de la base y por encima de la subrasante. Su función es proporcionar a la base un cimiento uniforme y construir una adecuada plataforma de trabajo para su colocación y compactación. Esta capa puede no ser necesaria cuando la subrasante es de elevada capacidad de soporte.

Una de las funciones de esta capa es de carácter económico, debido a que se usa para disminuir el espesor de la base (material más costoso). Su función estructural es la de transmitir los esfuerzos de manera adecuada hacia la subrasante. Otra de sus funciones es de servir de transición entre el material de base más o menos grueso y la propia subrasante, generalmente formada por materiales más finos.

Es deseable que cumpla también una función drenante, para lo cual es imprescindible que los materiales utilizados carezcan de finos y en todo caso suele ser una capa de transición necesaria. Se emplean normalmente subbases granulares constituidas por materiales cribados o de trituración parcial, suelos estabilizados con cemento, etc.

Otra de sus funciones es la de disminuir las deformaciones, algunos cambios volumétricos de la capa subrasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de agua o cambios extremos de temperatura, pueden absorberse con la capa subbase, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.

Además debe cumplir con los requisitos de calidad mostrados en las siguientes tablas.

<b>Tabla 1.4 Requisitos de granulometría de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos</b>			
Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura (mm)	Designación	$\sum L \leq 10$ millones	$\sum L > 10$ millones
75	3"	100	100
50	2"	85 - 100	85 - 100
37.5	1 1/2"	75 - 100	75 - 100
25	1"	62 - 100	62 - 100
19	3/4"	54 - 100	54 - 100
9.5	3/8"	40 - 100	40 - 100
4.75	N° 4	30 - 100	30 - 80
2	N° 10	21 - 100	21 - 60
0.85	N° 20	13 - 92	13 - 45
0.425	N° 40	8 - 75	8 - 33
0.25	N° 60	5 - 60	5 - 26
0.15	N° 100	3 - 45	3 - 20
0.075	N° 200	0 - 25	0 - 15

4Tabla 1.4 Requisitos de granulometría de materiales para subbases

<b>Tabla 1.5 Requisitos de calidad de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos</b>	
Característica	Valor %

	$\Sigma L \leq 10$ millones	$\Sigma L > 10$ millones
Límite Líquido máximo	30	25
Índice plástico máximo	10	6
Valor de Soporte California (CBR) mínimo	50	60
Equivalente de arena mínimo	30	40
Desgaste de Los Ángeles máximo	50	40
Grado de compactación mínimo	100	100

5Tabla 1.5 Requisitos de calidad de los materiales para subbases

#### 1.4.3 Base.

Es la capa situada bajo la carpeta, es una capa de muy alta estabilidad y densidad. Su principal propósito es el de distribuir o repartir los esfuerzos creados por las cargas rodantes que actúan sobre la superficie de rodamiento para que los esfuerzos transmitidos a la subbase no sean tan grandes que den como resultado una deformación excesiva de la subrasante.

La base debe ser también de tales características que no sea dañada por la capilaridad del agua o por la acción de las heladas, ya sea que actúen en forma separada o conjunta. Desde el punto de vista económico la base permite reducir el espesor de la carpeta que es más costosa.

El material utilizado en la construcción de dicha capa, dependerá de los ejes equivalentes esperados durante la vida útil del pavimento, con base en lo siguiente:

- El material para la base hidráulica será 100% producto de trituración de roca sana, cuando el tránsito esperado sea mayor a 10 millones de ejes equivalentes.
- Cuando el tránsito sea de 1 a 10 millones de ejes equivalentes, el material contendrá como mínimo 75% de partículas producto de la trituración de roca sana.
- Si el tránsito esperado es menor a 1 millón de ejes equivalentes, el material deberá contener como mínimo 50% de partículas producto de la trituración de roca sana.

También deberán cumplir con los requisitos de calidad mostrados en las siguientes tablas.

<b>Tabla 1.6 Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos asfálticos</b>		
Característica	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10$ millones	$\Sigma L > 10$ millones
Límite Líquido máximo	25	25
Índice plástico máximo	6	6

Valor de Soporte California (CBR) mínimo	80	100
Equivalente de arena mínimo	40	50
Desgaste de Los Ángeles máximo	35	30
Partículas alargadas y lajeadas máximo	40	35
Grado de compactación mínimo	100	100

6Tabla 1.6 Requisitos de calidad de los materiales para bases

<b>Tabla 1.7 Requisitos de granulometría de los materiales para bases de pavimentos asfálticos</b>			
Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura (mm)	Designación	$\sum L \leq 10$ millones	$\sum L > 10$ millones
75	3"	100	100
50	2"	85 - 100	85 - 100
37.5	1 1/2"	75 - 100	75 - 100
25	1"	62 - 100	62 - 92
19	3/4"	54 - 100	54 - 83
9.5	3/8"	40 - 100	40 - 65
4.75	N° 4	30 - 80	30 - 50
2	N° 10	21- 60	21 - 36
0.85	N° 20	13- 44	13 - 25
0.425	N° 40	8 - 31	8 - 17
0.25	N° 60	5 - 23	5 - 12
0.15	N° 100	3 - 17	3 - 9
0.075	N° 200	0 - 10	0 - 5

7Tabla 1.7 Requisitos de granulometría de los materiales para bases

#### 1.4.4 Carpeta.

Es la capa que soporta directamente las solicitaciones del tránsito y aporta las características funcionales y estructurales, absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los verticales. En condiciones de alta intensidad del tránsito puede llegar a alcanzar espesores considerables.

Cuando se construye con mezcla asfáltica estas pueden ser hechas en frío o en caliente. Debe proporcionar una superficie de rodamiento cómoda y segura, con color y textura convenientes además de resistir los efectos abrasivos del tránsito. Debe ser una capa prácticamente impermeable, constituyendo una protección para la base.

### 1.5 DETERIORO Y TIPOS DE FALLAS EN LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES.

Considerando la importancia que tienen las carreteras dentro de la economía de un país, ya que los costes de transporte de viajeros y mercancías dependen en gran medida de los deterioros que presenten los pavimentos, es fundamental mantener las características de las carreteras de la mejor manera posible, para evitar elevar los costes de operación de los vehículos que transitan por ellas.

Las características iniciales de toda carretera ya sea de nueva construcción o después de una reparación, se van degradando con el paso del tiempo. Son diversos factores los que influyen y determinan este proceso de deterioro. Por una parte tenemos los factores relacionados directamente con las características del propio firme como pueden ser los espesores, los materiales utilizados en su fabricación y el proceso constructivo, los cuales podríamos considerar como los factores pasivos del proceso, y por otra parte tenemos los factores activos, verdaderos causantes del deterioro, que son el tránsito y los factores ambientales.

Los factores activos de deterioro son dos variables complejas y difíciles de definir, que dependen de un conjunto diverso de elementos, por una parte el tránsito está unido al número de ejes, a la carga por eje, a la velocidad de circulación de los vehículos, a la regularidad superficial de la carpeta, etc.

- Efectos del tránsito.

El efecto que provoca el tránsito sobre los pavimentos, constituye sin duda uno de los principales factores para el diseño.

En este sentido, nos deben de interesar las cargas más pesadas por eje, esperadas en el carril de proyecto y que generalmente es el más solicitado; debido a que éste determinará la estructura del pavimento. Sin embargo, en los casos de vialidades con carriles múltiples, podrá realizarse un diseño con estructuras y espesores diferentes, en función del tránsito asignado a cada carril.

Los ejes actúan sobre el pavimento transmitiendo un esfuerzo horizontal y otro vertical, lo cual se traduce en el tiempo en un deterioro de la carpeta que se manifiesta principalmente en los siguientes tipos de fallo:

- Fisuración por fatiga.
- Desprendimiento o pulimento del agregado.
- Deformaciones permanentes.
- Baches y peladuras.

La repetición de cargas y la acumulación de sus efectos sobre los pavimentos, como la fatiga o la deformación permanente, son fundamentales para el cálculo del dimensionamiento de sus capas. Por otro lado, se deben tomar en cuenta las máximas presiones de contacto, las sollicitaciones tangenciales en tramos especiales, como son curvas, zonas de frenado y aceleración, entre otros; las velocidades de aplicaciones, en particular, las lentas en rampas y zonas de estacionamiento de vehículos pesados.

- Efectos del medio ambiente

Por otra parte, los factores ambientales someten a las carpetas de carreteras a una serie de agresiones externas que afectan la durabilidad de la mezcla, tal es el caso de la radiación solar, las variaciones diarias y estacionales de la temperatura, la oxidación del asfalto a consecuencia del aire y el agua, las heladas y las sales fundentes empleadas contra las mismas, el derrame de aceites y combustibles, entre otros factores.

En el diseño de la propia estructura de los pavimentos es de suma importancia el comportamiento bajo los efectos de temperatura y humedad. Por lo que se deben considerar las temperaturas extremas diarias y estacionales, así como el régimen e intensidad de las precipitaciones pluviales, aspectos que además influyen durante el proceso constructivo.

El agua afecta a los materiales que conforman los pavimentos en distintas formas, modificando o alterando algunas de sus propiedades: resistencia al esfuerzo cortante, cohesión, expansión-contracción, erosión, grado de compactación, corrosión, envejecimiento de los asfaltos, adherencia entre agregado y asfalto y efectos de congelamiento.

Estos efectos no siempre son tomados en cuenta en el dimensionamiento y conservación de los firmes, pero su efecto puede tener especial importancia en su deterioro ya que ayudan a que se presenten problemas como:

- El desgaste de las mezclas asfálticas.
- La fisuración por esfuerzos térmicos.
- La fisuración y degradación superficial por efecto de las bajas temperaturas.
- La pérdida de capacidad de carga de las terracerías en épocas de deshielo o lluvias.

Las vías terrestres se proyectan y se construyen para que estén en servicio por un determinado número de años, llamado horizonte de proyecto de la obra. Al concluir este tiempo los caminos, se abandonan o se rescatan y reconstruyen con el objeto de aumentar el servicio por más tiempo, que es generalmente lo que sucede.

Cuando una obra vial se pone en servicio, debe presentar las condiciones óptimas para su operación, al transcurrir el tiempo, se deteriora por el uso, dificultándose así cada vez más la circulación del tránsito. Los deterioros pueden ser pequeños al principio, pero más adelante probablemente sean más serios y aceleren la falla del pavimento; por esto, una carretera requiere mantenimiento, conservación y rehabilitación oportuna, para que cumpla con su vida de proyecto, proporcione un servicio adecuado y no presente una falla prematura.

Es necesario un análisis cuidadoso para seleccionar el método y los materiales adecuados para la reparación de los pavimentos asfálticos. Ambos factores deben

ser considerados de acuerdo con las características del lugar, aunque en principio los trabajos de mantenimiento de pavimentos asfálticos siguen una misma secuencia. El primer paso para proceder a la reparación es el de determinar la causa de la falla, para poder atacar el problema desde lo más profundo.

Las fallas en el pavimento pueden ser, estructurales y funcionales, según los parámetros existentes para definirlos.

*Falla estructural.* Implica una destrucción de la estructura del pavimento o de uno o más de sus componentes, lo que los hace incapaces de soportar las cargas impuestas en su superficie por el tránsito y, en general se debe a que el tránsito que ha soportado la estructura es mayor al que se calculó para su vida útil; si este es el caso, la estructura cumplió con su finalidad. Aunque en otras ocasiones, la falla estructural se presente de forma prematura, es decir, mucho antes de terminar su periodo de vida útil, entonces la falla se debe a una mala estructuración del pavimento, materiales deficientes o un mal drenaje, entre otras causas.

Teniendo en cuenta que un pavimento es una estructura con cierta capacidad para absorber como energía elástica potencial el trabajo de deformación impuesto por cada carga circulante durante su vida útil; retirada la carga, dicha energía es la determinante de la recuperación elástica o cuasi elástica de las deformaciones producidas, la que será tanto más completa cuanto menor relajación de la energía elástica se ha producido durante el tiempo que ha actuado la carga. La falla de la estructura se deriva de dos causas fundamentales:

1. Si la capacidad mencionada es excedida más allá del valor que determinan las deformaciones recuperables por la elasticidad instantánea y retardada, se desarrollan deformaciones permanentes en cada aplicación de las cargas, las que se acumulan modificando los perfiles de la calzada hasta valores que resultan intolerables para la comodidad, seguridad y rapidez del tránsito y aún pueden provocar el colapso de la estructura.
2. Si la capacidad mencionada no es excedida pero las deformaciones recuperables son elevadas, los materiales y en particular las capas asfálticas sufren el fenómeno denominado fatiga cuando el número de aplicaciones de las cargas pesadas es elevado, que se traduce en reducción de sus características mecánicas. En este caso la deformación horizontal por tracción en la parte inferior de las capas asfálticas al flexionar la estructura, puede exceder el límite crítico y se llega a la iniciación del proceso de fisuramiento.

*Falla funcional.* Es aquella que tienen los caminos cuando las deformaciones superficiales son mayores que las tolerables, causando esfuerzos sobre vehículos y provocando ciertas incomodidades al tránsito, depende del tipo de camino del cual se trate, pues se puede tener una superficie de rodamiento con

deformaciones que son aceptables para caminos secundarios; pero inconvenientes para caminos de altas especificaciones.

El índice de servicio está ligado a este concepto de falla funcional. Este índice se estima con base en función del estado físico de la superficie de rodamiento, que el técnico califica de acuerdo a la cantidad de baches, deformaciones y grietas que presenta el camino o bien de acuerdo a la opinión de los usuarios.

El índice de servicio se otorga en escala de 1 a 5; en caminos de primer orden, se requiere que este valor sea como mínimo de 2.5 a 3 para estar en condiciones aceptables, pero en las que ya conviene reacondicionarlos; para caminos secundarios, estas condiciones se tienen con una calificación de 2.

#### *1.5.1 Deterioro de los Pavimentos Flexibles.*

Una carretera es una estructura diseñada para soportar las cargas del tránsito. En realidad las cargas, representadas principalmente por las ruedas de los vehículos pesados, circulan generalmente por unas zonas determinadas de la calzada, denominadas rodadas, y solo eventualmente abandonan estas zonas para realizar adelantamientos u otras maniobras esporádicas como las propias entradas o salidas de la carretera.

Este hecho que probablemente no es de gran utilidad para reducir la estructura del pavimento, si lo es para analizar las degradaciones que se producen en la carretera.

Parece obvio que las degradaciones situadas en esas zonas de las rodadas, son debidas a las cargas del tránsito, mientras que las situadas en otras zonas, difícilmente pueden ser atribuibles a dichas cargas sino a otros problemas de la carretera en sí.

Si se presentara el caso contrario de que una degradación no debida al tránsito se exhibiera en la zona de rodada; en este caso, el efecto del tránsito hará que el deterioro de esa degradación sea mucho más rápido que si la degradación no estuviera situada en dicha zona.

Existen una serie de deterioros en los pavimentos asfálticos que se relacionan con una disminución apreciable de las características iniciales y que pueden afectar la capacidad estructural del pavimento, la mayoría de ellos se presentan en forma de fisuras o de deformaciones permanentes y por lo general suelen afectar a más de una capa del pavimento.

##### *1.5.1.1 La Fisuración.*

La fisuración no implica en un principio un problema para el usuario. Este no nota que una carretera está fisurada hasta que su estado supone un deterioro tal que la superficie de la carretera se hace incómoda para la circulación por sí misma.

Esto significa una gran posibilidad para que el agua, gran enemigo de las carreteras, penetre hasta las capas inferiores afectando a la capacidad portante del pavimento y afectando su comportamiento futuro.

Permite la intrusión de elementos duros e incompresibles, cuando está abierta por las deformaciones térmicas, que hacen que, al cerrarse la fisura por una bajada de las temperaturas, se produzcan tensiones entre los bordes de la fisura y los materiales incompresibles que llegan a romper dichos bordes.

Se crea una discontinuidad en el pavimento que empeora la distribución de tensiones en la zona. Es sobradamente conocido que una carga en el borde de una losa produce solicitaciones mayores que una carga interior. Por ello la aparición de una fisura supone que existe un borde más en la losa y que las tensiones debidas al tránsito se multiplican más en la zona.

Pero lo más importante de una fisura es que refleja una enfermedad del pavimento. Esta enfermedad debe diagnosticarse y corregirse, de una forma adecuada, de manera que no ponga en peligro la vida de la carretera.

#### *1.5.1.2 Deformación en la Superficie de la Carretera.*

Otro factor que se debe considerar al interpretar las degradaciones de una carretera es el de observar si la superficie de la misma mantiene su regularidad transversal o no.

La existencia de hundimientos en la carretera es índice de que las capas granulares no son capaces de soportar las cargas del tránsito sin deformarse, ya que es muy difícil que un hundimiento apreciable pueda deberse a las capas de la mezcla asfáltica generalmente de menor espesor. Por ello, al ver una carretera degradada, si mantiene la regularidad superficial, se puede pensar que el problema reside en las capas superiores, mientras que si la carretera está deformada, las sospechas deben de recaer en las capas inferiores del pavimento.

Un caso aparte es el de las roderas de las carreteras. El principal análisis que se debe de realizar es determinar si la degradación realmente corresponde al problema denominado roderas o si, por el contrario, corresponde al hundimiento de la rodada.

En el primer caso, el problema está relacionado a la capa de mezcla asfáltica que forma la capa de rodadura del pavimento. Esta capa, con un diseño o una compactación inadecuada, sufre deformaciones fuertes con el tránsito canalizado, lo que, unido al comportamiento más plástico de la mezcla con temperaturas más altas, hace que se produzca un desplazamiento del material de la zona de rodada a las zonas laterales, formándose un cordón de material desplazado característico, a los lados de la zona de rodada.

Otro problema distinto es el que se presenta cuando la capas granulares del pavimento o la subrasante, no poseen la capacidad de carga necesaria para

soportar las cargas del tránsito. Esto provoca un hundimiento en la zonas de las rodadas, que es donde se producen las deformaciones verticales mayores en las capas granulares. Este hundimiento no lleva consigo la aparición de cordones laterales en los exteriores de la zona hundida, y si probablemente la fisuración en la zona, debido a que la mezcla asfáltica suele ser mucho más rígida en este caso que en el caso señalado anteriormente de deformación plástica de la mezcla asfáltica.

Como puede verse es necesario observar detalladamente una degradación de este tipo para conocer cuál de los dos casos se está presentando e identificar por lo tanto la capa origen de los problemas.

#### *1.5.2 Tipos de deterioros en los Pavimentos Flexibles.*

Los daños que se presentan en la estructura de un pavimento se pueden clasificar en cuatro categorías, además dentro de cada categoría existen diferentes tipos de deterioros que se originan por diversos factores, a continuación se presenta una descripción de cada uno de estos daños.

##### *1.- Fisuras.*

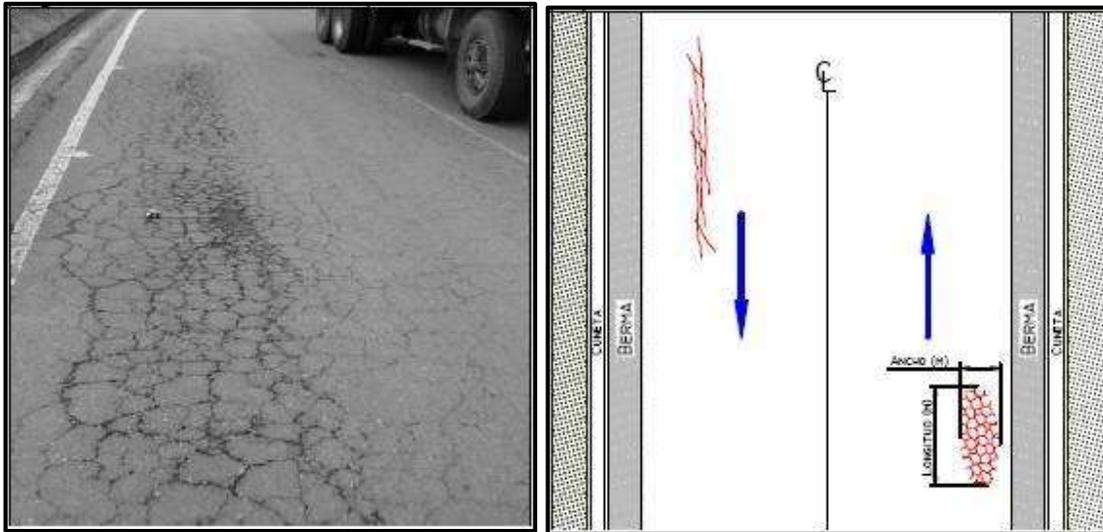
- Piel de cocodrilo.

Corresponde a una serie de fisuras interconectadas con patrones irregulares, generalmente localizadas en zonas sujetas a repeticiones de carga. La fisuración tiende a iniciarse en el fondo de las capas asfálticas, donde los esfuerzos de tracción son mayores bajo la acción de las cargas; se propagan a la superficie inicialmente como una o más fisuras longitudinales paralelas. Ante la repetición de cargas de tránsito, las fisuras se propagan formando piezas angulares que desarrollan un modelo parecido a la piel de cocodrilo.

La fisuración en forma de piel de cocodrilo puede ser originada por un dimensionamiento insuficiente del pavimento o simplemente por haberse producido un despegue de la capa superior de mezcla asfáltica, por una mala puesta en obra del riego de adherencia.

En el primer caso en el que se presenta en el conjunto de la estructura, además del deficiente dimensionamiento, influyen otros mecanismos como por ejemplo problemas de drenaje que afectan los materiales granulares, falta de compactación de las capas, subrasantes expansivas, entre otras.

En el caso en el que la mezcla asfáltica se despegue, esta tiene que trabajar de forma independiente del resto, por lo que llega a la fatiga, aunque el resto del pavimento se encuentre en buen estado y con una capacidad de carga elevada.



4Figura 1.3 Fisuración en piel de cocodrilo (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

Este fenómeno puede de forma progresiva o no, cuando se presenta, terminar en destrucciones del pavimento, que comienzan por desprendimiento de la carpeta en lugares localizados y en la rápida degradación de los materiales granulares expuestos.

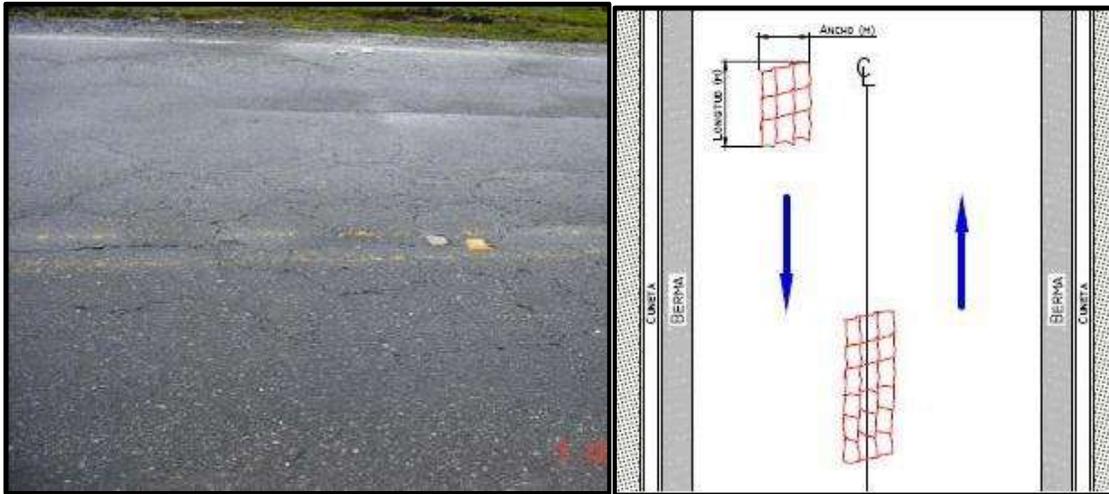
Es de suma importancia determinar, en el caso de que la fisuración venga originada por fatiga del pavimento en general, si la degradación está muy extendida o si es solo local para determinar si es un problema generalizado o simplemente puntual que puede arreglarse con un buen saneo de las zonas afectadas.

Al estudiar este tipo de agrietamientos resulta muy importante determinar si se trata el caso de un fenómeno evolutivo; en general, los procesos de fisuración asociados a envejecimiento y fatiga de las capas asfálticas progresan de forma muy lenta, en cambio son muy rápidas las evoluciones relacionadas a deficiencia estructural o exceso de agua.

- Fisuras en bloque

También es debida a la fatiga pero con una apertura de malla formada por la fisuración más amplia que en el caso anterior, con tamaños de bloques por encima de 25 por 25 centímetros.

Este deterioro difiere de la piel de cocodrilo en que esta última aparece en áreas sometidas a cargas, mientras que los bloques aparecen usualmente en áreas no cargadas. Sin embargo, es usual encontrar bloques que han evolucionado en piel de cocodrilo por acción del tránsito. Por otra parte, la piel de cocodrilo generalmente está formada por bloques con más lados y ángulos agudos

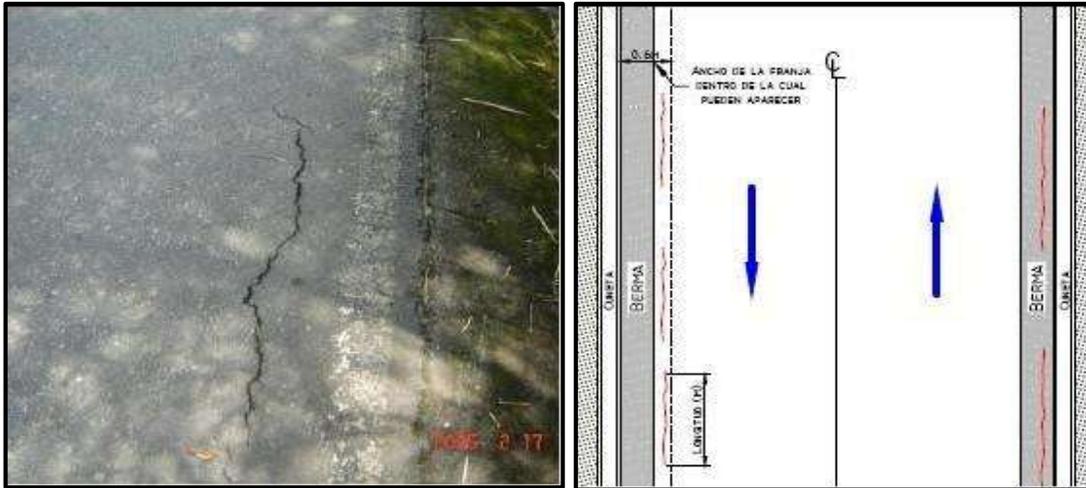


5Figura 1.4 Fisuración en bloque (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

- Fisuras de borde.

Corresponden a fisuras con tendencia longitudinal a semicircular localizadas cerca del borde de la calzada, se presenta principalmente por la ausencia de acotamiento, por la diferencia de nivel entre la calzada y el acotamiento, por la insuficiencia del acotamiento de soportar las tensiones producidas por el tránsito en la calzada o cuando el drenaje es deficiente y el acotamiento presenta un exceso de humedad.

La principal causa de este deterioro es la falta de confinamiento lateral de la estructura debido a la carencia de bordillos, anchos de acotamientos insuficientes o sobrecarpetas que lleguen hasta el borde del carril y quedan en desnivel con el acotamiento; en estos casos la fisura es generada cuando el tránsito circula muy cerca del borde. Las fisuras que aparezcan por esta causa generalmente se encuentran a distancias entre 0.3 a 0.6 metros del borde de la calzada.



6Figura 1.5 Fisuración de borde (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

- Fisuras Longitudinales.

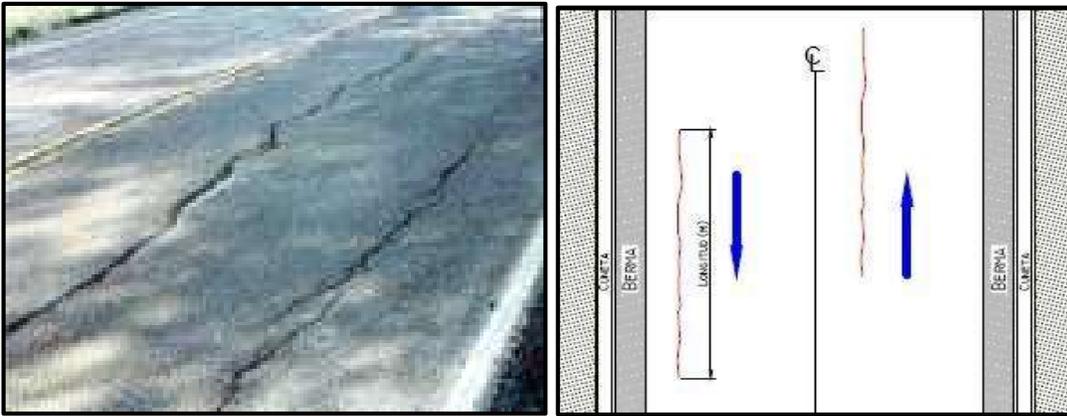
La importancia y el origen de una fisura longitudinal en la carretera, dependerá de su situación relativa dentro de la calzada.

De hecho, una parte apreciable de las fisuras longitudinales en una carretera situada fuera de las zonas de rodadas, tiene su origen en causas diferentes al agotamiento del pavimento por causas de las cargas del tránsito.

Las juntas originadas por juntas de trabajo mal realizadas o por falta de adherencia entre capas antes de compactar la capa superior, son bastantes frecuentes en las carreteras. También son frecuentes en pavimentos semirígidos las fisuras longitudinales de retracción formadas en las capas inferiores cementadas y reflejadas en la superficie del pavimento.

En el caso de las fisuras longitudinales situadas en la zona de la rodada, su origen puede ser debido a la falta de capacidad de carga del pavimento, como paso inicial a la fisuración de piel de cocodrilo. Agrietamientos como este pueden deberse a movimientos de las capas del pavimento que tienen lugar predominante en dirección horizontal, este fenómeno se puede presentar en la base, subbase o en la subrasante.

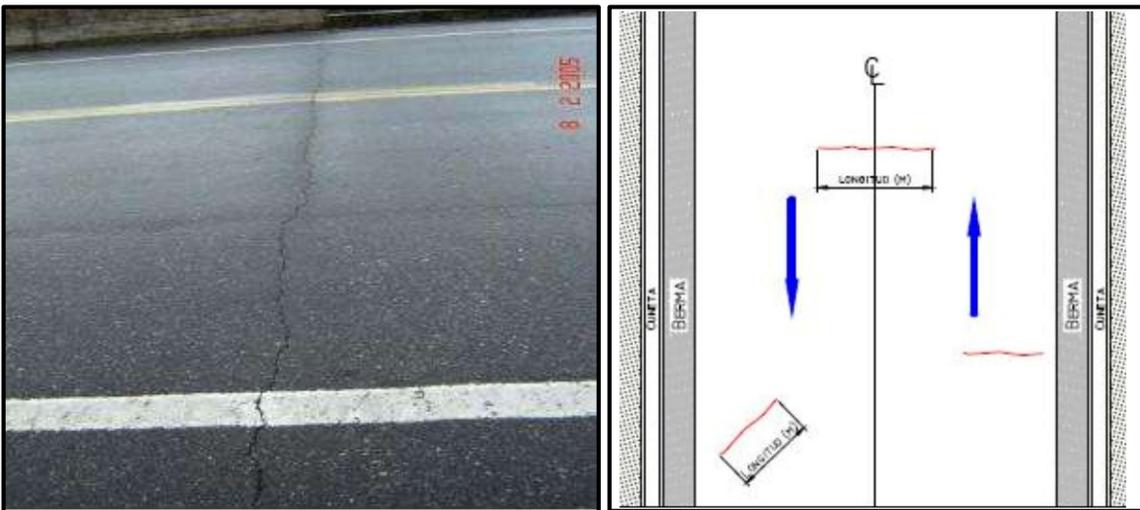
Las fisuras longitudinales tienen un desarrollo en su deterioro, que comienza con ramificaciones, pérdida del material del borde de la fisura y formación de fisuras secundarias cerca de la principal.



7Figura 1.6 Fisuración Longitudinal (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

- Fisuras transversales

Las fisuras transversales pueden ser originadas por el tránsito o por otro tipo de causas, principalmente por asiento de terraplenes, por la diferencia de rigidez de la subrasante entre las zonas de contacto entre corte y terraplén, por fisuración térmica, por el reflejo de las fisuras de capas profundas cementadas, por defectos de extendido, etc.



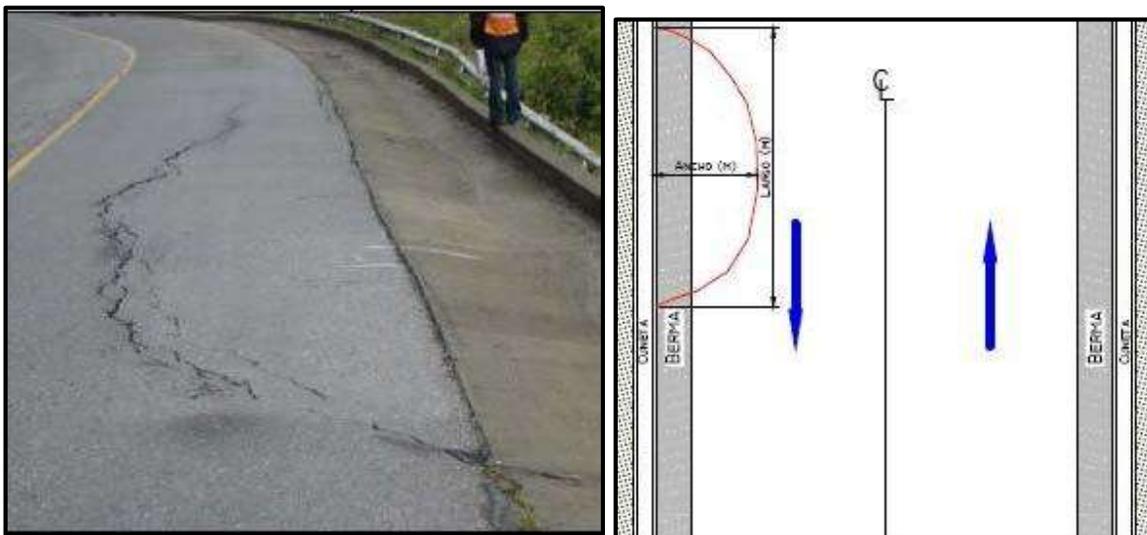
8Figura 1.7 Fisuración transversal (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

- Fisuración en media luna.

Son fisuras de forma parabólica asociadas al movimiento del terraplén por lo que usualmente se encuentran acompañadas de hundimientos.

En el caso de presentarse un asiento importante en el terreno subyacente o un círculo de rotura que pase por la calzada, es posible que aparezcan fisuras de una gran curvatura. En este caso, se suele apreciar una diferencia de altura, generalmente ligera, entre un labio de la fisura y el otro.

En general, este tipo de fisuras se presentan por inestabilidad del terraplén o por efectos locales de desecación, aunque entre otras causas se pueden mencionar las siguientes: falla lateral de talud en zonas de terraplén, falla de talud en zonas de corte a media ladera, ausencia o falla de obras de contención de la estructura, entre otros.



9Figura 1.8 Fisuración en media luna (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

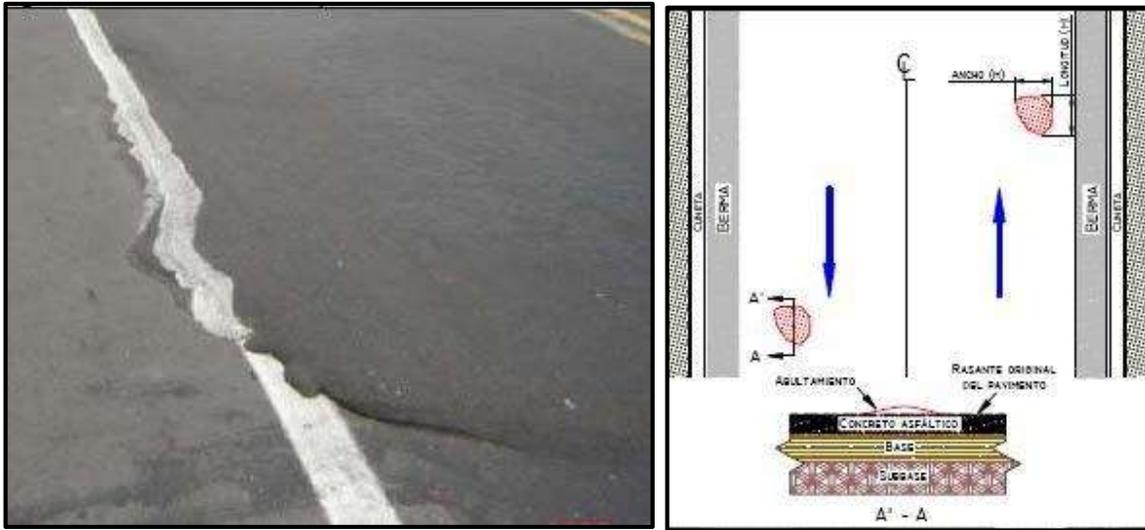
## 2.- Deformaciones.

- Ondulaciones

También conocidas como corrugaciones o rizado, es un daño caracterizado por la presencia de ondas en la superficie del pavimento, generalmente perpendiculares a la dirección del tránsito, con longitudes entre crestas generalmente menores que 1.0 metro.

Las ondulaciones son una deformación plástica de la capa asfáltica, debido generalmente a una pérdida de estabilidad de la mezcla en climas cálidos por una mala dosificación de asfalto, uso de ligantes blandos o agregados redondeados.





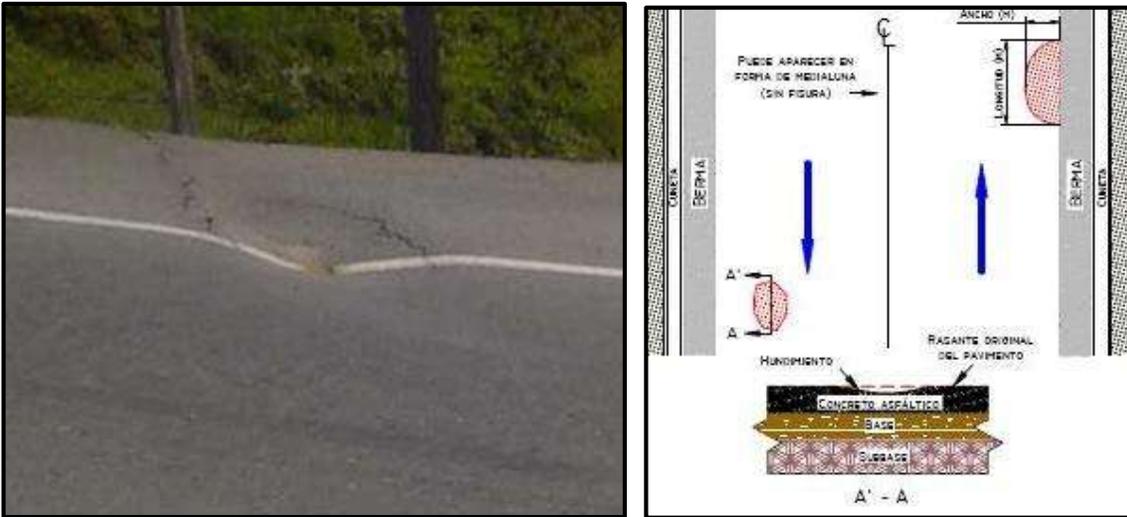
11Figura 1.10 Deformaciones por abultamiento (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

Se genera principalmente por la expansión de la subrasante o en capas de concreto asfáltico colocado sobre placas de concreto rígido, el cual se forma al existir bajo la capa asfáltica.

- Hundimiento

Los hundimientos corresponden a depresiones localizadas en el pavimento con respecto al nivel de la rasante.

Este tipo de daño puede generar problemas de seguridad a los vehículos, especialmente cuando contienen agua pues se puede producir hidroplaneo. Los hundimientos pueden estar orientados de forma longitudinal o transversal al eje de la vía, o pueden tener forma de media luna.



12Fgirua 1.11 Deformaciones por hundimiento (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

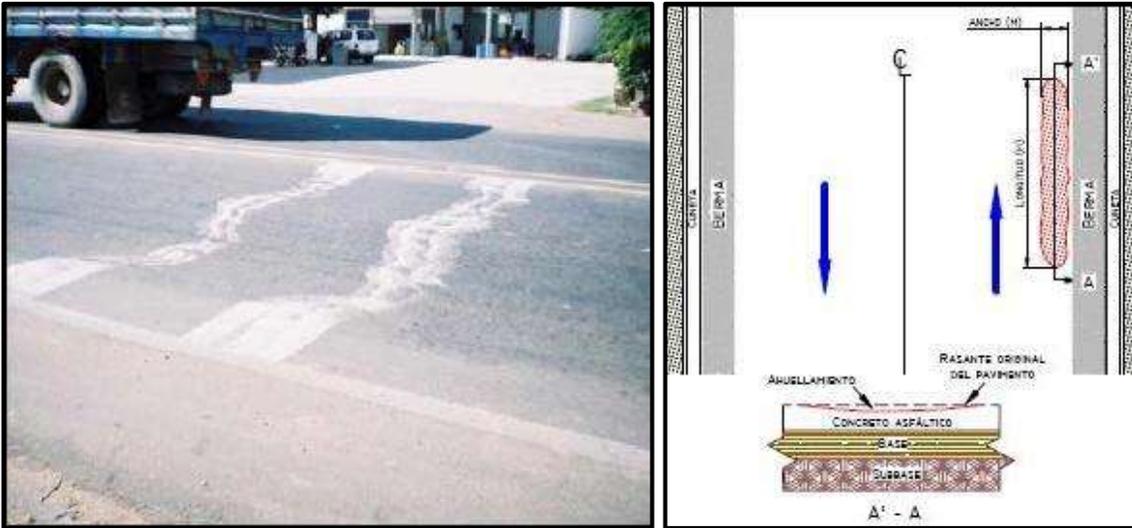
Existen diversas causas que producen hundimientos las cuales están asociadas con problemas que en general afectan a toda la estructura del pavimento, algunas de estas son: asentamiento de la subrasante; deficiencia de compactación de las capas inferiores del pavimento, del terraplén o en zonas de acceso a obras de arte o puentes; deficiencias de drenaje que afectan los materiales granulares; deficiencias de compactación de rellenos de zanjas que atraviesan la calzada; entre otras.

- Ahuellamiento o roderas

El Ahuellamiento es una depresión de la zona localizada sobre la trayectoria de las llantas de los vehículos. Con frecuencia se encuentra acompañada de una elevación de las zonas adyacentes a la zona deprimida y de fisuración.

Un Ahuellamiento significativo puede llevar a la falla estructural del pavimento y posibilitar el fenómeno de hidropilano por almacenamiento de agua.

El Ahuellamiento ocurre principalmente debido a una deformación permanente de algunas de las capas del pavimento o de la subrasante, generada por deformación plástica de la capa asfáltica o por deformación de la subrasante debido a las constantes repeticiones de carga del tránsito.



13Figura 1.12 Deformaciones por ahuellamiento (fuente. Ministerio de transporte de Colombia)

La deformación plástica de la mezcla asfáltica tiende a aumentar en climas cálidos y también puede darse por una inadecuada compactación de las capas durante la construcción, por el uso de asfaltos blandos o agregados redondeados.

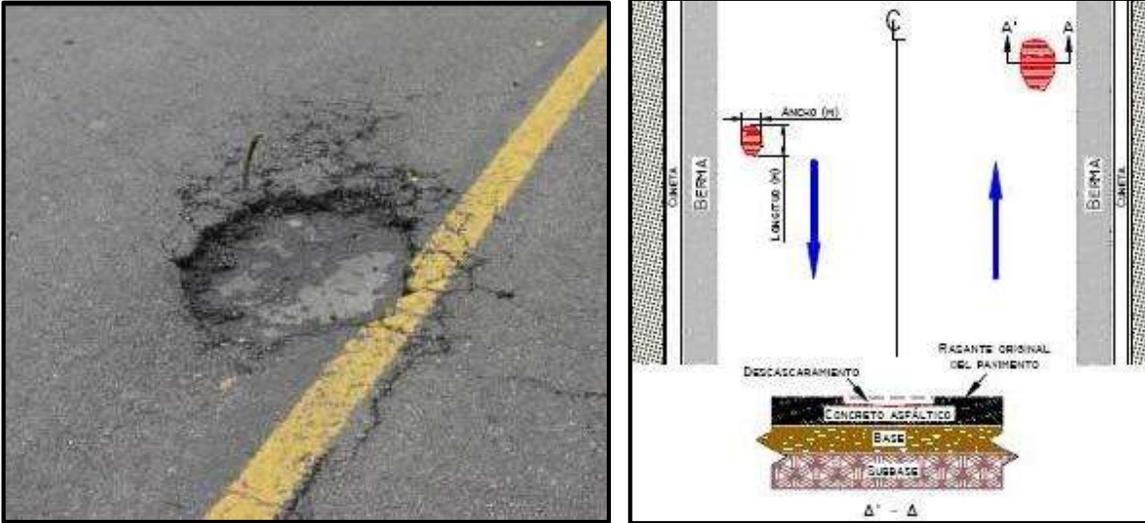
Además, la falla estructural del pavimento puede manifestarse con daños de este tipo debido a una deficiencia de diseño, la cual se manifiesta cuando la vía está sometida a cargas de tránsito muy altas.

### 3.- Pérdida de las capas de la estructura.

- Descascaramiento.

Este deterioro corresponde al desprendimiento de las capas asfálticas de rodadura, sin llegar a afectar las capas asfálticas superiores.

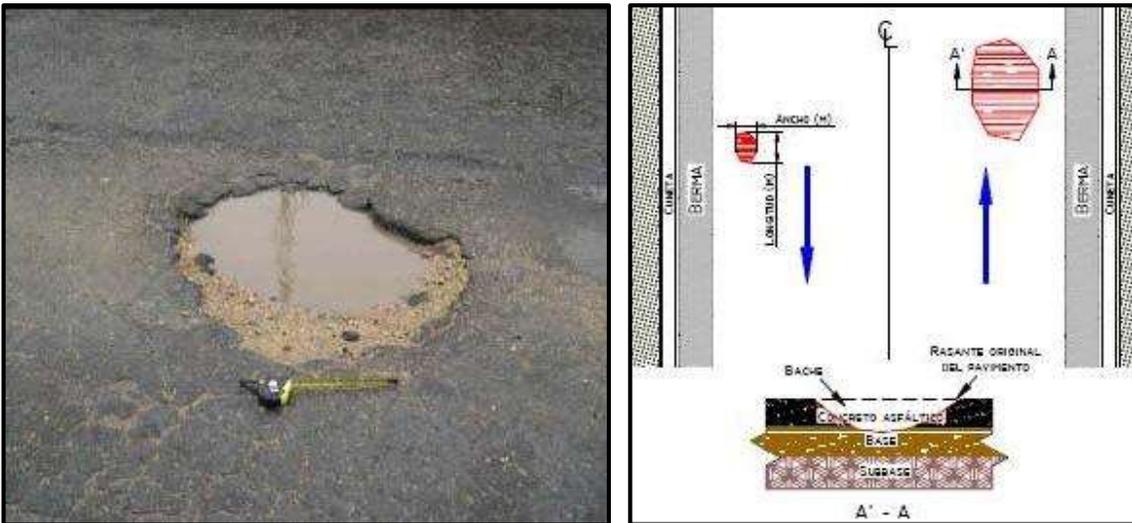
Algunas de las causas principales de este daño son: limpieza insuficiente previa a tratamientos superficiales, espesor insuficiente de las capas asfálticas de rodadura, riego de liga deficiente, mezcla asfáltica muy permeable, entre otros.



14Figura 1.13 Descascaramiento (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

- Baches.

Los baches son una desintegración total de la carpeta asfáltica que deja expuestos los materiales granulares lo cual lleva al aumento de área afectada y al aumento de la profundidad debido a la acción del tránsito. Dentro de este tipo de deterioro se encuentran los conocidos como ojos de pescado, que corresponden a baches de forma redondeada y profundidad variable, con bordes bien definidos que resultan de una deficiencia localizada en las capas estructurales.



15Figura 1.14 Bache en una carretera (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

Este tipo de deterioro puede presentarse por la retención de agua en las zonas fisuradas que ante la acción del tránsito produce reducción de esfuerzos efectivos

generando las deformaciones y las fallas del pavimento. Este deterioro ocurre siempre como evolución de otros daños, especialmente la piel de cocodrilo.

También es consecuencia de algún defecto constructivo o de una deficiencia de espesores de capas estructurales. Puede producirse también en zonas donde el pavimento o la subrasante son débiles.

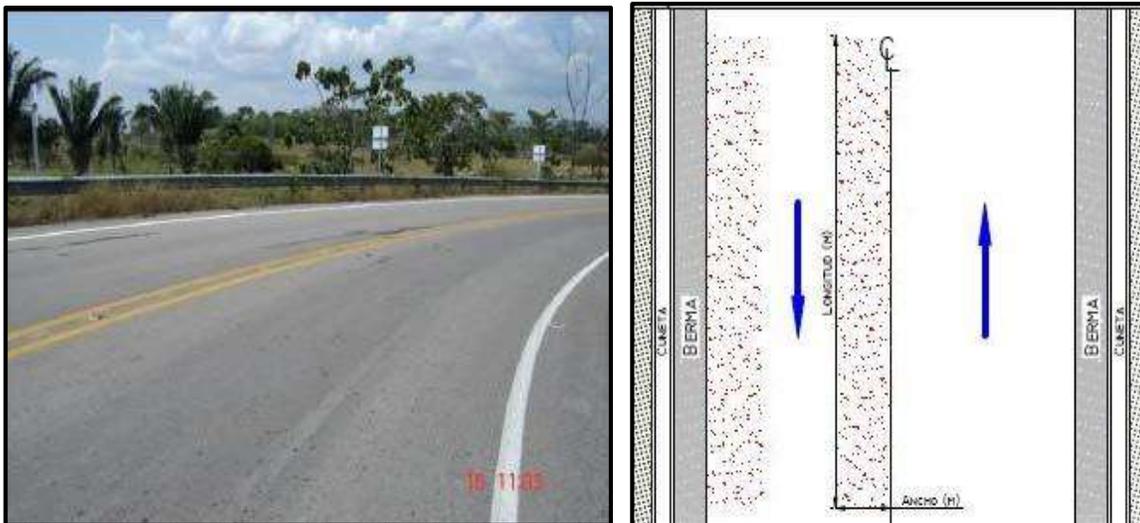
Los baches son inaceptables en una red de carreteras donde se quiere dar al usuario un nivel mínimo de funcionalidad. Además son zonas donde se debe de actuar de inmediato ya que son fuente de entrada importante de agua y de discontinuidad estructural del pavimento.

La gravedad del bache es en función de la profundidad del mismo que de su extensión, aunque ambos parámetros son de importancia para el usuario.

#### 4.- Daños superficiales y otros daños.

- Desgaste superficial.

Corresponde al deterioro del pavimento ocasionado principalmente por acción del tránsito, agentes abrasivos o erosivos. Se presenta como pérdida de ligante y mortero. Suele encontrarse en zonas por donde circulan los vehículos; este daño provoca aceleración del deterioro del pavimento por acción del medio ambiente y del tránsito.



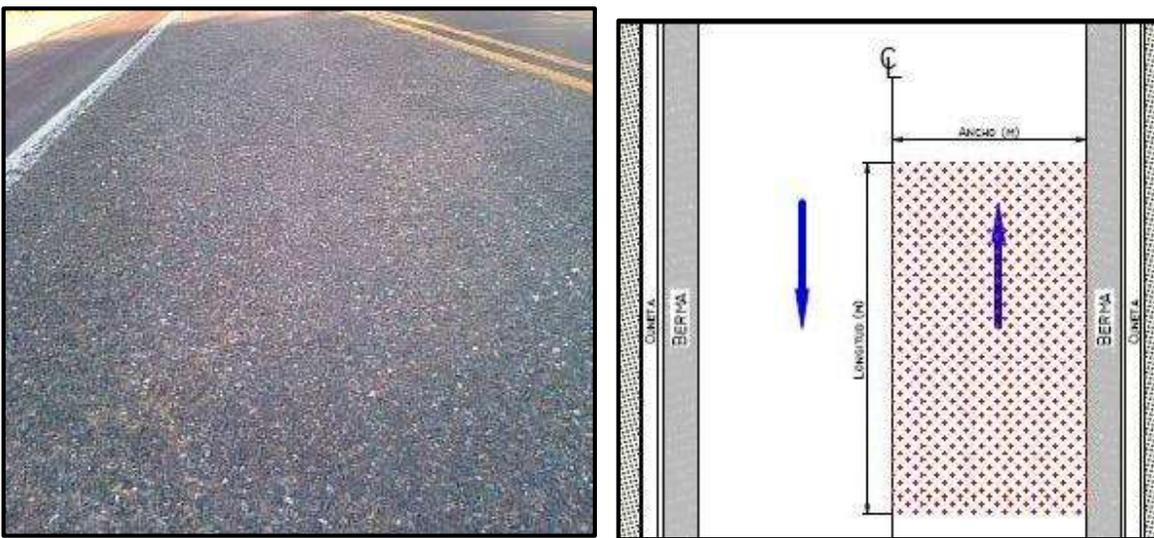
16Figura 1.15 Desgaste superficial de una carretera (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

El desgaste superficial generalmente es un deterioro natural del pavimento, aunque si se presenta con severidades medias a altas a edades tempranas puede estar asociado a un envejecimiento significativo del asfalto.

Puede generarse también por las siguientes causas: falta de adherencia del asfalto con los agregados, deficiente dosificación del asfalto en la mezcla, acción intensa de agua u otros agentes abrasivos además del tránsito, entre otros.

- Pérdida del agregado.

Conocida también como desintegración, corresponde a la disgregación superficial de la capa de rodadura debido a una pérdida gradual de agregados, haciendo la superficie más rugosa y exponiendo de forma progresiva los materiales a la acción del tránsito y los agentes climáticos. Este tipo de daño es común en tratamientos superficiales, caso en el que pueden aparecer estrías en la dirección del riego.



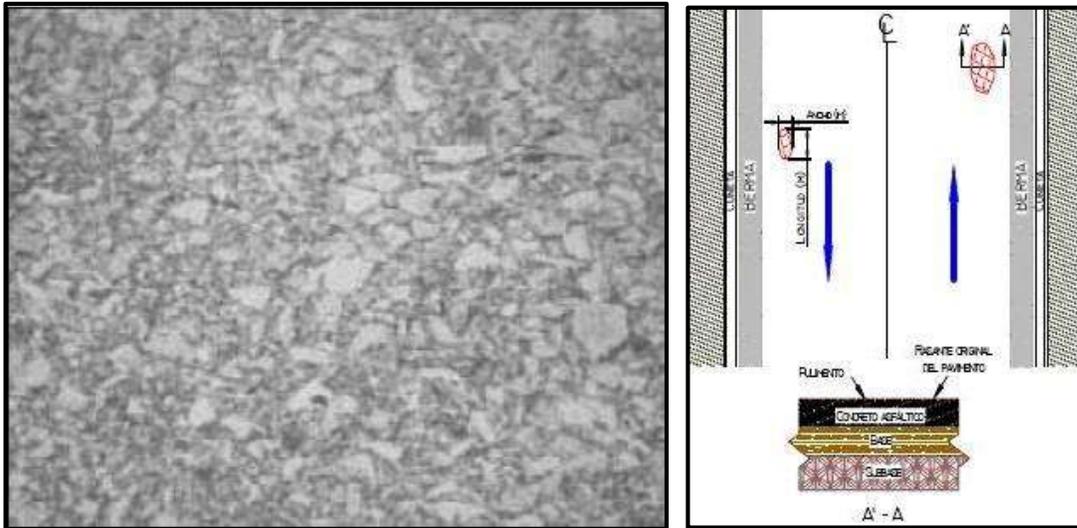
17Figura 1.16 Pérdida del agregado (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

Algunas de las causas de este deterioro son: aplicación irregular del ligante en tratamientos superficiales, problemas de adherencia entre ligante y agregado, uso de agregados contaminados con finos o agregados muy sobresalientes, lluvia durante la aplicación o el fraguado del ligante asfáltico, endurecimiento significativo del asfalto, contaminación de la capa de rodadura con aceite, gasolina u otros.

- Pulimento del agregado.

Este deterioro se evidencia por la presencia de agregados con caras planas en la superficie o por la ausencia de agregados angulares, en ambos casos se puede llegar a afectar la resistencia al deslizamiento.

La causa de este daño radica principalmente en una baja resistencia o susceptibilidad de algunos agregados al pulimento.

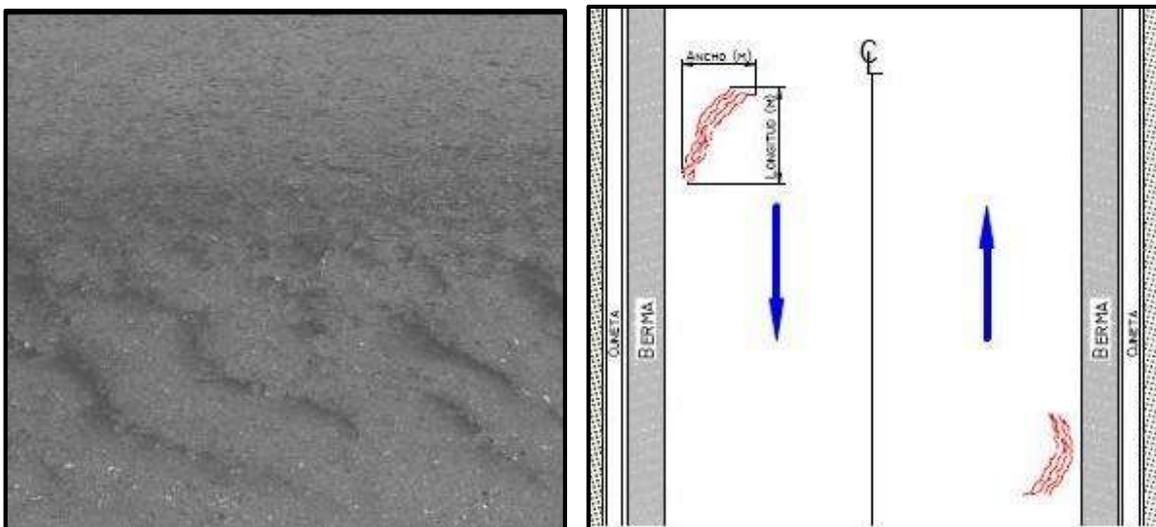


18 Figura 1.17 Pulimento del agregado (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

- Exudación.

Este tipo de daño se presenta con una película o afloramiento de ligante asfáltico sobre la superficie del pavimento generalmente brillante, resbaladiza y usualmente pegajosa. Este es un proceso que puede llegar a afectar la resistencia al deslizamiento.

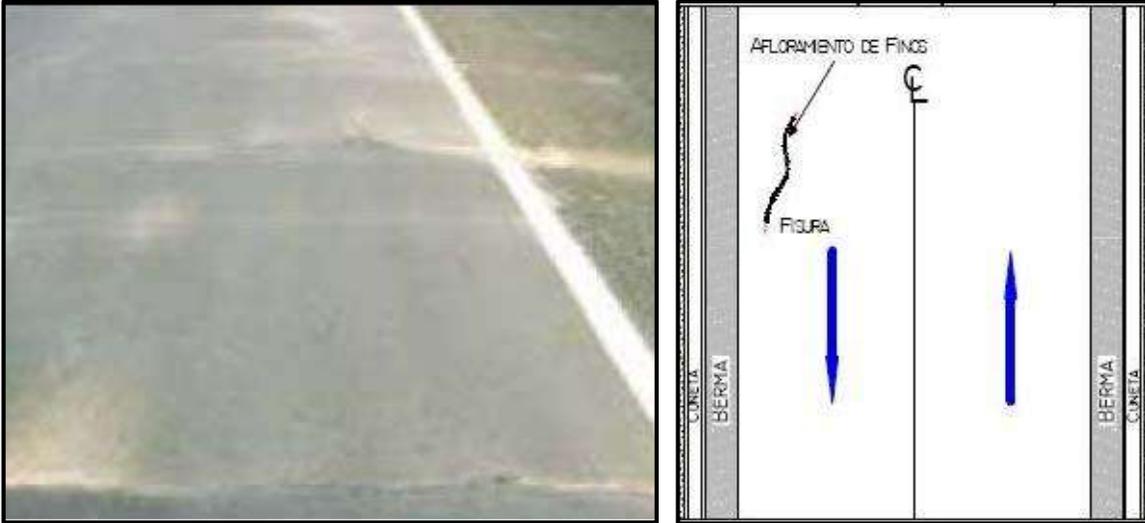
La exudación se genera cuando la mezcla tiene cantidades excesivas de asfalto haciendo que el contenido de vacíos con aire de la mezcla sea bajo; ocurre generalmente en épocas o en zonas calurosas. También puede darse por el uso de asfaltos muy blandos o por derrame de ciertos solventes.



19 Figura 1.18 Exudación de una capa asfáltica (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

- Afloramiento de finos.

Este afloramiento corresponde a la salida de agua infiltrada, junto con materiales finos de la capa base por las grietas, cuando circulan sobre ellas las cargas del tránsito. La presencia de manchas o de material acumulado en la superficie cercana al borde de las grietas indica la existencia del fenómeno. Se encuentra principalmente en pavimentos semi-rígidos.



20 Figura 1.19 Afloramiento de finos (fuente: Ministerio de transporte de Colombia)

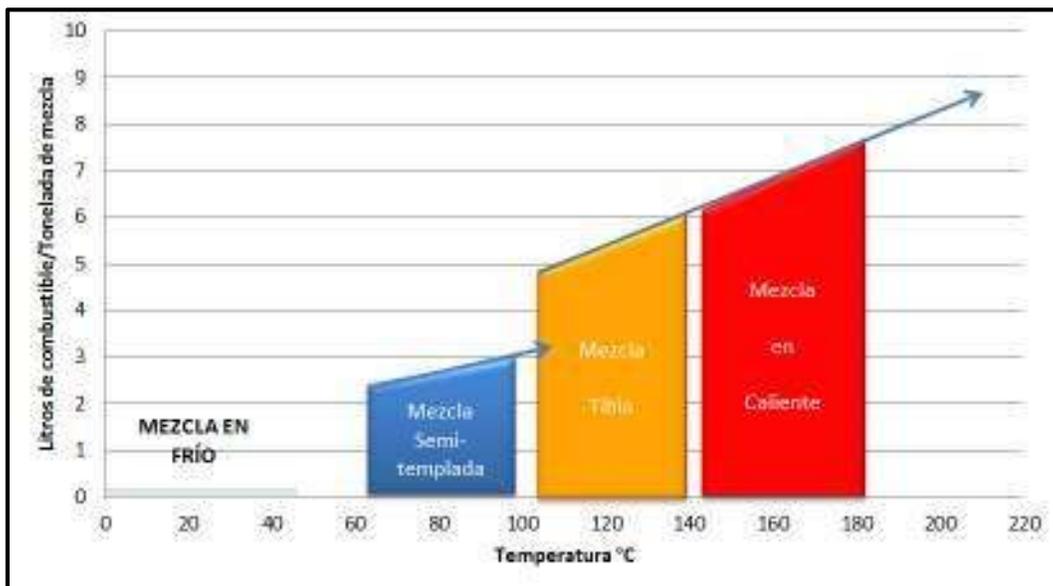
Algunas de las causas de este fenómeno son: ausencia o inadecuado sistema de subdrenaje, exceso de finos en la estructura, entre otros.

## CAPÍTULO 2 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO.

En México, las mezclas asfálticas con emulsión se utilizan desde la década de los 60's. Tradicionalmente se usaron para caminos de mediano y bajo tránsito y tuvieron un gran auge en los 90's. Sin embargo su uso disminuyó considerablemente en la última década, ya que en muchos casos no se obtenían los resultados esperados, por factores como el uso de emulsiones no formuladas correctamente para cada proyecto específico, procedimientos constructivos deficientes, diseños de normativa limitados y escasos controles de calidad.

Lo anterior contribuyó al incremento de aplicaciones de mezcla en caliente en caminos secundarios que también han presentado deficiencias por la producción de mezclas de mala calidad, largos traslados de mezcla y obras localizadas en zonas de alta precipitación pluvial que afectan su construcción y desempeño al aplicarse a temperaturas menores de las recomendadas o en presencia de lluvia, retrasando también los periodos de ejecución.

Sin embargo la actual situación mundial con respecto al agotamiento de recursos naturales, la alta emisión de gases de efecto invernadero y el alto consumo energético en la construcción y mantenimiento de pavimentos, requieren considerar tecnologías eco-ambientales y sustentables. Esto ha impulsado el desarrollo y uso de técnicas innovadoras de emulsiones y aditivos que permitan aplicaciones de mayor calidad y optimizar el consumo energético diferenciado por rangos de temperatura de aplicación como se muestra en la siguiente figura.



21 Figura 2.1 Clasificación de mezclas asfálticas con base en su temperatura de aplicación.

### *Beneficios de las mezclas asfálticas en frío*

Las mezclas asfálticas en frío de alto desempeño presentan los siguientes beneficios comparados con las mezclas en caliente:

- En el proceso de mezclado se evita la oxidación del asfalto debido a que la mezcla con emulsión se produce a temperaturas cercanas a la ambiente.
- No existen inconvenientes relacionados con la temperatura de aplicación, por lo que se pueden incrementar las distancias de acarreo.
- Debido al uso de tensoactivos que se utilizan para emulsionar el asfalto, presentan mejor afinidad ligante-agregado.
- Estas mezclas son aplicables incluso en temporada de lluvias, ampliando los periodos de ejecución.
- Se pueden almacenar a temperatura ambiente.
- Típicamente la producción de la mezcla en caliente consume 275 MJ/ton con respecto a las mezclas den frio que consumen 14MJ/ton, lo cual genera un ahorro de energía en el proceso de construcción de pavimentos.
- Reducción en la emisión de gases de efecto invernadero, ya que las mezclas en caliente típicamente emiten 22 Kg CO<sub>2</sub>/ton, mientras que las mezclas en frío emiten 1 Kg CO<sub>2</sub>/ton.
- Presentan mayor flexibilidad.

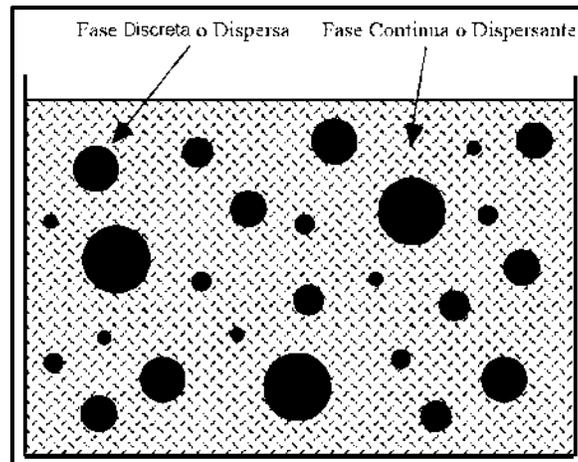
Una de las limitaciones de las mezclas asfálticas con emulsión es que curan gradualmente en el tiempo por su contenido de humedad, por lo que la resistencia se desarrolla progresivamente. Sin embargo, con el objetivo de reducir los tiempos de ruptura de la emulsión, curado y cohesión de la mezcla se han desarrollado emulsiones especiales que permiten utilizar menores contenidos de humedad e incrementar la cohesión inicial. El uso de aditivos como el cemento Portland en conjunto con la emulsión asfáltica también permite incrementar dicha cohesión. En la actualidad se están desarrollando micro-emulsiones (emulsiones con tamaño de partícula de glóbulos de asfalto menores a 1 micra) para estas aplicaciones con la finalidad de desarrollar mezclas de altas prestaciones iniciales, mejorando el comportamiento y requiriendo menor tiempo de curado.

### **2.1 EMULSIONES ASFÁLTICAS.**

Una emulsión asfáltica consiste de tres componentes básicos: asfalto, agua y un agente emulsionante. En algunas ocasiones, la emulsión puede contener otros aditivos, como estabilizantes, mejoradores de recubrimiento, mejoradores de adherencia o agentes de control de rotura.

Se sabe que el agua y el asfalto no se mezclan, excepto en condiciones cuidadosamente controladas, utilizando equipos de alta especialización y aditivos químicos.

De una manera muy simple se puede decir que una emulsión es una dispersión de un líquido en otro líquido que no son miscibles. Muchos tipos de emulsiones son usados en nuestra vida diaria. La mayonesa, el látex, las pinturas y los helados son algunas de las emulsiones más comunes. En cada uno de estos casos, ciertos procesos químicos y mecánicos están involucrados para combinar 2 o más materiales que no son miscibles bajo condiciones normales. La definición científica es la siguiente: “Es un sistema heterogéneo termodinámicamente inestable que está conformado de al menos dos líquidos inmiscibles entre ellos; en el cual uno de ellos forma la fase continua y al menos una segunda fase dispersa en forma de glóbulos dispersos”.



22 Figura 2.2 Diagrama de una emulsión asfáltica (fuente: Manual técnico básico SemMaterials)

Existen dos tipos de emulsiones según la concentración de cada una de estas fases: una emulsión directa es aquella en que la fase hidrocarbonada está dispersa en la parte acuosa; en la inversa, la fase acuosa está dispersa en la parte hidrocarbonada. Las del primer tipo son las que más se emplean en la industria caminera.

El objetivo es lograr una dispersión estable del cemento asfáltico en el agua, suficientemente estable para ser bombeada, almacenada durante un tiempo prolongado, y mezclada. La emulsión deberá proveer el suficiente tiempo de mezclado al entrar en contacto con el agregado, de tal forma que proporcione un cubrimiento homogéneo. La emulsión deberá empezar el proceso de “rompimiento” después de este proceso. “Rotura” es la separación del agua del asfalto. Al curar, el residuo asfáltico conserva toda la capacidad adhesiva, la durabilidad y la resistencia al agua, propias del cemento asfáltico con el cual fue elaborado.

### 2.1.1 Componentes de una emulsión.

La emulsificación consiste en la trituración por medios mecánicos del asfalto en glóbulos los cuales son eléctricamente cargados para proveer una energía de repulsión (principio electrostático por el cual cargas iguales se repelen).

Los principales componentes son:

- Asfalto.

En la producción de emulsiones se puede utilizar asfaltos modificados con polímero o bien aditivados para mejorar su comportamiento en campo.

El cemento asfáltico es el elemento básico de la emulsión asfáltica y, en la mayoría de los casos, constituye entre un 50% y 75 % de la emulsión. La química del asfalto es una materia compleja, y no es necesario, para el caso, examinar todas las propiedades del cemento asfáltico. Algunas propiedades del cemento asfáltico sí afectan significativamente la emulsión final. Sin embargo, no hay una correlación exacta entre las propiedades del asfalto y la facilidad con que el asfalto puede ser emulsionado. Si bien la dureza base del cemento asfáltico puede variar, la mayoría de las emulsiones es hecha con asfaltos con un rango de penetraciones 60 – 250. La compatibilidad química entre el agente emulsivo y el cemento asfáltico es esencial para la producción de una emulsión estable.

El asfalto proviene principalmente de la refinación del crudo de petróleo. El asfalto está compuesto básicamente de grandes moléculas de hidrocarburos, y su composición química es variada. La estructura coloidal del asfalto depende de la naturaleza química y del porcentaje de moléculas de hidrocarburos, y de la reacción entre éstas.

La compleja interacción de las diferentes moléculas hace casi imposible predecir con precisión el comportamiento de un asfalto que será emulsificado.

- Agua.

Se utiliza como medio para dispersión del tensoactivo como parte de la fase continua. Su composición tiene un efecto importante en la estabilidad y comportamiento de las emulsiones.

El agua encontrada en la naturaleza puede ser inadecuada debido a impurezas, sea en solución o en suspensión coloidal. Es de importancia la presencia de iones de calcio y magnesio. Estos iones favorecen la formación de una emulsión catiónica estable. Comúnmente se adiciona cloruro de calcio a las emulsiones catiónicas, con el fin de aumentar la estabilidad durante el almacenamiento.

El agua puede contener dependiendo de la fuente, diminutas partículas de óxido de hierro, limos y arcillas que pueden comprometer la integridad de la emulsión.

Es común encontrar aguas no tratadas o de desecho partículas que están cargadas negativamente, y absorben rápidamente los agentes emulsivos, desestabilizando la emulsión. El uso de aguas impuras puede resultar en un desequilibrio en los componentes de la emulsión, lo que puede afectar en forma adversa el desempeño o causar una rotura prematura.

- Tensoactivo o emulsificante.

Los tensoactivos comúnmente utilizados son derivados de grasas de origen animal como son las aminas. El propósito de este es estabilizar la emulsión durante la producción, almacenamiento y transporte.

Las propiedades de una emulsión dependen en gran parte del producto químico usado como emulsificante. Dicho químico es un agente que modifica la tensión superficial, comúnmente llamado surfactante, que determina si la emulsión se clasificará como aniónica, catiónica o no iónica. El emulsificante, también mantiene los glóbulos de asfalto en suspensión estable y permite su rotura oportuna. El surfactante cambia la tensión superficial en la interfase, es decir en el área de contacto entre los glóbulos de asfalto y el agua. Hay gran disponibilidad de emulsificantes. Su selección se debe realizar considerando su compatibilidad con el cemento asfáltico usado y la aplicación a la que va dirigida la emulsión asfáltica.

Los emulsificantes aniónicos que se utilizan con mayor frecuencia son los ácidos grasos derivados de la producción maderera, tales como aceites de tallos, resinas y ligninas. Los emulsificantes aniónicos son saponificados (vuelto jabón) por reacción con hidróxidos de sodio o potasio.

La mayoría de los emulsificantes catiónicos son aminas grasas (diaminas, imidazolininas y amidoaminas). Las aminas son convertidas en jabón por reacción con un ácido, generalmente clorhídrico. Otro tipo de agente emulsificante es la sal cuaternaria de amonio, que se usa para producir emulsiones catiónicas.

En la mayoría de los casos, el agente se combina con el agua antes de introducirlo en el molino coloidal. También puede adicionarse una parte en el cemento asfáltico antes de su ingreso al molino.

Utilizando una definición general, los agentes químicos tensoactivos son sustancias solubles en agua, cuya presencia en la solución cambia marcadamente las propiedades del solvente y de las superficies con las que entran en contacto. Se clasifican por la forma en que se disocian o ionizan en agua. Poseen un equilibrio molecular entre una larga cadena lipofílica hidrocarbonada y una cabeza polar hidrofílica. Los surfactantes son adsorbidos en la interfase entre líquidos y gases o líquidos y sólidos. Tienden a concentrarse en la interfase de modo que los

grupos hidrofílicos se orientan hacia la fase más polar y los grupos lipofílicos hacia la fase menos polar.

Básicamente, hay tres tipos de surfactante que son clasificados según sus características de disociación en el agua:

1. Surfactantes aniónicos.- En los que el grupo polar electrovalente de hidrocarburos es parte del ión cargado negativamente, cuando el compuesto se ioniza:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n \text{COO}^- \text{Na}^+$
2. Surfactantes no-iónicos.- En los que el grupo hidrofílico es covalente y polar, se disuelve sin ionización:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n \text{COO} (\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_x \text{H}$
3. Surfactantes catiónicos.- En los que el grupo polar y electrovalente de hidrocarburos es parte del ión cargado positivamente cuando el compuesto se ioniza:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n \text{NH}_3^+ \text{Cl}^-$

Para ser un agente emulsivo eficaz, el surfactante debe ser soluble en agua y poseer un adecuado equilibrio entre las propiedades hidrofílicas y lipofílicas.

- Ácido o base.

Como los emulsificantes son insolubles en agua, es necesario convertirlos en sales para que pueden dispersarse. Se requiere además usar ácidos o bases para activar el emulsificante. Para muchas emulsiones catiónicas se usan ácidos fuertes como el ácido clorhídrico y para emulsiones aniónicas se usan bases como hidróxido de potasio.

- Polímeros.

Para mejorar las propiedades de la emulsión se pueden llegar a utilizar polímeros. Los cuales pueden ayudar a mejorar el desempeño a largo plazo ya que proveen mayor resistencia al agrietamiento y producen una mejor adherencia entre el asfalto y el agregado. Los tipos más comunes de polímeros son: SB (estireno-butadieno), SBS (estireno-butadieno-estireno), EVA (etileno-vinil-acetato), y SB emulsionado conocido como látex.

- Energía de dispersión.

La emulsión es formada por energía mecánica y energía fisicoquímica. La energía mecánica divide el asfalto en finas partículas. Esto se realiza a través de un molino coloidal el cual tritura el asfalto que entra en forma líquida (para lo cual el asfalto es calentado a temperaturas entre 120 y 160°C para asegurar que el rango de viscosidad sea el adecuado).

La energía fisicoquímica se debe al emulsificante el cual debe reducir la tensión interfacial entre la fase de hidrocarburo (asfalto) y la fase acuosa (solución jabonosa) para facilitar su emulsificación. Debe crear una película alrededor de las partículas.

### *2.1.2 Elaboración de la Emulsión.*

El equipo básico para preparar emulsiones incluye un dispositivo mecánico de alta velocidad, de altas tensiones de corte (usualmente un molino coloidal), para dividir el asfalto en pequeñísimas gotas.

El molino coloidal posee un rotor de alta velocidad (17-100 Hz o 1000-6000 RPM) con gálidos de paso en el orden de 0.25 a 0.50 mm. Las gotas de emulsiones asfálticas tienen tamaños inferiores al diámetro de un cabello humano, esto es, alrededor de 0.001 a 0.010 mm. Se emplean analizadores de tamaños de partículas para caracterizar la calidad de una emulsión.

Durante el proceso de emulsificación, se alimenta el molino coloidal con asfalto caliente, el cual es dividido en pequeñas gotas. Al mismo tiempo, ingresa en el molino coloidal el agua conteniendo el agente emulsivo la solución jabonosa conformada por agua, agente emulsionante, ácido o base y en algunos casos aditivos. El asfalto que ingresa en el molino coloidal se calienta para alcanzar una baja viscosidad; la temperatura del agua se ajusta para optimizar el proceso de emulsificación. Estas temperaturas varían, dependiendo de las características de emulsificación del cemento asfáltico y de la compactibilidad entre asfalto y agente emulsivo.

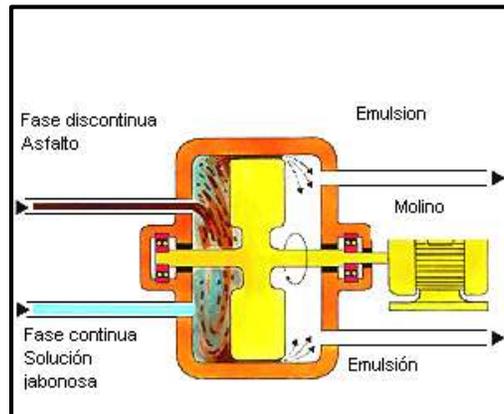
El método de incorporación del emulsificante al agua varía de acuerdo con el procedimiento empleado por el fabricante. Para ser solubles en agua, algunos emulsificantes, como las aminas, deben mezclarse y reaccionar con un ácido; otros, como los ácidos grasos, deben mezclarse y reaccionar con un álcali.

El tamaño de las partículas de asfalto es un factor vital en la elaboración de una emulsión estable.

Estas gotas de asfalto de tamaño microscópico se dispersan en el agua en presencia del tensoactivo (surfactante). El surfactante produce un cambio en la tensión superficial en el área de contacto entre las gotas de asfalto y el agua, permitiendo así que el asfalto permanezca en suspensión. Las partículas de asfalto, todas con similares cargas eléctricas, se repelen entre sí, lo que ayuda a mantenerlas suspendidas.

En la producción de las emulsiones básicamente se prepara y acondiciona el asfalto el cual puede ser modificado con polímero, con aditivos mejoradores de penetración, con aditivos peptizantes, etc. Se prepara además la solución jabonosa la cual incluye agua, emulsificante, ácido y algunos aditivos. Estas dos

corrientes: asfalto y solución jabonosa son alimentadas al molino en donde el asfalto es molido y mezclado con la solución jabonosa para obtener la emulsión.



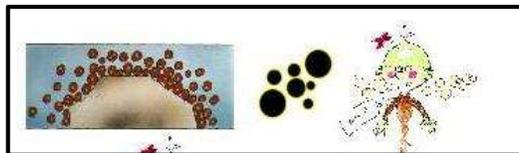
23 Figura 2.3 Diagrama típico de producción (fuente: Les Emulsions de bitume Routes de France)

### 2.1.3 Proceso de rompimiento de las emulsiones.

La fabricación de emulsiones tiene como objetivo mantener una dispersión estable del cemento asfáltico en agua, lo suficiente para bombearlo, almacenarlo y mezclarlo. Sin embargo la emulsión empieza su proceso de rompimiento al hacer contacto con el agregado en una mezcla y al ser aplicada sobre el pavimento. Al romper el residuo asfáltico conserva toda la capacidad adhesiva, la durabilidad y la resistencia al agua propia del cemento asfáltico con el cual fue elaborada.

Es decir la adherencia total del asfalto a la superficie o agregado que se requiere recubrir con asfalto ocurre en su totalidad una vez que los glóbulos de asfalto se unen en su totalidad (coalescen y el agua se separa). A este fenómeno se le conoce como rompimiento de la emulsión, el cual ocurre al entrar en contacto con agregado pétreo durante el tiempo siguiendo las siguientes fases:

- Decantación. Los glóbulos de asfalto cargados en el caso de las emulsiones catiónicas con carga positiva son atraídos a la superficie del agregado pétreo.



24 Figura 2.4 Decantación (fuente: Les Emulsiones de bitume Routes de France)

- Floculación. El acercamiento de los glóbulos lleva a la adhesión entre algunas partículas de asfalto y el agua empieza a separarse.



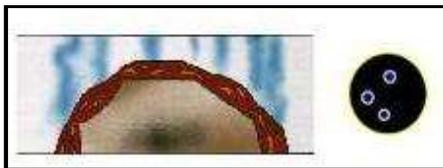
25 Figura 2.5 Floculación (fuente: *Les Emulsiones de bitume Routes de France*)

- Coagulación. Existe una mayor unión de los glóbulos de asfalto y menor agua atrapada. La coloración de la emulsión empieza a tornarse más negra.



26 Figura 2.6 Coagulación (fuente: *Les Emulsiones de bitume Routes de France*)

- Rompimiento. Se presenta coalescencia, las partículas de agua quedan atrapadas entre los glóbulos de asfalto.



27 Figura 2.7 Rompimiento (fuente: *Les Emulsiones de bitume Routes de France*)

- Curado. Representa la unión total de los glóbulos sin agua atrapada.



28 Figura 2.8 Curado (fuente: *Les Emulsiones de bitume Routes de France*)

#### 2.1.4 Clasificación de las emulsiones.

Las emulsiones se pueden clasificar por:

- Su rompimiento en:
  - Rompimiento lento
  - Rompimiento medio
  - Rompimiento rápido

La ruptura de una emulsión asfáltica es el fenómeno que se produce cuando los glóbulos de asfalto de la emulsión dispersa en el agua, en contacto con el agregado mineral, sufren una ionización por parte del agregado, dando origen a la formación de un compuesto insoluble en agua, que se precipitará sobre el material pétreo.

La coalescencia se refiere al proceso que sigue la emulsión para convertirse nuevamente en cemento asfáltico. La tendencia a coalescer está estrechamente relacionada con la capacidad de mezcla de una emulsión.

b) Por la carga de la partícula (carga del glóbulo de asfalto):

- Catiónicas (carga positiva)
- Aniónica (carga negativa)
- No iónicas (carga neutra)

Esta clasificación se da con base en las cargas eléctricas que rodean a las partículas de asfalto. En México las emulsiones que se comercializan para pavimentos son catiónicas en su gran mayoría, se comercializan algunas aniónicas como impermeabilizantes.

c) Por su tipo:

- Emulsión directa (O-W). La fase dispersa (interna o discontinua) es lipofílica y la fase dispersante (externa o continua) es hidrofílica. Este es el tipo de emulsiones que más se comercializa para pavimentos.



29 Figura 2.9 Emulsión directa (fuente: Manual técnico básico SemMaterials)

- Emulsión inversa (W-O). La fase dispersa (interna o discontinua) es hidrofílica y la fase dispersante (externa o discontinua) es lipofílica.



30 Figura 2.10 Emulsión inversa (fuente: Manual técnico básico SemMaterials)

- Emulsión múltiple (O-W-O) en estas emulsiones las partículas de aceite contienen pequeñas esferas hidrofílicas.



31 Figura 2.11 Emulsión Múltiple (fuente: Manual técnico básico SemMaterials)

d) De acuerdo al tamaño de partícula.

	Emulsión	Microemulsión
Tamaño de partícula (micrómetros)	10 a 20	0.01 a 0.05
Apariencia visual	Opaco	Transparente
Viscosidad	Alta, depende de la concentración de la fase dispersa	Muy baja, independiente de la fase dispersa o aceitosa
Estabilidad	Variable, depende del tiempo	Alta

*Tabla.1.8 Clasificación de Emulsiones de acuerdo al tamaño de partícula.*

Nomenclatura de las emulsiones.

Debido a que en México la mayor parte de las emulsiones utilizadas son catiónicas se usan las siglas iniciales:

EC: Emulsión Catiónica y según su rompimiento o aplicación seguida de la letra R (rápida), M (medias), L (lentas), S (superestable), o I (impregnación), seguidas del residuo asfáltico. Ejemplo:

ECR60: Emulsión Catiónica de rompimiento rápido con residuo mínimo de 60%.

### 2.1.5 Rompimiento y Curado.

#### 2.1.5.1 Rompimiento.

Para que la emulsión asfáltica cumpla con su objetivo final, es decir, que actúe como ligante, el agua debe separarse de la fase asfáltica y evaporarse. Este fenómeno se denomina "rompimiento". Para tratamientos de superficie y sellados, las emulsiones están formuladas para romper químicamente al entrar en contacto con una sustancia extraña como el agregado pétreo o la superficie de un pavimento. En el caso de las emulsiones catiónicas y aniónicas de rompimiento rápido y medio, la disposición inicial de las gotas de emulsión asfáltica sobre el agregado tiene lugar por medio de fenómenos electroquímicos.

Una emulsión de rompimiento rápido tendrá un tiempo corto de rompimiento (entre uno a cinco minutos luego de aplicada), mientras que emulsiones de rompimiento medio o lento pueden presentar un tiempo considerablemente mayor.

La velocidad de rompimiento está controlada principalmente por el tipo específico y la concentración del agente emulsivo. No obstante, existen otros factores, que influyen directamente en el rompimiento de la emulsión.

#### *2.1.5.2 Curado.*

El curado involucra el desarrollo de las propiedades mecánicas del cemento asfáltico. El resultado final es una película cohesiva continua que mantiene a los agregados con una fuerte unión de carácter adhesivo. Para que esto ocurra, el agua debe evaporarse por completo y las partículas de la emulsión asfáltica tienen que coalescer y unirse al agregado. El agua se elimina por evaporación, por la aplicación de presión (rodillado) y por la absorción del agregado pétreo, pero excesiva humedad, bajas temperaturas o lluvias inmediatamente después de la aplicación pueden demorar un curado apropiado.

#### *2.1.5.3 Factores que afectan el rompimiento y el curado.*

Algunos factores que pueden influir en el tiempo de rompimiento y curado de las emulsiones asfálticas son:

- Absorción de agua.- Un agregado de textura áspera, poroso, retrasa el tiempo de rompimiento al absorber agua de la emulsión y mantener mayor cantidad de agua atrapada.
- Contenido de humedad de los agregados.- Si bien los agregados húmedos pueden facilitar el recubrimiento, tienden a hacer más lento el proceso de curado al incrementar el tiempo necesario para la evaporación.
- Condiciones climáticas.- La temperatura, la humedad y la velocidad del viento tienen influencia en el tiempo de evaporación del agua, en las características de liberación del agua.
- Fuerzas mecánicas.- La presión de los rodillos y el tránsito a baja velocidad, desalojan el agua de la mezcla y ayudan a lograr cohesión, el curado y la estabilidad de la mezcla.
- Superficie específica.- Una mayor superficie específica de los agregados, particularmente finos en exceso o agregado sucio, acelera el rompimiento de la emulsión.
- Química de superficies.- La interacción entre las cargas de la superficie del agregado, en combinación con la carga del agente tensoactivo, pueden influir marcadamente en la velocidad de rompimiento, en particular en el caso de emulsiones catiónicas, iones de calcio y de magnesio presentes en la superficie del agregado pueden reaccionar, acelerando el rompimiento.
- Tipo y calidad de emulsivo.- El surfactante empleado y concentración usada de éste en la elaboración de una emulsión determina las características de rompimiento de la misma.

## **CAPITULO 3 MÉTODO DE DISEÑO BAJO PROTOCOLO AMAAC.**

### **3.1 Métodos de Diseño de Pavimentos Flexibles.**

En la actualidad la ingeniería de caminos se debate ante la urgente necesidad de mejorar los procedimientos de diseños de pavimentos, con el fin de lograr mejores desempeños de esas estructuras que permitan una optimización de los costos de mantenimiento y rehabilitación asociados y sobre todo, de los costos de operación para los usuarios.

Normalmente el diseño, análisis y evaluación estructural de las condiciones de los pavimentos se basan en la teoría elástica multicapas; este acercamiento ofrece la posibilidad de una solución racional al problema. El éxito de esta aproximación depende de la precisión y de la manera en que se emplean las propiedades de los materiales.

La práctica actual del análisis y diseño de los pavimentos se basa en métodos básicamente empíricos, en donde el diseño se basa en propiedades físicas de los materiales y algún índice de resistencia, como lo es el Valor de Soporte de California (CBR). Aún las metodologías basadas en tramos de prueba de regresión de resultados, como lo es el método AASHTO, el cual se puede considerar como empírico en el sentido que su aplicación está rigurosamente restringida a las condiciones que se utilizaron para su calibración. A pesar de esto, desde tiempo atrás se ha manejado conceptos mecanicistas como el Módulo de Resiliencia, pero solo como parámetro de cálculo que se correlaciona con el CBR, y no como una propiedad fundamental del material. En el mejor de los casos existen métodos que se les llaman semí-empíricos o empírico-mecanicistas, porque ya consideran leyes de fatiga de los materiales en los cálculos de la vida útil del pavimento.

Las metodologías mecanicistas plantean tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento del pavimento, ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Lo cual quiere decir que, un marco teórico donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen, y se pueden determinar en laboratorio o en campo. Esta metodología nos permitirá la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se puedan presentar y por lo tanto aumentar la confiabilidad en nuestros diseños.

Las componentes de entrada al proceso de diseño se refieren a la geometría de la estructura, básicamente son los espesores de capa: las propiedades de los materiales que conforman cada una de esas capas que serán módulos dinámicos o resilientes; el tipo de clima del medio físico que atravesará la carretera, definido por precipitación y temperatura; el nivel de tránsito definido, ya sea en ejes equivalentes o preferentemente a través de su espectro de distribución de cargas.

La selección del diseño inicial consiste en una primera estimación de valores para esas componentes de entrada.

Definido el diseño inicial, se procede al cálculo de lo que vamos a llamar las respuestas estructurales en la sección estructural del pavimento. Estas respuestas estructurales consisten en conocer la distribución de esfuerzos ( $\sigma$ ), deformaciones unitarias ( $\epsilon$ ) y deflexiones ( $\delta$ ). El cálculo se realiza considerando al pavimento como un medio multicapas, en donde el comportamiento de los materiales se apoya en la Teoría de la Elasticidad.

A partir de la respuesta estructural del pavimento se calcula el nivel de daño esperado en el periodo de diseño, para los diferentes tipos de deterioro que se pudieran presentar; estos deterioros pueden ser agrietamientos por fatiga, agrietamientos térmicos, deformaciones permanentes y finalmente el nivel de regularidad medido a través del llamado Índice de Regularidad Internacional (IRI).

Calculados los niveles de deterioro para el periodo de diseño, se comparan con los valores máximos permitidos del diseñador, que dependerá del tipo de camino que se trate. Para caminos de altas especificaciones, en especial para los caminos de cuota, las exigencias serán mayores.

La finalidad del método es la de garantizar el desempeño del pavimento a lo largo de su vida de proyecto. Esto quiere decir, garantizar que los niveles de agrietamientos, deformación permanente, regularidad superficial, entre otros, se mantendrán dentro de un rango ideal, que dependerá de la importancia de la red carretera de que se trate.

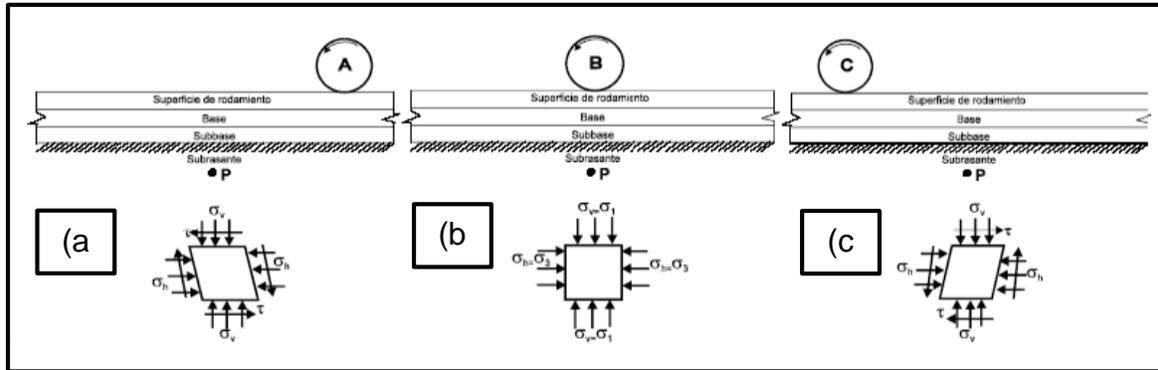
### **3.2 Esfuerzo producidos en los Pavimentos Flexibles.**

Los materiales que constituyen los pavimentos, incluyendo las terracerías y el terreno de cimentación, se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tránsito vehicular.

El tránsito tiene una gran influencia en los esfuerzos producidos en los pavimentos y su caracterización es bastante compleja debido no solo a la versatilidad de los vehículos existentes, sino también a las interacciones vehículo-pavimento que producen fenómenos con esfuerzos adicionales a las propias cargas estáticas del tránsito.

Un elemento de un pavimento está sujeto a pulsos de carga que involucran componentes de esfuerzos normales y cortantes. Los esfuerzos son transitorios y cambian de posición con el tiempo conforme la carga avanza; el esfuerzo cortante cambia de sentido conforme la carga pasa, provocando así una rotación de los ejes de esfuerzos principales. (Lekarp et al, 1997).

En la siguiente figura se muestra el esquema de una sección longitudinal de las capas de un pavimento, sobre la cual la carga se mueve a velocidad constante.



32Figura 3.1 Estado de esfuerzos en una sección longitudinal de un pavimento (fuente: Pandey et al, 1987).

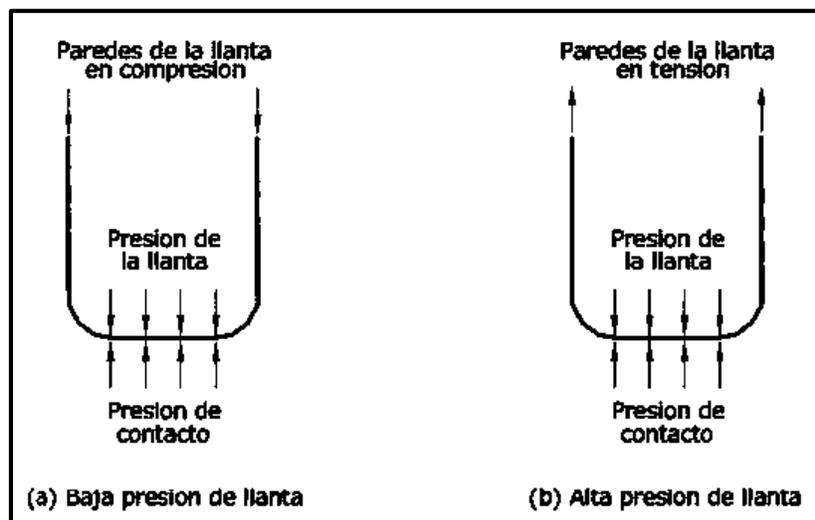
El estado de esfuerzo experimentado por el punto P debido a la carga en el punto A, es de condiciones tales que en este punto actúan esfuerzos de tipo normal como esfuerzos cortantes; tal como lo podemos observar en la figura (a). Cuando la carga se desplaza hacia el punto B, los esfuerzos de tipo cortantes son nulos, actuando de esta forma tan solo esfuerzos de tipo normal, como se presenta en la figura (b). Al continuar con el recorrido de la carga esta se desplaza hasta el punto C, donde la condición de los esfuerzos cortantes es de sentido contrario en comparación con los experimentados en el punto A, como se observa en la figura (c).

Para caracterizar los esfuerzos producidos por el tránsito a un pavimento, una opción sería estudiar de forma independiente algunos aspectos específicos, ya que se ha demostrado a través de la experimentación su relación con los diferentes mecanismos de deterioro de los pavimentos, estos son:

- Magnitud de las cargas según la composición del tránsito (tipo de eje, distribución de cargas por eje, número de ejes que circulan y número de repeticiones de carga).
- Forma geométrica de cada sollicitación sobre el pavimento (área de contacto y reparto de presiones sobre la misma).
- Velocidad de los vehículos y tiempo sollicitación en un punto.
- Estados de esfuerzos que producen las cargas, en función de su magnitud y tipología (verticales, tangenciales, fenómenos de impacto, etc.).
- Características de las capas del pavimento.

Las cargas que los vehículos transmiten al pavimento son inducidas por medio de las ruedas, por tal motivo es de vital importancia conocer el área de contacto de la

rueda con el pavimento; asumiendo que la presión de contacto depende de la presión de inflado del neumático, como se observa en la figura 3.2, la presión de contacto es más grande que la presión de inflado del neumático, para presiones bajas de la llanta, debido a que la pared de la llanta está en compresión y la suma de las fuerzas verticales de la pared y presión del neumático, deben de ser iguales a la fuerza debida a la presión de contacto; por el contrario para presiones de las llantas altas, la presión de contacto es más pequeña que la presión de la rueda, debido a que la pared de la llanta está en tensión. Sin embargo, generalmente se asume la presión de contacto igual a la presión de la llanta, debido a que los ejes de carga pesados tienen presiones altas y efectos más destructivos en el pavimento, utilizar la presión de la llanta como presión de contacto, es esta al lado de la seguridad (Huang, 1993).



33Figura 3.2 Relación entre la presión de contacto y la presión de la llanta (fuente: Huang, 1993).

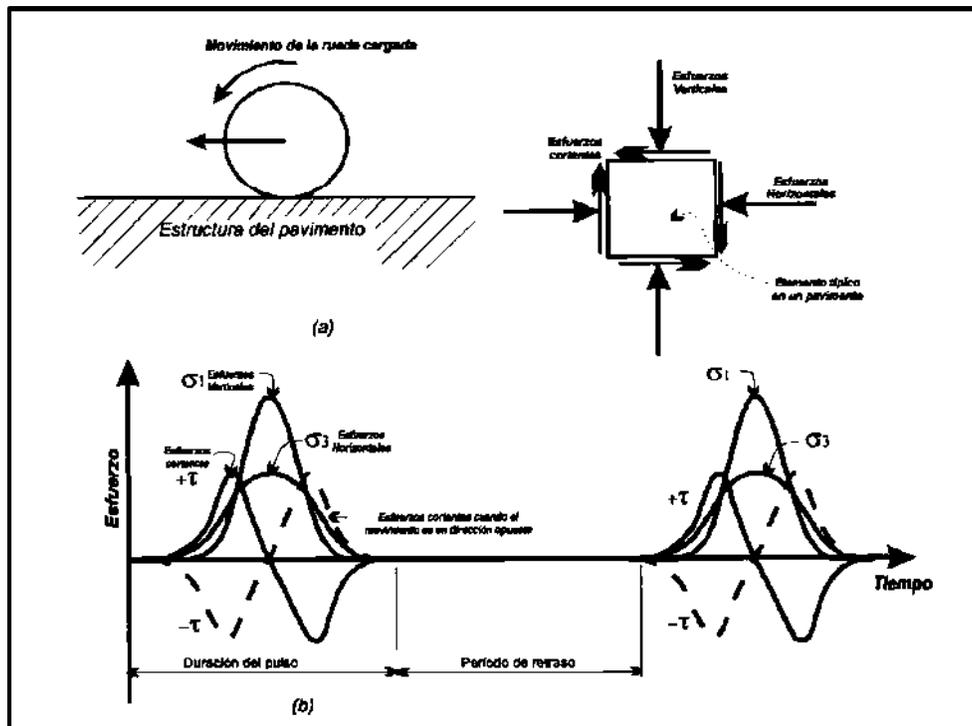
Otro de los aspectos considerados es tomar en cuenta que los neumáticos de los vehículos se apoyan sobre el pavimento produciendo una huella de forma distinta para cada tipo de rueda, presión de inflado, carga por rueda, velocidad y estado de la superficie. Cuando está en movimiento además de variar la forma de la huella, aparecen esfuerzos diferentes a los verticales, que son los que existen cuando el vehículo está detenido o con un movimiento uniforme, por el contrario aparecen esfuerzos horizontales debido al rozamiento y a los cambios de trayectoria, succiones de agua contenida en la sección estructural y esfuerzos verticales de impacto por efecto de los movimientos del vehículo y las irregularidades de la carretera.

Los esfuerzos horizontales de aceleración y frenado o en curvas de pequeño radio, que se pueden producir en zonas localizadas, influyen también en el estado de esfuerzos y deformaciones del pavimento. Cuando en la superficie de un

pavimento se originan esfuerzos tangenciales, estos deben de ser resistidos por los 8-10 cm superiores, pero en general no afectan a las capas inferiores.

Es relevante también considerar que los efectos dinámicos de los vehículos se transforman en impactos y vibraciones en los que intervienen el estado superficial del pavimento y el tipo de suspensión del vehículo. Los vehículos en marcha transmiten al neumático una carga de magnitud variable, según el movimiento oscilatorio de la masa suspendida, cuya frecuencia varia con la velocidad y tipo de pavimento. Los máximos pueden ser un 50% superior a los presentados con carga estática; este aumento de cargas se refleja sobre el pavimento en forma de presión de contacto y/o incremento de la superficie de la rodada.

En la figura 3.3, se puede observar que cuando la rueda cargada avanza, se producen pulsaciones de los esfuerzos verticales y horizontales, que son acompañados de una doble pulsación del esfuerzo cortante con una señal contraria en el plano horizontal y vertical; se muestra la relación entre esfuerzo y tiempo. Se puede ver que a medida que la rueda cargada se aproxima a un punto específico del pavimento, el esfuerzo cortante se incrementa hasta llegar a un máximo para luego decrecer hasta un valor de cero, en ese momento el esfuerzo vertical es máximo; posteriormente se incrementa nuevamente, pero ahora con signo contrario hasta lograr un máximo negativo, para después decrecer y llegar a cero; describiendo con este comportamiento una onda sinoidal completa.



34Figura 3.3 Estado de esfuerzos en un pavimento debido al movimiento de una rueda cargada (fuente: Pandey et al, 1987).

El estado de esfuerzos descritos anteriormente se presenta en forma repetida cuando el paso de los vehículos se hace constante, este proceso depende de la acumulación de los ejes equivalentes.

Se puede apreciar el desarrollo de los esfuerzos horizontales, verticales y cortantes originados por las cargas del tránsito. En base a esto se observa que el funcionamiento adecuado del pavimento depende en gran medida de las propiedades mecánicas de los materiales.

En los pavimentos, las deformaciones provocadas, por los diferentes estados de esfuerzos debidos al tránsito, interesan desde dos puntos de vista: por un lado las deformaciones excesivas están asociadas a estados de falla; y por otro porque es bien sabido que un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente de que las deformaciones no hayan inducido a un colapso estructural propiamente dicho (Rico A, Del Castillo H, 1992).

### **3.3 Diseño de Mezclas bajo Protocolo AMAAC.**

El proceso de diseño de una mezcla asfáltica consiste en la selección del agregado, selección del asfalto, compactación de los especímenes de prueba, el cálculo de los parámetros volumétricos y la determinación del contenido óptimo de asfalto.

El diseño de mezcla seleccionado, usualmente es, el más económico y el que cumple de manera satisfactoria con todos los requisitos establecidos. El diseño de mezclas es una herramienta usada en el control. Es utilizada en la aceptación de materiales, en el control de la mezcla de obra y en la compactación final de la mezcla.

En México con el fin de optimizar las estructuras que conforman un pavimento, a través de las características de calidad de cada uno de los materiales que lo conforman, a iniciativa de la Asociación Mexicana del Asfalto, AMAAC, un comité técnico con especialistas tanto del sector privado como del público, incluyendo centros de investigación y universidades, ha propuesto un protocolo para el diseño y control de mezclas asfálticas de granulometría densa para mezclas en frío.

Aunque muchos de los ensayos que se mencionan son ya de uso extensivo en nuestro país y otros se encuentran en su impulso inicial, en su conjunto representan ese cúmulo de experiencia, conocimiento y tecnología, que se requiere para contribuir a una mejor infraestructura carretera para México.

#### *3.3.1 Componentes del protocolo.*

La mezcla asfáltica es un material compuesto, formado por la conjunción de agregados pétreos y un material asfáltico en este caso emulsiones asfálticas, eventualmente con aditivos, cuyas propiedades mecánicas de resistencia, deformación y permeabilidad, estarán condicionadas a su vez por las propiedades particulares de cada componente en la mezcla.

Para su utilización en pavimentos carreteros, la mezcla asfáltica en frío debe ser resistente a las deformaciones plásticas, al fenómeno de fatiga y al daño por humedad.

El protocolo de diseño establece la evaluación de propiedades volumétricas de la mezcla, la medición del daño por humedad en tensión indirecta (TSR) y la determinación del módulo dinámico en la mezcla.

<b>Designación del nivel de tránsito</b>	<b>Numero de Ejes Equivalentes</b>	<b>Tipo de carreteras usuales</b>	<b>Ensayes recomendados</b>
<b>Nivel I</b> Tránsito Bajo	menor a 1,000,000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carreteras Federales Tipo D</li> <li>• Carreteras Alimentadoras</li> <li>• Carreteras Estatales y Municipales</li> <li>• Calles Urbanas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño volumétrico y susceptible a la humanidad</li> </ul>
<b>Nivel II</b> Tránsito Medio	de 1,000,000 a 10,000,000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carreteras Estatales</li> <li>• Carreteras Federales tipo B y C</li> <li>• Vialidades Urbanas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad</li> <li>• Susceptibilidad a la deformación permanente</li> </ul>
<b>Nivel III</b> Tránsito Alto	de 10,000,000 a 30,000,000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carretera Federales tipo A</li> <li>• Autopistas de cuota</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad</li> <li>• Susceptibilidad a la deformación permanente</li> <li>• Módulo dinámico</li> </ul>
<b>Nivel IV</b> Tránsito Muy Alto	más de 30,000,000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carreteras Federales troncales</li> <li>• Autopistas de cuota importantes</li> <li>• Vialidades suburbanas en ciudades muy grandes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humanidad</li> <li>• Susceptibilidad a la deformación permanente</li> <li>• Módulo dinámico</li> <li>• Fatiga</li> </ul>

35Figura 3.4 Niveles de diseño (fuente: Protocolo AMAAC).

La secuencia de etapas en el diseño es de la siguiente manera:

1. Nivel I.

- Selección de los agregados pétreos. La totalidad del material deberá ser obtenido por trituración.
- Granulometría de la mezcla. Su selección depende de la combinación de materiales pétreos que logren cumplir con la curva granulométrica.
- Calidad de los agregados pétreos tanto para la fracción gruesa como para la fracción fina.

- Determinación del contenido de humedad de mezclado óptimo por medio de Proctor Modificado.
- Selección de la emulsión asfáltica adecuada de acuerdo al material pétreo particular mediante pre-diseños.
- Diseño volumétrico. Fabricación de los especímenes en el compactador giratorio, a un nivel de giros definido, tratando de simular los vacíos encontrados usualmente en campo en este tipo de mezclas.
- Susceptibilidad de la resistencia de la mezcla al daño inducido por humedad. Los ensayos son de tensión indirecta. La relación entre las resistencias húmeda y seca deberá ser al menos 80% sin ciclos de congelamiento.
- Determinación del contenido óptimo de asfalto a partir de los valores de TSR obtenidos.

## 2. Nivel II.

- Módulo dinámico. Es un parámetro esencial para poder calcular los espesores de carpeta asfáltica en los nuevos métodos de diseño de pavimentos flexibles. Los ensayos se realizan en especímenes compactados una vez determinada la fórmula de trabajo.

### 3.3.2 Selección del agregado pétreo.

A continuación se presentan los requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.

		Tamaño nominal del material pétreo mm		
		19	12.5	9.5
Designación	Abertura (mm)	Porcentaje que pasa		
1"	25	100-100	-	-
3/4"	19	90-100	100-100	-
1/2"	12.5	-90	90-100	100-100
3/8"	9.5	-	-90	90-10
#4	4.75	-	-	-90
#8	2.36	23-49	28-58	32-67
#16	1.18	-	-	-
#30	0.6	-	-	-
#50	0.3	-	-	-
#100	0.15	-	-	-
#200	0.075	2-8	2-10	2-10

9Tabla 3.1 Puntos de control (fuente: Protocolo AMAAC).

Existen granulometrías que se definen como gruesas o finas según su composición, como se muestra a continuación:

- 1) Tamaño de mezcla 37.5 mm:
  - Granulometría fina cuando más del 47% pasa la malla 9.5mm.
  - Granulometría gruesa cuando menos del 47% pasa la malla 9.5mm.
- 2) Tamaño de mezcla 25.0 mm:
  - Granulometría fina cuando más del 40% pasa la malla de 4.75mm.
  - Granulometría gruesa cuando menos del 40% pasa la malla de 4.75mm.
- 3) Tamaño de mezcla 19.0 mm:
  - Granulometría fina cuando más del 47% pasa la malla de 4.75mm.
  - Granulometría gruesa cuando menos del 47% pasa la malla de 4.75mm.
- 4) Tamaño de mezcla 12.5 mm:
  - Granulometría fina cuando más del 39% pasa la malla de 2.36mm.
  - Granulometría gruesa cuando menos del 39% pasa la malla de 2.36mm.
- 5) Tamaño de mezcla 9.5 mm:
  - Granulometría fina cuando más del 47% pasa la malla de 2.36mm.
  - Granulometría gruesa cuando menos del 47% pasa la malla de 2.36mm.

Algunas ventajas que tiene la utilización de la granulometría fina es: menor permeabilidad, mejor trabajabilidad para tamaños nominales menores a 25mm, espesores delgados en tamaños nominales menores a 25mm, mayor durabilidad en carreteras de tránsito bajo a medio y provee una textura lisa. Por otra parte la granulometría gruesa ofrece: incrementa la macrotextura, mejor estructura interna, elevada durabilidad en todos los tipos de proyectos.

Una mezcla de granulometría densa se puede utilizar para desempeñar las siguientes funciones en un pavimento:

- Estructural. Para mezclas finas y gruesas de 37.5, 25 y 19mm, este es el propósito principal de las mezclas de granulometría densa y es ante todo una función del espesor de la capa. Sin embargo, los materiales seleccionados pueden mejorar el valor estructural de las mezclas.
- Fricción. Para mezclas gruesas de 19. 12.5 y 9.5mm, esto es una consideración importante para las carpetas de superficie. La fricción es una función de las propiedades del agregado y mezcla.
- Nivelación. Para mezclas finas de 12.5 y 9.5mm, esta mezcla puede utilizarse en capas delgadas o gruesas para rellenar depresiones de las carreteras.

- Bacheo. Para mezclas finas y gruesas de 12.5 y 9.5mm, la mezcla debe reunir los mismos requerimientos que la utilizada para una nueva.

### 3.3.2.1 Pruebas al agregado pétreo.

Las pruebas que se le realizan a la fracción gruesa (grava o sello) son las que se presentan en la siguiente figura:

Característica	Norma	Especificación
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131	30 máx. (capas estructurales)
Desgaste Microdeval, %	AASHTO TP 58-99	18 máx. (capas estructurales)
Intemperismo acelerado, %	AASHTO T 104	15 máx. para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D 5821	90 mín.
Partículas alargadas y alargadas, %	ASTM D 4791	3 a 1 %, 10 máx.

*10Tabla 3.2 Especificaciones para el agregado grueso (fuente: protocolo AMAAC).*

En lo referente a las características del agregado fino (arena), sus especificaciones se muestran a continuación:

Característica	Norma	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D 2419	50 mín. (capas estructurales)
Angularidad, %	AASHTO T 304	40 mín.
Azul de metileno, mg/g	Recomendación AMAAC RA-05/2008	15 máx. (capas estructurales)

*11Tabla 3.3 Especificaciones para el agregado fino (fuente: protocolo AMAAC).*

### 3.3.3 Pruebas de desempeño en la mezcla asfáltica.

#### 3.3.3.1 Ensaye de Tensión Indirecta (TSR).

El ensaye simula la susceptibilidad a la humedad de una mezcla asfáltica, este proceso se lleva a cabo utilizando dos grupos de especímenes; uno seco y otro saturado. La prueba aplica una carga de tensión diametral sobre la pastilla.

Para llevar a cabo el ensaye es necesario realizar al menos 6 especímenes, de los cuales 3 se prueban en seco y los otros 3 se prueban en húmedo.

Para especímenes de 100 mm (4 in) de diámetro la altura será de  $63.5 \pm 2.5$  mm ( $2.5 \pm 0.1$  in) y para 150 mm de diámetro la altura es de  $95 \pm 5$  mm ( $3.75 \pm 0.20$  in).

Una vez compactado los especímenes, mediante el compactador giratorio, se procede a calcular los vacíos de aire en cada uno, para lo cual se debe obtener la gravedad máxima teórica de la mezcla ( $G_{mm}$ ) y con la obtención de la gravedad bruta de la mezcla utilizando la siguiente ecuación se obtienen los vacíos de aire en el espécimen.

$$\% Va = \frac{(G_{mm} - G_{mb})}{G_{mm}} * 100$$

Una vez obtenidos los vacíos se conforman dos grupos, de 3 pastillas cada uno, tratando de que el promedio de vacíos sea muy similar al del otro grupo.

Los especímenes secos se recubren con una bolsa plástica impermeable y se introducen en un baño de agua a  $25 \pm 0.5$  °C por 2 horas  $\pm$  10 minutos, el cual debe un nivel de agua mínimo de 25 mm sobre los especímenes. Una vez transcurrido el tiempo se sacan del baño de agua y se prueban en la prensa. Se obtiene la carga máxima que resistieron ya sea en libras o kilogramos.

Para los especímenes húmedos se obtiene el volumen de vacíos de aire de cada pastilla, para lo cual se utiliza la siguiente fórmula:

$$Va = \frac{\%Va * Vol.pastilla}{100}$$

Obtenido el volumen de vacíos el siguiente paso es saturar esos vacíos con agua en un rango de 70 a 80%, esto se logra dentro de un molde aplicando vacío con una presión de 13 a 67 kPa por un tiempo corto de 5 a 10 minutos. Seguido a esto se recubre la pastilla con una película plástica y se sella con una bolsa; la cual debe contener  $10 \pm 0.5$  mL de agua, se introduce la pastilla en un congelador a temperatura de  $-18 \pm 3$ °C por un periodo mínimo de 16 horas (en el caso de considerar el ciclo de congelamiento).

Después de las 16 horas se sacan las pastillas del congelador y se les retira la bolsa y la película plástica tan pronto como se pueda, para meterlas a un baño de agua a  $60 \pm 1$ °C por  $24 \pm 1$  hora.

Posterior a las 24 horas se sacan las pastillas para meterlas en un baño de agua a  $25 \pm 0.5$  °C por 2 horas  $\pm$  10 minutos. Seguido de este tiempo se sacan las pastillas y se secan superficialmente para probarlas en la prensa.

Todas las pastillas antes de ser probadas en la presan, deben ser medidas del espesor.

La fórmula para obtener el esfuerzo a tensión en las pastillas es la siguiente:

$$\sigma = \frac{2000 * P}{\pi * t * D}$$

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo de Tensión en kPa.

P = Carga máxima en Newtons

t = Espesor de la pastilla en milímetros

D = Diámetro de la pastilla en milímetro

Esta fórmula se aplica para obtener el esfuerzo en seco y en húmedo. Para calcular el porcentaje de tensión indirecta se hace de la siguiente manera:

$$TSR = \frac{\sigma \text{ húmedo}}{\sigma \text{ seco}} * 100$$

Los esfuerzos utilizados son el promedio de cada grupo.

### 3.3.3.2 *Ensayo de Módulo Dinámico.*

A continuación de manera general se presenta la norma de Módulo Dinámico emitida por el Instituto Mexicano del Transporte con fecha 2011/10/14 la cual es una traducción de la norma extranjera AASHTO TP 62-07 Standard Method of Test Deterining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA) emitida por la American Association of State Highway and Transportation Officials.

#### 1. Alcance.

Este método de prueba cubre el procedimiento para preparación y ensayo de mezcla asfáltica en caliente (HMA) para determinar el módulo dinámico y el ángulo de fase para un rango de temperaturas y frecuencias de carga.

La norma se aplica a especímenes de mezcla preparada en el laboratorio con tamaño nominal máximo, menor o igual a 37.5 mm.

## 2. Definiciones.

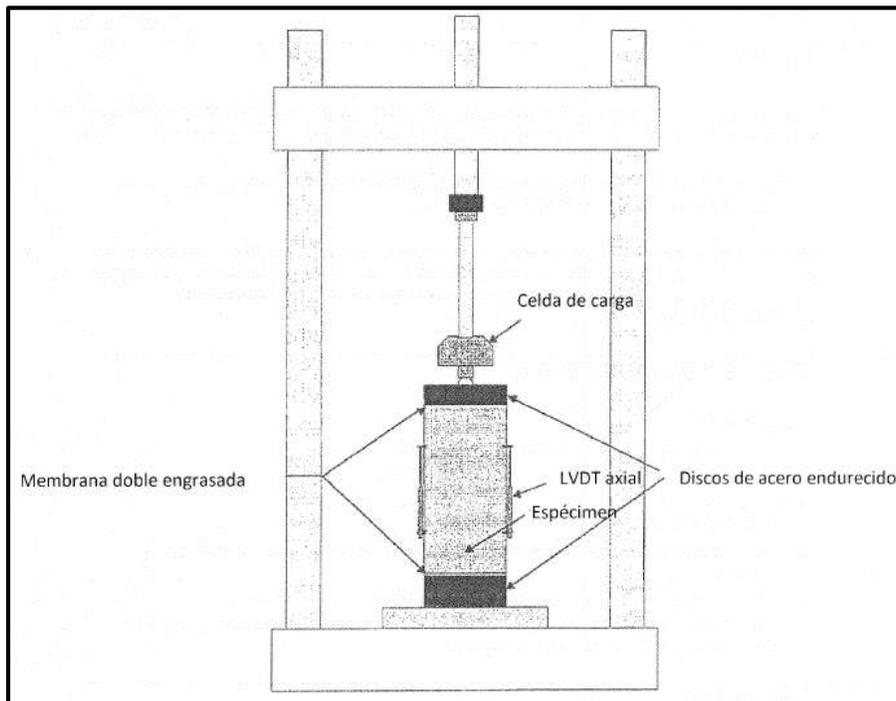
Se conoce como Módulo complejo ( $E^*$ ), al número complejo que define la relación entre el esfuerzo y la deformación para un material viscoelástico lineal.

El Módulo Dinámico ( $|E^*|$ ) es el valor absoluto del módulo complejo calculado dividiendo el esfuerzo máximo entre la deformación máxima axial recuperable para un material sometido a carga senoidal.

Ángulo de fase ( $\phi$ ), es el ángulo en grado entre un esfuerzo senoidal pico aplicado y la deformación pico resultante en un ensayo bajo esfuerzo controlado.

## 3. Resumen del método.

Se aplica un esfuerzo de compresión axial senoidal (haverseno) a un espécimen de concreto asfáltico a una temperatura y frecuencia de carga determinada. El esfuerzo aplicado y la deformación axial recuperable del espécimen se miden y se usan para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase.



36Figura 3.5 Esquema general del ensayo de módulo dinámico (fuente: Instituto Mexicano del Transporte)

Los valores de módulo dinámico medidos en un rango de temperaturas y frecuencias de carga pueden ser ajustados en una curva maestra para caracterizar el concreto asfáltico para el diseño de espesores de pavimentos y análisis de comportamiento.

## 4. Aparatos.

Sistema de ensayo de módulo dinámico. Un sistema de ensayo de módulo dinámico consiste de una máquina de ensayo, cámara ambiental y sistema de medición.

Máquina de ensayo. Una máquina de ensayo servo hidráulica capaz de producir una carga de compresión senoidal controlada. La máquina de prueba deber tener una capacidad de aplicar carga en un rango de frecuencias de 0.1 a 25 Hz y niveles de esfuerzo mayores a 2800 kPa (400 psi). Para cargas senoidales, el error estándar de la carga aplicada debe ser menor que el 5 %. El error estándar de la carga aplicada es una medida de la diferencia entre los datos de carga medidos y el mejor ajuste senoidal. El error estándar de la carga es definido en la ecuación siguiente:

$$se(P) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n - 4}} \left( \frac{100\%}{\hat{x}_0} \right)$$

Donde:

Se(P)= error estándar de la carga aplicada

$x_i$ = carga medida en el punto i

$\hat{x}$ = carga estimada para el punto i del ajuste senoidal

$\hat{x}_0$ = amplitud del ajuste senoidal

n= número total de datos recolectados durante el ensayo

Cámara ambiental. Una cámara para controlar la temperatura del espécimen de ensayo a la temperatura deseada. La cámara ambiental debe ser capaz de controla la temperatura del espécimen en un rango de temperaturas de -10 a 60°C, con una exactitud de  $\pm 0.5$  °C. La cámara debe ser lo suficientemente grande para acomodar el espécimen de prueba y el espécimen de referencia con el termocople colocado en el centro para verificar la temperatura.

Sistema de medición. El sistema de medición debe estar controlado completamente por computadora, capaz de medir y registrar durante el ensayo la carga aplicada y la deformación axial. El sistema debe ser capaz de medir la carga senoidal aplicada y las deformaciones resultantes con una aproximación de 0.5%. La precisión y resolución de las mediciones son resumidas en la tabla 3.5.

Medición	Rango	Exactitud	Resolución
Carga	0.12 a 25 kN	Error $\leq$ 0.0 por ciento	$\leq$ 0.0012 kN
Deformación	$\geq$ 1 mm	Error $\leq$ 0.0025 mm	$\leq$ 0.0002 mm
Log de fase entre la Carga y la deformación	No especificado	$\leq$ 1 grado	No especificado

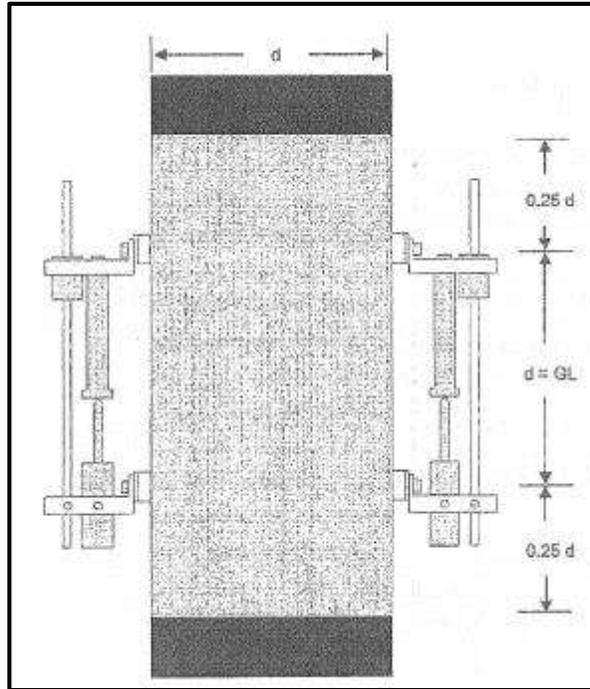
12Tabla 3.4 Exactitud y resolución del sistema de medición (fuente: IMT).

Carga. La carga debe ser medida con una celda de carga electrónica en contacto con uno de los extremos del espécimen. La celda de carga debe ser calibrada de acuerdo con T 67. El sistema de medición de carga debe tener un rango mínimo de 0 a 25 kN con una resolución de 1.2 N.

Deformaciones axiales. Las deformaciones axiales deben ser medidas con un LVDT montado entre los pines pegados al espécimen, por ejemplo, como se muestra en la figura 3.6. Las deformaciones deben ser medidas en dos puntos a 180°, tres puntos a 120° o cuatro puntos a 90°. El arreglo de mediciones en cuatro puntos a 90° tiene la ventaja sobre las otras dos opciones en que, en caso de que un LVDT no funcione apropiadamente, ese LVDT y el LVDT del lado opuesto pueden ser descartados y los dos LVDTs restantes pueden ser usados para determinar la deformación promedio. Los LVDTs deben tener un rango de  $\pm 0.5$  mm. El sistema de medición de la deformación debe poder regresar a cero y debe tener los rangos definidos en la Tabla 3.6.

Rango, mm (in)	Resolución, mm (in)
$\pm 0.5$ (0.01969)	0.0100 (0.00039)
$\pm 0.25$ (0.00984)	0.0050 (0.00020)
$\pm 0.125$ (0.00492)	0.0025 (0.00010)
$\pm 0.0625$ (0.00246)	0.0010 (0.00004)

13Tabla 3.5 Requerimientos del sistema de medición de deformación (fuente: IMT).



37Figura 3.6 Esquema general de los puntos de medición (fuente: IMT).

Placas de carga. Se requieren placas de carga de  $104.5 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$  para colocar arriba y abajo del espécimen para transferir la carga de la máquina de prueba al espécimen. Generalmente, estas placas deben ser hechas de acero endurecido o de chapa de acero, o aluminio anodizado de alta resistencia. Si son elaboradas de materiales más suaves se requerirá reemplazarlas más frecuentemente. No se deben utilizar materiales que tienen módulos elásticos lineales y dureza inferior que el aluminio 6061-T6.

Compactador giratorio superpave. Un compactador giratorio y el equipo asociado para preparar especímenes de laboratorio de acuerdo con T 312. El compactador debe ser capaz de compactar especímenes de 170 mm de altura.

Sierra. Una máquina para cortar los extremos de los especímenes de prueba a la longitud requerida. La sierra debe tener un lado de corte con diamante y debe ser capaz de cortar los especímenes a las dimensiones requeridas sin calentarse excesivamente o sin provocar corto.

Extractor de núcleos. Una máquina extractora con sistema de enfriamiento y punta de diamante para cortar especímenes de prueba de 101.6 mm de diámetro nominal.

##### 5. Calibración del equipo de prueba.

La señal de acondicionamiento y el aparato de adquisición de datos del sistema de ensayo deben ser verificados para asegurar que no hay exceso en la fase de cambio entre los canales de carga y desplazamiento.

El sistema de ensayo debe ser calibrado antes de su uso inicial y al menos una vez al año, o de acuerdo a los requisitos de manufactura o cada 200 ensayos.

Verificar la capacidad de la cámara ambiental para mantener la temperatura requerida dentro de la exactitud especificada.

Verificar la calibración de todos los componentes de medición del sistema de ensayo.

Si cualquiera de las verificaciones proporciona datos que no cumplen con la exactitud especificada, corrija el problema antes de proceder con la prueba.

#### 6. Especímenes de prueba.

Tamaño. Los ensayos de módulo dinámico deben ser llevados a cabo en especímenes de prueba de 150 mm extraídos de mezclas compactadas en el compactador giratorio. El diámetro promedio de los especímenes debe estar entre los 100 y 1004 mm con una desviación estándar de 1.0 mm. La altura promedio del espécimen de prueba debe estar entre 147.5 y 152.5 mm.

Envejecimiento. Las mezclas preparadas en el laboratorio deben envejecerse a corto plazo en el horno durante 4 horas de acuerdo al procedimiento R30. Las mezclas de campo no requieren ser envejecidas antes del ensayo.

Especímenes giratorios. Prepare especímenes de 170 mm de altura de acuerdo con T 312 al contenido de vacíos de aire requeridos.

Extracción. Extraiga especímenes de prueba de 101.6 mm de diámetro del centro del espécimen giratorio. El extractor y el espécimen giratorio deben estar adecuadamente apoyados para asegurar que el espécimen de prueba resultante sea cilíndrico con los lados lisos, paralelos y libres de ranuras, bordes y escalonamientos.

Diámetro. Mida el diámetro del espécimen de prueba en la mitad y en tres puntos a lo largo del eje a 90° uno con respecto al otro. Registre cada una de las seis mediciones con una aproximación de 0.1 mm. Calcule el promedio y la desviación estándar de las seis mediciones. Si la desviación estándar es mayor que 2.5 mm, deseche el espécimen. Para los especímenes que sean aceptables, utilizar el diámetro promedio con una aproximación a 1 mm en todos los cálculos de las propiedades del material.

Preparación de los extremos. Los extremos de todos los especímenes de prueba deben ser lisos y perpendiculares al eje del espécimen. Prepare los extremos de los especímenes cortando con una sierra de una sola o doble hoja. Los extremos de los especímenes preparados deben cumplir las tolerancias descritas abajo. Rechace los especímenes de prueba que no cumplan dichas tolerancias.

La altura de la rugosidad de la superficie de corte de los extremos del espécimen debe estar dentro de una tolerancia de  $\pm 0.05$  mm en cualquier diámetro. Este requisito debe ser verificado al menos en tres posiciones ubicadas a  $120^\circ$  aproximadamente usando una regla y vernier de 8.1 a 12.5 mm de ancho aproximadamente o un comparador óptico.

El extremo del espécimen no debe alejarse de la perpendicular con respecto al eje del espécimen por más de  $1^\circ$ , equivalente a 2.7 mm en 152.4 mm. Este requisito debe ser verificado en cada uno de los especímenes usando un calibrador y una escuadra.

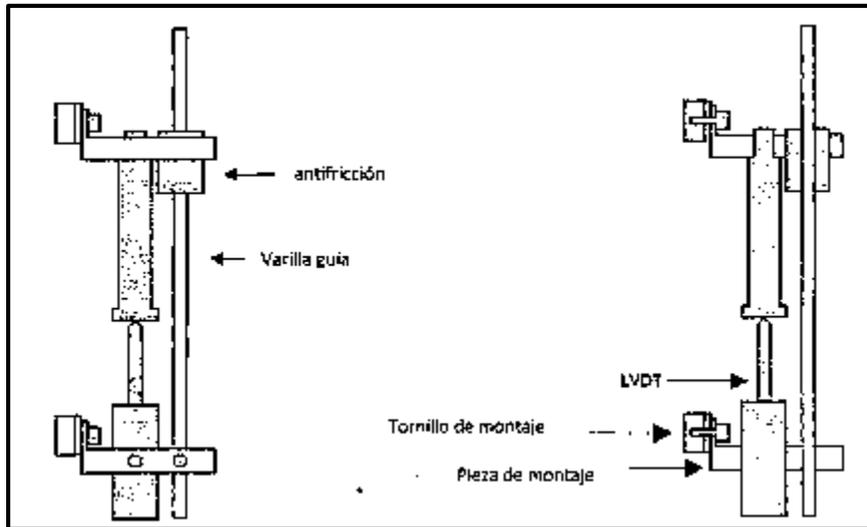
Replicas. El número de especímenes de prueba requeridos depende del número de mediciones de deformación axial hechas por espécimen y la exactitud deseada del módulo dinámico promedio. Se deben ensayar tres especímenes para obtener un límite en la exactitud deseada. La tabla 3.7 resume la exactitud estimada asociada con el número de especímenes.

LVDTs por espécimen	Numero de especímenes	Límite estimado de exactitud
2	2	$\pm 18.0\%$
2	3	$\pm 15.0\%$
2	4	$\pm 13.4\%$
3	2	$\pm 13.1\%$
3	3	$\pm 12.0\%$
3	4	$\pm 11.5\%$

14Tabla 3.6 Exactitud estimada relacionada con el número de especímenes (fuente: IMT).

## 7. Instrumentación del espécimen de prueba.

Pegue con adhesivo epóxico los pines de montaje, para los LVDTs axiales, a los lados del espécimen. La figura 3.7 muestra los detalles del montaje de los pines y LVDTs.



38Figura 3.7 Detalle del montaje del Hardware (fuente: IIMT).

La longitud del medidor para medir la deformación axial debe ser de  $101.6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . Debe utilizarse un aparato para alineamiento y espaciado apropiado para facilitar el montaje del hardware de medición de la deformación axial.

#### 8. Procedimiento.

La serie de ensayos para el desarrollo de curvas maestras para usar en respuesta de pavimentos y análisis de comportamiento debe ser llevada a cabo a  $-10, 4.4, 21.1, 37.8$  y  $54 \text{ }^\circ\text{C}$  a frecuencias de carga de 0.1, 0.5, 1, 5, 10 y 25 Hz para cada una de las temperaturas. Cada uno de los especímenes de prueba, individualmente instrumentado con LVDTs, debe ser ensayado para cada una de las 30 combinaciones de temperatura y frecuencia de carga comenzando con la temperatura más baja y procediendo a la más alta. El ensayo a una temperatura dada debe comenzar con la frecuencia más alta de carga y proceder con la más baja.

Coloque el espécimen de prueba en la cámara de temperatura y permita que se equilibre a la temperatura de prueba especificada  $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Use un espécimen de monitoreo con un termocople montado en el centro para determinar el momento en que el espécimen alcanza la temperatura especificada de ensayo. Los tiempos mínimos recomendados para que la temperatura se equilibre son proporcionados como un guía.

Temperatura del espécimen °C (°F)	Tiempo en el cuarto de temperatura, h 25°C	Tiempo previo a la temperatura de ensayo, h
-10 (14)	Toda la noche	Toda la noche
4 (40)	Toda la noche	4 horas o toda la noche
21 (70)	1	3
37 (100)	2	2
54 (130)	3	1

15Tabla 3.7 Tiempos de equilibrio recomendados (fuente: IMT).

Coloque uno de los tratamientos para reducir la fricción en los extremos encima del disco de acero endurecido de la parte inferior del marco de carga, móntelos LVDTs axiales en los pines previamente pegados al espécimen. Ajuste los LVDTs al extremo de su rango lineal para permitir que el rango completo esté disponible para la deformación permanente a compresión acumulada.

Coloque el tratamiento para reducir la fricción en los extremos en la parte superior y el disco de acero endurecido encima del espécimen. Centre visualmente el espécimen con el actuador de carga con el propósito de evitar carga excéntrica.

Aplique una carga de contacto (Pmin) igual al cinco por ciento de la carga dinámica que será aplicada al espécimen. Es aceptable incrementar el esfuerzo de contacto aplicando hasta 20kPa para mejorar la efectividad del control de la maquina aplicando una carga que mantendrá el contacto positivo con el espécimen pre sin dañarlo.

Ajuste y balancee el sistema de medición electrónico como sea necesario.

Aplique una carga (Pdinámica) sinusoidal (haverseno) al espécimen en forma cíclica. La carga dinámica debe ser ajustada para obtener deformaciones axiales entre 50 y 150 microdeformaciones.

Ensaye el espécimen de la temperatura más baja a la más alta. Para cada una de las temperaturas, aplicar la carga de la frecuencia más alta a la más baja. Al inicio del ensayo, precondicionar el espécimen con 200 cíclicas a 25 Hz al nivel de esfuerzo que corresponda de acuerdo con la Tabla 3.9. Luego cargue el espécimen como es especificado en la Tabla 3.10. Un periodo típico de reposo entre cada una de las frecuencias es de dos minutos. El periodo de reposo no debe exceder los 30 minutos para cualquier frecuencia consecutiva.

Temperatura °C (°F)	Rango KPa	Rango, psi
-10 (14)	1400-2800	200-400
4 (40)	700-1400	100-200
21 (70)	350-700	50-100
37 (100)	140-250	20-50
54 (130)	35-70	5-10

16Tabla 3.8 Niveles de esfuerzo dinámico típicos (fuente: IMT).

Frecuencia (Hz)	Número de ciclos
25	200
10	200
5	100
1	20
0.5	15
0.1	15

17Tabla 3.9 Número de ciclos para la secuencia de ensayo (fuente: IMT).

El espécimen debe ser desechado al final de cada serie de ensayos para cada uno de los periodos de temperatura. Si la deformación permanente no recuperable acumulada es mayor a 1500 micro unidades de deformación, reducir el nivel de esfuerzo a la mitad. Mantenga los datos del ensayo hasta el siguiente periodo de reposo, deseche el espécimen y use uno nuevo para el resto de las frecuencias de ensayos bajo condiciones de carga reducida.

### 9. Cálculos.

Esta sección presenta los procedimientos para calcular el módulo dinámico  $|E^*(\omega)|$  y el ángulo de fase,  $\theta(\omega)$ , usando datos de una frecuencia de carga específica,  $\omega$ . También define mediciones de calidad de los datos que deben ser usadas con los límites de calidad para evaluar la confiabilidad de los datos de prueba.

La aproximación general usada aquí involucra el ajuste de mínimos cuadrados de una onda sinusoidal, como es descrito por Chapra y Canale en métodos numéricos para ingenieros (McGraw Hill, 1985, pp 404-407). Se utiliza la regresión debido a que es fácil para la mayoría de los ingenieros y técnicos en la industria de pavimentos entenderla y aplicarla efectivamente. Esta aproximación es fácilmente llevada a cabo en una hoja de cálculo.

Los datos obtenidos de cada uno de los ensayos de módulo dinámico a una frecuencia  $\omega_0$  son almacenados en forma de varios arreglos, uno para el tiempo ( $t$ ), otro para el esfuerzo ( $\sigma_i$ ) y otro para cada una de las deformaciones  $j=1,2,3,\dots,m$  de los transductores de deformación usados ( $\epsilon_j$ ). El número de  $i=1,2,3,\dots,n$  puntos en cada uno de los arreglos será igual y dependerá del número de datos recolectados por ciclo de carga y el número total de ciclos para cada uno de los cuales los datos han sido recolectados. Se recomienda que se utilicen 50 puntos por ciclo y 5 ciclos para un total de 250 datos.

Análisis de datos de esfuerzo. El primer paso en el análisis es analizar los datos en el arreglo de esfuerzo. El análisis de datos es llevado a cabo en datos de esfuerzo centrado el cual es calculado del arreglo de datos de esfuerzo restando el esfuerzo promedio.

El esfuerzo promedio se determina con la siguiente fórmula:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n}$$

Donde:

$\bar{\sigma}$  = esfuerzo promedio

$\sigma_i$  = Esfuerzo en el punto i en el arreglo de datos

n = número de puntos en el arreglo de datos

El esfuerzo central se calcula restando el esfuerzo promedio de cada uno de las mediciones de esfuerzo:

$$\sigma'_i = \sigma_i - \bar{\sigma}$$

$\sigma'_i$  = esfuerzo central en el punto i en el arreglo de datos

$\sigma_i$  = esfuerzo en el punto i en el arreglo de datos

$\bar{\sigma}$  = esfuerzo promedio

De los datos de esfuerzo central, calcule los tres coeficientes de esfuerzo: desplazamiento, magnitud en la fase y magnitud fuera de fase.

$$A_{\sigma 0} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma'_i}{n} \quad (4)$$

$$A_{\sigma 1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \sigma'_i \cos(\omega_0 t_i) \quad (5)$$

$$B_{\sigma 1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \sigma'_i \sin(\omega_0 t_i) \quad (6)$$

Donde:

$A_{\sigma 0}$  = coeficiente de esfuerzo de desplazamiento, kPa (psi)

$A_{\sigma 1}$  = magnitud del coeficiente de esfuerzo en fase, kPa (psi)

$B_{\sigma 1}$  = magnitud del coeficiente de esfuerzo fuera de fase, kPa (psi)

$\sigma'_i$  = esfuerzo central en el punto i en el arreglo de datos

$\omega_0$  = frecuencia del esfuerzo aplicado, rad/seg

$t_i$  = tiempo en el punto i en el arreglo de datos, s

De los coeficientes de esfuerzo, calcular la magnitud del esfuerzo y el ángulo de fase:

$$|\sigma^*| = \sqrt{A_{\sigma_1}^2 + B_{\sigma_1}^2} \quad (7)$$

$$\theta_{\sigma} = \arctan\left(-\frac{B_{\sigma_1}}{A_{\sigma_1}}\right) \quad (8)$$

Donde:

$|\sigma^*|$  = magnitud del esfuerzo, kPa (psi)

$\theta_{\sigma}$  = ángulo de fase, grados

$A_{\sigma_1}$  = magnitud del coeficiente de esfuerzo en la de fase

$B_{\sigma_1}$  = magnitud del coeficiente de esfuerzo fuera de fase, kPa (psi)

Calcule un arreglo de los esfuerzo centrales estimados y la desviación estándar del esfuerzo aplicado.

$$\hat{\sigma}_i = A_{\sigma_0} + A_{\sigma_1} \cos(\omega_0 t_i) \quad (9)$$

$$se(\sigma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{\sigma}_i - \sigma_i)^2}{n-4} \left(\frac{100\%}{|\sigma^*|}\right)} \quad (10)$$

Donde:

$\hat{\sigma}_i$  = esfuerzo central estimado en el punto i, kPa (psi)

$se(\sigma)$  = desviación estándar para el esfuerzo aplicado, por ciento

$A_{\sigma_0}$  = coeficiente de esfuerzo de desplazamiento, kPa (psi)

$A_{\sigma_1}$  = magnitud del coeficiente de esfuerzo en fase, kPa (psi)

$B_{\sigma_1}$  = magnitud del coeficiente de esfuerzo fuera de fase, kPa (psi)

$\sigma_i$  = esfuerzo central en el punto i en el arreglo de datos

$\omega_0$  = frecuencia del esfuerzo aplicado, rad/seg

$t_i$  = tiempo en el punto i en el arreglo de datos, s

$|\sigma^*|$  = magnitud del esfuerzo, kPa (psi)

$n$  = número de puntos en el arreglo de datos

Análisis de datos de deformación. El segundo paso en el análisis es llevar a cabo un análisis similar en los datos de cada uno de los transductores de deformación. Sin embargo, en este caso los datos son corregidos para deriva causada por la

deformación permanente durante el ensayo, y los datos centrados en la deformación promedio para el transductor.

Para estimar el ajuste en los datos de deformación, busque cada una de los arreglos de transductores de deformación y determine los valores máximo y mínimo y el tiempo en que ocurrió para cada uno de los ciclos de carga. Luego determine la pendiente del valor máximo y mínimo locales con respecto al tiempo usando la regresión lineal. El promedio de estas dos pendientes es la velocidad de ajuste  $D_j$  para el transductor  $j$ .

Determine la deformación promedio de cada transductor como sigue:

$$\bar{\epsilon}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_{ji}}{n} \quad (11)$$

Donde:

$\bar{\epsilon}_j$  = deformación promedio para el transductor  $j$

$\epsilon_{ji}$  = deformación para el transductor  $j$  en el punto  $i$  del arreglo

$n$  = número de puntos en el arreglo de datos

Corrija y centre los datos de deformación para cada uno de los transductores restando de las deformaciones medidas los tiempos de la velocidad de ajuste el tiempo de carga y también reste la deformación promedio para dicho transductor.

$$\epsilon'_{ji} = \epsilon_{ji} - D_j t_i - \bar{\epsilon}_j \quad (12)$$

Donde:

$\epsilon'_{ji}$  = deformación central y corregida para el transductor  $j$  en el punto  $i$  en el arreglo de datos

$\epsilon_{ji}$  = deformación para el transductor  $j$  en el punto  $i$  en el arreglo de datos

$t_i$  = tiempo para el punto  $i$  en el arreglo de datos

$\bar{\epsilon}_j$  = deformación promedio para el transductor  $j$

$D_j$  = velocidad de ajuste del transductor  $j$

De los datos de deformación centrados y corregidos para cada transductor, calcule los tres coeficientes de deformación: desplazamiento, magnitud de la fase y magnitud fuera de la fase.

$$A_{\epsilon j 0} = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon'_{ji}}{n} \quad (13)$$

$$A_{\epsilon j 1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon'_{ji} \cos(\omega_0 t_i) \quad (14)$$

$$B_{\epsilon j 1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon'_{ji} \sin(\omega_0 t_i) \quad (15)$$

Donde:

$A_{\epsilon_j}$  = coeficiente de ajuste para el transductor de deformación j

$A_{\epsilon_{j1}}$  = magnitud del coeficiente en fase para el transductor de deformación j

$B_{\epsilon_{j1}}$  = magnitud del coeficiente fuera de fase para el transductor de deformación j

$\epsilon'_{ji}$  = deformación central y corregida para el transductor j en el punto i en el arreglo de datos

$t_i$  = tiempo para el punto i en el arreglo de datos

$\omega_0$  = frecuencia del esfuerzo aplicado, rad/seg

De los coeficientes de deformación, calcule la magnitud de la deformación y el ángulo de fase para cada transductor.

$$|\epsilon_j| = \sqrt{A_{\epsilon_{j1}}^2 + B_{\epsilon_{j1}}^2} \quad (16)$$

$$\theta_{\epsilon_{j1}} = \arctan\left(-\frac{B_{\epsilon_{j1}}}{A_{\epsilon_{j1}}}\right) \quad (17)$$

Donde:

$|\epsilon_j|$  = magnitud de la deformación para el transductor, j

$\theta_{\epsilon_{j1}}$  = ángulo de fase para el transductor de deformación, grados

$A_{\epsilon_{j1}}$  = magnitud del coeficiente en fase para el transductor de deformación j

$B_{\epsilon_{j1}}$  = magnitud del coeficiente fuera de fase para el transductor de deformación j

Para cada uno de los transductores de deformación, calcular una matriz/fila de la deformación central y la corregida estimada y la desviación estándar de los datos de deformación.

$$\epsilon'_{ji} = A_{\epsilon_{j0}} + A_{\epsilon_{j1}} \cos(\omega_0 t_i) + B_{\epsilon_{j1}} \sin(\omega_0 t_i) \quad (18)$$

$$SE(\epsilon_j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon'_{ji} - \epsilon_{ji})^2}{n-4} \left(\frac{100\%}{|\epsilon'_j|}\right)} \quad (19)$$

Donde:

$\hat{\epsilon}_{ji}^t$  = deformación central corregida y estimada para el transductor de deformación j en el punto i

$se(\epsilon_j)$  = desviación estándar para la respuesta del transductor j, por ciento

$A_{\epsilon_j}$  = coeficiente de ajuste para el transductor de deformación j

$A_{c_{\theta j}}$  = magnitud del coeficiente en fase para el transductor de deformación j

$B_{\epsilon_{\theta j}}$  = magnitud del coeficiente fuera de fase para el transductor de deformación j

$\epsilon_{ji}^*$  = deformación central y corregida para el transductor j en el punto i en el arreglo de datos

$t_i$  = tiempo para el punto i en el arreglo de datos

$\omega_0$  = frecuencia del esfuerzo aplicado, rad/seg

$|\epsilon_j^*|$  = magnitud de la deformación para el transductor, j

$n$  = número de puntos en el arreglo de datos

Calcule el ángulo de fase promedio, la magnitud de la deformación y la desviación estándar para todos los transductores de deformación m, con dos coeficientes de uniformidad que representan la variación entre la deformación de los transductores.

$$\bar{\theta}_\epsilon = \frac{\sum_{j=1}^m \theta_{\epsilon j}}{m} \quad (20)$$

$$|\bar{\epsilon}^*| = \frac{\sum_{j=1}^m |\epsilon_j^*|}{m} \quad (21)$$

$$se(\bar{\epsilon}) = \frac{\sum_{j=1}^m se(\epsilon_j)}{m} \quad (22)$$

$$U_\epsilon = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (|\epsilon_j^*| - |\bar{\epsilon}^*|)^2}{m-1}} \left( \frac{100 se_0}{|\bar{\epsilon}^*|} \right) \quad (23)$$

Donde:

$\bar{\theta}_\epsilon$  = ángulo de fase promedio para todos los transductores de deformación, grados

$|\bar{\epsilon}^*|$  = magnitud de la deformación promedio

$se(\bar{\epsilon})$  = desviación estándar promedio para todos los transductores de deformación, en por ciento

$U_\epsilon$  = Coeficiente de uniformidad para los transductores de deformación, porciento

$U_{\theta}$  = Coeficiente de uniformidad para la fase, porciento

$m$  = número de puntos en el arreglo de datos

Calcule el ángulo de fase y el módulo dinámico. El paso final en el análisis de datos es calcular el ángulo de fase general  $\theta(\omega)$ , en grados, y el módulo complejo,  $|E^*(\omega)$ , kPa para la frecuencia seleccionada,  $\omega$ :

$$\theta(\omega) = \bar{\theta}_\epsilon - \theta_\sigma \quad (25)$$

$$|E^*(\omega)| = \frac{|\sigma^*|}{|\epsilon^*|} \quad (26)$$

Donde:

$\theta(\omega)$  = ángulo de fase entre el esfuerzo aplicado y la deformación para la frecuencia  $\omega$ , grados

$|E^*(\omega)|$  = módulo dinámico para la frecuencia  $\omega$ , kPa (psi)

$\bar{\theta}_\epsilon$  = ángulo de fase promedio para todos los transductores de deformación, grados

$\theta_\sigma$  = ángulo de fase del esfuerzo, grados

$|\sigma^*|$  = magnitud del esfuerzo, kPa (psi)

#### 10. Calidad de los datos.

Además del módulo dinámico y el ángulo de fase, un producto del análisis de datos descrito en la sección anterior son cuatro indicadores de calidad: (1) la desviación estándar del esfuerzo aplicado, (2) la desviación estándar de las mediciones de deformación, (3) el coeficiente de uniformidad de las mediciones de deformación y (4) el coeficiente de uniformidad de las mediciones del ángulo de fase.

Estos indicadores de la calidad de los datos deben ser usados para aprobar la confiabilidad de los datos. La tabla 3.11 presenta los límites recomendados para los indicadores de calidad de los datos.

Indicador	Símbolo	Ecuación	Límite
Desviación estándar del esfuerzo aplicado	$se(\sigma)$	9	$\leq 10\%$
Desviación estándar promedio de la medición de deformaciones	$se(\epsilon)$	21	$\leq 10\%$
Coficiente de uniformidad de las mediciones de deformación	$U_\epsilon$	22	$\leq 20\%$
Coficiente de uniformidad de las mediciones del ángulo de fase	$U_\theta$	23	$\leq 3$ grados

18Tabla 3.10 Límites recomendados para indicadores de calidad (fuente: IMT).

## CAPITULO 4 PRUEBAS DE DESEMPEÑO EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

### 4.1 Agregado Pétreo.

Para el desarrollo experimental del presente trabajo de investigación, se utilizó un agregado pétreo de la región centro del país, el cual es un material de origen basáltico producto de trituración.

El agregado pétreo utilizado es una combinación de dos fracciones: una gruesa y una fina; la parte gruesa está compuesta a su vez por 2 tipos de material, una grava (3/4") y un sello (1/2"). El material grueso pertenece al Banco de "La Letra" y el material fino pertenece al Banco de "Derrumbadas".

En lo referente al material pétreo se evaluaron las propiedades físicas que presentan en el diseño del protocolo AMAAC, dichas propiedades se evaluaron con las siguientes pruebas:

- Granulometría.
- Desgaste de los Ángeles.
- Microdeval.
- Densidad y Absorción.
- Pesos Volumétricos.
- Equivalente de Arena.
- Azul de Metileno.
- Angularidad del agregado Fino.
- Forma y caras fracturadas de la partícula.

#### 4.1.1 Granulometría.

Esta prueba nos permite identificar los porcentajes de las fracciones que componen al material pétreo, dicha prueba es el comienzo para el diseño de la mezcla asfáltica.

En el protocolo AMAAC se definen distintos puntos de control, esto dependiendo del tamaño nominal del agregado en estudio.

La prueba consiste en cribar una muestra de agregado por las mallas especificadas en el protocolo AMAAC, las cuales son: 1", 3/4", 1/2", 3/8", No. 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y pasa 200.

Para el agregado fino:

<b>Granulometría del Material por Lavado</b>	
Masa inicial de la muestra, g	1596
Masa final de la muestra, g	1436.9
Masa de pérdida, g	159.1

					<b>Error:</b>	<b>0.22%</b>
Tamaño abertura de malla		Peso Retenido, g	Peso Retenido Ajustado, g	Retenido Parcial, %	Retenido Acumulado, %	% Que pasa
mm	plg					
50	2"	0	0	0.0%	0.0%	100%
37.5	1 1/2"	0	0	0.0%	0.0%	100%
25	1"	0	0	0.0%	0.0%	100%
19	3/4"	0	0	0.0%	0.0%	100%
12.5	1/2"	0	0	0.0%	0.0%	100%
9.5	3/8"	0	0	0.0%	0.0%	100%
6.3	No. 4	65.1	65.5	4.1%	4.1%	96%
2.36	No. 8	383.6	384.0	24.1%	28.2%	72%
1.18	No. 16	326.1	326.5	20.5%	48.6%	51%
0.6	No. 30	240.2	240.6	15.1%	63.7%	36%
0.3	No. 50	153.7	154.1	9.7%	73.4%	27%
0.15	No. 100	139.4	139.8	8.8%	82.1%	18%
0.075	No. 200	89.2	89.6	5.6%	87.7%	12%
	<b>Pasa No. 200</b>	36.4	195.9	12.3%	100.0%	0%
	<b>Total:</b>	1433.7	1596	100%		

19Tabla 4.1 Granulometría Arena.

## Grava

<b>Granulometría del Material por Lavado</b>	
Masa inicial de la muestra, g	3078.3
Masa final de la muestra, g	3045
Masa de pérdida, g	33.3

					<b>Error:</b>	<b>0.04%</b>
Tamaño abertura de malla		Peso Retenido, g	Peso Retenido Ajustado, g	Retenido Parcial, %	Retenido Acumulado, %	% Que pasa
mm	plg					
50	2"	0	0	0.0%	0.0%	100%
37.5	1 1/2"	0	0	0.0%	0.0%	100%
25	1"	0	0	0.0%	0.0%	100%
19	3/4"	12.7	12.7	0.4%	0.4%	100%
12.5	1/2"	1052.3	1052.3	34.2%	34.6%	65%
9.5	3/8"	680.7	680.7	22.1%	56.7%	43%
6.3	No. 4	952	952.2	30.9%	87.6%	12%
2.36	No. 8	244.3	244.5	7.9%	95.6%	4%
1.18	No. 16	41.8	42.0	1.4%	96.9%	3%
0.6	No. 30	12.2	12.4	0.4%	97.3%	3%
0.3	No. 50	8.2	8.4	0.3%	97.6%	2%
0.15	No. 100	9.9	10.1	0.3%	97.9%	2%
0.075	No. 200	14.2	14.4	0.5%	98.4%	2%
	<b>Pasa No. 200</b>	15.4	48.9	1.6%	100.0%	0%
	<b>Total:</b>	3043.7	3078.3	100%		

20Tabla 4.2 Granulometría Grava.

Sello

<b>Granulometría del Material por Lavado</b>	
Masa inicial de la muestra, g	1701.8
Masa final de la muestra, g	1679.1
Masa de pérdida, g	22.7

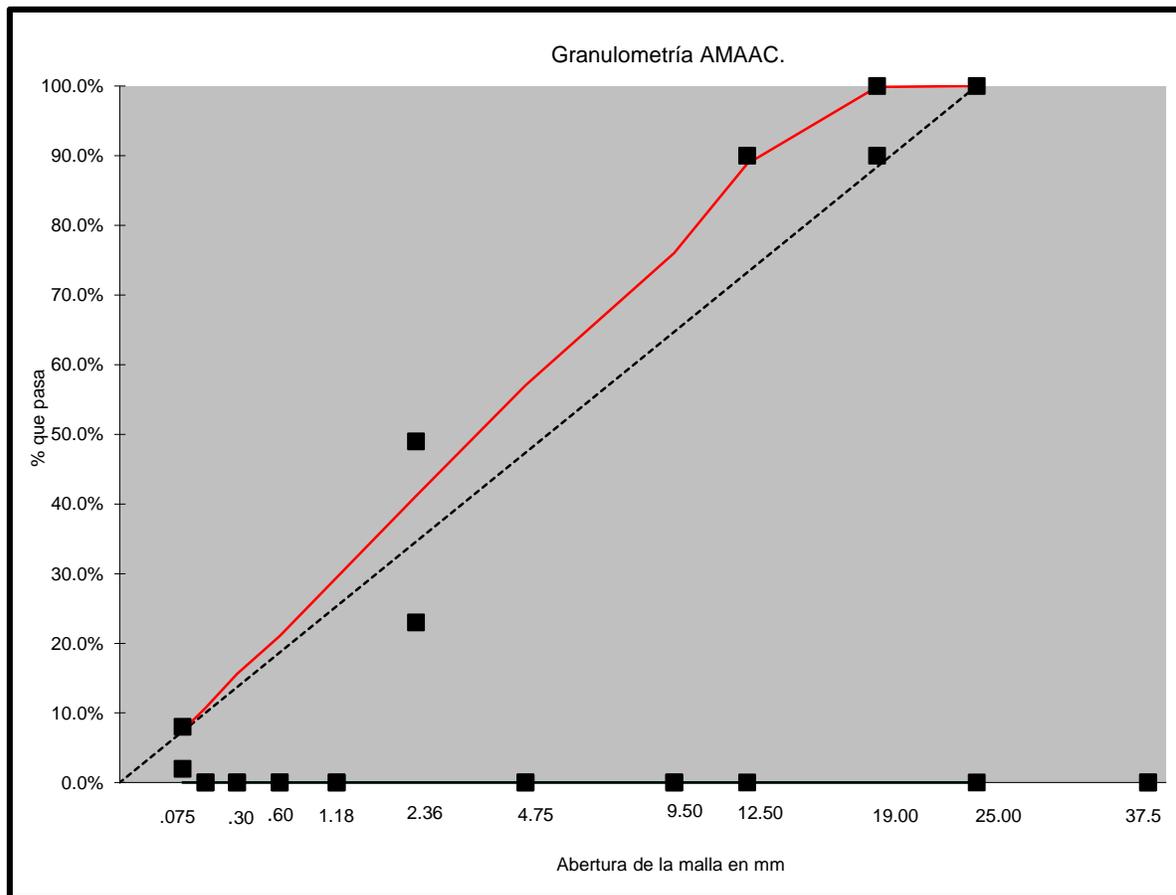
					<b>Error:</b>	<b>0.00%</b>
Tamaño abertura de malla		Peso Retenido, g	Peso Retenido Ajustado, g	Retenido Parcial, %	Retenido Acumulado, %	% Que pasa
mm	plg					
<b>50</b>	<b>2"</b>	0	0	0.0%	0.0%	100%
<b>37.5</b>	<b>1 1/2"</b>	0	0	0.0%	0.0%	100%
<b>25</b>	<b>1"</b>	0	0	0.0%	0.0%	100%
<b>19</b>	<b>3/4"</b>	0	0	0.0%	0.0%	100%
<b>12.5</b>	<b>1/2"</b>	92.5	92.5	5.4%	5.4%	95%
<b>9.5</b>	<b>3/8"</b>	695.7	695.7	40.9%	46.3%	54%
<b>6.3</b>	<b>No. 4</b>	848.8	848.8	49.9%	96.2%	4%
<b>2.36</b>	<b>No. 8</b>	33.8	33.8	2.0%	98.2%	2%
<b>1.18</b>	<b>No. 16</b>	1.8	1.8	0.1%	98.3%	2%
<b>0.6</b>	<b>No. 30</b>	1	1.0	0.1%	98.3%	2%
<b>0.3</b>	<b>No. 50</b>	0.7	0.7	0.0%	98.4%	2%
<b>0.15</b>	<b>No. 100</b>	0.9	0.9	0.1%	98.4%	2%
<b>0.075</b>	<b>No. 200</b>	2	2.0	0.1%	98.6%	1%
	<b>Pasa No. 200</b>	1.9	24.6	1.4%	100.0%	0%
<b>Total:</b>		1679.1	1701.8	100%		

21Tabla 4.3 Granulometría Sello.

La propuesta granulometría es: un 55% Arena, 30% Grava y 15% Sello. Lo cual nos da una granulometría como se muestra a continuación.

Abertura de Malla		Granulometría Individual			Mezcla
1"	25.00	100%	100%	100%	100%
3/4"	19.00	100%	100%	100%	100%
1/2"	12.60	100%	65%	95%	89%
3/8"	9.60	100%	43%	54%	76%
No. 4	4.75	96%	12%	4%	57%
No. 8	2.36	72%	4%	2%	41%
No. 16	1.18	51%	3%	2%	29%
No. 30	0.60	36%	3%	2%	21%
No. 50	0.30	27%	2%	2%	16%
No. 100	0.15	18%	2%	2%	11%
No. 200	0.075	12%	2%	1%	7%

22Tabla 4.4 Granulometría de la mezcla.



39Figura 4.1 Granulometría y puntos de control AMAAC.

#### 4.1.2 Desgaste de los Ángeles

El objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en una mezcla asfáltica. La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio, en donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un periodo de 500 revoluciones, midiendo la variación de pesos de la muestra en estudio, pesando el material retenido en la malla número 12, este a su vez será dividido por el peso inicial de la muestra. De esta forma obtendremos el porcentaje de desgaste del material.

Granulometría	Número de esferas	Masa de la carga abrasiva, g
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

23Tabla 4.5 Tipo de muestra.

Tamaño de Mallas Pasa-Retiene	A	B	C	D
1 1/2" - 1"	1250 ± 25			
1" - 3/4"	1250 ± 25			
3/4" - 1/2"	1250 ± 25	2500 ± 10		
1/2" - 3/8"	1250 ± 25	2500 ± 10		
3/8" - 1/4"			2500 ± 10	
1/4" - #4			2500 ± 10	
#4 - #8				5000 ± 10
<b>PESO TOTAL INICIAL</b>	<b>5000 ± 10</b>	<b>5000 ± 10</b>	<b>5000 ± 10</b>	<b>5000 ± 10</b>

24Tabla 4.6 Composición de la muestra.

#### Evaluación de la Grava.

<b>Desgaste de Los Ángeles</b>	
Tipo Granulometría	B
Masa inicial, g	5004.1
Masa final, g	4167.8
<b>Desgaste L.A., %</b>	<b>16.7%</b>

25Tabla 4.7 Resultados Grava Desgaste de los Ángeles.

#### Evaluación del Sello.

<b>Desgaste de Los Ángeles</b>	
Tipo Granulometría	C
Masa inicial, g	5001.5
Masa final, g	4034.5
<b>Desgaste L.A., %</b>	<b>19.3%</b>

26Tabla 4.8 Resultados Sello Desgaste de los Ángeles.

#### 4.1.3 Microdeval.

El ensayo microdeval, en agregados gruesos, es una medida de la resistencia a la abrasión y durabilidad de agregados pétreos que han sido sometidos a la acción combinada de abrasión y molienda con bolas de acero en presencia de agua. La muestra con graduación normalizada es inicialmente sumergida en agua por un tiempo definido según la granulometría del material. La muestra es entonces colocada en un recipiente de acero con 2.0 litros de agua y una carga abrasiva consistente en 5000 gr de balines de acero de 9.5 mm de diámetro. El recipiente, agregado, agua y carga se rotan a 100 rpm por un tiempo normalizado según el tamaño de la partícula. La muestra luego es lavada y secada en horno. La pérdida es la cantidad de material que pasa el tamiz de 1.18 mm (No 16), expresada como porcentaje de la masa original de la muestra.

TAMAÑO NÓMINAL = 3/4"

Malla Pasa - Retiene	Masa, g
3/4" - 5/8"	375
5/8" - 1/2"	375
1/2" - 3/8"	750
<b>TOTAL</b>	<b>1500 ± 5</b>

TAMAÑO NÓMINAL = 1/2"

Malla Pasa - Retiene	Masa, g
1/2" - 3/8"	750
3/8" - 1/4"	375
1/4" - #4	375
<b>TOTAL</b>	<b>1500 ± 5</b>

TAMAÑO NÓMINAL = 3/8"

Malla Pasa - Retiene	Masa, g
3/8" - 1/4"	750
1/4" - #4	750
<b>TOTAL</b>	<b>1500 ± 5</b>

Número de revoluciones.

Tamaño Nominal	Duración, rpm
3/4"	12,000 ± 100
1/2"	10,500 ± 100
3/8"	9,000 ± 100

27Tabla 4.9 Composición de la muestra por tamaño nominal y número de revoluciones.

$$\% \text{ Desgaste Micro - Deval} = 100 \frac{\text{masa inicial} - \text{masa final}}{\text{masa inicial}}$$

<b>Micro-Deval</b>	
Tipo Granulometría	1
Masa inicial, g	1505.3
Masa final, g	1213
<b>Desgaste , %</b>	<b>19.4%</b>

28Tabla 4.10 Evaluación Micro-Deval Grava.

<b>Micro-Deval</b>	
Tipo Granulometría	3
Masa inicial, g	1501.1
Masa final, g	1239.4
<b>Desgaste , %</b>	<b>17.4%</b>

29Tabla 4.11 Evaluación Micro-Deval Sello.

#### 4.1.4 Densidad y Absorción.

Estas pruebas permiten determinar las relaciones masa-volumen de los materiales respecto a la relación masa-volumen del agua, así como la absorción de los materiales y se utilizan para calcular los volúmenes ocupados por el material o mezcla de materiales o mezcla de materiales en sus diferentes condiciones de contenidos de agua y el cambio de masa del material debido a la entrada de agua en sus poros, con respecto a su condición en estado seco; las pruebas se realizan de distinta manera en la fracción del material retenida en la malla N° 4 (4.75 mm) y en la condición que pasa dicha malla.

Para el retenido en la malla No. 4 se sumerge la muestra en agua durante  $24 \pm 4$  horas, se seca el material para obtener la condición de Saturado Superficialmente Seco ( $P_{SSS}$ ), se determina el peso sumergido ( $P_{sum}$ ) y se seca la muestra en horno hasta peso constante, se toma el peso seco ( $P_s$ )

$$Densidad\ Relativa\ (Secado\ al\ horno,\ Gsb) = \frac{P_s}{P_{SSS} - P_{sum}}$$

$$Densidad\ Relativa\ (Saturado\ y\ Superficialmente\ Seco) = \frac{P_{SSS}}{P_{SSS} - P_{sum}}$$

$$Densidad\ Relativa\ Aparente = \frac{P_s}{P_s - P_{sum}}$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{P_{SSS} - P_s}{P_s} \times 100$$

<b>Gravedad específica y absorción del agregado grueso</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>
Peso seco de la muestra, g	4068.8	3906.3
Peso SSS de la muestra, g	4185.5	4016.1
Peso Sumergido de la muestra, g	2636.5	2530.4
Densidad Neta (Gsb)	2.627	2.629
Densidad Aparente (Gsa), %	2.841	2.839
Absorción, %	2.9%	2.8%
<b>Gsb, promedio</b>	2.628	
<b>Gsa, promedio</b>	2.840	
<b>Absorción, % promedio</b>	2.8%	

30Tabla 4.12 Gravedad específica de la Grava.

<b>Gravedad específica y absorción del agregado grueso</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>
Peso seco de la muestra, g	3404.1	3343.3
Peso SSS de la muestra, g	3495.8	3431
Peso Sumergido de la muestra, g	2218.3	2171.1
Densidad Neta (Gsb)	2.665	2.654
Densidad Aparente (Gsa), %	2.871	2.852
Absorción, %	2.7%	2.6%
<b>Gsb, promedio</b>	2.659	
<b>Gsa, promedio</b>	2.861	
<b>Absorción, % promedio</b>	2.7%	

31Tabla 4.13 Gravedad específica del Sello.

Para la densidad del material fino (pasa malla No. 4) el procedimiento es el siguiente: Saturar material a 6% de humedad por  $24 \pm 4$  hrs, colocar material en cono hasta el borde y amontonar material adicional sobre la superficie, dejar caer el pisón 25 veces a 5 mm de la superficie, levantar verticalmente el cono, determinar condición Saturado y Superficialmente Seco ( $P_{SSS}$ ), llenar parcialmente el picnómetro con agua, introducir  $500 \pm 10$  g de Agregado SSS (S), llenar con agua hasta 90% de capacidad del picnómetro, tapar, invertir y agitar el picnómetro hasta eliminar burbujas de aire (15 a 20 minutos), llenar con agua el picnómetro hasta marca de calibración, ajustar temperatura de picnómetro, agua y muestra a  $23 \pm 2$  °C y registrar su masa (C), sacar el agregado del picnómetro, secarlo y determinar su masa (A), determinar masa del picnómetro con agua hasta la marca de calibración (B).

$$\text{Densidad Relativa (Secado al horno, Gsb)} = \frac{A}{B + S - C}$$

$$\text{Densidad Relativa (Saturado y Superficialmente Seco)} = \frac{S}{B + S - C}$$

$$\text{Densidad Relativa Aparente (Gsa)} = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\% \text{ Absorción} = 100 \frac{(S - A)}{A}$$

<b>Gravedad específica y absorción del agregado fino</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>
Peso SSS de la muestra, g	500.8	500.4
Peso Picnómetro+agua	1305.2	1305.2
Peso Picnómetro+agua+muestra	1602.2	1602.3
Peso seco de la muestra, g	497.8	498.6
Densidad Neta (Gsb)	2.443	2.453
Densidad Aparente (Gsa)	2.479	2.474
Absorción, %	0.6%	0.4%
<b>Gsb, promedio</b>	2.448	
<b>Gsa, promedio</b>	2.477	
<b>Absorción, % promedio</b>	0.5%	

32Tabla 4.14 Gravedad específica de la Arena.

#### 4.1.5 Pesos Volumétricos.

El peso volumétrico es el factor que se usa para la determinación del volumen que ocupa un agregado grueso o fino. Se requiere obtener dos pesos volumétricos que son: seco suelto y seco compacto.

El procedimiento para obtener el peso volumétrico seco suelto (PVSS), consiste en llenar con el material pétreo un recipiente con peso y volumen conocido, de igual forma para obtener el peso volumétrico seco compacto o seco varillado (PVSV), se llena el recipiente pero esta vez en 3 capas, para cada capa se dan 25 golpes con la varilla punta de bala.

<b>Peso Volumétrico Agregado Grueso</b>	
Peso recipiente+muestra S y S	5781.3
Peso recipiente+muestra S y C	6101.4
y seco suelto, kg/m <sup>3</sup>	1.439
y seco compacto, kg/m <sup>3</sup>	1.550

33Tabla 4.15 Peso Volumétrico de la Grava.

<b>Peso Volumétrico Agregado Grueso</b>	
Peso recipiente+muestra S y S	5487.4
Peso recipiente+muestra S y C	6036.9
γ seco suelto, kg/m <sup>3</sup>	1.336
γ seco compacto, kg/m <sup>3</sup>	1.528

34Tabla 4.16 Peso volumétrico del Sello.

<b>Peso Volumétrico Agregado Fino</b>	
Peso recipiente+muestra S y S	5964.9
Peso recipiente+muestra S y C	6492.1
γ seco suelto, kg/m <sup>3</sup>	1.503
γ seco compacto, kg/m <sup>3</sup>	1.687

35Tabla 4.17 Peso volumétrico de la Arena.

#### 4.1.6 Equivalente de Arena.

Esta prueba permite determinar el contenido de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en agitar una probeta, que contiene una muestra del material pétreo que pasa la malla N°4, mezclada con una solución que permite separar la arena de la arcilla.

La muestra del material se humedece para evitar segregación y pérdida de finos, una vez que se llega al contenido óptimo de trabajo se forma un cono con el material, se llena la medida metálica, iniciando de la base a la parte superior del cono y con presión manual consolidar el material dentro de éste. Se vacían 4" de la solución de trabajo en la probeta, se vacía la muestra en la probeta con ayuda de un embudo y se golpea la base de la probeta enérgicamente para humedecer el material y eliminar burbujas, se deja reposar durante  $10 \pm 1$  minuto. Transcurrido el tiempo se tapa la probeta y se agita para despegar el material de la base. Se coloca la probeta en el agitador mecánico por  $45 \pm 1$  segundo, después se quita el tapón y se irriga la probeta de manera descendente, aplicando suaves punzadas y girando el irrigador mientras fluye la solución de trabajo. Se retira el irrigador y se ajusta el nivel de la solución a 15", se deja reposar por 20 minutos y se toman las lectura de arcilla (nivel superior), luego la lectura de arena con ayuda del pisón.

$$\% \text{ Equivalente de Arena} = 100 \frac{\text{Lectura Arena}}{\text{Lectura de Arcilla}}$$

<b>Equivalente de Arena</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>
Lectura de Arcilla, plg.	5.4	5.0
Lectura de Arena, plg.	3.6	3.4
<b>Equivalente Arena, %</b>	67%	68%
<b>Promedio</b>	<b>67%</b>	

36Tabla 4.18 Equivalente de Arena.

#### 4.1.7 Azul de Metileno.

La prueba de azul de metileno se emplea para conocer el grado de contaminación con material dañino o materia orgánica, que se encuentra presente en el material analizado. Entre mayor sea el valor de azul de metileno mayor es el grado de contaminación.

La preparación de la muestra consiste en obtener mínimo 5 gramos de material que pasa la malla No. 200, en un vaso de precipitado se vierte 1 g de filler y 30 ml de agua destilada, y se agita en el agitador magnético. En un bureta graduada a 50 ml se llena con la solución de azul de metileno 1/1000. Se agrega 1 ml de solución a la vez y se agita la suspensión por 1 minuto, se toma una gota de suspensión con la punta de la barra de vidrio y se coloca en el papel filtro, se observa la gota para identificar la aparición del halo azul, se repite la adición de 1 ml de solución hasta la aparición del halo, una vez que aparece se deja agitar por 4 minutos más y se toma una nueva gota para confirmar la aparición del halo. Se reporta el número de mililitros de solución utilizados hasta la aparición del halo.

Azul de Metileno	
mg/g	5

37Tabla 4.19 Azul de Metileno.

#### 4.1.8 Angularidad del agregado fino.

Un medidor cilíndrico calibrado de 100 ml nominales se llena con agregado fino de graduación prescrita, permitiendo que la muestra fluya a través de un embudo desde una altura fija dentro del medidor. El agregado fino se extrae y su masa se determina pesándolo. El contenido de vacíos sin compactar se calcula como la diferencia entre el volumen del medidor cilíndrico y el volumen absoluto del agregado fino recogido en el medidor. El contenido de vacíos del agregado fino sin compactar se calcula usando la gravedad específica bulk seca del agregado fino. Se deben hacer tres medidas con cada muestra y los resultados se promedian.

$$\text{Angularidad del Agregado Fino, \%} = 100 \frac{\text{Vol cilindro} - \frac{\text{Peso agregado}}{\text{densidad específica}}}{\text{Vol cilindro}}$$

Angularidad del agregado fino			
	1	2	3
Peso cilindro + muestra, g	379.0	379.1	378.9
Peso de la muestra, g	126.8	126.9	126.7
Angularidad del agregado fino, %	48.2%	48.2%	48.2%
<b>AAF, % promedio</b>	<b>48.2%</b>		

38Tabla 4.20 Angularidad del agregado fino.

#### 4.1.9 Forma de la partícula.

La forma de la partícula define grupos de acuerdo a: partículas planas, partículas alargadas y finalmente en partículas planas y alargadas. Con la realización de esta prueba nos permite definir los porcentajes de material correspondientes a cada grupo antes mencionado.

Se evalúa cada partícula en la relación 1:3 y separar en cualquiera de los 3 grupos:

Planas: Ancho vs Espesor

Alargada: Largo vs Ancho

Planas y alargadas: Longitud vs Espesor

Se determina el porcentaje de cada grupo, por masa o por conteo.

Grava.

<i>Partículas Planas y Alargadas</i>			Por Masa o No. Partículas		
Tamaño Partícula	Masa de la muestra, g	No. Partículas	Planas	Alargadas	Planas y Alargadas
3/4"	20.3		0	0	0
1/2"	1131.1		21	0	0
3/8"					
<b>SUMA</b>	1151.4		21	0	0
	<b>Partículas Planas</b>	<b>Partículas Alargadas</b>	<b>Planas y Alargadas</b>		
<b>Promedio</b>	1.8%	0.0%	0.0%		

39 Tabla 4.21 Partículas planas y alargadas de la Grava.

Sello.

<i>Partículas Planas y Alargadas</i>			Por Masa o No. Partículas		
Tamaño Partícula	Masa de la muestra, g	No. Partículas	Planas	Alargadas	Planas y Alargadas
3/4"	0		0	0	0
1/2"	0		0	0	0
3/8"	713.3		23.3	0	0
<b>SUMA</b>	713.3		23.3	0	0
	<b>Partículas Planas</b>	<b>Partículas Alargadas</b>	<b>Planas y Alargadas</b>		
<b>Promedio</b>	3.3%	0.0%	0.0%		

40 Tabla 4.22 Partículas planas y alargadas del Sello.

#### 4.1.10 Caras fracturadas.

En cuanto a la prueba de las caras fracturadas de igual forma que la anterior nos permite conocer las características del material en cuanto al grado de trituración se refiere. La prueba clasifica al material en tres grupos: material con cero caras fracturadas, una cara fracturada y finalmente dos o más caras fracturadas.

<b>Caras Fracturadas</b>			<b>Por Masa o No. Partículas</b>		
<b>Tamaño Partícula</b>	<b>Masa de la muestra, g</b>	<b>No. Partículas</b>	<b>0 Caras Fracturadas</b>	<b>1 Cara Fracturada</b>	<b>2 ó + Caras Fracturadas</b>
<b>3/4"</b>	66.1		0	8.3	57.8
<b>1/2"</b>	745.7		0	142.8	602.9
<b>3/8"</b>	211.7		0	29.7	182
<b>SUMA</b>	1023.5	0	0	180.8	842.7
	<b>0 CF</b>	<b>1 CF</b>	<b>2 CF</b>		
<b>Caras Fracturadas</b>	0.0%	100.0%	82.3%		

41Tabla 4.23 Caras fracturadas de la Grava.

$$\% \text{ Caras Fracturadas} = 100 \frac{F}{F + N}$$

F= Partículas que si cumplen con las caras fracturadas.

N= Partículas que no cumplen.

<b>Caras Fracturadas</b>			<b>Por Masa o No. Partículas</b>		
<b>Tamaño Partícula</b>	<b>Masa de la muestra, g</b>	<b>No. Partículas</b>	<b>0 Caras Fracturadas</b>	<b>1 Cara Fracturada</b>	<b>2 ó + Caras Fracturadas</b>
<b>3/4"</b>	0	0	0	0	0
<b>1/2"</b>	0	0	0	0	0
<b>3/8"</b>	304.8		13.5	51.4	239.9
<b>SUMA</b>	304.8	0	13.5	51.4	239.9
	<b>0 CF</b>	<b>1 CF</b>	<b>2 CF</b>		
<b>Caras Fracturadas</b>	4.4%	95.6%	78.7%		

42Tabla 4.24 Caras fracturadas del Sello.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de las propiedades físicas del agregado utilizado en la investigación.

PROPIEDAD FÍSICA	NORMA	FRACCIÓN DEL AGREGADO			ESPECIFICACIÓN
		FINO	GRUESO	SELLO	
Peso Volumétrico Seco Suelto, kg/m <sup>3</sup>	ASTM C 29	1503	1439	1336	-
Peso Volumétrico Seco Compacto, kg/m <sup>3</sup>		1687	1550	1528	-
Gravedad Específica Neta, Gsb	ASTM C 127	2.448	2.628	2.659	> 2.4
Gravedad Específica Aparente, Gsa		2.477	2.840	2.861	-
Absorción, %		0.5%	2.8%	2.7%	-
<b>PRUEBAS EXCLUSIVAS EN EL AGREGADO FINO</b>					
Angularidad, %	AASHTO T 304	48%	-	-	40% mín.
Equivalente de Arena, %	ASTM D 2419	67%	-	-	50% mín.
Azul de Metileno, mg/g	AMAAC RA 05	5	-	-	
<b>PRUEBAS EXCLUSIVAS EN EL AGREGADO GRUESO</b>					
Desgaste de Los Ángeles, %	ASTM C 131	-	17%	19%	30% máx.
Micro-Deval, %	AASHTO T 327	-	19%	17%	15% máx.
Partículas con 1 Cara Fracturada, %	ASTM D 5821	-	100%	96%	100% mín.
Partículas con 2 ó más Caras Fracturadas, %		-	82%	79%	90% mín.
Partículas Planas, %	ASTM D 4791	-	2%	3%	10% máx.
Partículas Alargadas, %		-	0%	0%	10% máx.

43Tabla 4.25 Propiedades físicas de los agregados.

## 4.2 Prueba Proctor Modificada.

El término compactación se utiliza en la descripción del proceso de densificación de un material mediante medios mecánicos. El incremento de la densidad se obtiene por medio de la disminución de la cantidad de aire que se encuentra en los espacios vacíos que se encuentra en el material, manteniendo el contenido de humedad relativamente constante.

Para medir el grado de compactación de material de un suelo o un relleno se debe establecer la densidad seca del material. En la obtención de la densidad seca se debe tener en cuenta los parámetros de la energía utilizada durante la compactación y también depende del contenido de humedad durante el mismo.

Prueba de compactación de suelos más utilizada es la prueba Proctor de la cual existen dos variantes: la Proctor Estándar y la Proctor Modificada. La diferencia que existe entre estas dos variantes es la energía de compactación utilizada.

Tipo de Prueba	Masa Pisón (kg)	Diámetro Pisón (mm)	Altura de caída Pisón (cm)
Estándar	2.5 ± 0.01	50.8	30.5 ± 0.1
Modificada	4.54 ± 0.01	50.8	45.7 ± 0.1

44Tabla 4.26 Dimensiones del Pisón.

El número de capas en la que se llenará el molde depende también del tipo de prueba Proctor a utilizar, para la Estándar son 3 capas y para la Modificada 5 capas.

En lo que respecta a las variantes de compactación, estas dependen del tamaño de la muestra en kilogramos y el diámetro del molde en milímetros, como se muestra en la tabla 4.27.

Variante	A	B	C	D
Tamaño máximo del material (mm)	7.5 (No. 4)		19.0 (3/4")	
Tamaño de la muestra (kg)	4	7.5	4	7.5
Diámetro interno del molde (mm)	101.6 ± 0.4	152.4 ± 0.7	101.6 ± 0.4	152.4 ± 0.7
Número de golpes por capa	25	56	25	56

45Tabla 4.27 Variantes de compactación.

Una vez elegido el tipo de variante se procede a llevar a cabo la prueba. Para nuestro caso se trata de una Proctor Modificada con un tamaño de muestra de 7.5 kilogramos, por lo que se dieron 56 golpes por capa.

El aumento en la humedad de compactación fue de 2%, comenzando con 4%, esto con base en el peso del agregado. Para obtener con mayor precisión el contenido de humedad utilizado con la compactación, para cada contenido se tomó una muestra de material, se obtuvo su peso húmedo y posteriormente se

introdujo a un horno para secarlo y conocer su peso seco. Los cálculos se realizaron con las siguientes fórmulas.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Masa húmeda} - \text{Masa Seca}}{\text{Masa Seca}}$$

$$\text{Masa volumétrica húmeda} = \frac{(\text{Peso Molde y suelo}) - (\text{Peso del molde})}{\text{Volumen del Molde}} * 1000$$

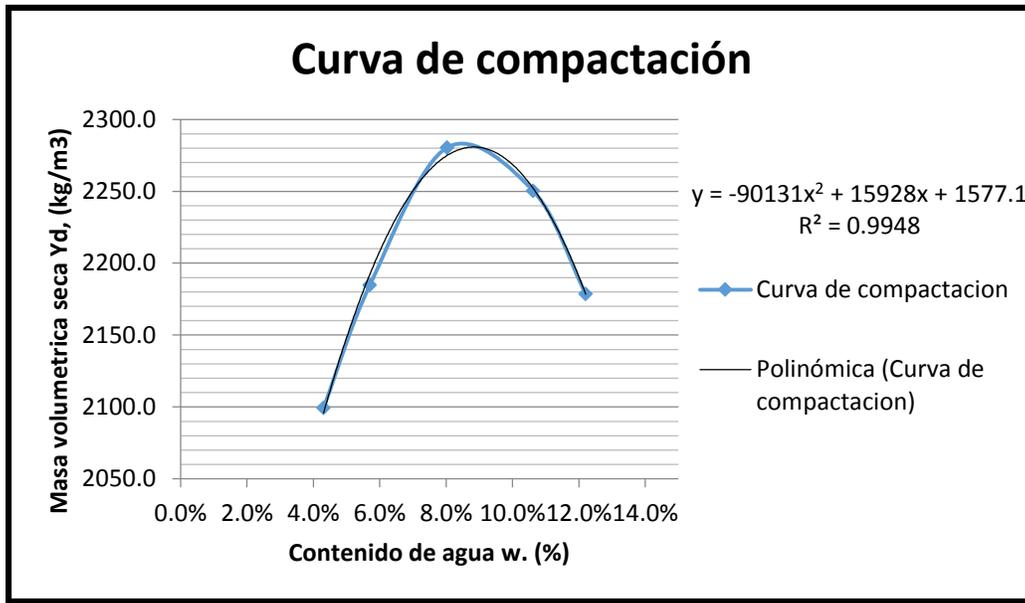
$$\text{Masa volumétrica Seca} = \frac{\text{Masa volumétrica húmeda}}{(100 + \text{Contenido de humedad})} * 100$$

Contenido de agua en espécimen		
Peso húmedo	Peso seco	Humedad
215.6	206.7	4.3%
200.2	189.4	5.7%
208.5	193.9	7.5%
204.5	189.3	8.0%
209.3	189.2	10.6%
224.3	199.9	12.2%

46Tabla 4.28 Contenido de humedad de la muestra.

Masa volumétrica del material húmedo, (kg/m3)	Ym	2189.8	2309.4	2377.9	2463.6	2489.3	2444.5
Masa del cilindro con el material húmedo compactado, (g)	Wi	10901.8	11139.4	11275.7	11445.9	11497.1	11408
Masa del cilindro, (g)	Wt	6548.9	6548.9	6548.9	6548.9	6548.9	6548.9
Volumen del cilindro, (cm3)	V	1987.8	1987.8	1987.8	1987.8	1987.8	1987.8
Masa volumétrica seca del espécimen, (kg/m3)	Yd	2099.4	2184.8	2211.4	2280.4	2250.3	2178.6
Contenido de agua del espécimen, (%)	w	4.3%	5.7%	7.5%	8.0%	10.6%	12.2%

47Tabla 4.29 Cálculo masa volumétrica seca.



40Figura 4.2 Curva de compactación.

Con los datos obtenidos se utilizó una ecuación de regresión polinomial de segundo orden, con la cual se obtuvo que el contenido de humedad óptimo para la compactación es de 8.8%. Cabe señalar que dicho valor nos permite tener un punto de referencia de la humedad de mezclado requerido que usualmente corresponde del 50 al 70% de la humedad de compactación determinada por Proctor Modificado.

Para el caso de nuestro estudio las emulsiones presentan un residuo asfáltico de 61%, considerando un punto de 8.5% de emulsión, tenemos un 3.3% de humedad a la cual tendremos que agregar lo restante de agua para obtener entre el 50 al 70% (4.4 a 6.2% de humedad) del valor en Proctor Modificado. Resultando entonces que se tendrá que adicionar un 3% de agua, con estos valores se inician los pre-diseños y en ellos se confirma la humedad de mezclado, observando que presenten buen cubrimiento del agregado, manejo adecuado de la mezcla y la cohesión a edad temprana. Teniendo en cuenta lo anterior se determinó que el punto óptimo fue 8.5% de emulsión más 4% de agua, para el caso de la emulsión superestable el contenido de agua incrementó al 5%, debido a que con el 4% no había buena manejabilidad de la mezcla, ni buen cubrimiento.

### 4.3 Caracterización de las emulsiones asfálticas.

Las pruebas realizadas a las emulsiones asfálticas utilizadas en la presente investigación se mencionan enseguida:

- Residuo asfáltico por evaporación.
- Tamaño de la partícula.
- Viscosidad Saybolt Furol.
- Asentamiento a 5 días.

- Retenido en la malla #20.
- Carga eléctrica de la partícula.

#### 4.3.1 Residuo asfáltico por evaporación.

Con esta prueba determinamos el contenido de asfalto presente en la emulsión. El ensayo se realiza calentando una muestra de emulsión en una parrilla, hasta lograr evaporar el total de agua que contiene. El cálculo se realiza con la siguiente ecuación:

$$\text{Residuo asfáltico}(\%) = \frac{(W_f - W_s)}{W_i} \times 100$$

Donde:

$W_f$  = Peso final de la emulsión + sartén y agitador.

$W_s$  = Peso del sartén y agitador.

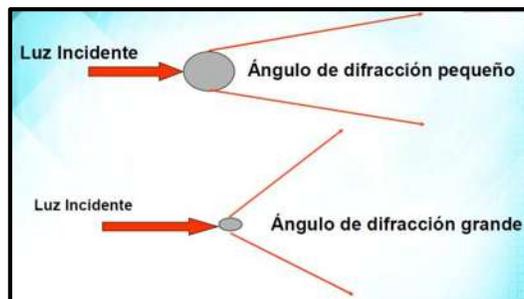
$W_i$  = Peso inicial de la emulsión.

#### 4.3.2 Tamaño de partícula.

La determinación del tamaño de partícula de una emulsión es uno de los parámetros más importantes para asegurar la calidad del proceso de molienda. Tiene un efecto directo en propiedades tales como viscosidad y asentamiento de las emulsiones.

Este parámetro es afectado por diversas variables como: tipo y naturaleza del cemento asfáltico, temperaturas de molienda del asfalto y solución jabonosa, tipo y concentración de emulsificante usado, molino y configuración de éste, pH, entre otros.

Existen diversas técnicas para determinar el tamaño de partícula, sin embargo en este estudio se utilizó la técnica llamada *determinación por difracción de rayo láser* de la cual se obtiene la distribución del tamaño en micras de los glóbulos de asfalto en una emulsión.



41Figura 4.3 Determinación del tamaño de partícula.

#### 4.3.3 Viscosidad Saybolt Furol.

La prueba permite conocer la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura estandarizada.

El ensayo consiste en verter una muestra dentro del viscosímetro a una temperatura de 25 °C (para el caso de las emulsiones lentas evaluadas en este estudio), la emulsión debe ser previamente filtrada a través de la malla No. 20. Una vez colocada la muestra dentro del tubo, debe ser retirado el tapón que impide la salida para dejar fluir la emulsión directamente en el matraz; desde la fluencia de la emulsión dentro del matraz hasta el llenado a la marca estandarizada con 60 ml, el tiempo debe ser contabilizado y reportado en segundos.

#### 4.3.4 Asentamiento a 5 días.

Esta prueba permite determinar el grado de homogeneidad que conservan las emulsiones asfálticas, después de haber sido almacenadas durante periodos prolongados. El ensayo consiste en dejar reposar una muestra debidamente homogeneizada de 500 cm<sup>3</sup> en una probeta, la probeta debe ser tapada y colocada en un lugar libre de vibraciones durante un tiempo de 5 días a temperatura ambiente. Finalmente se extraen dos muestras de 50 ± 1 g, una de la parte superior de la probeta y otra de la parte inferior, se determina el residuo asfáltico de ambas; para el registro del asentamiento se calcula la diferencia de residuo asfáltico.

#### 4.3.5 Retenido en la malla No. 20.

Esta prueba permite cuantificar el asfalto de una emulsión que se retiene en la malla N°20 cuando contiene glóbulos de asfalto relativamente grandes, para estimar la uniformidad de la emulsión. El ensayo consiste en hacer pasar a través de la malla un litro de emulsión para posteriormente secar al horno la malla con los glóbulos contenidos. El material retenido reportado se calcula del siguiente modo:

$$R_{20(\%)} = \frac{(W_{\text{retenido seco+ malla y fondo}}) - (W_{\text{malla y fondo}})}{10}$$

#### 4.3.6 Carga eléctrica de la partícula.

Esta prueba permite determinar la polaridad eléctrica de los glóbulos de asfalto en la emulsiones, con el propósito de identificarlas como aniónicas cuando los glóbulos tienen una carga eléctrica negativa y como catiónicas cuando su carga es positiva. El procedimiento consiste en inducir una corriente eléctrica a través de la emulsión, mediante dos electrodos y observar a cuál de ellos son atraídos lo

glóbulos de asfalto. El ensayo consiste en colocar en un vaso de precipitado una muestra de la emulsión, dentro de la cual se introducirán los electrodos conectados a la fuente de poder; los electrodos deben ser sumergidos al menos 25 mm, sin tocar paredes ni el fondo del vaso. Para iniciar la prueba se logra una intensidad de 8 mA y se acciona el cronómetro, el ensayo finaliza al transcurrir 30 minutos de aplicación de la corriente o cuando la intensidad se reduzca a 2 mA, lo que ocurra primero; finalmente se observa en cuál de los electrodos se encuentra adherido el asfalto.

Prueba	Método de prueba	Especificación del asfalto grado viscosidad	ECL	ECS	ECL
			Valor	Valor	Valor
Residuo asfáltico por evaporación, %.	ASTM D 6934	0.61	61.62	61.2	61.3
<i>Tamaño de partícula después de almacenamiento en horno a 60°C una noche</i>					
D(v,0.1) (um)			2.8	5.0	3.58
D(4,3) (um)			4.98	8.34	6.32
D(v,0.5) (um)			4.63	7.79	5.7
D(3,2) (um)			4.28	7.32	5.43
D(v,0.9) (um)			7.27	12.59	9.8
Span			9.660E-01		1.09E+00
Viscosidad Saybolt Furol 25°C, SSF	ASTM D 7496	20 seg	84	21	26
Asentamiento a 5 días, %	ASTM D 6930	5%	3.2		23.2
Retenido en malla no. 20, %	ASTM D 6933	0.1%	0.000	0.001	0.004
Carga eléctrica de la partícula	ASTM D 244 / D 7402	2 mA			

48Tabla 4.30 Caracterización de las emulsiones.

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

Para determinar el contenido óptimo de emulsión a utilizar, se realizaron los pre-diseños. Esto consiste en tomar una muestra de 700 gramos del material pétreo con la granulometría definida, una vez que se tiene la muestra en un molde se vierte el material y se le agrega agua, para nuestro caso se utilizó un 4 y 5% de agua respecto al agregado, se mezcla el material con el agua de manera uniforme durante un periodo de 1 minuto. Finalmente se adiciona la emulsión, se comenzó con un contenido de 8% de emulsión y de igual forma se mezcla durante 2 minutos aproximadamente, se vierte la mezcla sobre una hoja y se deja expuesta al sol.

Después de 1 hora de exposición al sol, se observa su consistencia, el cubrimiento del agregado y de manera manual se realiza una compresión a una porción de la mezcla y se determina su cohesión.

Una vez realizados los prediseños para cada emulsión utilizada se obtuvieron los siguientes datos para el contenido óptimo de emulsión:

- ECL 8.5% Emulsión + 4.0% Agua
- ECS 8.5% Emulsión + 5.0% Agua
- ECLP 8.5% Emulsión + 4.0% Agua

## **4.5 Pruebas de desempeño en la mezcla asfáltica.**

### *4.5.1 Ensayo de Tensión Indirecta (TSR).*

El ensayo de Tensión Indirecta se realizó como lo establece la norma AASHTO T 283 (Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage).

Para la realización de dicha prueba se utilizaron diversas variables como son: la humedad de compactación y el contenido de emulsión asfáltica. Para la humedad de compactación se utilizaron dos: 60 y 70% de humedad pérdida total en la mezcla, y en lo que respecta al contenido de emulsión se utilizaron tres: 7.5, 8.5 y 9.5%. Esto fue utilizado en las tres diferentes emulsiones evaluadas. Además para las muestras acondicionadas se realizaron con y sin ciclo de congelamiento.

Una vez que las muestras llegaban a la humedad de compactación requerida, se continúa con el proceso de compactación. El cual fue realizado en un compactador giratorio, se compactó por altura (63.5 mm) con un límite máximo de 100 giros. Después de la compactación los especímenes se metieron a un horno a 60°C durante 3 días, con el fin de que se evapore totalmente el agua en la mezcla.

Transcurridos los 3 días, se obtienen las propiedades volumétricas de las pastillas. Lo cual se llevó a cabo mediante el equipo llamado "Corelok".

El procedimiento para obtener las propiedades volumétricas es: pesar en el aire la pastilla en seco, pesar en el aire la bolsa donde se introduce la muestra, se acomoda la pastilla dentro de la bolsa y se deja dentro del equipo Corelok, se cierra el equipo para sellar la bolsa, una vez terminado el proceso, se pesa la bolsa sumergiéndola en una tina. Posterior a esto se saca la pastilla de la bolsa y se vuelve a pesar en el aire. Para proceder con el cálculo la pastilla tiene una tolerancia de máximo 5 gramos de diferencia con el primer peso; si es mayor, la pastilla debe secarse y repetir el procedimiento.

Con los datos de los pesos de la pastilla en seco, la bolsa y el sumergido se procede a realizar los cálculos para encontrar el valor de la Gravedad Bruta de la Mezcla (Gmb).

Para obtener los vacíos en las muestras, se debe tener los datos de la Gravedad Máxima de la Mezcla (Gmm). El cual se realiza de la siguiente manera: se hace la mezcla con la cantidad de emulsión deseada y se deja en el horno por 3 días a 60°C, después de esto se disgrega la mezcla y con ayuda de un picnómetro se introduce el material en él, se toma el peso en el aire de la mezcla, se llena de agua, cuidando que el agua tenga un nivel de 1" sobre la mezcla, se ejerce presión de vacío ( $27.5 \pm 2.5$  in Hg) y se mantiene una vibración durante 15 minutos, se retira y se sumerge en una tina con agua ( $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ) y se toma el peso sumergido. Se hace la calibración del picnómetro el cual consiste en obtener el peso sumergido del picnómetro sin material.

Los cálculos se realizan de la siguiente manera:

$$Gmb = \frac{\text{Masa de la muestra}}{\text{Volumen de la muestra}}$$
$$Gmm = \frac{\text{Peso seco de la muestra}}{\text{Peso seco} - ((\text{Peso picnometro} + \text{muestra}) - \text{Peso Picnometro})}$$
$$\% Va = \left(1 - \frac{Gmb}{Gmm}\right) * 100$$

Conociendo los vacíos de las muestras, se forman 2 grupos, un grupo se evaluará en condición seca y el otro en condición húmeda.

Los especímenes secos se acondicionan a una temperatura de 25°C y se evalúan en la prensa. Se toma la lectura en libras y se realiza el cálculo para obtener el esfuerzo en seco, como se mencionó en el capítulo anterior.

Para las muestras húmedas considerando el ciclo de congelamiento primero se saturan los vacíos de aire con agua hasta lograr un 70 a 80% de saturación, posteriormente se les da un ciclo de congelamiento de  $-18 \pm 3^\circ\text{C}$  por 16 horas como mínimo, seguido se meten a un baño de agua a  $60 \pm 1^\circ\text{C}$  durante  $24 \pm 1$  hora, una vez hecho lo anterior se introducen las muestras en un baño de agua a  $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$  por 2 horas  $\pm 10$  minutos y al final se prueban en la prensa. Se obtiene la carga en libras y se calcula su esfuerzo en húmedo.

El valor de TSR se calcula dividiendo el esfuerzo en húmedo entre el esfuerzo en seco y se multiplica por 100, el valor mínimo es de 80% para mezclas en frío sin ciclos de congelamiento, mientras que el valor es el mismo para las mezclas en caliente pero considera un ciclo de congelamiento.

#### 4.5.1.1 Emulsión Catiónica de Rompimiento Lento (ECL).

Para el desarrollo del ensayo de Tensión Indirecta se utilizó una Emulsión Catiónica de rompimiento Lento, con un residuo asfáltico del 61%. La combinación utilizada fue de 7.5%, 8.5% y 9.5%, con un contenido de agua del 4%. Se realizó la compactación a dos diferentes contenidos de humedad: 1) 60% de humedad perdida y 2) 70% de humedad perdida, en ambos casos es considerando el total de humedad en la mezcla, es decir, el 4% de agua de mezcla más el contenido de agua que aporta cada porcentaje de Emulsión. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas.

#### Con ciclo de congelamiento.

Determinación de la Gravedad Máxima de la mezcla Gmm		
	Muestra 1	Muestra 2
Peso de la muestra seca	1559.7	1562.5
Calibración del picnómetro	1341.3	1341.3
Muestra+Agua+Picnómetro	2267.3	2268.2
Gmm	2.461	2.458
Promedio Gmm	2.460	

49Tabla 4.31 Valor de la Gravedad Máxima Teórica 7.5% ECL.

ECL 7.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
	1	2	3	4	5	6	7	8
No. Espécimen								
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.7	63.8	63.7	63.7	64.2	65.2	63.9	63.7
Peso Seco, g	1038.7	1041.0	1041.9	1041.4	1051.7	1045.7	1052.0	1053.7
Peso Sumergido, g	600.4	600.3	599.9	599.7	582.3	577.6	582.3	581.7
Peso SSS, g	1082.4	1083.2	1085.2	1084.7	1068.0	1068.7	1065.4	1066.3
Volumen espécimen, cm3	482.00	482.90	485.30	485.00	485.70	491.10	483.10	484.60
Gmb	2.155	2.156	2.147	2.147	2.165	2.129	2.178	2.174
Gmm	2.460							
% Vacíos	12.4%	12.4%	12.7%	12.7%	12.0%	13.4%	11.5%	11.6%
Promedio % Vacíos	12.6%				12.1%			
Volumen de Vacíos, cm3	59.8	59.7	61.8	61.7	58.2	66.0	55.5	56.3
Carga, lb	863.55	819.02	826.29	815.71	1206.59	1130.09	1205.49	1135.38
Carga, N	3850.3	3651.7	3684.1	3637.0	5379.8	5038.7	5374.9	5062.3
Esfuerzo, kPa	384.80	364.38	368.19	363.48	533.47	491.98	535.48	505.92

50Tabla 4.32 TSR 7.5% ECL con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	516.71		
Esfuerzo en Húmedo, kPa	370.21		
% TSR	72%		
		Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
		Seco	18.45
		Húmedo	8.60
			3.57%
			2.32%

51Tabla 4.33 Valores de Esfuerzo 7.5% ECL con 60% de pérdida de humedad.

ECL 7.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
No. Espécimen									
Diámetro, mm	100.0								
Espesor, mm	63.8	64.5	64.0	63.6	64.4	64.5	64.9	63.8	64.6
Peso Seco, g	1033.8	1040.3	1038.3	1039.8	1049.5	1051.8	1050.2	1052.7	1053.1
Peso Sumergido, g	574.0	575.8	573.3	573.8	581.6	582.9	580.0	583.0	583.8
Peso SSS, g	1054.1	1060.6	1052.8	1054.6	1068.4	1070.8	1067.2	1068.5	1071.9
Volumen espécimen, cm3	480.10	484.80	479.50	480.80	486.80	487.90	487.20	485.50	488.10
Gmb	2.153	2.146	2.165	2.163	2.156	2.156	2.156	2.168	2.158
Gmm	2.460								
% Vacíos	12.5%	12.8%	12.0%	12.1%	12.4%	12.4%	12.4%	11.9%	12.3%
Promedio % Vacíos	12.3%				12.3%				
Volumen de Vacíos, cm3	59.9	61.9	57.4	58.1	60.2	60.3	60.3	57.6	60.0
Carga, lb	781.54	739.43	868.18	846.13	1206.37	1255.09	1285.29	1266.56	1161.62
Carga, N	3484.6	3296.9	3870.9	3772.6	5378.8	5596.0	5730.7	5647.1	5179.3
Esfuerzo, kPa	347.71	325.40	385.05	377.63	531.71	552.33	562.13	563.49	510.40

52Tabla 4.34 TSR 7.5% ECL con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	544.01			<b>Desviación Estándar</b>	<b>Coefficiente de Variación</b>	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	358.95			<b>Seco</b>	20.29	3.73%
% TSR	66%			<b>Húmedo</b>	23.88	6.65%

53Tabla 4.35 Valores de Esfuerzo ECL 7.5% con 70% de pérdida de humedad.

Determinación de la Gravedad Máxima de la mezcla Gmm		
	Muestra 1	Muestra 2
Peso de la muestra seca	1410.8	1718.9
Calibración del picnómetro	1342.1	1342.1
Muestra+Agua+Picnómetro	2177.0	2353.8
Gmm	2.450	2.431
Promedio Gmm	2.440	

54Tabla 4.36 Valor de la Gravedad Máxima Teórica 8.5% ECL.

ECL 8.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.7	64.1	63.6	63.7	63.6	63.6	63.6	63.6
Peso Seco, g	1045.4	1047.5	1045.6	1047.6	1040.2	1042.9	1037.2	1041.8
Peso Sumergido, g	574.8	577.5	574.4	575.0	575.0	574.3	569.4	572.3
Peso SSS, g	1058.1	1060.3	1058.0	1058.7	1054.3	1055.0	1050.9	1054.2
Volumen espécimen, cm3	483.30	482.80	483.60	483.70	479.30	480.70	481.50	481.90
Gmb	2.163	2.170	2.162	2.166	2.170	2.170	2.154	2.162
Gmm	2.440							
% Vacíos	11.4%	11.1%	11.4%	11.2%	11.1%	11.1%	11.7%	11.4%
Promedio % Vacíos	11.3%				11.3%			
Volumen de Vacíos, cm3	54.9	53.5	55.1	54.4	53.0	53.3	56.4	55.0
Carga, lb	634.05	520.73	655.21	730.39	941.81	1072.55	913.82	903.67
Carga, N	2827.0	2321.8	2921.3	3256.5	4199.2	4782.1	4074.4	4029.1
Esfuerzo, kPa	282.53	230.59	292.42	325.46	420.33	478.68	407.84	403.31

55Tabla 4.37 TSR 8.5% ECL con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	427.54			<b>Desviación Estándar</b>	<b>Coefficiente de Variación</b>	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	282.75			<b>Seco</b>	30.18	7.06%
% TSR	66%			<b>Húmedo</b>	34.05	12.04%

56Tabla 4.38 Valores de Esfuerzo 8.5% ECL con 60% de pérdida de humedad.

ECL 8.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.9	63.7	63.8	63.8	63.5	63.5	63.7	63.6
Peso Seco, g	1043.4	1044.0	1047.7	1040.6	1030.3	1027.4	1025.1	1032.4
Peso Sumergido, g	578.0	578.2	581.2	574.9	568.3	566.6	567.6	571.0
Peso SSS, g	1061.0	1061.0	1061.8	1055.6	1047.4	1044.5	1045.5	1048.6
Volumen espécimen, cm3	483.00	482.80	480.60	480.70	479.10	477.90	477.90	477.60
Gmb	2.160	2.162	2.180	2.165	2.150	2.150	2.145	2.162
Gmm	2.440							
% Vacíos	11.5%	11.4%	10.7%	11.3%	11.9%	11.9%	12.1%	11.4%
Promedio % Vacíos	11.2%				11.8%			
Volumen de Vacíos, cm3	55.4	55.0	51.2	54.3	56.9	56.9	57.8	54.5
Carga, lb	667.34	750.45	792.56	462.75	794.77	861.79	1070.79	1046.53
Carga, N	2975.4	3346.0	3533.7	2063.2	3543.6	3842.4	4774.3	4666.1
Esfuerzo, kPa	296.43	334.40	352.61	205.88	355.26	385.22	477.14	467.07

57Tabla 4.39 TSR 8.5% ECL con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	421.17			<b>Desviación Estándar</b>	<b>Coefficiente de Variación</b>	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	297.33			<b>Seco</b>	52.14	12.38%
% TSR	71%			<b>Húmedo</b>	56.56	19.02%

58Tabla 4.40 Valores de Esfuerzo 8.5% ECL con 70% de pérdida de humedad.

Determinación de la Gravedad Máxima de la mezcla Gmm		
	Muestra 1	Muestra 2
Peso de la muestra seca	1563.0	1564.1
Calibración del picnómetro	1341.3	1341.3
Muestra+Agua+Picnómetro	2259.6	2259.1
Gmm	2.424	2.420
Promedio Gmm	2.422	

59Tabla 4.41 Valor de la Gravedad Máxima Teórica 9.5% ECL.

ECL 9.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)				
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Diámetro, mm	100.0								
Espesor, mm	63.7	63.7	63.5	63.8	63.8	63.6	63.7	63.7	63.8
Peso Seco, g	1050.0	1051.1	1050.8	1047.0	1059.0	1055.1	1054.8	1050.7	1050.1
Peso Sumergido, g	575.9	579.6	581.6	577.5	583.6	579.2	580.9	577.8	574.6
Peso SSS, g	1061.1	1064.0	1064.2	1058.9	1070.9	1066.5	1067.0	1064.3	1063.0
Volumen espécimen, cm3	485.20	484.40	482.60	481.40	487.30	487.30	486.10	486.50	488.40
Gmb	2.164	2.170	2.177	2.175	2.173	2.165	2.170	2.160	2.150
Gmm	2.422								
% Vacíos	10.7%	10.4%	10.1%	10.2%	10.3%	10.6%	10.4%	10.8%	11.2%
Promedio % Vacíos	10.3%				10.7%				
Volumen de Vacíos, cm3	51.7	50.4	48.7	49.1	50.1	51.7	50.6	52.7	54.8
Carga, lb	539.69	462.09	474.21	478.62	1327.84	1274.93	1136.70	1239.22	1244.07
Carga, N	2406.3	2060.3	2114.3	2134.0	5920.4	5684.5	5068.1	5525.2	5546.9
Esfuerzo, kPa	240.48	205.91	211.97	212.94	590.76	569.00	506.51	552.19	553.49

60Tabla 4.42 TSR 9.5% ECL con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	554.39	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	217.83			
% TSR	39%	Seco	27.69	4.99%
		Húmedo	13.36	6.13%

61Tabla 4.42 Valores de Esfuerzo 9.5% ECL con 60% de pérdida de humedad.

ECL 9.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)				
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Diámetro, mm	100.0								
Espesor, mm	63.8	63.7	63.8	63.7	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
Peso Seco, g	1048.8	1046.5	1043.7	1047.5	1052.0	1048.6	1050.8	1048.6	1048.9
Peso Sumergido, g	577.3	576.8	576.8	579.8	581.3	580.1	581.6	580.3	578.5
Peso SSS, g	1061.1	1059.7	1057.3	1061.5	1064.0	1063.6	1065.0	1064.6	1062.0
Volumen espécimen, cm3	483.80	482.90	480.50	481.70	482.70	483.50	483.40	484.30	483.50
Gmb	2.168	2.167	2.172	2.175	2.179	2.169	2.174	2.165	2.169
Gmm	2.422								
% Vacíos	10.5%	10.5%	10.3%	10.2%	10.0%	10.5%	10.2%	10.6%	10.4%
Promedio % Vacíos	10.4%				10.4%				
Volumen de Vacíos, cm3	50.8	50.8	49.6	49.2	48.3	50.6	49.5	51.4	50.4
Carga, lb	623.91	564.60	463.19	489.43	1306.24	1393.32	1500.25	1256.41	1399.05
Carga, N	2781.8	2517.4	2065.2	2182.2	5824.1	6212.3	6689.1	5601.9	6237.9
Esfuerzo, kPa	277.58	251.58	206.07	218.09	583.89	622.82	670.61	561.62	625.38

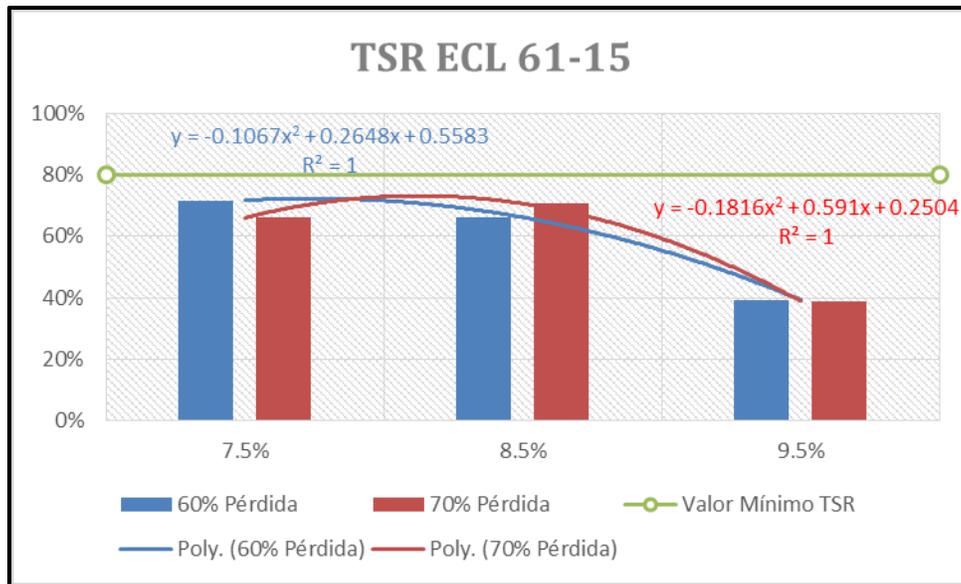
62Tabla 4.43 TSR 9.5% ECL con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	612.86	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	238.33			
% TSR	39%	Seco	37.57	6.13%
		Húmedo	28.13	11.80%

63Tabla 4.44 Valores de Esfuerzo 9.5% ECL con 70% de pérdida.

TSR EMO											
% EMO	% Asfalto	% Agua	% Agua Total	% Pérdida Humedad	% Humedad Compactación	Gmm	Gmb	% Vacíos	Condición	Carga	TSR %
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.460	2.160	12.2%	Seca	516.71	72%
							2.151	12.5%	Acondicionada	370.21	
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.159	12.2%	Seca	544.01	66%
							2.157	12.3%	Acondicionada	358.95	
8.5%	5.185%	4.0%	7.315%	60%	2.926%	2.440	2.164	11.3%	Seca	427.54	66%
							2.165	11.3%	Acondicionada	282.75	
8.5%	5.185%	4.0%	7.315%	70%	2.195%		2.152	11.8%	Seca	421.17	71%
							2.167	11.2%	Acondicionada	297.33	
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.422	2.164	10.7%	Seca	554.39	39%
							2.172	10.3%	Acondicionada	217.83	
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.171	10.4%	Seca	612.86	39%
							2.170	10.4%	Acondicionada	238.33	

64Tabla 4.45 Resumen de valores TSR ECL.



42Figura 4.4 Gráficas TSR ECL.

Sin ciclo de congelamiento.

ECL 7.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)					Subgrupo sin Acondicionar (Seco)				
No. Espécimen	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5
Diámetro, mm	100.0									
Espesor, mm	63.6	63.6	63.6	63.8	63.7	64.2	65.2	64.1	63.9	63.7
Peso Seco, g	1042.8	1044.2	1034.0	1031.4	1042.2	1051.7	1045.7	1050.3	1052.0	1053.7
Peso Sumergido, g	576.2	578.0	574.9	572.7	578.6	582.3	577.6	578.3	582.3	581.7
Peso SSS, g	1057.3	1058.2	1054.9	1051.7	1060.1	1068.0	1068.7	1066.4	1065.4	1066.3
Volumen espécimen, cm3	481.10	480.20	480.00	479.00	481.50	485.70	491.10	488.10	483.10	484.60
Gmb	2.168	2.175	2.154	2.153	2.164	2.165	2.129	2.152	2.178	2.174
Gmm	2.460									
% Vacíos	11.9%	11.6%	12.4%	12.5%	12.0%	12.0%	13.4%	12.5%	11.5%	11.6%
Promedio % Vacíos	12.1%					12.2%				
Volumen de Vacíos, cm3	57.2	55.7	59.7	59.7	57.8	58.2	66.0	61.1	55.5	56.3
Carga, lb	784.63	950.63	867.08	977.75	935.86	1206.59	1130.09		1205.49	1135.38
Carga, N	3498.4	4238.5	3866.0	4359.4	4172.7	5379.8	5038.7	0.0	5374.9	5062.3
Esfuerzo, kPa	350.18	424.27	386.98	435.00	417.02	533.47	491.98	0.00	535.48	505.92

65Tabla 4.46 TSR 7.5% ECL con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	516.71		Desviación Estándar		Coficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	402.69		Seco	18.45	3.57%
% TSR	78%		Húmedo	30.72	7.63%

66Tabla 4.47 Valores de esfuerzo 7.5% ECL con 60% de pérdida de humedad.

ECL 7.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)					Subgrupo sin Acondicionar (Seco)				
No. Espécimen	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5
Diámetro, mm	100.0									
Espesor, mm	63.8	63.5	63.6	63.8	63.8	64.4	64.5	64.9	63.8	64.6
Peso Seco, g	1043.3	1040.9	1037.4	1039.0	1045.2	1049.5	1051.8	1050.2	1052.7	1053.1
Peso Sumergido, g	579.3	575.6	576.0	575.3	583.1	581.6	582.9	580.0	583.0	583.8
Peso SSS, g	1061.9	1057.7	1055.5	1056.3	1064.0	1068.4	1070.8	1067.2	1068.5	1071.9
Volumen espécimen, cm3	482.60	482.10	479.50	481.00	480.90	486.80	487.90	487.20	485.50	488.10
Gmb	2.162	2.159	2.164	2.160	2.173	2.156	2.156	2.156	2.168	2.158
Gmm	2.460									
% Vacíos	12.1%	12.2%	12.1%	12.2%	11.6%	12.4%	12.4%	12.4%	11.9%	12.3%
Promedio % Vacíos	12.0%					12.3%				
Volumen de Vacíos, cm3	58.5	59.0	57.8	58.6	56.0	60.2	60.3	60.3	57.6	60.0
Carga, lb	800.50	850.54	814.61	940.27	959.45	1206.37	1255.09	1285.29	1266.56	1161.62
Carga, N	3569.1	3792.3	3632.1	4192.3	4277.8	5378.8	5596.0	5730.7	5647.1	5179.3
Esfuerzo, kPa	356.14	380.19	363.56	418.33	426.86	531.71	552.33	562.13	563.49	510.40

67Tabla 4.48 TSR 7.5% ECL con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	544.01		Desviación Estándar		Coficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	389.02		Seco	20.29	3.73%
% TSR	72%		Húmedo	28.63	7.36%

68Tabla 4.49 Valores de esfuerzo 7.5% ECL con 70% de pérdida de humedad.

ECL 8.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.6	63.5	63.6	63.7	63.6	63.6	63.6	63.6
Volumen espécimen, cm3	478.20	479.30	478.50	481.20	479.30	480.70	481.50	481.90
Gmb	2.160	2.164	2.175	2.157	2.170	2.170	2.154	2.162
Gmm	2.440							
% Vacíos	11.5%	11.3%	10.9%	11.6%	11.1%	11.1%	11.7%	11.4%
Promedio % Vacíos	11.3%				11.3%			
Volumen de Vacíos, cm3	55.0	54.3	51.9	55.9	53.0	53.3	56.4	55.0
Carga, lb	834.45	831.14	937.19	929.47	941.81	1072.55	913.82	903.67
Carga, N	3720.5	3705.8	4178.6	4144.2	4199.2	4782.1	4074.4	4029.1
Esfuerzo, kPa	372.41	371.52	418.27	414.17	420.33	478.68	407.84	403.31

69Tabla 4.50 TSR 8.5% ECL con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	427.54		Desviación Estándar	Coficiente de Variación	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	394.09		Seco	30.18	7.06%
% TSR	92%		Húmedo	22.18	5.63%

70Tabla 4.51 Valores de esfuerzo 8.5% ECL con 60% de pérdida de humedad.

ECL 8.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.6	63.6	63.6	63.7	63.5	63.5	63.7	63.6
Volumen espécimen, cm3	475.90	481.60	478.70	477.50	479.10	477.90	477.90	477.60
Gmb	2.150	2.155	2.146	2.154	2.150	2.150	2.145	2.162
Gmm	2.440							
% Vacíos	11.9%	11.7%	12.1%	11.7%	11.9%	11.9%	12.1%	11.4%
Promedio % Vacíos	11.8%				11.8%			
Volumen de Vacíos, cm3	56.6	56.2	57.7	56.0	56.9	56.9	57.8	54.5
Carga, lb	831.14	935.77	935.55	907.20	794.77	861.79	1070.79	1046.53
Carga, N	3705.8	4172.3	4171.3	4044.9	3543.6	3842.4	4774.3	4666.1

71Tabla 4.52 TSR 8.5% ECL con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	421.17		Desviación Estándar	Coficiente de Variación	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	402.59		Seco	52.14	12.38%
% TSR	96%		Húmedo	19.07	4.74%

72Tabla 4.53 Valores de Esfuerzo 8.5% ECL con 70% de pérdida de humedad.

ECL 9.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)					Subgrupo sin Acondicionar (Seco)				
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diámetro, mm	100.0									
Espesor, mm	63.7	63.5	63.7	63.8	63.8	63.6	63.7	63.7	63.7	63.8
Peso Seco, g	1056.2	1058.3	1046.9	1059.2	1051.4	1059.0	1055.1	1054.8	1050.7	1050.1
Peso Sumergido, g	580.9	580.9	573.5	580.0	577.8	583.6	579.2	580.9	577.8	574.6
Peso SSS, g	1066.6	1070.0	1059.1	1069.0	1064.7	1070.9	1066.5	1067.0	1064.3	1063.0
Volumen espécimen, cm3	485.70	489.10	485.60	489.00	486.90	487.30	487.30	486.10	486.50	488.40
Gmb	2.175	2.164	2.156	2.166	2.159	2.173	2.165	2.170	2.160	2.150
Gmm	2.422									
% Vacíos	10.2%	10.7%	11.0%	10.6%	10.8%	10.3%	10.6%	10.4%	10.8%	11.2%
Promedio % Vacíos	10.7%					10.7%				
Volumen de Vacíos, cm3	49.6	52.1	53.4	51.7	52.8	50.1	51.7	50.6	52.7	54.8
Carga, lb	971.36	985.91	945.78	910.95	917.34	1327.84	1274.93	1136.70	1239.22	1244.07
Carga, N	4330.9	4395.8	4216.9	4061.6	4090.1	5920.4	5684.5	5068.1	5525.2	5546.9
Esfuerzo, kPa	432.84	440.70	421.44	405.28	408.12	590.76	569.00	506.51	552.19	553.49

73Tabla 4.54 TSR 9.5% ECL con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	554.39		Desviación Estándar		Coficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	421.68		Seco	27.69	4.99%
% TSR	76%		Húmedo	13.70	3.25%

74Tabla 4.55 Valores de esfuerzo 9.5% ECL con 70% de pérdida de humedad.

ECL 9.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)					Subgrupo sin Acondicionar (Seco)				
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diámetro, mm	100.0									
Espesor, mm	64.0	63.8	63.6	63.7	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
Peso Seco, g	1052.3	1058.5	1054.5	1046.2	1052.0	1052.0	1048.6	1050.8	1048.6	1048.9
Peso Sumergido, g	583.1	585.4	581.7	577.5	581.1	581.3	580.1	581.6	580.3	578.5
Peso SSS, g	1068.4	1070.7	1068.5	1059.6	1065.1	1064.0	1063.6	1065.0	1064.6	1062.0
Volumen espécimen, cm3	485.30	485.30	486.80	482.10	484.00	482.70	483.50	483.40	484.30	483.50
Gmb	2.168	2.181	2.166	2.170	2.174	2.179	2.169	2.174	2.165	2.169
Gmm	2.422									
% Vacíos	10.5%	9.9%	10.6%	10.4%	10.3%	10.0%	10.5%	10.2%	10.6%	10.4%
Promedio % Vacíos	10.3%					10.4%				
Volumen de Vacíos, cm3	50.8	48.3	51.4	50.1	49.6	48.3	50.6	49.5	51.4	50.4
Carga, lb	1081.37	1198.87	1193.36	1106.28	1215.41	1306.24	1393.32	1500.25	1256.41	1399.05
Carga, N	4821.4	5345.3	5320.8	4932.5	5419.1	5824.1	6212.3	6689.1	5601.9	6237.9
Esfuerzo, kPa	479.60	533.38	532.60	492.96	543.29	583.89	622.82	670.61	561.62	625.38

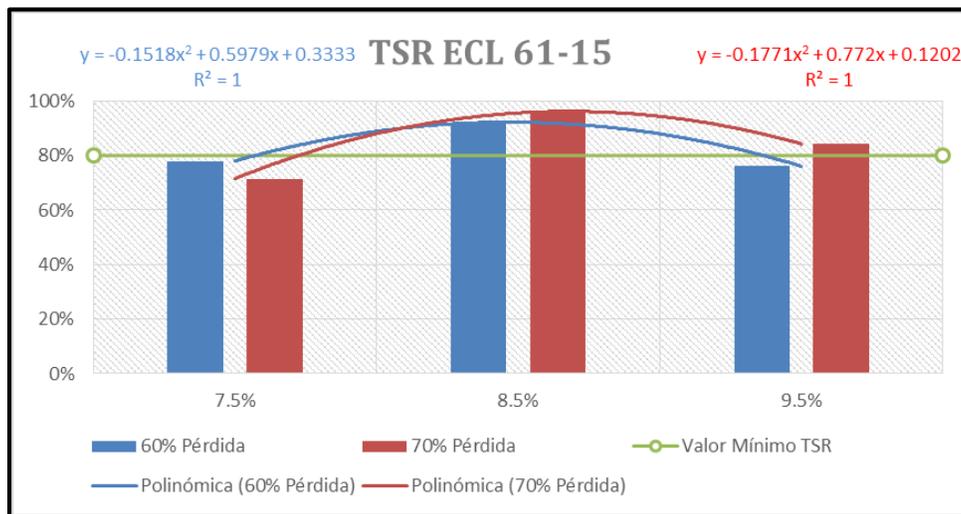
75Tabla 4.56 TSR 9.5% ECL con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	612.86		Desviación Estándar		Coficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	516.36		Seco	37.57	6.13%
% TSR	84%		Húmedo	25.21	4.88%

76Tabla 4.57 Valores de esfuerzo 9.5% ECL con 70% de pérdida de humedad.

TSR EMO 61-15											
% EMO	% Asfalto	% Agua	% Agua Total	% Pérdida Humedad	% Humedad Compactación	Gmm	Gmb	% Vacios	Condición	Carga	TSR %
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.460	2.160	12.2%	Seca	516.71	78%
							2.163	12.1%	Acondicionada	402.69	
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.159	12.2%	Seca	544.01	72%
							2.164	12.0%	Acondicionada	389.02	
8.5%	5.185%	4.0%	7.315%	60%	2.926%	2.440	2.164	11.3%	Seca	427.54	92%
							2.164	11.3%	Acondicionada	394.09	
8.5%	5.185%	4.0%	7.315%	70%	2.195%		2.151	11.8%	Seca	421.17	96%
							2.152	11.8%	Acondicionada	402.59	
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.422	2.164	10.7%	Seca	554.39	76%
							2.164	10.7%	Acondicionada	421.68	
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.171	10.4%	Seca	612.86	84%
							2.172	10.3%	Acondicionada	516.36	

77Tabla 4.58 Resumen de valores TSR ECL sin ciclo de congelamiento.



78Figura 4.5 Gráficas TSR ECL sin ciclo de congelamiento.

#### 4.5.1.2 Emulsión Catiónica Superestable (ECS).

Con ciclo de congelamiento.

Determinación de la Gravedad Máxima de la mezcla Gmm		
	Muestra 1	Muestra 2
Peso de la muestra seca	1556.3	1556.8
Calibración del picnómetro	1716.6	1716.6
Muestra+Agua+Picnómetro	2641.5	2642.6
Gmm	2.465	2.468
Promedio Gmm	2.466	

79Tabla 4.59 Valor de la Gravedad Máxima Teórica ECS 7.5%.

CoreLok Gravedad Específica bulk														
Número de muestra	% Emulsión	% Agua	% Pérdida de agua	A Peso de la bolsa (g)	B Muestra Seca antes del sellado (g)	C Peso sumergido (g)	D Muestra seca después de sumergir (g)	E Ratio B/A	F Densidad aparente de la bolsa	G Volumen Total (A+D) - C	H Volumen de la bolsa A/F	I Volumen de la muestra G - H	J Gravedad específica B/I	% Vacíos
1	7.5%	5%	60%	28.6	1045.0	529.1	1044.9	36.54	0.799	544.4	35.797	508.603	2.055	16.7%
2	7.5%	5%	60%	28.9	1045.7	532.5	1045.5	36.18	0.800	541.9	36.146	505.754	2.068	16.2%
3	7.5%	5%	60%	26.6	1047.1	539.9	1047.0	39.36	0.794	533.7	33.491	500.209	2.093	15.1%
4	7.5%	5%	60%	26.8	1048.5	543.0	1048.4	39.12	0.795	532.2	33.725	498.475	2.103	14.7%
5	7.5%	5%	60%	45.3	1047.8	531.4	1047.3	23.13	0.821	561.2	55.163	506.037	2.071	16.0%
6	7.5%	5%	60%	39.6	1040.8	530.4	1040.5	26.28	0.816	549.7	48.531	501.169	2.077	15.8%
7	7.5%	5%	60%	42.0	1041.0	537.9	1040.7	24.79	0.818	544.8	51.316	493.484	2.109	14.5%
8	7.5%	5%	60%	35.2	1044.4	537.7	1043.9	29.67	0.810	541.4	43.438	497.962	2.097	15.0%

80Tabla 4.60 Volumetrías TSR 7.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

$$\text{Densidad de la bolsa} = (- 0.00166 * \text{Ratio}) + 0.8596$$

ECS 7.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	66.0	66.0	65.1	64.7	64.3	64.5	64.5	64.4
Volumen espécimen, cm3	508.60	505.75	500.21	498.47	506.04	501.17	493.48	497.96
Gmb	2.055	2.068	2.093	2.103	2.071	2.077	2.109	2.097
Gmm	2.466							
% Vacíos	16.7%	16.2%	15.1%	14.7%	16.0%	15.8%	14.5%	15.0%
Promedio % Vacíos	15.7%				15.3%			
Volumen de Vacíos, cm3	84.9	81.8	75.7	73.4	81.2	79.2	71.4	74.5
Carga, lb	587.75	533.96	608.26	684.54	924.80	1185.00	1053.40	1193.40
Carga, N	2620.6	2380.7	2712.0	3052.1	4123.4	5283.5	4696.7	5320.9
Esfuerzo, kPa	252.77	229.64	265.21	300.32	408.24	521.48	463.57	526.00

81Tabla 4.61 TSR 7.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	479.82	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	261.98	Seco	48.10
% TSR	55%	Húmedo	25.55
			10.03%
			9.75%

82Tabla 4.62 Valores de esfuerzo ECS 7.5% con 60% de pérdida de humedad.

CoreLok Gravedad Específica bulk														
Número de muestra	% Emulsión	% Agua	% Pérdida de agua	A Peso de la bolsa (g)	B Muestra Seca antes del sellado (g)	C Peso sumergido (g)	D Muestra seca después de sumergir (g)	E Ratio B/A	F Densidad aparente de la bolsa por tabla	G Volumen Total (A+D) - C	H Volumen de la bolsa A/F	I Volumen de la muestra G - H	J Gravedad específica B/I	% Vacíos
1	7.5%	5%	70%	24.6	1046.9	540.6	1046.8	42.56	0.789	530.8	31.180	499.620	<b>2.095</b>	15.0%
2	7.5%	5%	70%	24.8	1045.8	530.0	1045.6	42.17	0.790	540.4	31.408	508.992	<b>2.055</b>	16.7%
3	7.5%	5%	70%	22.8	1046.9	537.0	1046.8	45.92	0.783	532.6	29.105	503.495	<b>2.079</b>	15.7%
4	7.5%	5%	70%	23.2	1047.0	535.1	1046.8	45.13	0.785	534.9	29.566	505.334	<b>2.072</b>	16.0%
5	7.5%	5%	70%	29.3	1048.8	538.3	1048.8	35.80	0.800	539.8	36.617	503.183	<b>2.084</b>	15.5%
6	7.5%	5%	70%	41.1	1046.4	536.4	1046.4	25.46	0.817	551.1	50.285	500.815	<b>2.089</b>	15.3%
7	7.5%	5%	70%	42.0	1047.0	539.7	1046.7	24.93	0.818	549	51.331	497.669	<b>2.104</b>	14.7%
8	7.5%	5%	70%	36.9	1043.3	530.9	1043.2	28.27	0.813	549.2	45.406	503.794	<b>2.071</b>	16.0%

83Tabla 4.63 Volumetría TSR 7.5% con 70% de pérdida de humedad.

ECS 7.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
	1	2	3	4	5	6	7	8
No. Espécimen								
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	65.2	66.0	65.7	65.8	64.8	64.9	64.6	64.3
Volumen espécimen, cm3	499.62	508.99	503.50	505.33	503.18	500.81	497.67	503.79
Gmb	2.095	2.055	2.079	2.072	2.084	2.089	2.104	2.071
Gmm	2.466							
% Vacíos	15.0%	16.7%	15.7%	16.0%	15.5%	15.3%	14.7%	16.0%
Promedio % Vacíos	15.9%				15.4%			
Volumen de Vacíos, cm3	75.2	85.0	79.0	80.8	77.9	76.6	73.2	80.8
Carga, lb	744.06	462.53	649.70	577.39	974.60	933.20	895.50	1147.10
Carga, N	3317.5	2062.3	2896.8	2574.4	4345.4	4160.8	3992.7	5114.5
Esfuerzo, kPa	323.92	198.92	280.69	249.07	426.91	408.14	393.47	506.38

84Tabla 4.64 TSR 7.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	433.73		Desviación Estándar		Coefficiente de Variación.
Esfuerzo en Húmedo, kPa	263.15		Seco	43.59	10.05%
% TSR	<b>61%</b>		Húmedo	45.62	17.34%

85Tabal 4.65 Valores Esfuerzos ECS 7.5% con 70% de pérdida de humedad.

Determinación de la Gravedad Máxima de la mezcla Gmm		
	Muestra 1	Muestra 2
Peso de la muestra seca	1570.8	1569.1
Calibración del picnómetro	1716.6	1716.6
Muestra+Agua+Picnómetro	2644.9	2643.3
Gmm	2.445	2.443
Promedio Gmm	2.444	

86Tabla 4.66 Valor de la Gravedad Máxima Teórica 8.5% ECS.

CoreLok □ Gravedad Específica bulk														
Número de muestra	% Emulsión	% Agua	% Pérdida de agua	A Peso de la bolsa (g)	B Muestra Seca antes del sellado (g)	C Peso sumergido (g)	D Muestra seca después de sumergir (g)	E Ratio B/A	F Densidad aparente de la bolsa por tabla	G Volumen Total (A+D) - C	H Volumen de la bolsa A/F	I Volumen de la muestra G - H	J Gravedad específica B/I	% Vacíos
1	8.5%	5%	60%	27.8	1053.8	551.3	1053.6	37.91	0.797	530.1	34.895	495.205	<b>2.128</b>	12.9%
2	8.5%	5%	60%	28.6	1052.8	551.7	1052.7	36.81	0.798	529.6	35.817	493.783	<b>2.132</b>	12.8%
3	8.5%	5%	60%	26.7	1053.4	550.2	1053.2	39.45	0.794	529.7	33.623	496.077	<b>2.123</b>	13.1%
4	8.5%	5%	60%	27.9	1053.0	551.6	1053.0	37.74	0.797	529.3	35.009	494.291	<b>2.130</b>	12.8%
5	8.5%	5%	60%	36.5	1049.1	546.0	1049.0	28.74	0.812	539.5	44.957	494.543	<b>2.121</b>	13.2%
6	8.5%	5%	60%	33.5	1053.3	551.5	1053.1	31.44	0.807	535.1	41.491	493.609	<b>2.134</b>	12.7%
7	8.5%	5%	60%	32.1	1049.9	545.9	1049.7	32.71	0.805	535.9	39.861	496.039	<b>2.117</b>	13.4%
8	8.5%	5%	60%	40.8	1050.4	545.4	1050.3	25.75	0.817	545.7	49.947	495.753	<b>2.119</b>	13.3%

87Tabla 4.67 Volumetría 8.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

ECS 8.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
	1	2	3	4	5	6	7	8
No. Espécimen								
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	64.9	65.1	65.0	64.9	63.7	64.0	63.6	64.1
Volumen espécimen, cm3	495.20	493.78	496.08	494.29	494.54	493.61	496.04	495.75
Gmb	2.128	2.132	2.123	2.130	2.121	2.134	2.117	2.119
Gmm	2.444							
% Vacíos	12.9%	12.8%	13.1%	12.8%	13.2%	12.7%	13.4%	13.3%
Promedio % Vacíos	12.9%				13.1%			
Volumen de Vacíos, cm3	64.0	63.0	65.0	63.4	65.2	62.6	66.4	65.9
Carga, lb	756.41	734.14	710.77	797.63	1179.69	1265.89	1148.39	1209.02
Carga, N	3372.6	3273.3	3169.1	3556.3	5259.8	5644.2	5120.3	5390.6
Esfuerzo, kPa	330.82	320.10	310.38	348.85	525.67	561.43	512.53	535.38

88Tabla 4.68 TSR 8.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	533.75	Desviación Estándar		Coeficiente de Variación
		Seco	Húmedo	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	327.54	17.92		3.36%
% TSR	<b>61%</b>	14.27		4.36%

89Tabla 4.69 Valores Esfuerzo 8.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

CoreLok Gravedad Especifica bulk														
Número de muestra	% Emulsión	% Agua	% Pérdida de agua	A Peso de la bolsa (g)	B Muestra Seca antes del sellado (g)	C Peso sumergido (g)	D Muestra seca despues de sumergir (g)	E Ratio B/A	F Densidad aparente de la bolsa por tabla	G Volumen Total (A+D) - C	H Volumen de la bolsa A/F	I Volumen de la muestra G - H	J Gravedad específica B/I	% Vacíos
1	8.5%	5%	70%	25.5	1053.5	545.4	1053.3	41.31	0.791	533.4	32.237	501.163	<b>2.102</b>	14.0%
2	8.5%	5%	70%	25.6	1052.3	539.0	1052.2	41.11	0.791	538.8	32.349	506.451	<b>2.078</b>	15.0%
3	8.5%	5%	70%	23.8	1052.2	544.5	1052.0	44.21	0.786	531.3	30.272	501.028	<b>2.100</b>	14.1%
4	8.5%	5%	70%	24.8	1053.8	548.0	1053.6	42.49	0.789	530.4	31.430	498.970	<b>2.112</b>	13.6%
5	8.5%	5%	70%	42.0	1052.6	542.9	1052.3	25.06	0.818	551.4	51.345	500.055	<b>2.105</b>	13.9%
6	8.5%	5%	70%	34.6	1051.0	538.6	1050.7	30.38	0.809	546.7	42.760	503.940	<b>2.086</b>	14.7%
7	8.5%	5%	70%	38.3	1049.0	541.6	1049.0	27.39	0.814	545.7	47.044	498.656	<b>2.104</b>	13.9%
8	8.5%	5%	70%	30.6	1050.6	544.0	1050.4	34.33	0.803	537	38.126	498.874	<b>2.106</b>	13.8%

90Tabla 4.70 Volumetría 8.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

ECS 8.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	65.2	65.9	65.3	65.1	64.2	63.9	64.4	64.4
Volumen espécimen, cm3	501.16	506.45	501.03	498.97	500.06	503.94	498.66	498.87
Gmb	2.102	2.078	2.100	2.112	2.105	2.086	2.104	2.106
Gmm	2.444							
% Vacíos	14.0%	15.0%	14.1%	13.6%	13.9%	14.7%	13.9%	13.8%
Promedio % Vacíos	14.1%							
Volumen de Vacíos, cm3	70.1	75.8	70.5	67.7	69.3	73.9	69.4	69.0
Carga, lb	769.85	717.16	856.05	848.56	1227.97	1139.57	1036.17	1116.47
Carga, N	3432.5	3197.6	3816.8	3783.4	5475.1	5080.9	4619.9	4977.9
Esfuerzo, kPa	335.15	308.90	372.11	369.99	542.92	506.20	456.70	492.09

91Tabla 4.71 TSR 8.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	499.48	Desviación Estándar		Coficiente de Variación	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	346.54	Seco	30.89		6.18%
% TSR	<b>69%</b>	Húmedo	26.22		7.57%

92Tabla 4.72 Valores Esfuerzo 8.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

Determinación de la Gravedad Máxima de la mezcla Gmm		
	Muestra 1	Muestra 2
Peso de la muestra seca	1575.8	1580.2
Calibración del picnómetro	1716.6	1716.6
Muestra+Agua+Picnómetro	2640.5	2643.7
Gmm	2.417	2.420
Promedio Gmm	2.418	

93Tabla 4.73 Valor de la Gravedad Máxima Teórica 9.5% ECS.

CoreLok Gravedad Especifica bulk														
Número de muestra	% Emulsión	% Agua	% Pérdida de agua	A Peso de la bolsa (g)	B Muestra Seca antes del sellado (g)	C Peso sumergido (g)	D Muestra seca después de sumergir (g)	E Ratio B/A	F Densidad aparente de la bolsa por tabla	G Volumen Total (A+D) - C	H Volumen de la bolsa A/F	I Volumen de la muestra G - H	J Gravedad específica B/I	% Vacíos
1	9.5%	5%	60%	26.0	1060.9	553.6	1060.9	40.80	0.792	533.3	32.834	500.466	2.120	12.3%
2	9.5%	5%	60%	25.5	1060.5	553.2	1060.4	41.59	0.791	532.7	32.255	500.445	2.119	12.4%
3	9.5%	5%	60%	24.7	1060.1	555.6	1060.1	42.92	0.788	529.2	31.331	497.869	2.129	12.0%
4	9.5%	5%	60%	24.2	1059.0	547.5	1058.9	43.76	0.787	535.6	30.751	504.849	2.098	13.3%
5	9.5%	5%	60%	28.6	1057.6	559.7	1059.0	36.98	0.798	527.9	35.830	492.070	2.149	11.1%
6	9.5%	5%	60%	38.5	1058.7	556.2	1059.0	27.50	0.814	541.3	47.300	494.000	2.143	11.4%
7	9.5%	5%	60%	18.7	1060.4	559.9	1060.2	56.71	0.765	519	24.429	494.571	2.144	11.3%
8	9.5%	5%	60%	42.3	1056.9	546.2	1056.9	24.99	0.818	553	51.704	501.296	2.108	12.8%

94Tabla 4.74 Volumetría TSR 9.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

ECS 9.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	64.5	64.7	64.2	65.4	63.8	63.7	63.6	64.9
Volumen espécimen, cm3	500.47	500.44	497.87	504.85	492.07	494.00	494.57	501.30
Gmb	2.120	2.119	2.129	2.098	2.149	2.143	2.144	2.108
Gmm	2.418							
% Vacíos	12.3%	12.4%	12.0%	13.3%	11.1%	11.4%	11.3%	12.8%
Promedio % Vacíos	12.5%				11.7%			
Volumen de Vacíos, cm3	61.8	61.9	59.5	67.0	54.8	56.2	56.1	64.3
Carga, lb	1050.06	1057.12	1035.07	961.44	1455.27	1285.29	1358.05	1335.12
Carga, N	4681.8	4713.3	4615.0	4286.7	6488.5	5730.7	6055.1	5952.8
Esfuerzo, kPa	462.10	463.77	457.63	417.28	647.45	572.72	606.10	583.93

95Tabla 4.75 TSR 9.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	602.55	Desviación Estándar		Coeficiente de Variación	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	450.20	Seco	28.57	4.74%	
% TSR	75%	Húmedo	19.14	4.25%	

96Tabla 4.76 Valores Esfuerzo 9.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

CoreLok □ Gravedad Especifica bulk														
Número de muestra	% Emulsión	% Agua	% Pérdida de agua	A Peso de la bolsa (g)	B Muestra Seca antes del sellado (g)	C Peso sumergido (g)	D Muestra seca después de sumergir (g)	E Ratio B/A	F Densidad aparente de la bolsa por tabla	G Volumen Total (A+D) - C	H Volumen de la bolsa A/F	I Volumen de la muestra G - H	J Gravedad específica B/I	% Vacíos
1	9.5%	5%	70%	28.6	1060.5	558.4	1060.4	37.08	0.798	530.6	35.838	494.762	<b>2.143</b>	11.4%
2	9.5%	5%	70%	28.6	1059.5	555.9	1059.3	37.05	0.798	532	35.835	496.165	<b>2.135</b>	11.7%
3	9.5%	5%	70%	27.3	1058.8	555.2	1058.6	38.78	0.795	530.7	34.330	496.370	<b>2.133</b>	11.8%
4	9.5%	5%	70%	27.4	1060.1	556.3	1060.0	38.69	0.795	531.1	34.449	496.651	<b>2.134</b>	11.7%
5	9.5%	5%	70%	32.7	1053.1	547.0	1053.2	32.20	0.806	538.9	40.564	498.336	<b>2.113</b>	12.6%
6	9.5%	5%	70%	26.5	1060.4	553.9	1060.4	40.02	0.793	533	33.410	499.590	<b>2.123</b>	12.2%
7	9.5%	5%	70%	35.2	1059.2	551.0	1059.0	30.09	0.810	543.2	43.476	499.724	<b>2.120</b>	12.4%
8	9.5%	5%	70%	26.7	1059.6	548.6	1059.4	39.69	0.794	537.5	33.639	503.861	<b>2.103</b>	13.0%

97Tabla 4.77 Volumetría TSR 9.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

ECS 9.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	64.3	64.1	64.3	64.1	64.5	64.4	64.9	64.8
Volumen espécimen, cm3	494.76	496.17	496.37	496.65	498.34	499.59	499.72	503.86
Gmb	2.143	2.135	2.133	2.134	2.113	2.123	2.120	2.103
Gmm	2.418							
% Vacíos	11.4%	11.7%	11.8%	11.7%	12.6%	12.2%	12.4%	13.0%
Promedio % Vacíos	11.7%				12.6%			
Volumen de Vacíos, cm3	56.2	58.1	58.6	58.3	62.9	61.1	61.7	65.7
Carga, lb	1039.92	1129.43	958.35	942.92	1282.21	1387.81	1432.34	1362.46
Carga, N	4636.6	5035.7	4272.9	4204.1	5716.9	6187.8	6386.3	6074.7
Esfuerzo, kPa	459.06	500.13	423.05	417.54	564.26	611.68	626.45	596.80

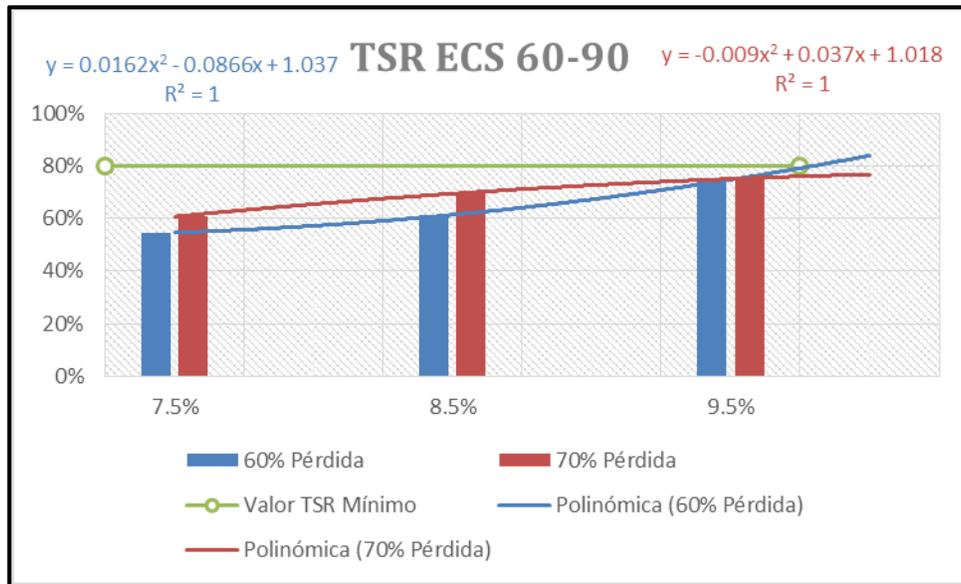
98Tabla 4.78 TSR 9.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	599.80	Desviación Estándar		Coeficiente de Variación	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	449.95	Seco	23.04	3.84%	
% TSR	<b>75%</b>	Húmedo	33.07	7.35%	

99Tabla 4.79 Valores Esfuerzo 9.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

TSR ECS											
% ECS	% Asfalto	% Agua	% Agua Total	% Pérdida Humedad	% Humedad Compactación	Gmm	Gmb	% Vacíos	Condición	Carga	TSR %
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	60%	3.170%	2.466	2.090	15.3%	Seca	479.82	55%
							2.080	15.7%	Acondicionada	261.98	
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	70%	2.378%		2.084	15.5%	Seca	433.73	61%
							2.075	15.9%	Acondicionada	263.15	
8.5%	5.185%	5.0%	8.315%	60%	3.326%	2.444	2.121	13.2%	Seca	533.75	61%
							2.128	12.9%	Acondicionada	327.54	
8.5%	5.185%	5.0%	8.315%	70%	2.495%		2.101	14.0%	Seca	499.48	69%
							2.098	14.1%	Acondicionada	346.54	
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	60%	3.482%	2.418	2.136	11.7%	Seca	602.55	75%
							2.116	12.5%	Acondicionada	450.20	
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	70%	2.612%		2.115	12.6%	Seca	599.80	75%
							2.137	11.7%	Acondicionada	449.95	

100 Tabla 4.80 Resumen valores TSR ECS.



43 Figura 4.6 Gráficas TSR ECS.

Sin ciclo de congelamiento.

ECS 7.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	64.6	65.2	65.0	64.6	64.3	64.5	64.5	64.4
Volumen espécimen, cm3	495.87	502.73	499.13	502.75	506.04	501.17	493.48	497.96
Gmb	2.104	2.081	2.097	2.078	2.071	2.077	2.109	2.097
Gmm	2.466							
% Vacíos	14.7%	15.6%	15.0%	15.8%	16.0%	15.8%	14.5%	15.0%
Promedio % Vacíos	15.3%				15.3%			
Volumen de Vacíos, cm3	72.9	78.6	74.8	79.3	81.2	79.2	71.4	74.5
Carga, lb	944.50	1029.80	1110.90	1153.00	924.80	1185.00	1053.40	1193.40
Carga, N	4211.2	4591.5	4953.1	5140.8	4123.4	5283.5	4696.7	5320.9
Esfuerzo, kPa	415.00	448.32	485.11	506.62	408.24	521.48	463.57	526.00

101Tabla 4.81 TSR 7.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	479.82	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	463.76			
% TSR	97%	Seco	48.10	10.03%
		Húmedo	35.03	7.55%

102Tabla 4.82 Valores de esfuerzo 7.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

ECS 7.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	64.8	65.1	65.5	65.2	64.8	64.9	64.6	64.3
Volumen espécimen, cm3	499.58	501.85	504.91	502.10	503.18	500.81	497.67	503.79
Gmb	2.092	2.081	2.077	2.083	2.084	2.089	2.104	2.071
Gmm	2.466							
% Vacíos	15.2%	15.6%	15.8%	15.5%	15.5%	15.3%	14.7%	16.0%
Promedio % Vacíos	15.5%				15.4%			
Volumen de Vacíos, cm3	75.8	78.3	79.7	78.0	77.9	76.6	73.2	80.8
Carga, lb	1028.20	966.50	1014.80	1155.60	974.60	933.20	895.50	1147.10
Carga, N	4584.4	4309.3	4524.6	5152.4	4345.4	4160.8	3992.7	5114.5
Esfuerzo, kPa	450.39	421.41	439.77	503.09	426.91	408.14	393.47	506.38

103Tabla 4.83 TSR 7.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	433.73	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	453.66			
% TSR	105%	Seco	43.59	10.05%
		Húmedo	30.36	6.69%

104Tabla 4.84 Valores de esfuerzo 7.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

ECS 8.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.6	63.6	64.2	63.6	63.7	64.0	63.6	64.1
Volumen espécimen, cm3	493.61	493.35	500.76	492.37	494.54	493.61	496.04	495.75
Gmb	2.128	2.124	2.099	2.133	2.121	2.134	2.117	2.119
Gmm	2.444							
% Vacíos	12.9%	13.1%	14.1%	12.7%	13.2%	12.7%	13.4%	13.3%
Promedio % Vacíos	13.2%				13.1%			
Volumen de Vacíos, cm3	63.7	64.6	70.6	62.5	65.2	62.6	66.4	65.9
Carga, lb	1089.30	1005.75	1094.37	1234.37	1179.69	1265.89	1148.39	1209.02
Carga, N	4856.8	4484.3	4879.4	5503.6	5259.8	5644.2	5120.3	5390.6
Esfuerzo, kPa	486.15	448.87	483.85	550.90	525.67	561.43	512.53	535.38

105Tabla 4.85 TSR 8.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	533.75		Desviación Estándar	Coficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	492.44	Seco	17.92	3.36%
% TSR	92%	Húmedo	36.84	7.48%

106Tabla 4.86 Valores de esfuerzo 8.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

ECS 8.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.9	64.7	64.4	64.2	64.2	63.9	64.4	64.4
Volumen espécimen, cm3	498.16	500.89	500.66	504.43	500.06	503.94	498.66	498.87
Gmb	2.112	2.102	2.101	2.089	2.105	2.086	2.104	2.106
Gmm	2.444							
% Vacíos	13.6%	14.0%	14.0%	14.5%	13.9%	14.7%	13.9%	13.8%
Promedio % Vacíos	14.0%				14.1%			
Volumen de Vacíos, cm3	67.5	70.0	70.1	73.2	69.3	73.9	69.4	69.0
Carga, lb	1143.32	1180.58	1267.44	1150.37	1227.97	1139.57	1036.17	1116.47
Carga, N	5097.7	5263.8	5651.1	5129.1	5475.1	5080.9	4619.9	4977.9
Esfuerzo, kPa	507.87	517.93	558.63	508.61	542.92	506.20	456.70	492.09

107Tabla 4.87 TSR 8.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	499.48		Desviación Estándar	Coficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	523.26	Seco	30.89	6.18%
% TSR	105%	Húmedo	20.80	3.98%

108Tabla 4.88 Valores de esfuerzo 8.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

ECS 9.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.5	63.8	63.7	64.2	63.8	63.7	63.6	64.9
Volumen espécimen, cm3	493.56	495.09	495.12	497.01	492.07	494.00	494.57	501.30
Gmb	2.143	2.138	2.140	2.138	2.149	2.143	2.144	2.108
Gmm	2.418							
% Vacíos	11.4%	11.6%	11.5%	11.6%	11.1%	11.4%	11.3%	12.8%
Promedio % Vacíos	11.5%				11.7%			
Volumen de Vacíos, cm3	56.2	57.3	57.0	57.7	54.8	56.2	56.1	64.3
Carga, lb	1291.91	1591.96	1276.70	1299.85	1455.27	1285.29	1358.05	1335.12
Carga, N	5760.2	7098.0	5692.4	5795.6	6488.5	5730.7	6055.1	5952.8
Esfuerzo, kPa	577.49	708.26	568.90	574.70	647.45	572.72	606.10	583.93

109Tabla 4.89 TSR 9.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	602.55		Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	607.34	Seco	28.57	4.74%
% TSR	101%	Húmedo	58.35	9.61%

110Tabla 4.90 Valores de esfuerzo 9.5% con 60% de pérdida de humedad.

ECS 9.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	65.0	64.6	64.6	64.7	64.5	64.4	64.9	64.8
Volumen espécimen, cm3	501.25	499.23	497.34	503.02	498.34	499.59	499.72	503.86
Gmb	2.110	2.118	2.125	2.105	2.113	2.123	2.120	2.103
Gmm	2.418							
% Vacíos	12.8%	12.4%	12.1%	12.9%	12.6%	12.2%	12.4%	13.0%
Promedio % Vacíos	12.6%				12.6%			
Volumen de Vacíos, cm3	63.9	61.9	60.4	65.1	62.9	61.1	61.7	65.7
Carga, lb	1273.17	1287.94	1444.47	1338.87	1282.21	1387.81	1432.34	1362.46
Carga, N	5676.6	5742.5	6440.4	5969.5	5716.9	6187.8	6386.3	6074.7
Esfuerzo, kPa	555.98	565.91	634.69	587.38	564.26	611.68	626.45	596.80

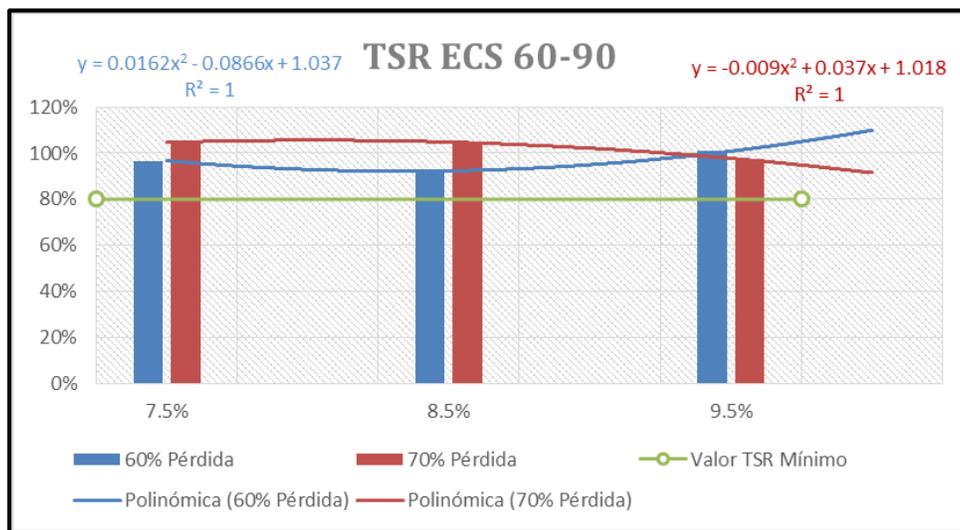
111Tabla 4.91 TSR 9.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	599.80		Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	585.99	Seco	23.04	3.84%
% TSR	98%	Húmedo	30.32	5.17%

112Tabla 4.92 Valores de esfuerzo 9.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

TSR ECS 60-90											
% ECS	% Asfalto	% Agua	% Agua Total	% Pérdida Humedad	% Humedad Compactación	Gmm	Gmb	% Vacíos	Condición	Carga	TSR %
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	60%	3.170%	2.466	2.090	15.3%	Seca	479.82	97%
							2.089	15.3%	Acondicionada	463.76	
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	70%	2.378%		2.084	15.5%	Seca	433.73	105%
							2.087	15.4%	Acondicionada	453.66	
8.5%	5.185%	5.0%	8.315%	60%	3.326%	2.444	2.121	14.0%	Seca	533.75	92%
							2.123	13.9%	Acondicionada	492.44	
8.5%	5.185%	5.0%	8.315%	70%	2.495%		2.101	14.8%	Seca	499.48	105%
							2.100	14.9%	Acondicionada	523.26	
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	60%	3.482%	2.418	2.140	11.5%	Seca	602.55	101%
							2.136	11.7%	Acondicionada	607.34	
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	70%	2.612%		2.115	12.6%	Seca	599.80	98%
							2.115	12.6%	Acondicionada	585.99	

113Tabla 4.93 Resumen valores TSR ECS sin ciclo de congelamiento.



44Figura 4.7 Gráficas TSR ECS sin ciclo de congelamiento.

4.5.1.3 Emulsión Catiónica de Rompimiento Lento modificada con Polímero (ECLP).

Con ciclo de congelamiento.

Determinación de la Gravedad Máxima de la mezcla Gmm										
Muestra	% Emulsión	Peso Bolsa 1 (g)	Peso Bolsa 2 (g)	Peso muestra en el aire (g)	Peso sumergido (g)	Volumen total cm3	Volumen de las bolsas cm3	Volumen Muestra cm3	Gmm	Gmm Promedio
1	7.5%	50.3	21.5	1559.8	915.6	716.0	77.311	638.689	2.442	2.443
2	7.5%	48.0	23.1	1558.8	915.8	714.1	76.372	637.728	2.444	
1	8.5%	50.1	21.1	1551.7	903.1	719.8	76.688	643.112	2.413	2.417
2	8.5%	48.1	22.6	1563.6	912.4	721.9	75.980	645.920	2.421	
1	9.5%	50.5	21.2	1573.7	908.3	737.1	77.231	659.869	2.385	2.398
2	9.5%	50.3	22.5	1547.0	899.9	719.9	78.316	641.584	2.411	

114 Tabla 4.94 Valores de la Gravedad Máxima Teórica ECLP.

Los valores se obtienen con las siguientes fórmulas:

$$Volumen\ total = (Peso\ Bolsa\ 1 + Peso\ bolsa\ 2 + Peso\ muestra\ al\ aire) - Peso\ sumergido$$

$$Volumen\ bolsas = \left( \frac{Peso\ bolsa\ 1}{Densidad\ bolsa\ 1} \right) + \left( \frac{Peso\ bolsa\ 2}{Densidad\ bolsa\ 2} \right)$$

$$Densidad\ bolsa\ 1 = 0.903$$

$$Densidad\ bolsa\ 2 = 0.995$$

$$Volumen\ Muestra = Volumen\ total - volumen\ bolsas$$

$$Gmm = \frac{Peso\ muestra\ al\ aire}{Volumen\ muestra}$$

CoreLok Gravedad Especifica bulk														
Número de muestra	% Emulsión	% Agua	% Pérdida de agua	A Peso de la bolsa (g)	B Muestra Seca antes del sellado (g)	C Peso sumergido (g)	D Muestra seca después de sumergir (g)	E Ratio B/A	F Densidad aparente de la bolsa por tabla	G Volumen Total (A+D) - C	H Volumen de la bolsa A/F	I Volumen de la muestra G - H	J Gravedad específica B/I	% Vacíos
1	7.5%	4%	60%	20.3	1048.4	550.5	1048.4	51.65	0.774	518.2	26.232	491.968	2.131	12.8%
2	7.5%	4%	60%	21.5	1046.5	546.0	1046.3	48.67	0.779	521.8	27.607	494.193	2.118	13.3%
3	7.5%	4%	60%	28.8	1048.6	547.4	1048.5	36.41	0.799	529.9	36.038	493.862	2.123	13.1%
4	7.5%	4%	60%	19.9	1047.0	547.0	1047.0	52.61	0.772	519.9	25.768	494.132	2.119	13.3%
5	7.5%	4%	60%	25.8	1050.7	553.2	1050.7	40.72	0.792	523.3	32.576	490.724	2.141	12.4%
6	7.5%	4%	60%	25.5	1053.5	554.8	1053.4	41.31	0.791	524.1	32.237	491.863	2.142	12.3%
7	7.5%	4%	60%	24.4	1049.3	552.9	1049.4	43.00	0.788	520.9	30.956	489.944	2.142	12.3%
8	7.5%	4%	60%	24.4	1050.2	553.7	1050.1	43.04	0.788	520.8	30.958	489.842	2.144	12.2%

115Tabla 4.95 Volumetría TSR 7.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

ECLP 7.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.9	64.1	63.7	64.1	63.7	63.6	63.8	63.7
Volumen espécimen, cm3	491.97	494.19	493.86	494.13	490.72	491.86	489.94	489.84
Gmb	2.131	2.118	2.123	2.119	2.141	2.142	2.142	2.144
Gmm	2.443							
% Vacíos	12.8%	13.3%	13.1%	13.3%	12.4%	12.3%	12.3%	12.2%
Promedio % Vacíos	13.1%				12.3%			
Volumen de Vacíos, cm3	62.9	65.9	64.7	65.6	60.7	60.7	60.5	60.0
Carga, lb	634.71	687.62	658.52	710.77	1113.78	1066.82	1003.54	987.01
Carga, N	2829.9	3065.9	2936.1	3169.1	4965.9	4756.6	4474.4	4400.7
Esfuerzo, kPa	281.94	304.49	293.44	314.74	496.30	476.12	446.47	439.81

116Tabla 4.96 TSR 7.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	464.68		Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	298.65	Seco	22.81	4.91%
% TSR	64%	Húmedo	12.24	4.10%

117Tabla 4.97 Valores Esfuerzo 7.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

CoreLok □ Gravedad Especifica bulk														
Número de muestra	% Emulsión	% Agua	% Pérdida de agua	A Peso de la bolsa (g)	B Muestra Seca antes del sellado (g)	C Peso sumergido (g)	D Muestra seca después de sumergir (g)	E Ratio B/A	F Densidad aparente de la bolsa por tabla	G Volumen Total (A+D) - C	H Volumen de la bolsa A/F	I Volumen de la muestra G - H	J Gravedad específica B/I	% Vacíos
1	7.5%	4%	70%	25.6	1047.5	542.9	1047.5	40.92	0.792	530.2	32.336	497.864	<b>2.104</b>	13.9%
2	7.5%	4%	70%	23.8	1047.3	541.9	1047.1	44.00	0.787	529	30.259	498.741	<b>2.100</b>	14.1%
3	7.5%	4%	70%	22.1	1047.8	543.1	1047.8	47.41	0.781	526.8	28.301	498.499	<b>2.102</b>	14.0%
4	7.5%	4%	70%	23.4	1047.1	542.0	1047.1	44.75	0.785	528.5	29.797	498.703	<b>2.100</b>	14.1%
5	7.5%	4%	70%	21.3	1031.9	535.4	1031.9	48.45	0.779	517.8	27.336	490.464	<b>2.104</b>	13.9%
6	7.5%	4%	70%	20.3	1032.7	537.6	1032.6	50.87	0.775	515.3	26.188	489.112	<b>2.111</b>	13.6%
7	7.5%	4%	70%	28.4	1036.0	540.9	1035.9	36.48	0.799	523.4	35.542	487.858	<b>2.124</b>	13.1%
8	7.5%	4%	70%	27.0	1039.9	542.5	1040.0	38.51	0.796	524.5	33.934	490.566	<b>2.120</b>	13.2%

118 Tabla 4.98 Volumetría TSR 7.5% ECLP con 70% de pérdida de humedad.

ECLP 7.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
	1	2	3	4	5	6	7	8
No. Espécimen								
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	64.9	64.8	64.9	65.0	63.7	63.7	63.6	63.6
Volumen espécimen, cm3	497.86	498.74	498.50	498.70	490.46	489.11	487.86	490.57
Gmb	2.104	2.100	2.102	2.100	2.104	2.111	2.124	2.120
Gmm	2.443							
% Vacíos	13.9%	14.1%	14.0%	14.1%	13.9%	13.6%	13.1%	13.2%
Promedio % Vacíos	14.0%				13.4%			
Volumen de Vacíos, cm3	69.1	70.1	69.6	70.1	68.1	66.4	63.8	64.9
Carga, lb	576.51	631.18	622.59	632.73	1228.42	1033.75	1052.49	992.30
Carga, N	2570.5	2814.2	2775.9	2821.1	5477.1	4609.1	4692.7	4424.3
Esfuerzo, kPa	252.14	276.48	272.30	276.30	547.38	460.64	469.73	442.86

119 Tabla 4.99 TSR 7.5% ECLP con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	480.15		Desviación Estándar		Coficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	269.31	Seco	40.00		8.33%
% TSR	<b>56%</b>	Húmedo	10.05		3.73%

120 Tabla 4.100 Valores Esfuerzo 7.5% ECLP con 70% de pérdida de humedad.

CoreLok □ Gravedad Especifica bulk														
Número de muestra	% Emulsión	% Agua	% Pérdida de agua	A Peso de la bolsa (g)	B Muestra Seca antes del sellado (g)	C Peso sumergido (g)	D Muestra seca después de sumergir (g)	E Ratio B/A	F Densidad aparente de la bolsa por tabla	G Volumen Total (A+D) - C	H Volumen de la bolsa A/F	I Volumen de la muestra G - H	J Gravedad específica B/I	% Vacíos
1	8.5%	4%	60%	27.6	1056.6	557.4	1056.6	38.28	0.796	526.8	34.671	492.129	<b>2.147</b>	11.2%
2	8.5%	4%	60%	28.8	1054.6	554.7	1054.6	36.62	0.799	528.7	36.053	492.647	<b>2.141</b>	11.4%
3	8.5%	4%	60%	26.4	1055.3	554.9	1055.2	39.97	0.793	526.7	33.281	493.419	<b>2.139</b>	11.5%
4	8.5%	4%	60%	27.6	1056.1	556.5	1056.0	38.26	0.796	527.1	34.670	492.430	<b>2.145</b>	11.3%
5	8.5%	4%	60%	28.6	1048.6	550.7	1048.6	36.66	0.799	526.5	35.807	490.693	<b>2.137</b>	11.6%
6	8.5%	4%	60%	25.5	1046.8	548.0	1046.8	41.05	0.791	524.3	32.219	492.081	<b>2.127</b>	12.0%
7	8.5%	4%	60%	27.5	1039.4	543.0	1039.3	37.80	0.797	523.8	34.511	489.289	<b>2.124</b>	12.1%
8	8.5%	4%	60%	24.4	1047.5	550.4	1047.3	42.93	0.788	521.3	30.951	490.349	<b>2.136</b>	11.6%

121 Tabla 4.101 Volumetrías TSR 8.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

ECLP 8.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.9	63.8	63.6	63.7	63.6	63.7	63.6	63.7
Volumen espécimen, cm3	492.13	492.65	493.42	492.43	490.69	492.08	489.29	490.35
Gmb	2.147	2.141	2.139	2.145	2.137	2.127	2.124	2.136
Gmm	2.417							
% Vacíos	11.2%	11.4%	11.5%	11.3%	11.6%	12.0%	12.1%	11.6%
Promedio % Vacíos	11.3%				11.8%			
Volumen de Vacíos, cm3	54.9	56.3	56.8	55.4	56.8	58.9	59.2	56.9
Carga, lb	588.85	515.44	589.74	592.38	961.44	860.91	954.16	866.86
Carga, N	2625.5	2298.2	2629.4	2641.2	4286.7	3838.5	4254.3	3865.0
Esfuerzo, kPa	261.57	229.32	263.20	263.96	429.09	383.62	425.84	386.27

122 Tabla 4.102 TSR 8.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	406.21	Desviación Estándar		Coeficiente de Variación	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	254.51	Seco	21.31	5.25%	
% TSR	63%	Húmedo	14.57	5.73%	

123 Tabla 4.103 Valores Esfuerzo 8.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

CoreLok □ Gravedad Especifica bulk														
Número de muestra	% Emulsión	% Agua	% Pérdida de agua	A Peso de la bolsa (g)	B Muestra Seca antes del sellado (g)	C Peso sumergido (g)	D Muestra seca después de sumergir (g)	E Ratio B/A	F Densidad aparente de la bolsa por tabla	G Volumen Total (A+D) - C	H Volumen de la bolsa A/F	I Volumen de la muestra G - H	J Gravedad específica B/I	% Vacíos
1	8.5%	4%	70%	25.3	1057.1	557.9	1057.0	41.78	0.790	524.4	32.016	492.384	2.147	11.2%
2	8.5%	4%	70%	25.7	1056.4	554.6	1056.2	41.11	0.791	527.3	32.476	494.824	2.135	11.7%
3	8.5%	4%	70%	23.9	1058.5	559.4	1058.2	44.29	0.786	522.7	30.404	492.296	2.150	11.0%
4	8.5%	4%	70%	24.4	1056.3	557.8	1056.3	43.29	0.788	522.9	30.975	491.925	2.147	11.2%
5	8.5%	4%	70%	26.1	1030.3	533.7	1030.3	39.48	0.794	522.7	32.869	489.831	2.103	13.0%
6	8.5%	4%	70%	27.4	1039.5	540.9	1039.2	37.94	0.797	525.7	34.395	491.305	2.116	12.5%
7	8.5%	4%	70%	20.4	1039.2	541.1	1039.1	50.94	0.775	518.4	26.321	492.079	2.112	12.6%
8	8.5%	4%	70%	24.4	1038.8	540.5	1038.6	42.57	0.789	522.5	30.928	491.572	2.113	12.6%

124 Tabla 4.104 Volumetrías TSR 8.5% ECLP con 70% de pérdida de humedad.

ECLP 8.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.8	64.2	63.8	63.5	63.7	63.6	63.6	63.5
Volumen espécimen, cm3	492.38	494.82	492.30	491.93	489.83	491.30	492.08	491.57
Gmb	2.147	2.135	2.150	2.147	2.103	2.116	2.112	2.113
Gmm	2.417							
% Vacíos	11.2%	11.7%	11.0%	11.2%	13.0%	12.5%	12.6%	12.6%
Promedio % Vacíos	11.3%				12.6%			
Volumen de Vacíos, cm3	55.0	57.7	54.3	54.9	63.5	61.2	62.1	61.7
Carga, lb	596.35	598.78	522.05	561.74	944.66	915.36	1042.13	984.80
Carga, N	2658.9	2669.7	2327.6	2504.6	4211.9	4081.3	4646.5	4390.9
Esfuerzo, kPa	265.32	264.74	232.26	251.10	420.94	408.52	465.10	440.21

125 Tabla 4.105 TSR 8.5% ECLP con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	433.69	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	253.35	Seco	21.36	4.93%
% TSR	58%	Húmedo	13.44	5.31%

126 Tabla 4.106 Valores Esfuerzo 8.5% ELCP con 70% de pérdida de humedad.

CoreLok □ Gravedad Especifica bulk														
Número de muestra	% Emulsión	% Agua	% Pérdida de agua	A Peso de la bolsa (g)	B Muestra Seca antes del sellado (g)	C Peso sumergido (g)	D Muestra seca despues de sumergir (g)	E Ratio B/A	F Densidad aparente de la bolsa por tabla	G Volumen Total (A+D) - C	H Volumen de la bolsa A/F	I Volumen de la muestra G - H	J Gravedad específica B/I	% Vacíos
1	9.5%	4%	60%	22.6	1057.8	558.8	1057.8	46.81	0.782	521.6	28.904	492.696	<b>2.147</b>	10.5%
2	9.5%	4%	60%	28.6	1061.3	560.0	1061.2	37.11	0.798	529.8	35.840	493.960	<b>2.149</b>	10.4%
3	9.5%	4%	60%	24.1	1060.7	557.7	1060.6	44.01	0.787	527	30.641	496.359	<b>2.137</b>	10.9%
4	9.5%	4%	60%	27.1	1054.6	554.8	1054.5	38.92	0.795	526.8	34.088	492.712	<b>2.140</b>	10.7%
5	9.5%	4%	60%	21.3	1048.9	550.7	1048.8	49.24	0.778	519.4	27.383	492.017	<b>2.132</b>	11.1%
6	9.5%	4%	60%	26.8	1046.5	548.6	1046.5	39.05	0.795	524.7	33.720	490.980	<b>2.131</b>	11.1%
7	9.5%	4%	60%	26.4	1051.4	554.3	1051.4	39.83	0.793	523.5	33.271	490.229	<b>2.145</b>	10.6%
8	9.5%	4%	60%	25.2	1044.1	546.3	1043.9	41.43	0.791	522.8	31.866	490.934	<b>2.127</b>	11.3%

127 Tabla 4.107 Volumetría TSR 9.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

ECLP 9.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	5	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.8	63.9	63.9	63.8	63.7	63.7	63.7	63.6
Volumen espécimen, cm3	492.70	493.96	496.36	492.71	492.02	490.98	490.23	490.93
Gmb	2.147	2.149	2.137	2.140	2.132	2.131	2.145	2.127
Gmm	2.398							
% Vacíos	10.5%	10.4%	10.9%	10.7%	11.1%	11.1%	10.6%	11.3%
Promedio % Vacíos	10.6%					11.0%		
Volumen de Vacíos, cm3	51.6	51.4	54.0	52.9	54.6	54.6	51.8	55.5
Carga, lb	579.37	550.71	578.27	535.50	764.20	804.25	748.69	795.43
Carga, N	2583.2	2455.4	2578.3	2387.6	3407.3	3585.9	3338.1	3546.5
Esfuerzo, kPa	257.76	244.63	256.87	238.24	340.53	358.37	333.62	355.00

128 Tabla 4.108 TSR 9.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	346.88		Desviación Estándar	Coficiente de variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	249.38	Seco	10.18	2.93%
% TSR	<b>72%</b>	Húmedo	8.26	3.31%

129 Tabla 4.109 Valores Esfuerzo 9.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

CoreLok □ Gravedad Especifica bulk														
Número de muestra	% Emulsión	% Agua	% Pérdida de agua	A Peso de la bolsa (g)	B Muestra Seca antes del sellado (g)	C Peso sumergido (g)	D Muestra seca después de sumergir (g)	E Ratio B/A	F Densidad aparente de la bolsa por tabla	G Volumen Total (A+D) - C	H Volumen de la bolsa A/F	I Volumen de la muestra G - H	J Gravedad específica B/I	% Vacíos
1	9.5%	4%	70%	22.6	1061.1	557.3	1060.9	46.95	0.782	526.2	28.913	497.287	2.134	11.0%
2	9.5%	4%	70%	25.7	1061.4	563.0	1061.2	41.30	0.791	523.9	32.489	491.411	2.160	9.9%
3	9.5%	4%	70%	20.1	1059.0	560.0	1059.0	52.69	0.772	519.1	26.032	493.068	2.148	10.4%
4	9.5%	4%	70%	24.1	1057.8	553.7	1057.7	43.89	0.787	528.1	30.633	497.467	2.126	11.3%
5	9.5%	4%	70%	28.6	1047.6	549.4	1047.6	36.63	0.799	526.8	35.804	490.996	2.134	11.0%
6	9.5%	4%	70%	25.1	1041.7	544.9	1041.8	41.50	0.791	522	31.744	490.256	2.125	11.4%
7	9.5%	4%	70%	23.4	1045.9	548.4	1045.8	44.70	0.785	520.8	29.794	491.006	2.130	11.2%
8	9.5%	4%	70%	23.5	1044.9	545.8	1044.5	44.46	0.786	522.2	29.906	492.294	2.123	11.5%

130 Tabla 4.110 Volumetría TSR 9.5% ELP con 70% de pérdida de humedad.

ECLP 9.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	64.1	63.7	63.7	64.4	63.6	63.7	63.6	63.6
Volumen espécimen, cm3	497.29	491.41	493.07	497.47	491.00	490.26	491.01	492.29
Gmb	2.134	2.160	2.148	2.126	2.134	2.125	2.130	2.123
Gmm	2.398							
% Vacíos	11.0%	9.9%	10.4%	11.3%	11.0%	11.4%	11.2%	11.5%
Promedio % Vacíos	10.7%				11.3%			
Volumen de Vacíos, cm3	54.8	48.8	51.5	56.4	54.1	55.9	54.9	56.6
Carga, lb	560.86	598.11	624.57	528.01	879.64	937.41	756.41	839.96
Carga, N	2500.7	2666.8	2784.7	2354.2	3922.0	4179.6	3372.6	3745.1
Esfuerzo, kPa	248.36	266.52	278.31	232.72	392.58	417.71	337.59	374.87

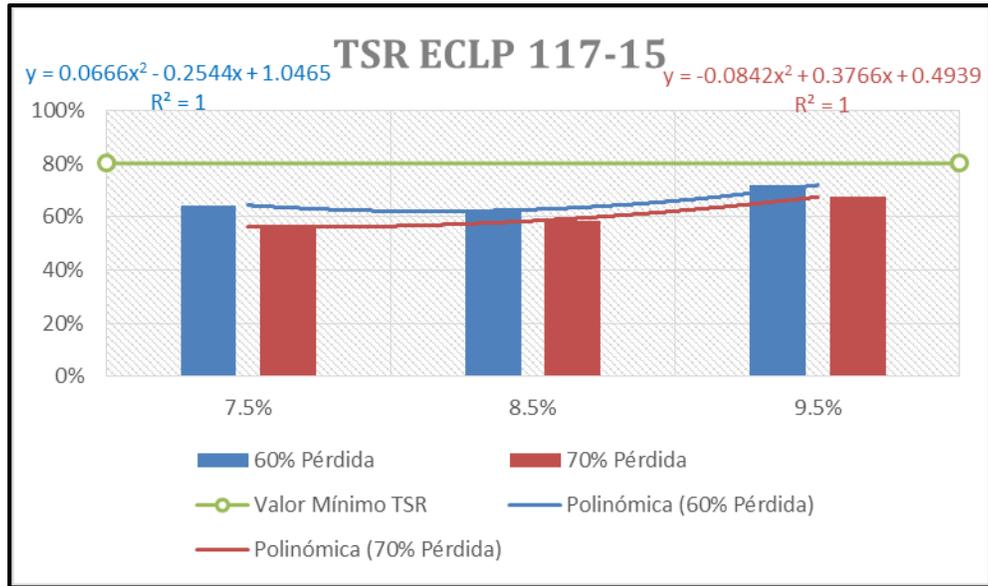
131 Tabla 4.111 TSR 9.5% ECLP con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	380.69		Desviación Estándar		Coefficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	256.48	Seco	29.17		7.66%
% TSR	67%	Húmedo	17.37		6.77%

132 Tabla 4.112 Valores Esfuerzo 9.5% ELP con 70% de pérdida de humedad.

TSR EMO 117-15											
% EMO	% Asfalto	% Agua	% Agua Total	% Pérdida Humedad	% Humedad Compactación	Gmm	Gmb	% Vacíos	Condición	Carga	TSR %
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.443	2.142	12.3%	Seca	464.68	64%
							2.123	13.1%	Acondicionada	298.65	
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.115	13.4%	Seca	480.15	56%
							2.101	14.0%	Acondicionada	269.31	
8.5%	5.185%	4.0%	7.315%	60%	2.926%	2.417	2.131	11.8%	Seca	406.21	63%
							2.143	11.3%	Acondicionada	254.51	
8.5%	5.185%	4.0%	7.315%	70%	2.195%		2.111	12.6%	Seca	433.69	58%
							2.145	11.3%	Acondicionada	253.35	
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.398	2.134	11.0%	Seca	346.88	72%
							2.143	10.6%	Acondicionada	249.38	
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.128	11.3%	Seca	380.69	67%
							2.142	10.7%	Acondicionada	256.48	

133 Tabla 4.113 Resumen valores TSR ECLP.



45 Figura 4.8 Gráficas TSR ECLP.

Sin ciclo de congelamiento.

ECLP 7.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	64.3	63.7	63.8	63.6	63.7	63.6	63.8	63.7
Volumen espécimen, cm3	493.02	489.54	490.72	488.97	490.72	491.86	489.94	489.84
Gmb	2.127	2.144	2.141	2.144	2.141	2.142	2.142	2.144
Gmm	2.443							
% Vacíos	12.9%	12.3%	12.4%	12.2%	12.4%	12.3%	12.3%	12.2%
Promedio % Vacíos	12.5%				12.3%			
Volumen de Vacíos, cm3	63.8	60.0	60.8	59.9	60.7	60.7	60.5	60.0
Carga, lb	837.32	889.57	907.64	955.04	1113.78	1066.82	1003.54	987.01
Carga, N	3733.3	3966.3	4046.8	4258.2	4965.9	4756.6	4474.4	4400.7
Esfuerzo, kPa	369.63	396.39	403.81	426.23	496.30	476.12	446.47	439.81

134Tabla 4.114 TSR 7.5%ECLP con 60% de pérdida de humedad

Esfuerzo en Seco, kPa	464.68		Desviación Estándar		Coficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	399.02		Seco	22.81	4.91%
% TSR	86%		Húmedo	20.21	5.07%

135Tabla 4.115 Valores de esfuerzo 7.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

ECLP 7.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	64.2	63.6	63.7	63.6	63.7	63.7	63.6	63.6
Volumen espécimen, cm3	494.29	491.58	496.60	489.40	490.46	489.11	487.86	490.57
Gmb	2.115	2.128	2.085	2.119	2.104	2.111	2.124	2.120
Gmm	2.443							
% Vacíos	13.4%	12.9%	14.7%	13.3%	13.9%	13.6%	13.1%	13.2%
Promedio % Vacíos	13.6%				13.4%			
Volumen de Vacíos, cm3	66.5	63.5	72.9	64.9	68.1	66.4	63.8	64.9
Carga, lb	891.11	837.98	770.96	893.72	1228.42	1033.75	1052.49	992.30
Carga, N	3973.1	3736.3	3437.4	3984.8	5477.1	4609.1	4692.7	4424.3
Esfuerzo, kPa	393.98	373.99	343.54	398.87	547.38	460.64	469.73	442.86

136Tabla 4.116 TSR 7.5% ECLP con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	480.15		Desviación Estándar		Coficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	377.59		Seco	40.00	8.33%
% TSR	79%		Húmedo	21.76	5.76%

137Tabla 4.117 Valores de esfuerzo 7.5% ECLP con 70% de pérdida de humedad.

ECLM 8.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.6	63.6	63.7	63.5	63.6	63.7	63.6	63.7
Volumen espécimen, cm3	492.47	489.85	490.70	489.85	490.69	492.08	489.29	490.35
Gmb	2.125	2.143	2.125	2.137	2.137	2.127	2.124	2.136
Gmm	2.417							
% Vacíos	12.1%	11.3%	12.1%	11.6%	11.6%	12.0%	12.1%	11.6%
Promedio % Vacíos	11.8%				11.8%			
Volumen de Vacíos, cm3	59.4	55.5	59.3	56.8	56.8	58.9	59.2	56.9
Carga, lb	651.91	744.94	794.55	736.12	961.44	860.91	954.16	866.86
Carga, N	2906.6	3321.4	3542.6	3282.1	4286.7	3838.5	4254.3	3865.0
Esfuerzo, kPa	290.95	332.47	354.05	329.05	429.09	383.62	425.84	386.27

138Tabla 4.118 TSR 8.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	406.21		Desviación Estándar		Coficiente de Variación	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	326.63		Seco	21.31	5.25%	
% TSR	80%		Húmedo	22.72	6.96%	

139Tabla 4.119 Valores de esfuerzo 8.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

ECLM 8.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.6	63.7	64.6	63.7	63.7	63.6	63.6	63.5
Volumen espécimen, cm3	490.04	491.82	495.60	490.40	489.83	491.30	492.08	491.57
Gmb	2.125	2.108	2.085	2.119	2.103	2.116	2.112	2.113
Gmm	2.417							
% Vacíos	12.1%	12.8%	13.7%	12.3%	13.0%	12.5%	12.6%	12.6%
Promedio % Vacíos	12.7%				12.6%			
Volumen de Vacíos, cm3	59.2	62.8	68.0	60.3	63.5	61.2	62.1	61.7
Carga, lb	901.69	847.02	987.67	820.78	944.66	915.36	1042.13	984.80
Carga, N	4020.3	3776.6	4403.7	3659.6	4211.9	4081.3	4646.5	4390.9
Esfuerzo, kPa	402.42	377.43	433.97	365.74	420.94	408.52	465.10	440.21

140Tabla 4.120 TSR 8.5% ECLP con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	433.69		Desviación Estándar		Coficiente de Variación	
Esfuerzo en Húmedo, kPa	394.89		Seco	21.36	4.93%	
% TSR	91%		Húmedo	26.17	6.63%	

141Tabla 4.121 Valores de esfuerzo 8.5% ECLP con 70% de pérdida de humedad.

ECLM 9.5% - 60% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.6	63.6	63.6	63.7	63.7	63.7	63.7	63.6
Volumen espécimen, cm3	491.12	489.99	490.56	492.05	492.02	490.98	490.23	490.93
Gmb	2.133	2.140	2.122	2.138	2.132	2.131	2.145	2.127
Gmm	2.398							
% Vacíos	11.0%	10.7%	11.5%	10.9%	11.1%	11.1%	10.6%	11.3%
Promedio % Vacíos	11.0%				11.0%			
Volumen de Vacíos, cm3	54.2	52.6	56.5	53.4	54.6	54.6	51.8	55.5
Carga, lb	720.03	715.18	699.75	610.24	764.20	804.25	748.69	795.43
Carga, N	3210.4	3188.7	3119.9	2720.8	3407.3	3585.9	3338.1	3546.5
Esfuerzo, kPa	321.35	319.18	312.30	271.92	340.53	358.37	333.62	355.00

142 Tabla 4.122 TSR 9.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	346.88		Desviación Estándar		Coficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	306.19	Seco	10.18		2.93%
% TSR	88%	Húmedo	20.06		6.55%

143 Tabla 4.123 Valores de esfuerzo 9.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

ECLM 9.5% - 70% Pérdida	Subgrupo Acondicionado (Húmedo)				Subgrupo sin Acondicionar (Seco)			
No. Espécimen	2	3	4	5	1	6	7	8
Diámetro, mm	100.0							
Espesor, mm	63.7	63.6	63.7	63.6	63.6	63.7	63.6	63.6
Volumen espécimen, cm3	490.51	490.46	488.53	491.07	491.00	490.26	491.01	492.29
Gmb	2.128	2.136	2.119	2.131	2.134	2.125	2.130	2.123
Gmm	2.398							
% Vacíos	11.3%	10.9%	11.7%	11.2%	11.0%	11.4%	11.2%	11.5%
Promedio % Vacíos	11.3%				11.3%			
Volumen de Vacíos, cm3	55.2	53.7	56.9	54.8	54.1	55.9	54.9	56.6
Carga, lb	678.80	824.09	686.74	768.31	879.64	937.41	756.41	839.96
Carga, N	3026.5	3674.3	3061.9	3425.6	3922.0	4179.6	3372.6	3745.1
Esfuerzo, kPa	302.47	367.79	306.01	342.90	392.58	417.71	337.59	374.87

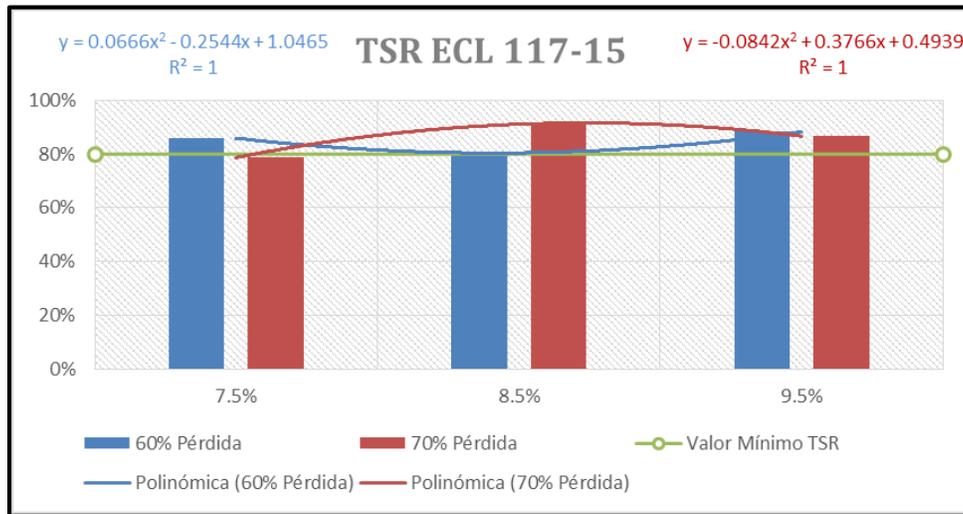
144 Tabla 4.124 TSR 9.5% ECLP con 70% de pérdida de humedad.

Esfuerzo en Seco, kPa	380.69		Desviación Estándar		Coficiente de Variación
Esfuerzo en Húmedo, kPa	329.79	Seco	29.17		7.66%
% TSR	87%	Húmedo	27.05		8.20%

145 Tabla 4.125 Valores de esfuerzo 9.5% ELCP con 70% de pérdida de humedad.

TSR EMO 117-15											
% EMO	% Asfalto	% Agua	% Agua Total	% Pérdida Humedad	% Humedad Compactación	Gmm	Gmb	% Vacios	Condición	Carga	TSR %
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.443	2.139	12.5%	Seca	464.68	86%
							2.142	12.3%	Acondicionada	399.02	
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.112	13.6%	Seca	480.15	79%
							2.115	13.4%	Acondicionada	377.59	
8.5%	5.185%	4.0%	7.315%	60%	2.926%	2.417	2.132	11.8%	Seca	406.21	80%
							2.131	11.8%	Acondicionada	326.63	
8.5%	5.185%	4.0%	7.315%	70%	2.195%		2.109	12.7%	Seca	433.69	91%
							2.111	12.6%	Acondicionada	394.89	
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.398	2.133	11.0%	Seca	346.88	88%
							2.134	11.0%	Acondicionada	306.19	
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.128	11.3%	Seca	380.69	87%
							2.128	11.3%	Acondicionada	329.79	

146Tabla 4.126 Resumen TSR ECLP sin ciclo de congelamiento.



46Figura 4.9 Gráficas TSR ECLP sin ciclo de congelamiento.

#### **4.5.2 Ensayo Módulo Dinámico.**

Para la realización de la prueba de Módulo Dinámico se utilizaron las 3 emulsiones que para el ensayo de TSR, las variantes utilizadas en la mezcla fueron: 2 contenidos de Emulsión (7.5% y 9.5%) y dos contenidos de humedad (60% y 70% de pérdida de humedad), esto para la evaluación de cada una de las emulsiones.

El primer paso para realizar la mezcla es determinar la cantidad de agua de mezclado y posteriormente el contenido de emulsión a utilizar, una vez realizada la mezcla se vacía en una charola y se mete al horno a 60°C, cuando llega al porcentaje de humedad deseado se procede a realizar la compactación.

La compactación se realiza en un compactador giratorio, y para nuestro caso compactamos por altura (150 mm) con un máximo de 100 giros, el diámetro de los especímenes fue de 150 mm (6"). Finalizada la compactación los especímenes se meten a un horno a 60°C durante 3 días.

Después de haber transcurrido los tres días se sacan los especímenes del horno y en la extractora de núcleos, se realiza la extracción de los módulos con un diámetro de 100 mm (4"). Se obtiene la volumetría de los módulos y se dejan secar.

Una vez secas las muestras, se pegan los pines (6) en el espécimen, posterior al haber pegado los pines, se acondicionan a la temperatura de ensayo (20°C) en la cámara de temperatura de la prensa. Para la temperatura de 20°C se dejan un mínimo de 3 horas y se monitorea la temperatura con el espécimen testigo dentro de la cámara.

Llegando el espécimen a la temperatura se realiza la prueba a la frecuencia determinada, para nuestro caso fue de 10Hz. Si se van a evaluar distintas Temperatura y frecuencias, se debe comenzar con la temperatura más baja hacia la más alta, y en lo que respecta a las frecuencias es de la más alta a la más baja.

Los cálculos para obtener el Módulo Dinámico y el ángulo de fase se lleva acabo con las fórmulas descritas en el capítulo anterior.

La evaluación del Módulo Dinámico se realizó a distintas edades del espécimen, por lo que cada vez que se terminaban de evaluar, se introducían a un horno a 40°C durante el tiempo necesario para su próxima evaluación.

#### 4.5.2.1 Módulo Dinámico Emulsión Catiónica de Rompimiento Lento (ECL).

El valor de la Gravedad Máxima Teórica es el mismo que se utilizó para el ensayo de Tensión Indirecta. Gmm 7.5% ECL = 2.460 y Gmm 9.5% ECL = 2.422.

Determinación de la gravedad bruta de la mezcla Gmb Extraídos							
No.	% EMO	% Humedad	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sum (g)	Gmb	Vacios %
1	7.5%	60%	2507.7	2548.8	1396.6	2.176	11.52%
2	7.5%	60%	2505.0	2547.1	1391.4	2.168	11.88%
3	7.5%	60%	2497.1	2541.9	1390.2	2.168	11.85%
Promedio						2.171	11.75%

147 Tabla 4.127 Volumetría Módulos 7.5% ECL con 60% de pérdida de humedad.

Determinación de la gravedad bruta de la mezcla Gmb Extraídos							
No.	% EMO	% Humedad	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sum (g)	Gmb	Vacios %
1	7.5%	60%	2485.5	2541.2	1385.4	2.150	12.58%
2	7.5%	60%	2496.0	2538.4	1391.2	2.176	11.55%
3	7.5%	60%	2490.1	2536.8	1382.2	2.157	12.32%
Promedio						2.161	12.15%

148 Tabla 4.128 Volumetría Módulos 7.5% ECL con 70% de pérdida de humedad.

Determinación de la gravedad bruta de la mezcla Gmb Extraídos							
No.	% EMO	% Humedad	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sum (g)	Gmb	Vacios %
1	9.5%	60%	2494.1	2533.4	1378.7	2.160	10.83%
2	9.5%	60%	2467.4	2510.1	1359.8	2.145	11.45%
3	9.5%	60%	2455.0	2491.5	1346.4	2.144	11.49%
Promedio						2.150	11.25%

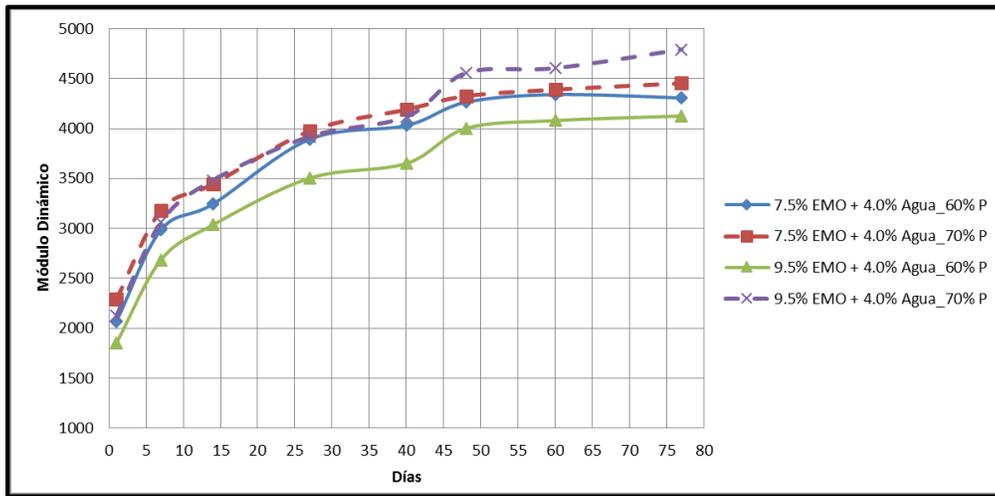
149 Tabla 4.129 Volumetría Módulos 9.5% ECL con 60% de pérdida de humedad.

Determinación de la gravedad bruta de la mezcla Gmb Extraídos							
No.	% EMO	% Humedad	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sum (g)	Gmb	Vacios %
1	9.5%	70%	2510.4	2542.9	1390.6	2.179	10.06%
2	9.5%	70%	2501.9	2531.6	1378.9	2.170	10.39%
3	9.5%	70%	2498.4	2530.8	1377.3	2.166	10.58%
Promedio						2.172	10.34%

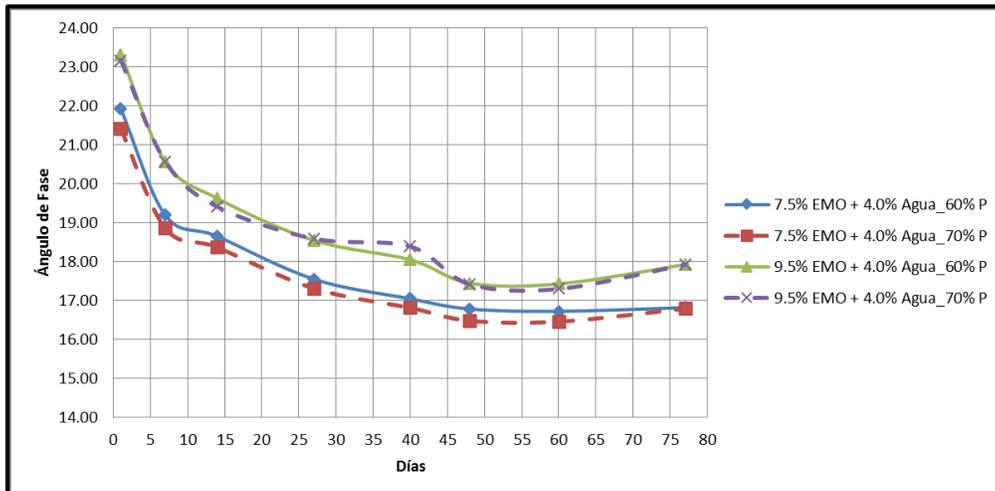
150 Tabla 4.130 Volumetría Módulos 9.5% ECL con 70% de pérdida de humedad.

MÓDULOS ECL												
% EMO	% Asfalto	% Agua	% Agua Total	% Pérdida Humedad	% Humedad Compactación	Gmm	Gmb	% Vacíos	Módulo E* (Mpa)	Coef. Var. E* (%)	$\delta$ (°)	Desviación Estándar $\delta$ (°)
Día 1												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.460	2.171	11.75%	2069	3.5%	21.93	0.16
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.161	12.15%	2292	5.6%	21.41	0.07
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.422	2.150	11.25%	1851	9.4%	23.32	0.58
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.172	10.34%	2128	4.6%	23.17	0.16
Día 7												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.460	2.171	11.75%	2984	4.7%	19.20	0.34
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.161	12.15%	3181	3.8%	18.86	0.06
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.422	2.150	11.25%	2685	7.0%	20.56	0.39
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.172	10.34%	3062	3.3%	20.58	0.17
Día 14												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.460	2.171	11.75%	3244	3.2%	18.65	0.03
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.161	12.15%	3445	3.8%	18.37	0.11
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.422	2.150	11.25%	3036	5.9%	19.63	0.26
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.172	10.34%	3481	2.4%	19.41	0.21
Día 27												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.460	2.171	11.75%	3893	2.7%	17.55	0.21
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.161	12.15%	3976	5.6%	17.32	0.13
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.422	2.150	11.25%	3504	6.3%	18.55	0.23
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.172	10.34%	3919	2.8%	18.59	0.14
Día 40												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.460	2.171	11.75%	4030	2.3%	17.05	0.11
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.161	12.15%	4192	6.6%	16.82	0.18
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.422	2.150	11.25%	3650	5.0%	18.05	0.29
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.172	10.34%	4116	2.8%	18.39	0.18
Día 48												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.460	2.171	11.75%	4263	3.6%	16.78	0.11
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.161	12.15%	4326	6.2%	16.49	0.05
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.422	2.150	11.25%	4001	4.6%	17.45	0.30
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.172	10.34%	4555	4.7%	17.42	0.08
Día 60												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.460	2.171	11.75%	4339	4.8%	16.73	0.28
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.161	12.15%	4391	6.4%	16.46	0.15
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.422	2.150	11.25%	4079	4.4%	17.43	0.28
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.172	10.34%	4602	3.3%	17.30	0.08
Día 77												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.460	2.171	11.75%	4306	4.6%	16.82	0.10
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.161	12.15%	4454	6.5%	16.80	0.09
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.422	2.150	11.25%	4125	3.2%	17.93	0.47
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.172	10.34%	4790	3.7%	17.93	0.18

151Tabla 4.131 Valores de Módulo Dinámico 7.5 y 9.5% ECL con 60 y 70% de pérdida de humedad.



47Figura 4.10 Gráfica Valores Módulo Dinámico 7.5 y 9.5% ECL.



48Figura 4.11 Gráfica Valores Ángulo de Fase 7.5 y 9.5% ECL.

#### 4.5.2.2 Módulo Dinámico Emulsión Catiónica Superestable (ECS).

El valor de la Gravedad Máxima Teórica es el mismo que se utilizó para el ensayo de Tensión Indirecta. Gmm 7.5% ECS = 2.466 y Gmm 9.5% ECS = 2.418.

Determinación de la gravedad bruta de la mezcla Gmb Extraídos							
No.	% EMO	% Humedad	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sum (g)	Gmb	Vacios %
1	7.5%	60%	2514.1	2543.7	1385.7	2.171	11.97%
2	7.5%	60%	2505.9	2533.5	1376.9	2.167	12.16%
3	7.5%	60%	2518.3	2549.0	1388.4	2.170	12.02%
Promedio						2.169	12.05%

152 Tabla 4.132 Volumetría Módulos 7.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

Determinación de la gravedad bruta de la mezcla Gmb Extraídos							
No.	% EMO	% Humedad	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sum (g)	Gmb	Vacios %
1	7.5%	60%	2513.7	2544.2	1387.9	2.174	11.86%
2	7.5%	60%	2511.7	2547.0	1388.9	2.169	12.07%
3	7.5%	60%	2522.8	2554.5	1398.0	2.181	11.56%
Promedio						2.175	11.83%

153 Tabla 4.133 Volumetría Módulos 7.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

Determinación de la gravedad bruta de la mezcla Gmb Extraídos							
No.	% EMO	% Humedad	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sum (g)	Gmb	Vacios %
1	9.5%	60%	2477.9	2507.7	1354.0	2.148	11.19%
2	9.5%	60%	2465.2	2501.3	1351.5	2.144	11.34%
3	9.5%	60%	2472.8	2503.1	1353.3	2.151	11.07%
Promedio						2.147	11.20%

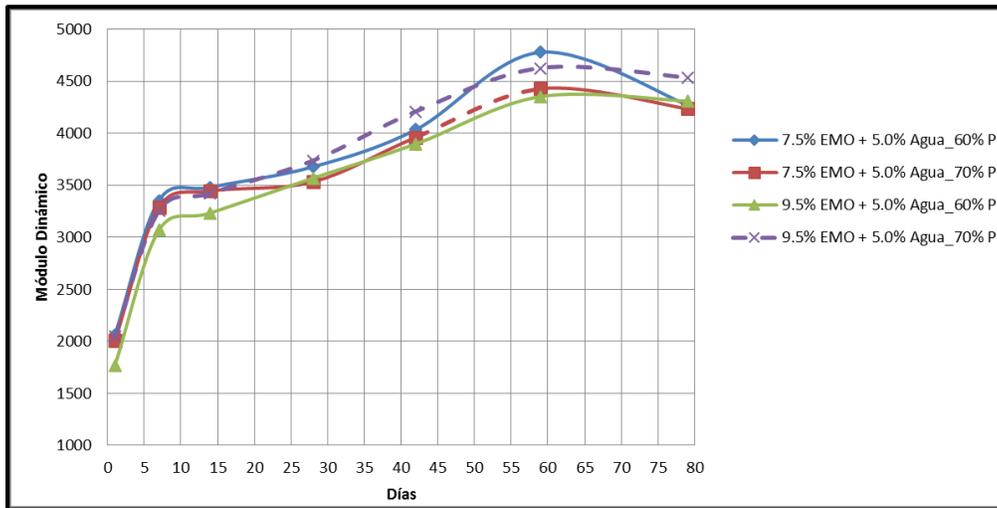
154 Tabla 4.134 Volumetría Módulos 9.5% ECS con 60% de pérdida de humedad.

Determinación de la gravedad bruta de la mezcla Gmb Extraídos							
No.	% EMO	% Humedad	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sum (g)	Gmb	Vacios %
1	9.5%	70%	2495.5	2525.5	1370.6	2.161	10.65%
2	9.5%	70%	2490.0	2519.8	1367.7	2.161	10.63%
3	9.5%	70%	2482.2	2513.2	1363.5	2.159	10.73%
Promedio						2.160	10.67%

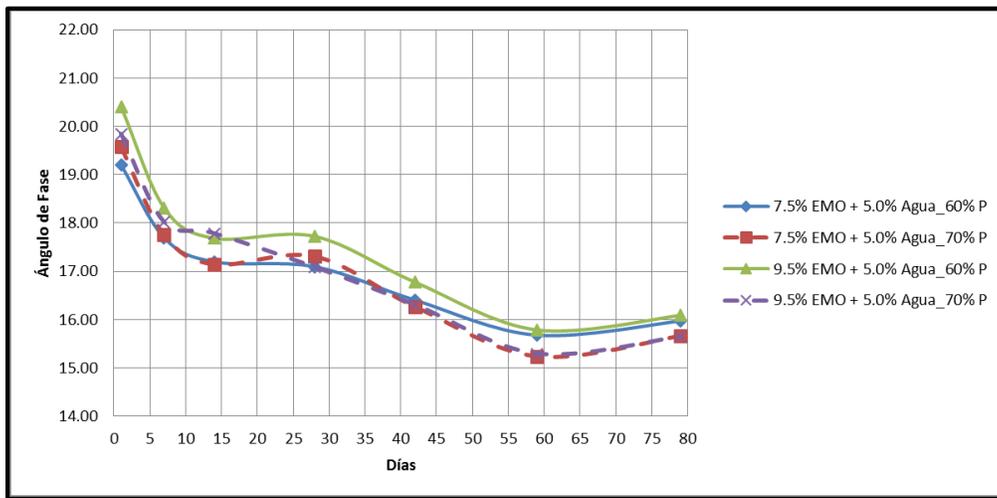
155 Tabla 4.135 Volumetría Módulos 9.5% ECS con 70% de pérdida de humedad.

MÓDULOS ECS												
% EMO	% Asfalto	% Agua	% Agua Total	% Pérdida Humedad	% Humedad Compactación	Gmm	Gmb	% Vacíos	Módulo E* (Mpa)	Coef. Var. E* (%)	$\delta$ (°)	Desviación Estándar $\delta$ (°)
Día 1												
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	60%	3.170%	2.466	2.169	12.05%	2060	3.3%	19.20	0.07
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	70%	2.378%		2.175	11.83%	2006	6.2%	19.57	0.26
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	60%	3.482%	2.418	2.147	11.20%	1768	4.4%	20.40	0.13
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	70%	2.612%		2.160	10.67%	2046	3.4%	19.84	0.33
Día 8												
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	60%	3.170%	2.466	2.169	12.05%	3354	1.8%	17.69	0.13
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	70%	2.378%		2.175	11.83%	3286	5.2%	17.75	0.07
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	60%	3.482%	2.418	2.147	11.20%	3069	1.6%	18.31	0.11
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	70%	2.612%		2.160	10.67%	3252	3.1%	18.02	0.09
Día 15												
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	60%	3.170%	2.466	2.169	12.05%	3480	4.8%	17.20	0.29
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	70%	2.378%		2.175	11.83%	3444	4.4%	17.14	0.11
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	60%	3.482%	2.418	2.147	11.20%	3233	1.0%	17.68	0.38
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	70%	2.612%		2.160	10.67%	3423	2.6%	17.78	0.04
Día 29												
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	60%	3.170%	2.466	2.169	12.05%	3677	0.7%	17.10	0.09
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	70%	2.378%		2.175	11.83%	3533	4.7%	17.31	0.35
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	60%	3.482%	2.418	2.147	11.20%	3568	5.6%	17.72	0.20
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	70%	2.612%		2.160	10.67%	3736	3.1%	17.08	0.12
Día 43												
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	60%	3.170%	2.466	2.169	12.05%	4034	3.0%	16.40	0.18
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	70%	2.378%		2.175	11.83%	3960	5.0%	16.26	0.07
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	60%	3.482%	2.418	2.147	11.20%	3897	2.5%	16.77	0.16
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	70%	2.612%		2.160	10.67%	4207	2.0%	16.30	0.17
Día 60												
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	60%	3.170%	2.466	2.169	12.05%	4779	5.0%	15.68	0.13
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	70%	2.378%		2.175	11.83%	4429	3.8%	15.23	0.08
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	60%	3.482%	2.418	2.147	11.20%	4352	1.8%	15.79	0.14
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	70%	2.612%		2.160	10.67%	4624	2.8%	15.29	0.10
Día 80												
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	60%	3.170%	2.466	2.169	12.05%	4273	3.8%	15.97	0.21
7.5%	4.575%	5.0%	7.925%	70%	2.378%		2.175	11.83%	4236	5.6%	15.66	0.28
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	60%	3.482%	2.418	2.147	11.20%	4309	3.7%	16.09	0.25
9.5%	5.795%	5.0%	8.705%	70%	2.612%		2.160	10.67%	4532	0.7%	15.64	0.09

156Tabla 4.136 Valores de Módulo Dinámico 7.5 y 9.5% ECS con 60 y 70% de pérdida de humedad.



49 Figura 4.12 Gráfica Valores Módulo dinámico 7.5 y 9.5% ECS.



50 Figura 4.13 Gráfica Valores Ángulo de Fase 7.5 y 9.5% ECS.

**4.5.2.3 Módulo Dinámico Emulsión Catiónica de Rompimiento Lento modificada con Polímero (ECLP).**

El valor de la Gravedad Máxima Teórica es el mismo que se utilizó para el ensayo de Tensión Indirecta. Gmm 7.5% ECS = 2.443 y Gmm 9.5% ECS = 2.398.

Determinación de la gravedad bruta de la mezcla Gmb Extraídos							
No.	% EMO	% Humedad	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sum (g)	Gmb	Vacios %
1	7.5%	60%	2526.2	2566.4	1413.3	2.191	10.33%
2	7.5%	60%	2514.0	2550.0	1399.4	2.185	10.57%
3	7.5%	60%	2512.7	2553.2	1403.3	2.185	10.56%
Promedio						2.187	10.49%

157 Tabla 4.137 Volumetría Módulos 7.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

Determinación de la gravedad bruta de la mezcla Gmb Extraídos							
No.	% EMO	% Humedad	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sum (g)	Gmb	Vacios %
1	7.5%	60%	2512.0	2555.5	1404.7	2.183	10.66%
2	7.5%	60%	2506.6	2550.5	1397.9	2.175	10.99%
3	7.5%	60%	2517.0	2562.3	1408.6	2.182	10.71%
Promedio						2.180	10.78%

158 Tabla 4.138 Volumetría Módulos 7.5% ECLP con 70% de pérdida de humedad.

Determinación de la gravedad bruta de la mezcla Gmb Extraídos							
No.	% EMO	% Humedad	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sum (g)	Gmb	Vacios %
1	9.5%	60%	2403.9	2463.2	1324.2	2.111	12.0%
2	9.5%	60%	2438.7	2488.6	1343.7	2.130	11.2%
3	9.5%	60%	2433.2	2477.2	1335.0	2.130	11.2%
Promedio						2.124	11.44%

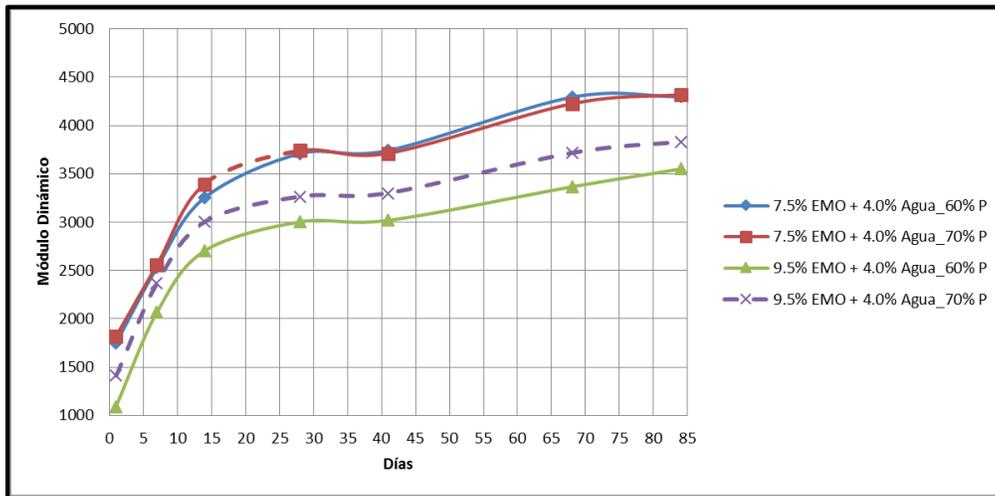
159 Tabla 4.139 Volumetría Módulos 9.5% ECLP con 60% de pérdida de humedad.

Determinación de la gravedad bruta de la mezcla Gmb Extraídos							
No.	% EMO	% Humedad	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sum (g)	Gmb	Vacios %
1	9.5%	70%	2450.9	2499.9	1355.5	2.142	10.7%
2	9.5%	70%	2450.1	2500.4	1353.0	2.135	11.0%
3	9.5%	70%	2438.5	2485.7	1343.0	2.134	11.0%
Promedio						2.137	10.89%

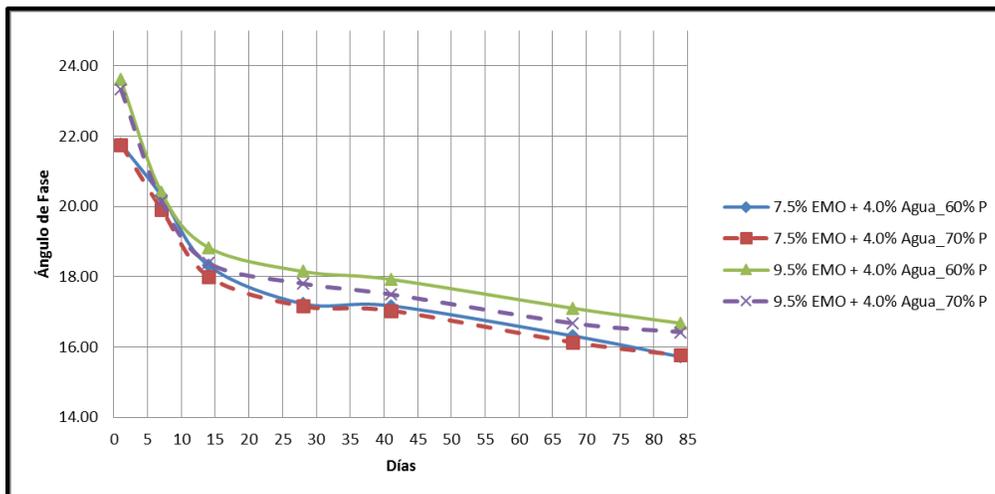
160 Tabla 4.140 Volumetría Módulos 9.5% ECLP con 70% de pérdida de humedad.

MÓDULOS ECLP												
% EMO	% Asfalto	% Agua	% Agua Total	% Pérdida Humedad	% Humedad Compactación	Gmm	Gmb	% Vacíos	Módulo E* (Mpa)	Coef. Var. E* (%)	$\delta$ (°)	Desviación Estándar $\delta$ (°)
Día 1												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.443	2.187	10.49%	1746	2.4%	21.78	0.09
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.180	10.78%	1819	8.8%	21.75	0.16
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.398	2.124	11.44%	1092	13.6%	23.61	0.54
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.137	10.89%	1414	4.7%	23.33	0.30
Día 8												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.443	2.187	10.49%	2529	2.0%	20.31	0.28
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.180	10.78%	2557	4.9%	19.91	0.02
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.398	2.124	11.44%	2064	6.0%	20.41	0.15
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.137	10.89%	2368	5.0%	20.14	0.15
Día 15												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.443	2.187	10.49%	3252	4.4%	18.32	0.38
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.180	10.78%	3392	5.3%	18.00	0.10
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.398	2.124	11.44%	2701	6.0%	18.83	0.12
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.137	10.89%	3002	4.9%	18.38	0.12
Día 29												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.443	2.187	10.49%	3708	2.5%	17.23	0.27
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.180	10.78%	3739	5.5%	17.16	0.22
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.398	2.124	11.44%	3002	3.7%	18.15	0.19
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.137	10.89%	3263	4.7%	17.80	0.14
Día 41												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.443	2.187	10.49%	3741	1.7%	17.17	0.23
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.180	10.78%	3712	3.4%	17.03	0.16
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.398	2.124	11.44%	3018	5.4%	17.92	0.20
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.137	10.89%	3300	4.7%	17.49	0.08
Día 68												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.443	2.187	10.49%	4292	2.5%	16.31	0.36
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.180	10.78%	4225	3.7%	16.14	0.14
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.398	2.124	11.44%	3365	6.2%	17.10	0.22
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.137	10.89%	3713	4.4%	16.67	0.02
Día 84												
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	60%	2.770%	2.443	2.187	10.49%	4297	3.2%	15.72	0.19
7.5%	4.575%	4.0%	6.925%	70%	2.078%		2.180	10.78%	4319	3.2%	15.77	0.06
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	60%	3.082%	2.398	2.124	11.44%	3550	5.7%	16.67	0.26
9.5%	5.795%	4.0%	7.705%	70%	2.312%		2.137	10.89%	3829	3.9%	16.42	0.26

161 Tabla 4.141 Valores Módulos 7.5 y 9.5% ECLP.

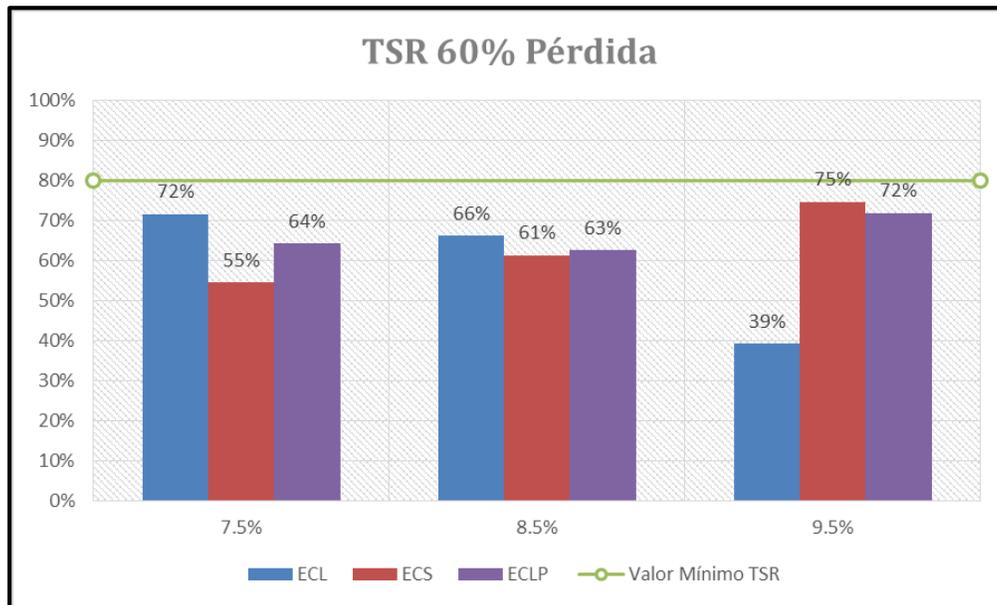


51 Figura 4.14 Gráfica Valores Módulos 7.5 y 9.5% ECLP.

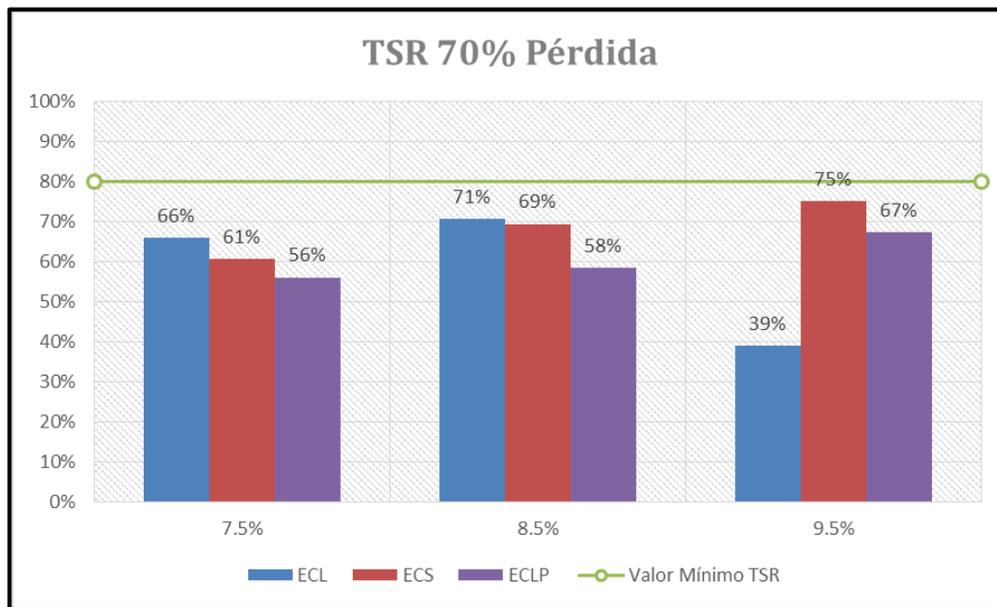


52 Figura 4.15 Gráfica Valores Ángulo de Fase 7.5 y 9.5% ECLP.

## CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE DATOS.



53Figura 5.1 Valores TSR 60% de pérdida de humedad.



54Figura 5.2 Valores TSR 70% de pérdida de humedad.

Para el caso de las tres emulsiones utilizadas con las distintas variantes empleadas (contenido de Emulsión y contenido de humedad de compactación) para el ensayo de Tensión Indirecta, ninguna cumplió con el valor mínimo requerido por la Norma AASHTO T283 cuando son evaluadas considerando un ciclo de congelamiento, el cual es 80%.

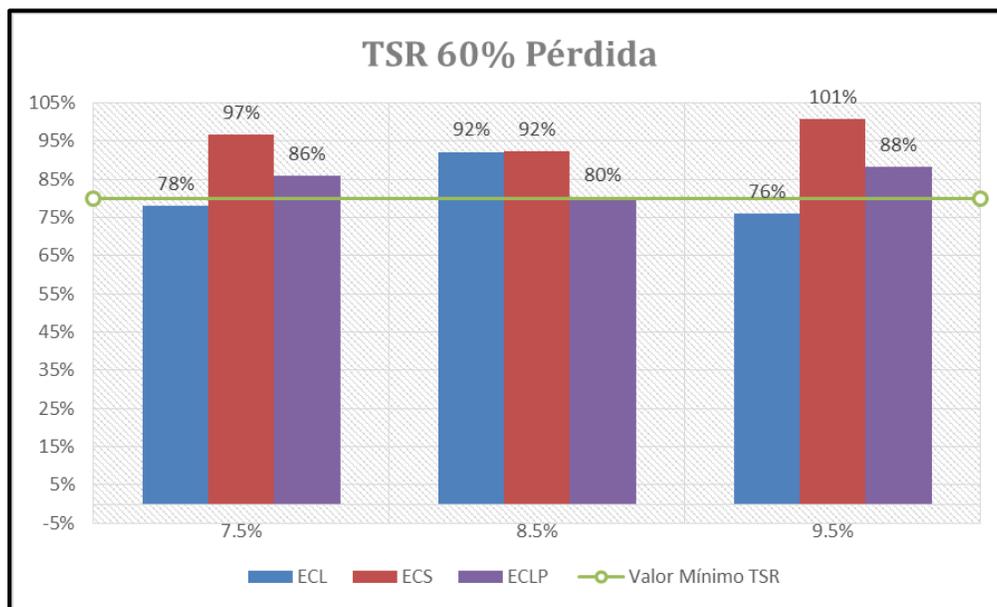
Uno de los factores que afecta directamente la resistencia de las pastillas es por una parte los vacíos de aire que presentan las muestras, los cuales se encuentran

en el rango desde 10% hasta 16% de vacíos de aire. Además por los resultados observados en la evaluación del Módulo Dinámico, la resistencia de la mezcla a edades tempranas es baja y conforme transcurren los días ésta va aumentando.

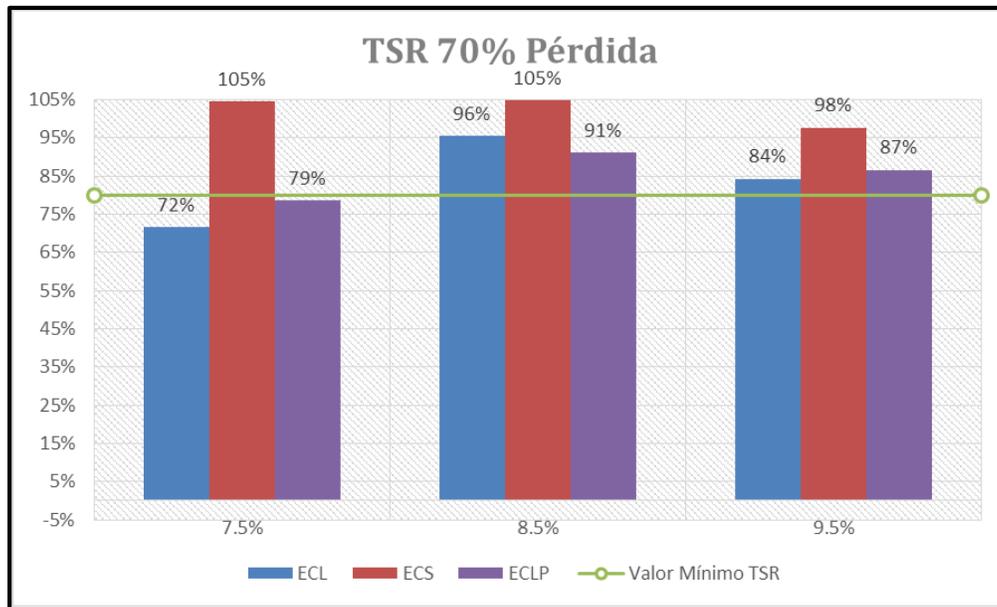
En la Emulsión Catiónica de Rompimiento Lento (ECL) y la Emulsión Catiónica de Rompimiento Lento Modificada con Polímero, para el esfuerzo en seco entre menor contenido de humedad de compactación se presente mayor será dicho esfuerzo. Mientras que para la Emulsión Catiónica Superestable ocurre lo inverso, entre mayor contenido de humedad de compactación mayor será el esfuerzo en seco.

La emulsión ECL con una pérdida del 60% de humedad para compactar entre mayor fue el contenido de Emulsión utilizado el porcentaje de TSR disminuyó, y para el caso del 70% de pérdida de humedad de compactación el punto que presentó el mayor valor de TSR fue el considerado en el prediseño como óptimo (8.5%) y tanto un porciento arriba como abajo del óptimo, los valores de TSR disminuyeron.

Para las emulsiones ECS y ECLP entre mayor fue el contenido de Emulsión el porcentaje de TSR aumentó. La ECS presentó mejor desempeño con una pérdida del 70% y por el contrario la ECLP obtuvo mejor desempeño con una pérdida del 60% de humedad.

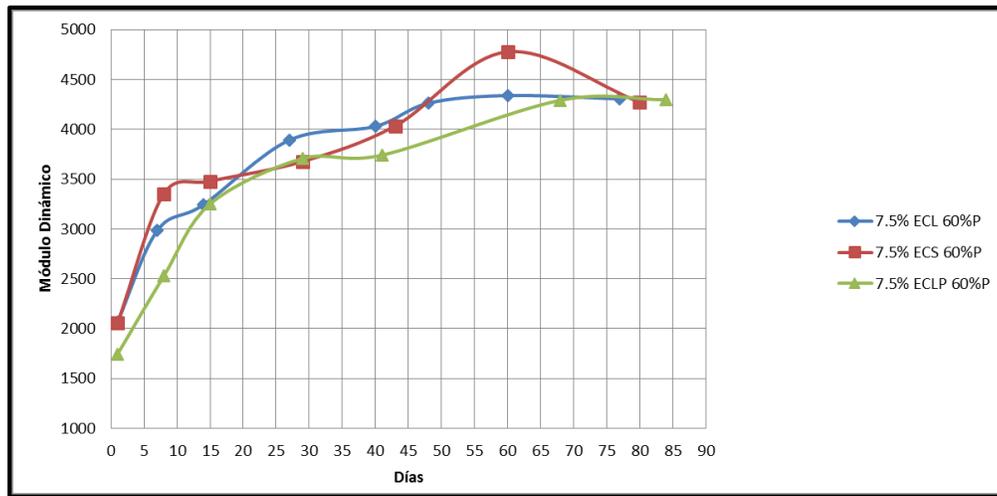


55Figura 5.3 Valores TSR 60% de pérdida de humedad sin ciclo de congelamiento.



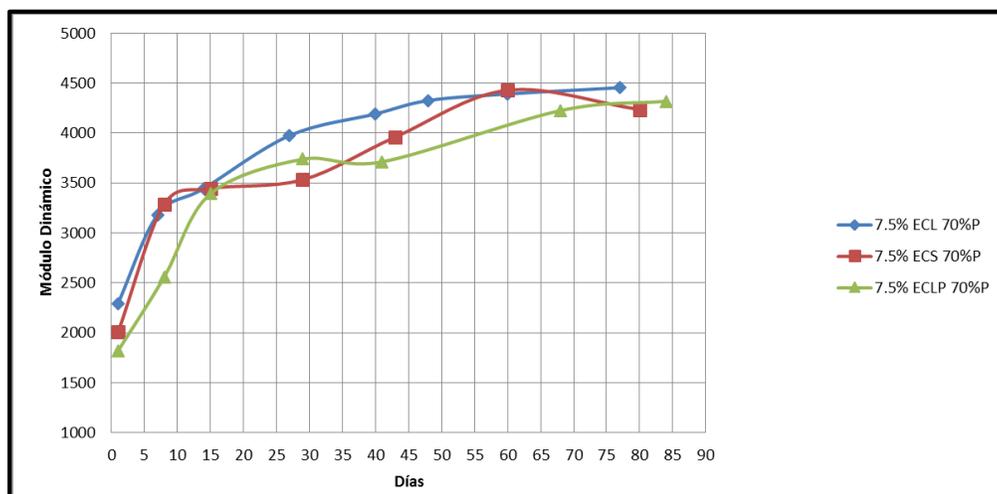
56Figura 5.4 Valores TSR 70% de pérdida de humedad sin ciclo de congelamiento.

En las figuras 5.3 y 5.4 los valores mínimos de TSR (80%), la mayor parte de los puntos analizados cumplen este parámetro, dichas muestras no tuvieron el ciclo de congelamiento como lo fue en el caso de las tablas 5.1 y 5.2. Con base en estas gráficas se puede determinar que el ciclo de congelamiento es muy agresivo para las mezclas en frío.



57Figura 5.5 Valores de Módulos Dinámicos con 7.5% de emulsión y 60% de pérdida de humedad.

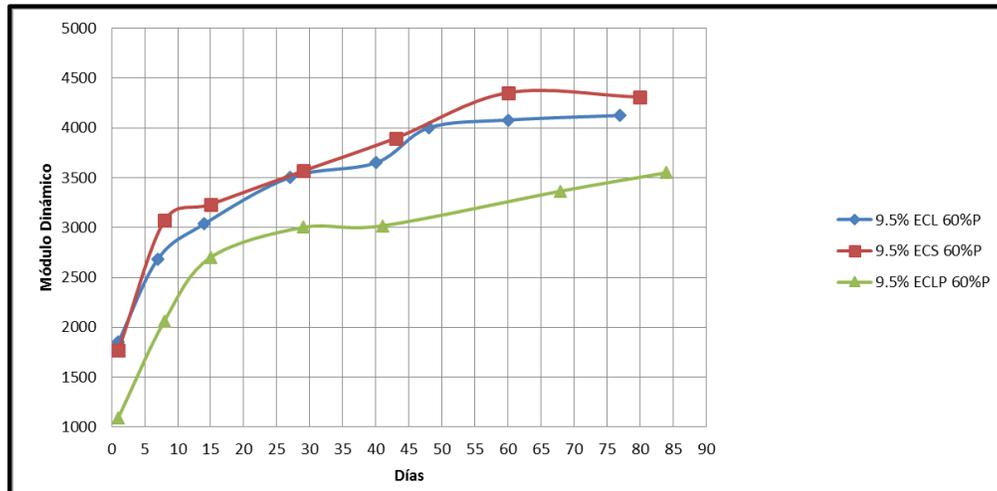
En el primer día de evaluación la emulsión modificada con polímero (ECLP) tuvo el valor de Módulo Dinámico más bajo pero conforme fueron transcurriendo los días la resistencia aumento. En la gráfica se observa que las emulsiones en el día 30 aumentan cerca de un 90 a 100% de la carga en el primer día, y en el día 80 las emulsiones presentan un valor de carga similar entre ellas. En los primeros 15 días la emulsión que registró un aumento de carga mayor en relación a su primer día de evaluación fue la modificada con polímero (ECLP).



58Figura 5.6 Valores de Módulos Dinámicos con 7.5% de emulsión y 70% de pérdida de humedad.

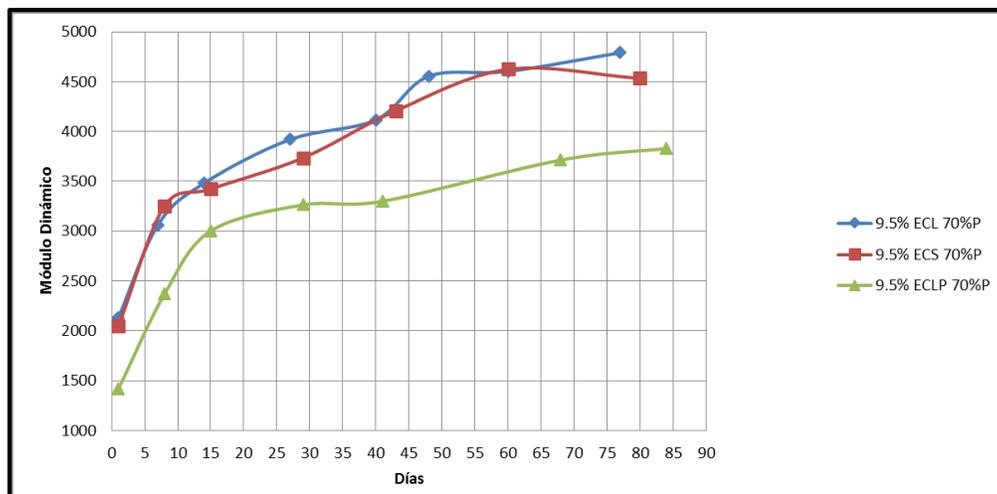
De la misma forma que en la gráfica anterior la emulsión modificada con polímero presentó el valor de carga más bajo y conforme pasan los días fue ganando

resistencia. A los 30 días los módulos alcanzaron valores entre los 3500 y 4000 Mpa. La emulsión que obtuvo valores de carga mayores en relación a las otras dos fue la emulsión de rompimiento lento (ECL).



59Figura 5.7 Valores de Módulos Dinámicos con 9.5% de emulsión y 60% de pérdida de humedad.

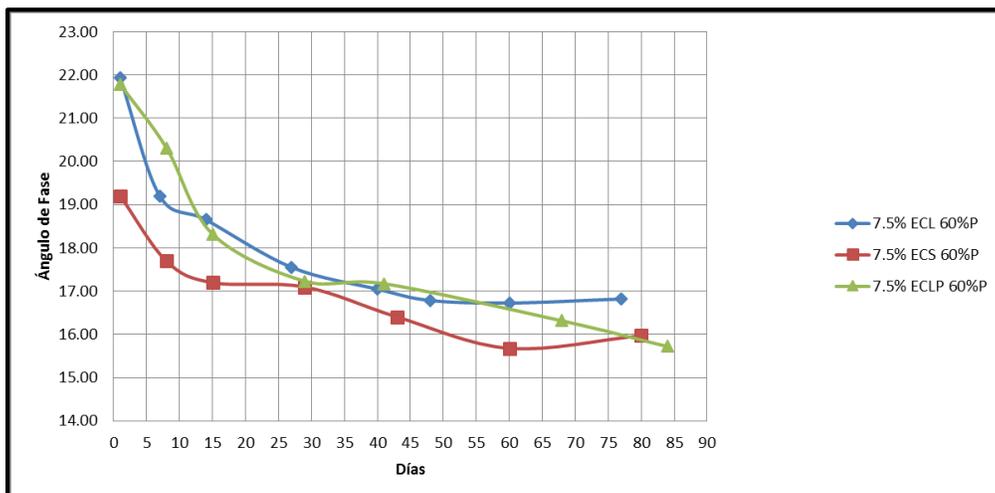
En la figura 5.5 podemos ver que la emulsión que registró las cargas más bajas en comparación con las otras dos emulsiones fue la modificada con polímero. De igual manera como se presentó en los especímenes con 7.5% de contenido de emulsión al día 30 los módulos aumentan su resistencia en un 100% respecto a su valor inicial, esto únicamente para las emulsiones de rompimiento lento (ECL) y la superestable (ECS), ya que la emulsión modificada con polímero registra éste incremento en el día 15.



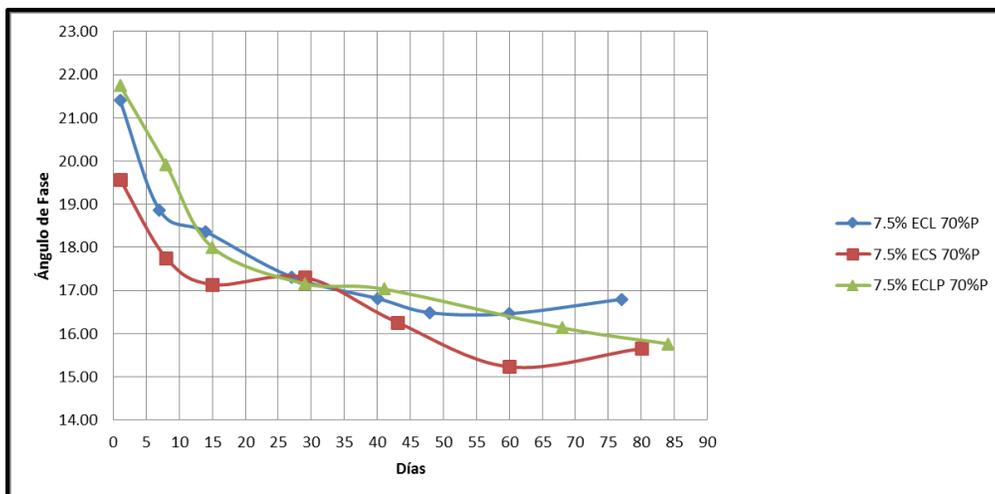
60Figura 5.8 Valores de Módulos Dinámicos con 9.5% de emulsión y 70% de pérdida de humedad.

Las emulsiones de rompimiento lento (ECL) y superestable (ECS) presentaron valores de carga similares y una tendencia de aumento de carga de la misma

manera, para el día 30 el incremento en relación al día inicial fue de 80 a 90%. La emulsión que tuvo un desempeño inferior comparado con estas dos emulsiones fue la modificada con polímero (ECLP).

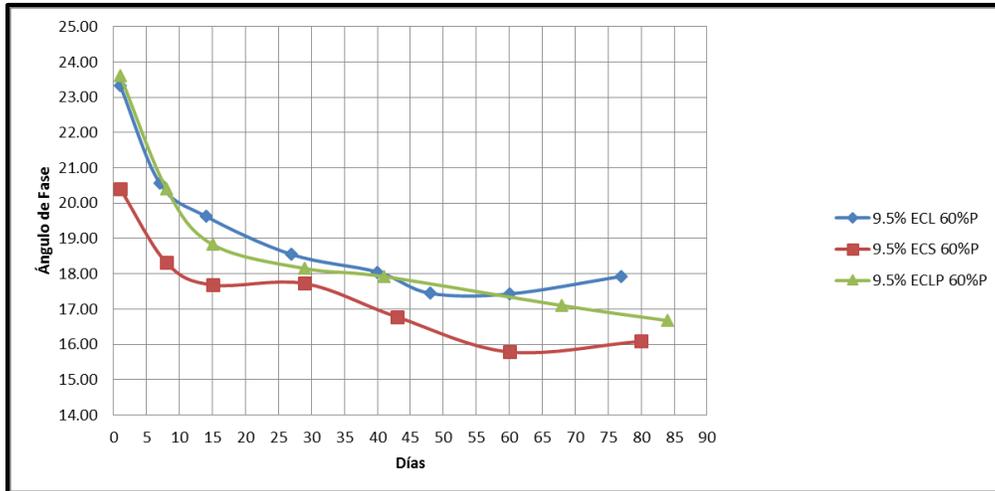


61 Figura 5.9 Valores de Ángulo de Fase con 7.5% de emulsión y 60% de pérdida de humedad.

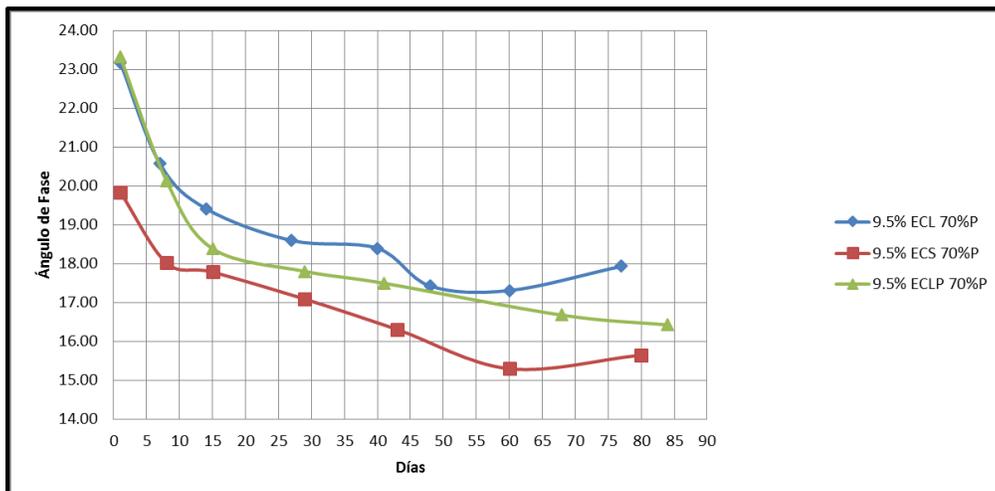


62 Figura 5.10 Valores de Ángulo de Fase con 7.5% de emulsión y 70% de pérdida de humedad.

Los valores de ángulo de fase para cada emulsión son muy similares tanto para el 60% como el 70% de pérdida de humedad de compactación. Las tres emulsiones presentaron un comportamiento similar con el transcurso de los días, comenzando con un valor de ángulo de fase mayor y con el paso de los días este fue disminuyendo.



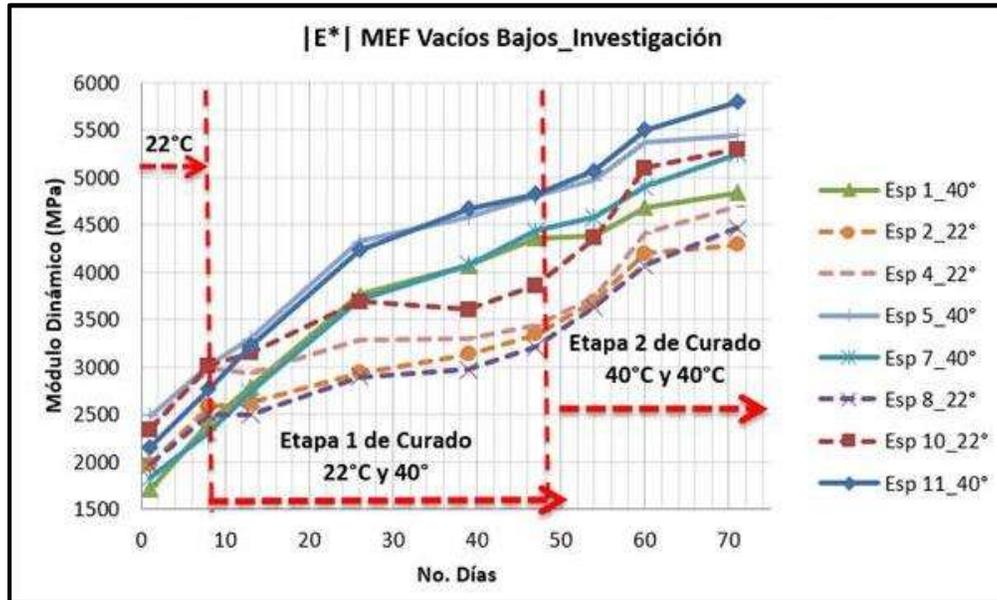
63 Figura 5.11 Valores de Ángulo de Fase con 9.5% de emulsión y 60% de pérdida de humedad.



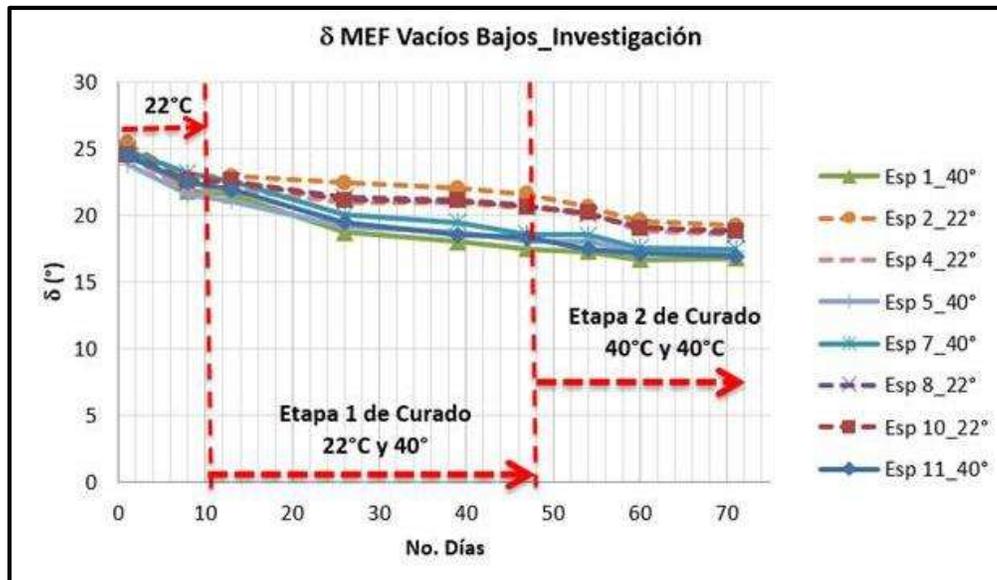
64 Figura 5.12 Valores de Ángulo de Fase con 9.5% de emulsión y 70% de pérdida de humedad.

Aunque inicialmente los valores de ángulo de fase son un poco mayor en comparación con los de 7.5% de emulsión, la tendencia que presentan es la misma, conforme pasan los días este valor disminuye, siendo la emulsión superestable (ECS) la que presenta ángulos de fase inferiores a las otras 2 emulsiones.

Efecto de la temperatura en el curado de las muestras.



65Figura 5.13 Módulos con diferente temperatura de curado.



66Figura 5.14 Ángulo de fase con diferente temperatura de curado.

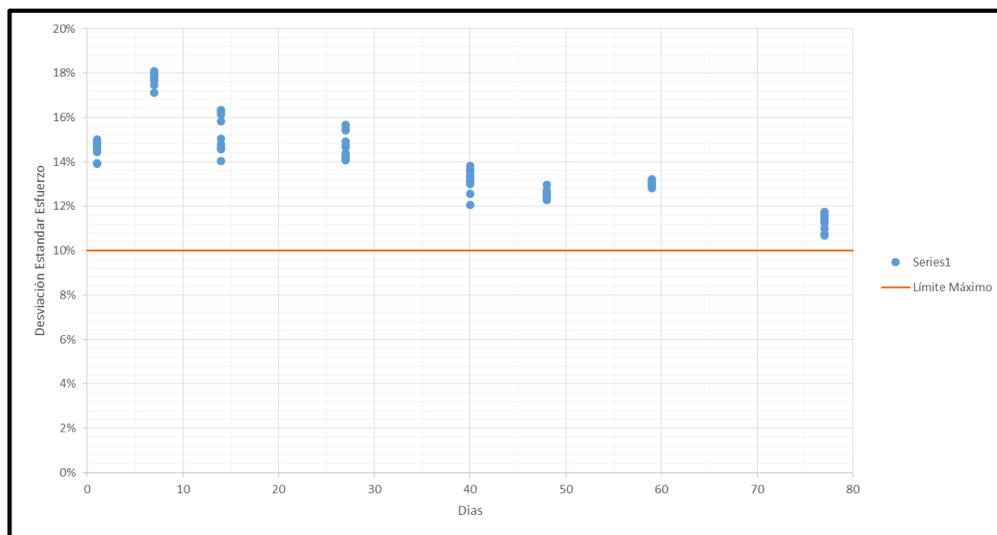
En las figuras 5.13 y 5.14 se puede observar el efecto que tiene la temperatura de curado tanto en el módulo dinámico como en el ángulo de fase. Durante los días 10 a 50 el valor del módulo dinámico para los especímenes que se curaron a 22°C incrementa máximo 1000 Mpa, mientras que para los que se curaron a 40°C el valor incremento casi 2000 Mpa. Lo que nos indica que a mayor temperatura los valores de módulo dinámico incrementan con mayor rapidez. Para el ángulo de fase las muestras que se curaron a 40°C tienen una mayor disminución en el valor del ángulo de fase en relación a los de 22°C.

También es importante mencionar que se requiere una revisión al método de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas en frío en los límites recomendados de los indicadores de calidad contra los usados en las mezclas en caliente, que se muestran a continuación en la tabla 4.102, se presentaran las gráficas obtenidas para cada emulsión.

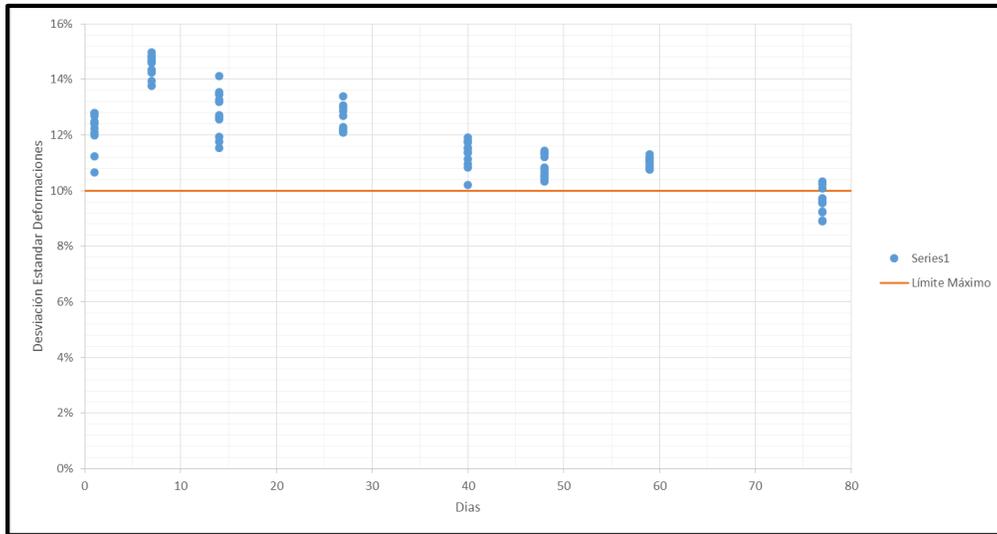
Indicador	Símbolo	Ecuación	Límite
Desviación estándar del esfuerzo aplicado	$se(\sigma)$	9	$\leq 10\%$
Desviación estándar promedio de la medición de deformaciones	$se(\epsilon)$	21	$\leq 10\%$
Coficiente de uniformidad de las mediciones de deformación	$U_L$	22	$\leq 20\%$
Coficiente de uniformidad de las mediciones del ángulo de fase	$U_0$	23	$\leq 3$ grados

162Tabla 5.1 Indicadores de calidad (fuente: IMT).

67

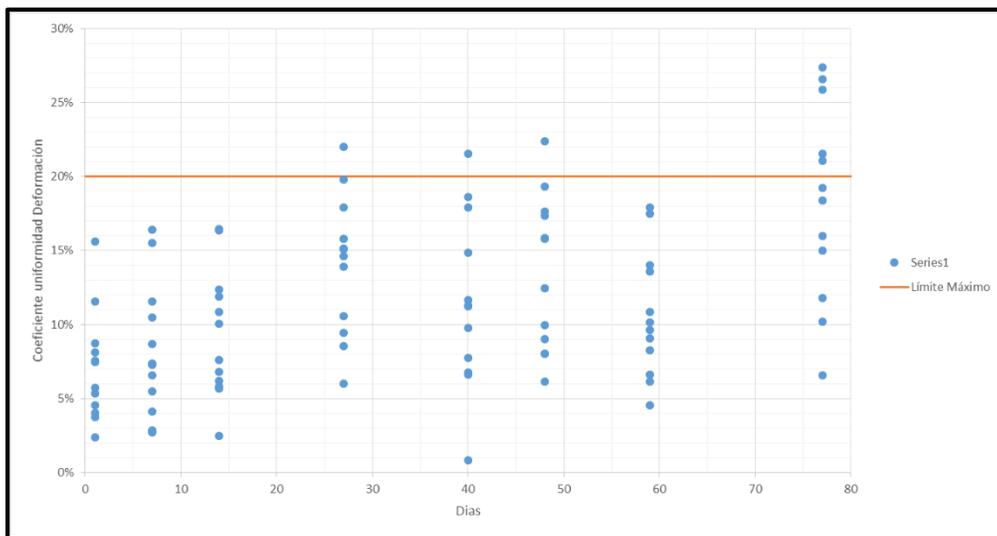


68Figura 5.15 Desviación Estándar del Esfuerzo aplicado ECL.

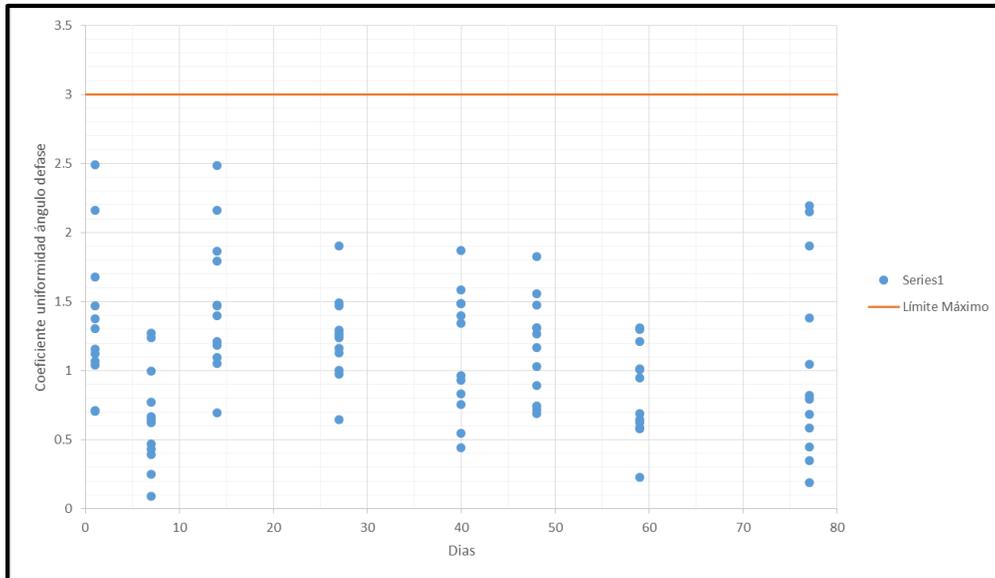


69 Figura 5.16 Desviación Estándar promedio de deformaciones ECL.

Las desviaciones estándar se encuentran por encima del límite máximo establecido en la norma para mezclas en caliente, este valor disminuye con el paso del tiempo.



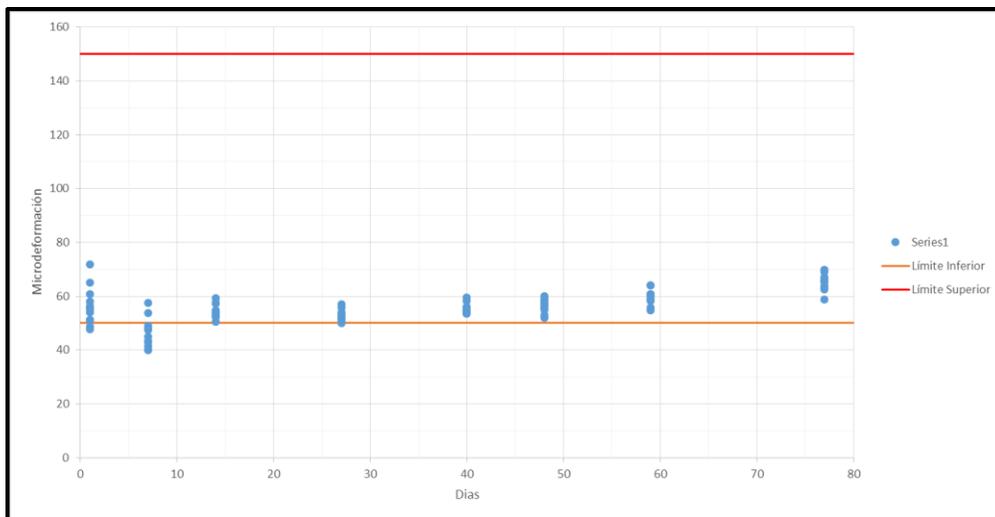
70 Figura 5.17 Coeficiente de uniformidad de deformación ECL.



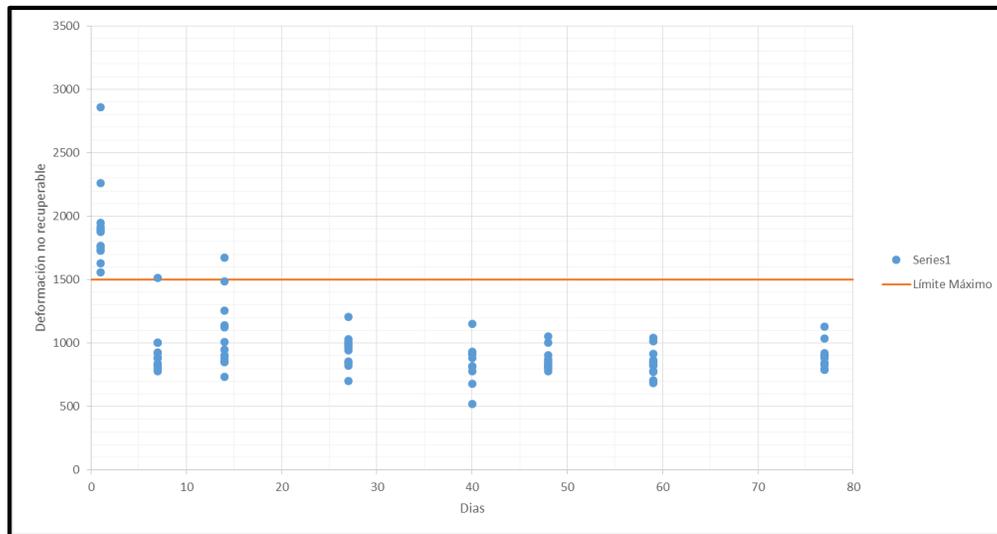
71 Figura 5.18 Coeficiente de uniformidad Ángulo de Fase ECL.

El coeficiente de uniformidad de deformación en un inicio cumple el límite máximo, pero conforme avanza el tiempo algunos especímenes se salen del valor límite.

Para el coeficiente de uniformidad del ángulo de fase todos los especímenes cumplen con la condición establecida por la norma.

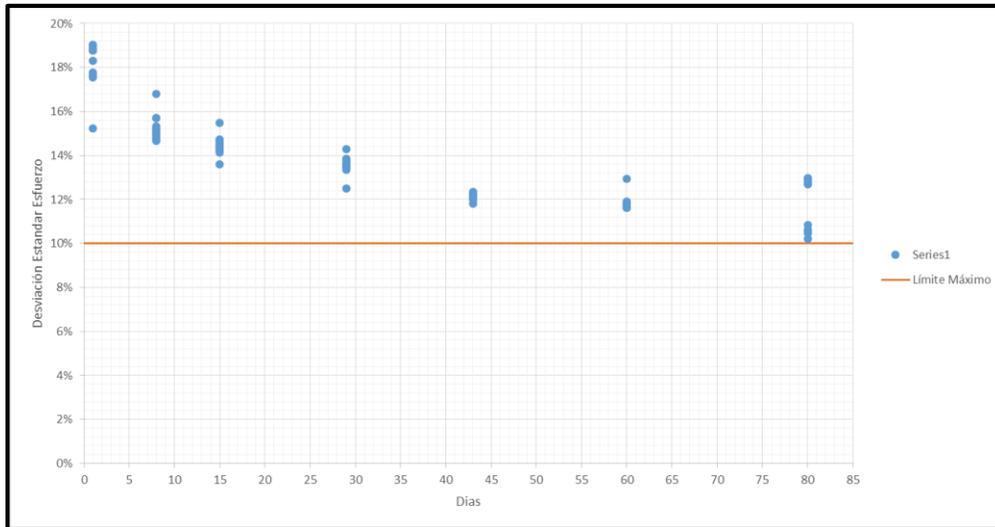


72 Figura 5.19 Microdeformación axial ECL.

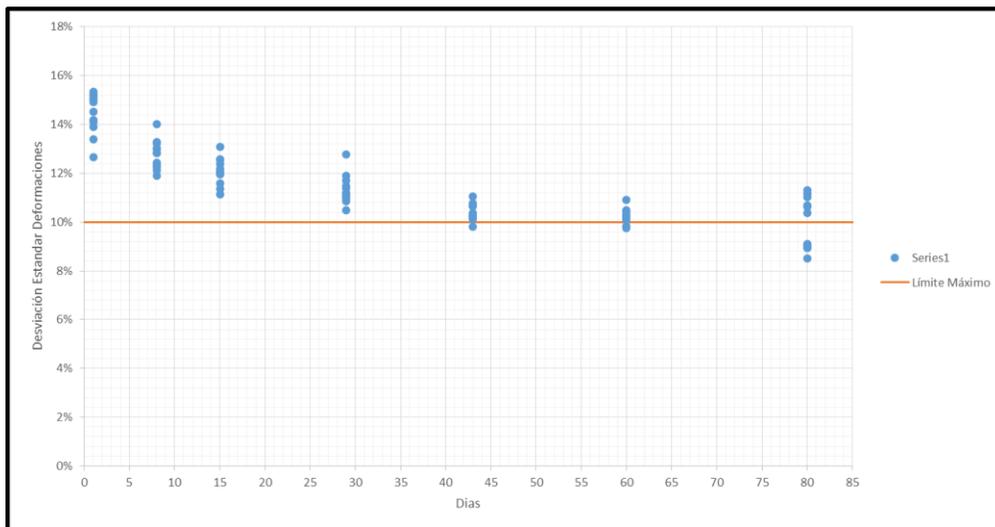


73Figura 5.20 Deformación no recuperable ECL.

Las microdeformaciones se encuentran muy cercanas al límite inferior (50), esto es debido a que entre mayor sea la deformación axial mayor es la deformación no recuperable. Entre mayor edad tienen los especímenes el valor de la deformación no recuperable se encuentra dentro del límite establecido por la norma.

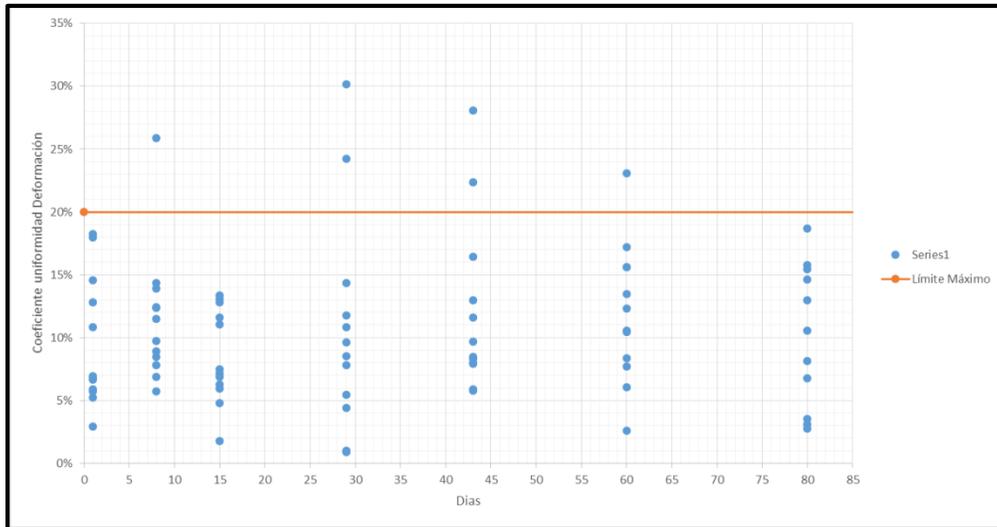


74Figura 5.21 Desviación Estándar del Esfuerzo aplicado ECS

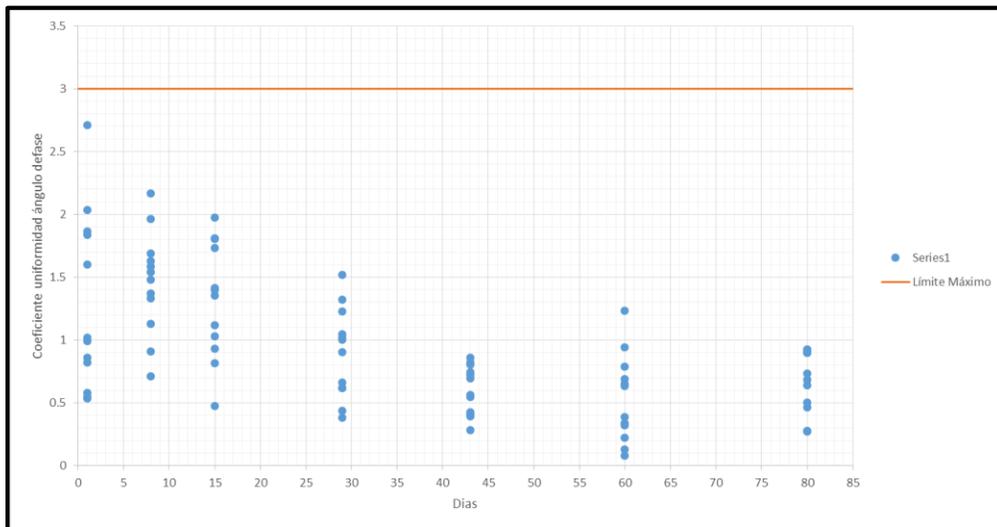


75Figura 5.22 Desviación Estándar promedio de deformaciones ECS.

El valor de las desviaciones no cumple con los indicadores de calidad establecidos para la mezcla en caliente. Dicho valor se acerca al límite indicado al transcurrir los días.

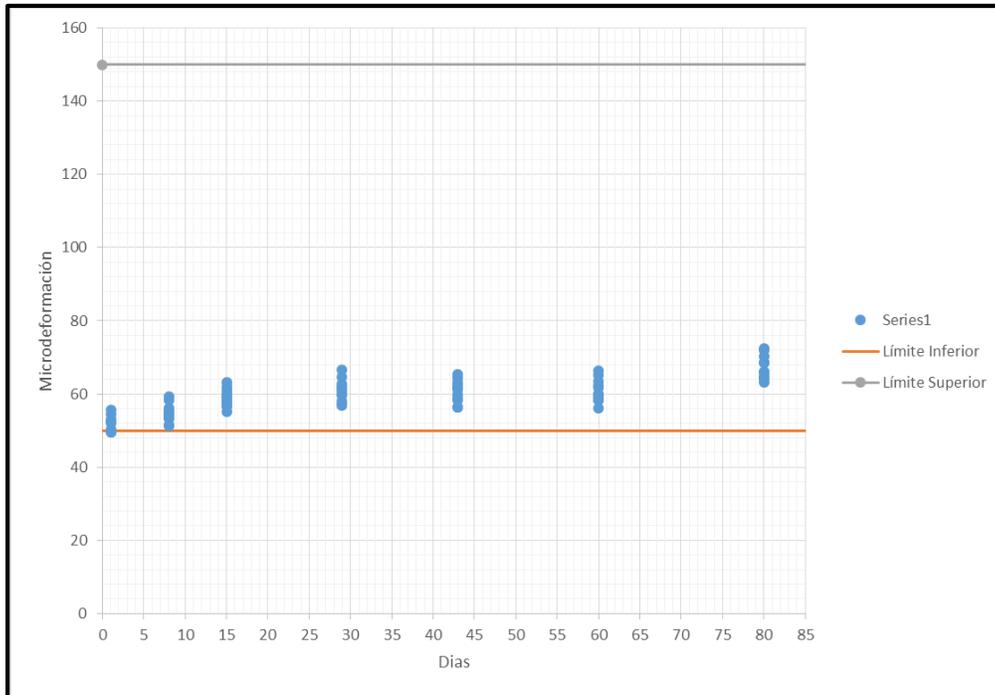


76Figura 5.23 Coeficiente de uniformidad de deformación ECS.

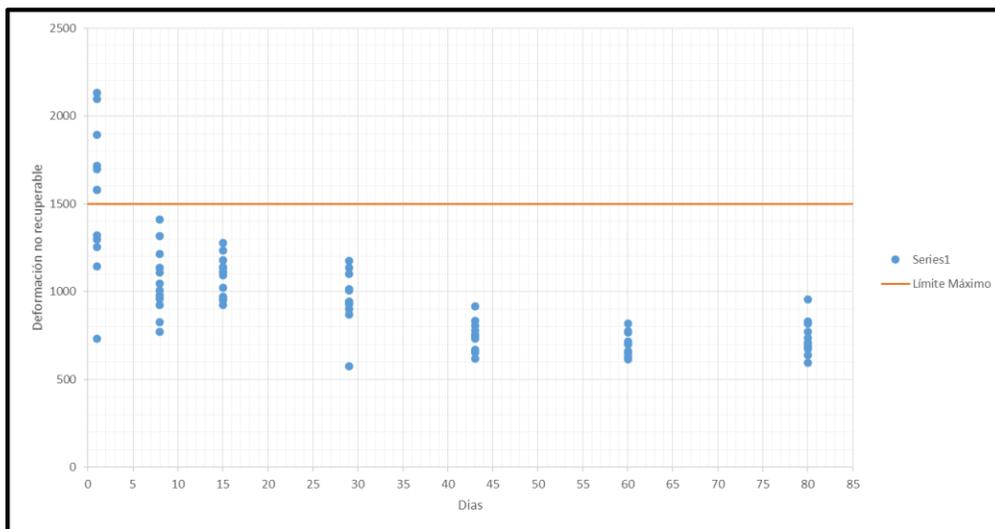


77Figura 5.24 Coeficiente de uniformidad Ángulo de Fase ECS.

Para el coeficiente de uniformidad de deformación algunos valores no están dentro del límite permitido, pero la mayoría si lo cumple. En lo referente al coeficiente de uniformidad de ángulo de fase todos los valores cumplen con la especificación.

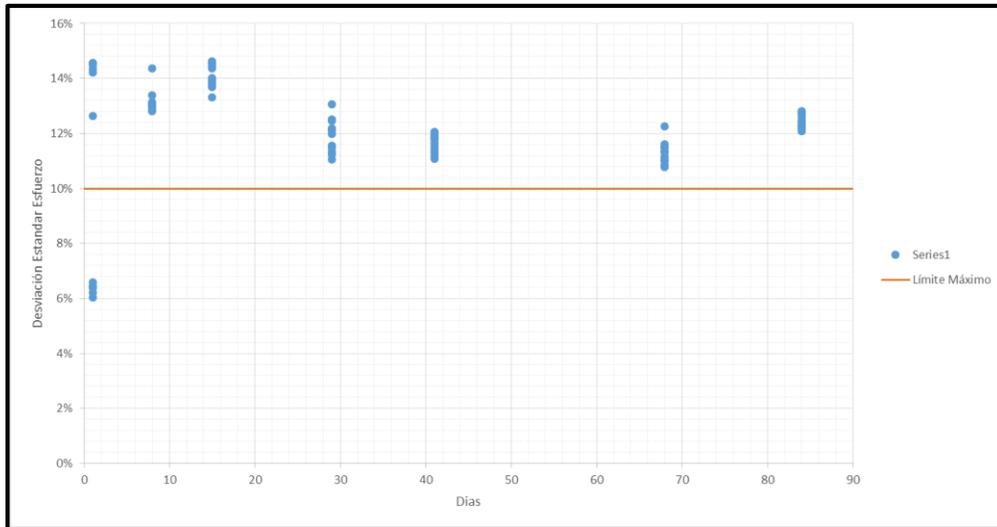


78Figura 5.25 Micordeformación axial ECS.

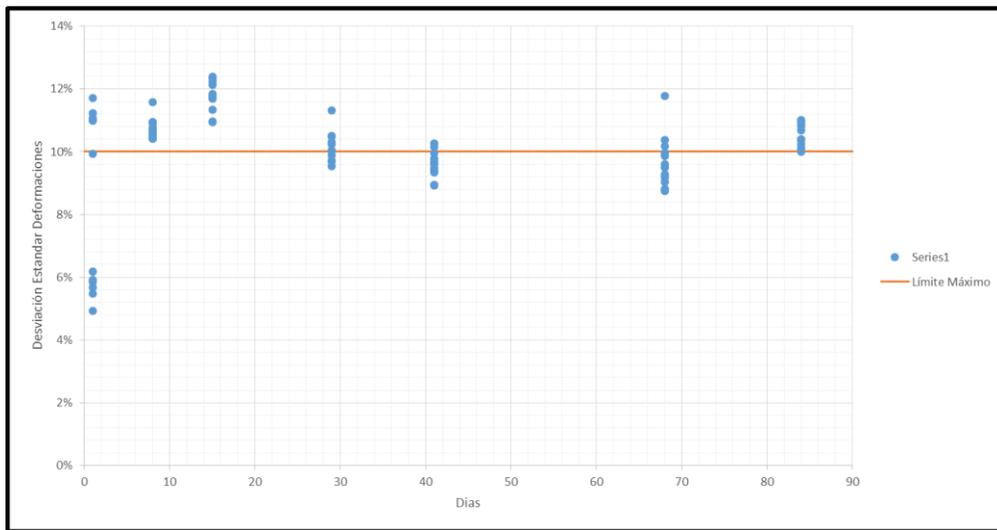


79Figura 5.26 Deformación no recuperable ECS.

La microdeformación axial se encuentra cercana al límite inferior (50) con la finalidad de que la deformación no recuperable no exceda las 1500, este indicador se cumple de mejor manera con el paso del tiempo.

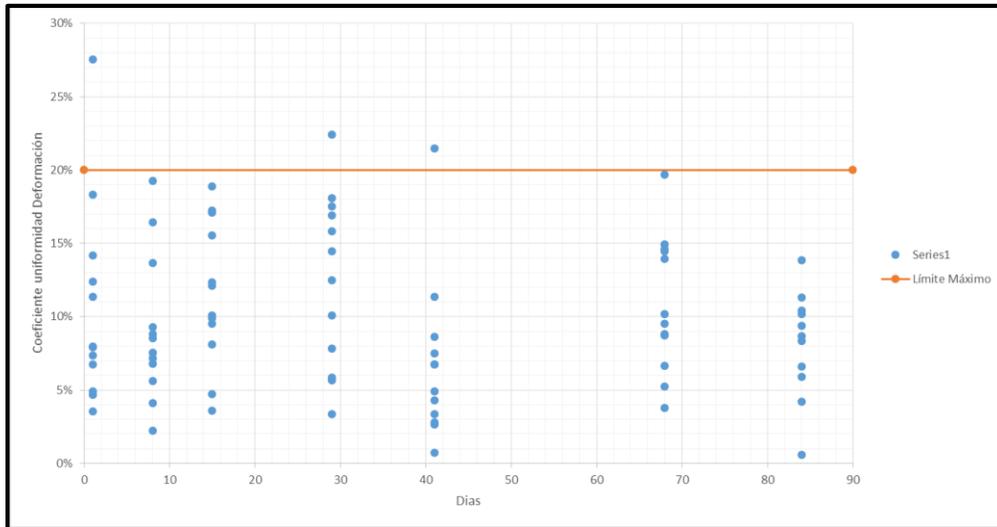


80Figura 5.27 Desviación Estándar del Esfuerzo aplicado ECLP.

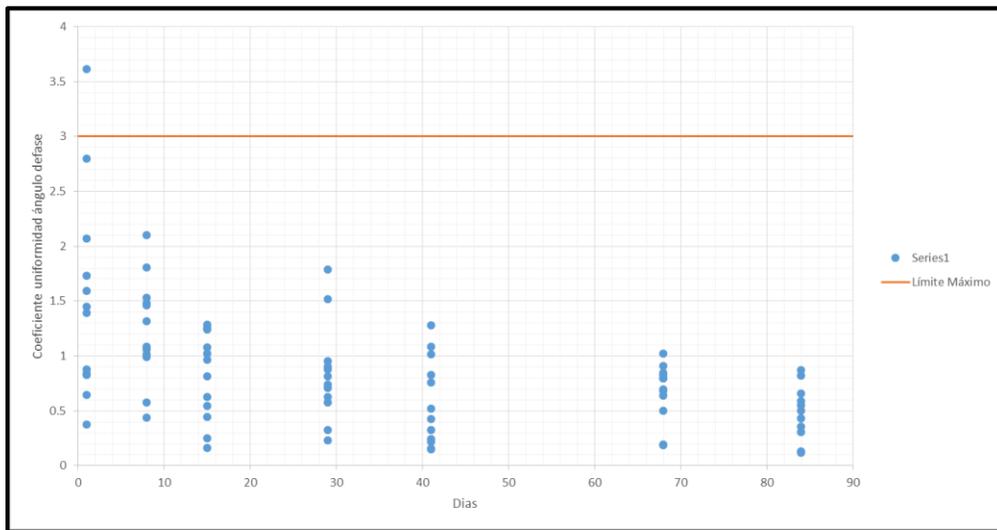


81Figura 5.28 Desviación Estándar promedio de las deformaciones ECLP.

De manera similar a las emulsiones anteriores, las desviaciones estándar tanto del esfuerzo como de las deformaciones, no se cumplen en todos los casos.

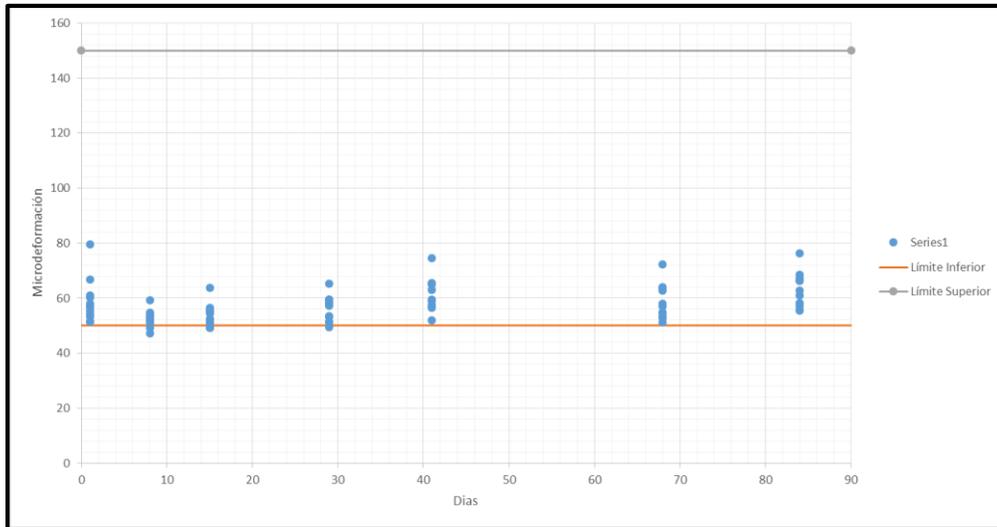


82Figura 5.29 Coeficiente de uniformidad de deformación ECLP.

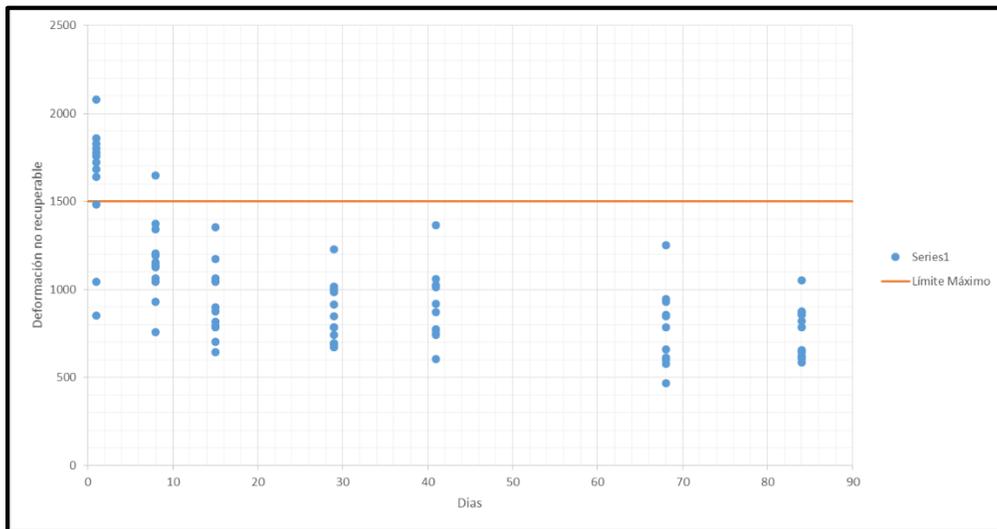


83Figura 5.30 Coeficiente de uniformidad Ángulo de Fase ECLP.

Los coeficientes de uniformidad la gran mayoría se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma, aunque en algunos casos este valor no se cumple.



84Figura 5.31 Microdeformación axial ECLP.



85Figura 5.32 Deformación no recuperable ECLP.

De igual manera que en las emulsiones anteriores el valor de la microdeformación axial se encuentra muy cerca del límite inferior (50) para poder cumplir con el valor máximo de deformación no recuperable (1500). En la gráfica 5.28 se puede observar que en los primeros días de evaluación la deformación no recuperable se encuentra muy cerca al valor límite, incluso en el primer día la mayoría de especímenes no cumple con dicho valor, pero con el transcurso del tiempo la deformación se encuentra dentro del límite establecido.

A continuación se presentarán datos de una investigación realizada en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Maestría en Ingeniería – Geotecnia con fecha de 2012, el cual se titula “Estudio del Comportamiento de una mezcla asfáltica fabricada con emulsión”.

La granulometría utilizada en esa investigación fue con base en las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS, 2007, la cual es para una mezcla densa denominada “MDF-2”. La granulometría es la que se presenta en la tabla 5.2.

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA		
Normal	Alterno	MDF-1	MDF-2	MDF-3
7,5 mm	1 ½"	100	-	-
25,0 mm	1"	80-95	100	-
19,0 mm	¾"	-	80-95	100
12,5 mm	½"	62-77	-	80-95
9,5 mm	3/8"	-	69-75	-
4,75 mm	No. 4	45-60	47-62	50-65
2,36 mm	No. 8	35-50	35-50	35-50
300 $\mu$ m	No. 50	13-23	13-23	13-23
75 $\mu$ m	No. 200	3-8	3-8	3-8

163Tabla 5.2 Granulometrías (fuente: INVIAS, 2007).

La emulsión utilizada fue una catiónica de rompimiento lento denominada “CRL-1” y cumple con los requisitos establecidos en las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS, 2007. Características que se presentan en la tabla 5.3.

ENSAYOS SOBRE LA EMULSIÓN	UNIDAD	NORMA DE ENSAYO INV	ROTURA RÁPIDA		ROTURA MEDIA				ROTURA LENTA						
			CRR-1		CRR-2		CRM		CRL-0		CRL-1		CRL-1h		
			Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	
Viscosidad															
Saybolt Fural a 25°C	s	E-763	-	-	-	-	-	-	50	-	200	-	100	-	-
Saybolt Fural a 50°C	s		20	100	20	300	20	450	-	-	-	-	-	-	-
Contenido de agua en volumen	s	E-761	-	40	-	35	-	35	-	50	-	43	-	43	-
Estabilidad de almacenamiento															
Sedimentación a los 7 días	%	E-764	-	5	-	5	-	5	-	10	-	5	-	5	-
Destilación															
Contenido de asfalto residual	%	E-762	60	-	65	-	60	-	40	-	57	-	57	-	-
Contenido de disolventes	%		-	3	-	3	-	12	10	20	-	-	-	-	0
Tamizado															
Retenido tamiz N° 20 (850 $\mu$ m)	%	E-765	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-
Rotura															
Diocilsulfosuccinato sódico	%	E-766	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mezcla con cemento	%	E-770	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Carga de partícula		E-767	Positiva		Positiva		Positiva		Positiva		Positiva		Positiva		
pH		E-768	-	6	-	6	-	6	-	6	-	6	-	6	-
Recubrimiento del agregado y resistencia al desplazamiento															
Con agregado seco		E-769	-	-	-	-	Buena	-	-	-	-	-	-	-	-
Con agregado seco y acción del agua			-	-	-	-	Satisfactoria	-	-	-	-	-	-	-	-
Con agregado húmedo			-	-	-	-	Satisfactoria	-	-	-	-	-	-	-	-
Con agregado húmedo y acción del agua			-	-	-	-	Satisfactoria	-	-	-	-	-	-	-	-
Ensayos sobre el residuo de destilación															
Penetración (25°C, 100gr, 5S)	0,1 mm	E-706	60	100	60	100	100	250	200	300	60	100	60	100	
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	cm	E-702	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	-
Solubilidad de tricloroetileno	%	E-713	97	-	97	-	97	-	97	-	97	-	97	-	-

164Tabla 5.3 Especificaciones para Emulsiones (fuente: INVIAS, 2007).

La obtención del contenido óptimo de asfalto se realizó con el diseño Marshall Modificado, para el cual se tuvo un resultado de 6.1% de asfalto. El residuo asfáltico de la emulsión utilizada fue de 65%, por lo que el contenido óptimo resulta ser 9.54% de emulsión. El contenido de humedad lo obtuvieron de manera visual con tres contenidos 4, 5 y 8%, concluyeron que el contenido que mejor mezclado y cubrimiento presentado fue el del 4%.

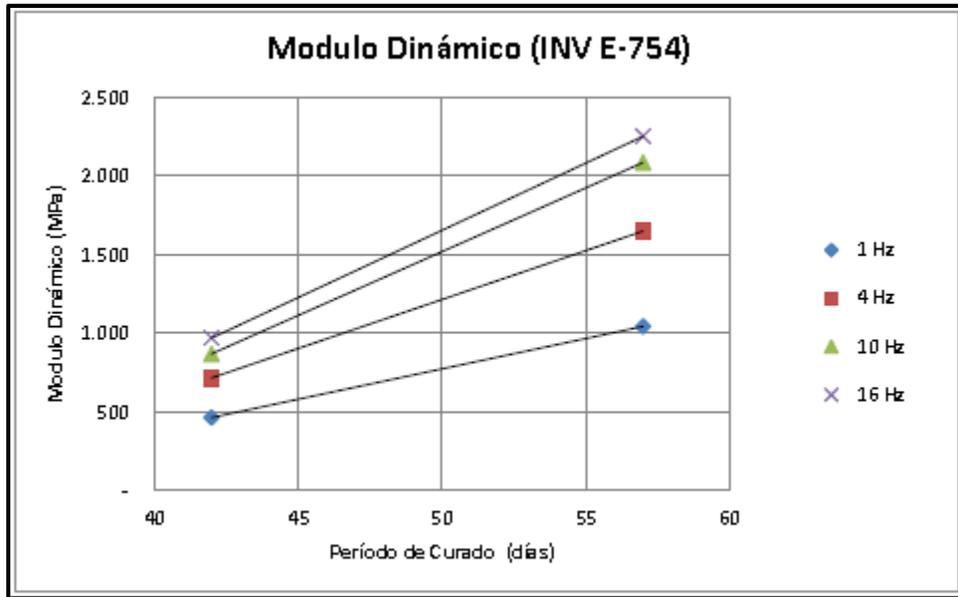
Teniendo los contenidos de emulsión y de humedad a utilizar, realizaron un tramo de prueba de 1.7\*1.0\*0.1 m. una vez fabricada la muestra, la colocaron en un molde construido para tal fin. Para proceder a la compactación dejaron que la emulsión rompiera. La compactación la llevaron a cabo con un vibro compactador combinada para mezclas asfálticas marca Komatsu CW40 modelo 2002, la carga estática del equipo es de 4 toneladas y la dinámica 6 toneladas.

El peso unitario de la mezcla suministrado por la planta fue de 2.159 gr/cm<sup>3</sup> y el calculado por el laboratorio 1.98 gr/cm<sup>3</sup>. Lograron una compactación del 91.7%.

Para la medición del módulo dinámico extrajeron núcleos del tramo de prueba e hicieron especímenes de 10cm de altura por 10 de diámetro. Se aplicó un esfuerzo de compresión axial sinusoidal (medio seno inverso) al espécimen en estudio. Evaluaron a una temperatura de 21°C y cuatro frecuencias 1, 4, 10 y 16 Hz a diferentes edades (42 y 57 días). En la tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos.

Muestra No.	Fecha Ensayo	Edad (días)	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)			
				1 Hz	4 Hz	10 Hz	16 Hz
1	20 jun/11	42	21	440,70	681,20	862,90	900,40
2	20 jun/11	42	21	489,90	751,70	876,50	1041,20
3	5 jul/11	57	21	1051,40	1620,30	2098,00	2217,70
4	5 jul/11	57	21	1036,40	1678,40	2072,90	2286,60
Porcentaje de aumento (%)				124	130	140	132

165Tabla 5.4 Valores Módulo Dinámico (fuente: Universidad Nacional de Colombia).



86Figura 5.33 Gráfica de Módulo Dinámico (fuente: Universidad Nacional de Colombia).

Muestra	Módulo Dinámico (Mpa)
Colombia	870
7.5% de Emulsión 60% Pérdida	3700 a 4000
7.5% de Emulsión 70% Pérdida	3700 a 4200
9.5% de Emulsión 60% Pérdida	3000 a 3800
9.5% de Emulsión 70% Pérdida	3300 a 4200

166Tabla 5.5 Comparación Valores Módulo Dinámico a 42 días.

Muestra	Módulo Dinámico (Mpa)
Colombia	2085
7.5% de Emulsión 60% Pérdida	4100 a 4700
7.5% de Emulsión 70% Pérdida	4000 a 4400
9.5% de Emulsión 60% Pérdida	3200 a 4300
9.5% de Emulsión 70% Pérdida	3500 a 4600

167Tabla 5.6 Comparación Valores Módulo Dinámico a 57 días.

Los valores obtenidos para el Módulo Dinámico en nuestra investigación para la misma frecuencia (10Hz) y temperatura similar (20°C) superan de manera significativa los obtenidos por la universidad de Colombia. Para el día 42 los especímenes se encuentran de 245% a 383% arriba del valor de Colombia y para el día 57 de 54% a 125%.

Con dicha evaluación podemos confirmar lo que se presentó en la nuestra, el valor de Módulo Dinámico se va incrementando con el paso del tiempo.

## **CONCLUSIONES.**

En lo que refiere al agregado pétreo utilizado, presentó resultados satisfactorios que cumplen las especificaciones del protocolo AMAAC, salvo dos pruebas en las que no cumplieron los parámetros establecidos, las cuales fueron Micro deval y porcentaje de 2 o más caras fracturadas. Esto puede ser el resultado de un mal proceso y deficiencia de trituración en el banco de material.

La prueba Proctor Modificada nos indica cual es la humedad de compactación óptima para un agregado en estudio, pero para nuestro caso no es un valor definitivo, debido a que en la elaboración de la mezcla no solo se utiliza agua, sino también emulsión asfáltica, por lo que la cantidad de asfalto inmersa en la emulsión no presenta las mismas propiedades que el agua. Pero esta prueba nos permite conocer un posible contenido óptimo de humedad en la mezcla a la hora de llevar a cabo la compactación.

La elaboración de prediseños son de mucha importancia ya que nos permiten de manera rápida, fácil y sencilla obtener contenidos cercanos al óptimo tanto de emulsión como de humedad, ya que en ellos observamos la manejabilidad que tiene la mezcla, el cubrimiento del agregado, tiempo de rompimiento de la emulsión y de manera manual la cohesión que presenta la mezcla en un determinado tiempo. Esto nos sirve para probar diferentes emulsiones con un mismo agregado y poder elegir aquellas que presenten el mejor desempeño en las características antes mencionadas.

Para el caso de la prueba de Ensayo a Tensión Indirecta (TSR) ninguna de las 3 emulsiones analizadas con sus distintas variantes que son 3 contenido de emulsión y con 2 diferentes porcentajes de humedad de compactación para cada contenido, ninguna de estas combinaciones presentó el valor mínimo establecido en el protocolo AMAAC, que es de 80%. Esto se debe principalmente a dos factores, por una parte está el porcentaje de vacíos de aire que contienen las muestras, los cuales se encuentran entre el 10% hasta 16%, y por otro lado la resistencia se ve afectada por el tiempo que tengan los especímenes evaluados, los cuales se probaron a 1 día después de su periodo de curado (3 días).

Para la emulsión catiónica de rompimiento lento (ECL) y la emulsión catiónica de rompimiento lento modificada con polímero, los esfuerzos en seco entre menor contenido de humedad de compactación se tenga, mayor es el esfuerzo. Mientras que para la emulsión catiónica superestable ocurre lo contrario, a mayor contenido de humedad de compactación mayor es el esfuerzo en seco.

La prueba del Módulo Dinámico nos permitió conocer de una mejor manera el aumento de la resistencia de los especímenes a través del tiempo, mostrando que para edades tempranas se tienen Módulos Dinámicos de cargas bajas pero con el paso de los días, este valor se incrementa y a partir del día 30 las cargas duplican su valor, esto depende en gran medida de la emulsión utilizada. Ya que la

emulsión que presentó un desempeño por debajo de las otras dos restantes fue la modificada con polímero.

Los valores de ángulo de fase son bajos y a diferencia de la carga, estos disminuyen con el paso de los días, lo cual no es de beneficio para la mezcla, debido a que la entre menor sea el ángulo de fase, el material tiende a comportarse como un material sólido elástico, por lo que se vuelve más frágil y quebradizo ante la aplicación de un carga.

Comparando los resultados obtenidos con una investigación realizada por la Universidad Nacional de Colombia, en donde se utilizó una emulsión de rompimiento lento con características similares a las utilizadas en nuestra investigación, además de que el agregado pétreo es de trituración y presenta de igual manera una granulometría parecida a la utilizada en nuestro caso, se puede concluir que el valor de los Módulos Dinámicos se incrementa con el paso de los días, nuestros valores de Módulos superan a los presentados por la investigación de la Universidad de Colombia.

Ante los resultados obtenidos y comparando con lo realizado en Colombia, es conveniente que para aplicaciones de mezclas asfálticas en frío, antes de la apertura al tránsito de vehículos se le dé un tratamiento superficial a la capa, esto para evitar que se introduzca agua en la mezcla o que los factores medio ambientales puedan afectar el desempeño de la mezcla. Ya que a edades tempranas este tipo de mezclas presenta valores de carga bajos y con el paso de los días esta gana resistencia.

Otro factor importante al utilizar mezclas asfálticas con emulsiones en campo es el de compactación, ya que no se puede compactar con exceso de peso, esto debido a que la mezcla se empieza a disgregar o separar y en vez de lograr una adecuada compactación se reduce el desempeño de la mezcla.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Alarcón Ibarra J. Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta. Tesis doctoral. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio. ETSECCPB. U.P.C. Barcelona España (2003).

Hernández Fernández N. Análisis de las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas, mediante la pista de ensayo de laboratorio UMich y ensayos reológicos. Tesis licenciatura. Facultad de Ingeniería Civil. UMSNH. Michoacán México (2007).

Tapia García M. Pavimentos. Facultad de Ingeniería. UNAM. Distrito Federal.

Sarmiento Otálora M. Estudio del Comportamiento de una mezcla asfáltica fabricada con emulsión. Tesis maestría. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá Colombia (2012).

Montejo Fonseca A. Ingeniería de Pavimentos para Carreteras tomo I. Universidad Católica de Colombia. Bogotá Colombia (2002).

Asphalt Institute. Emulsiones Asfálticas. Series de Manuales No. 19.

SemMaterials México. Manual Técnico Básico. (2010).

Romero A. V. Mezclas asfálticas en frío bajo el protocolo AMAAC. Octavo congreso mexicano del asfalto.

Instituto Mexicano del Transporte. Método de ensayo para determinación del Módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente (2011).

Asphalt Institute. Principios de Construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Series de Manuales No. 22 (1982).

Asphalt Institute. Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de SUPERPAVE (1996).

Asphalt Institute. Antecedentes de los Métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE (1998).

SemMaterials México. Utilización del ensayo de Módulo Dinámico en México.

Delgado Alamilla H. Lo complejo del módulo complejo: aspectos experimentales (segunda parte). Asfáltica Enero-Marzo (2013).

Delgado Alamilla H. Lo complejo del módulo complejo: principio de equivalencia tiempo-temperatura (tercera parte). Asfáltica Abril-Junio (2013).

Salazar A. Evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica en caliente, nivel III con aditivos mejoradores de adherencia y asfalto modificado tipo SBS. Asfáltica Octubre-Diciembre (2014).

Garnica Anguas P. Filosofía del Protocolo AMAAC para diseño de mezclas asfálticas densas de alto desempeño. Asfáltica.

Corro Caballero S. Diseño de Pavimentos Flexibles Comportamiento de los Tramos Experimentales. Series del Instituto de Ingeniería. Instituto de Ingeniería UNAM.

Rico Rodríguez A, Téllez Gutiérrez R, Garnica Anguas P. Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías de Diseño y Tendencias. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No 104 (1998).

Santiago Corro C. Guillermo Prado O. Diseño Estructural de pavimentos Asfálticos, incluyendo Carreteras de Altas Especificaciones. Instituto de Ingeniería de la UNAM (1999).