

## Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Proyecto: LM-PI-UMP-017-R2

### **ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA ADICIÓN DE FIBRA DRYMIX PARA LA MODIFICACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA**

Preparado por:

**Unidad de Materiales y Pavimentos**

San José, Costa Rica

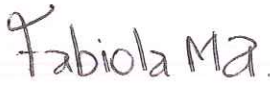

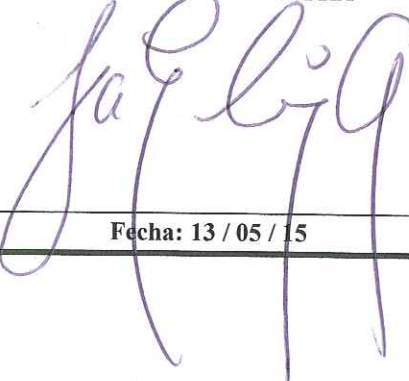


Mayo, 2015

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-LanammeUCR [fabiola.miranda@ucr.ac.cr](mailto:fabiola.miranda@ucr.ac.cr)



Información técnica del documento

<b>1. Informe</b> LM-PI-C-UMP-017-R2		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA ADICIÓN DE FIBRA DRYMIX PARA LA MODIFICACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA		<b>4. Fecha del Informe</b> Mayo, 2015
<b>7. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>8. Resumen</b> El siguiente documento corresponde al informe final del proyecto de análisis y evaluación del efecto de la adición de fibra Drymix para la modificación de mezcla asfáltica. El proyecto se basa en un esquema experimental que contempla el diseño de tres mezclas asfálticas, una de control y dos modificadas con diferentes porcentajes de fibra, y la ejecución de ensayos de desempeño para evaluar el comportamiento de las tres condiciones.  En el documento a continuación se muestran los resultados de todos los ensayos de laboratorio aplicados a los materiales, así como una interpretación y análisis de los mismos.		
<b>9. Palabras clave</b> Diseño Superpave, ensayos de desempeño, fibra Drymix		<b>10. Nivel de seguridad:</b> Ninguno
<b>11. Preparado por:</b> Ing. Fabiola Miranda Argüello Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos   Fecha: 13 / 05 / 15	<b>12. Revisado por:</b> Ing. José Pablo Aguiar, PhD Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos   Fecha: 13 / 05 / 15	
<b>13. Aprobado por:</b> Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA Sub-Coordinador PITRA   Fecha: 13 / 05 / 15	Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD Coordinador General PITRA   Fecha: 13 / 05 / 15	Ing. Alejandro Navas Carro, MSc Director del LanammeUCR   Fecha: 13 / 05 / 15

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL DEL PROYECTO .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>FIBRAS PARA LA MODIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS .....</b>	<b>12</b>
3.1	USOS DE LAS FIBRAS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	12
3.2	ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA) .....	12
3.3	ANÁLISIS DEL ENSAYO TGA.....	14
<b>4</b>	<b>INCORPORACIÓN DE LA FIBRA A LA MEZCLA ASFÁLTICA.....</b>	<b>15</b>
4.1	PRUEBAS DE MEZCLADO .....	15
4.2	PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO .....	18
4.2.1	<i>PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES.....</i>	<i>18</i>
4.2.2	<i>INCORPORACIÓN DE LOS MATERIALES Y PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO .....</i>	<i>19</i>
<b>5</b>	<b>DISEÑO DE MEZCLA SUPERPAVE .....</b>	<b>21</b>
5.1.1	<i>EQUIPO .....</i>	<i>21</i>
5.1.2	<i>ESPECÍMENES DE ENSAYO .....</i>	<i>22</i>
5.1.3	<i>RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO.....</i>	<i>22</i>
5.2	SELECCIÓN DE LA GRANULOMETRÍA .....	23
5.3	RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA .....	27
<b>6</b>	<b>ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO (MD) .....</b>	<b>30</b>
6.1	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO MD.....	31
6.1.1	<i>EQUIPO .....</i>	<i>31</i>
6.1.2	<i>ESPECÍMENES DE ENSAYO .....</i>	<i>31</i>
6.1.3	<i>RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO.....</i>	<i>32</i>
6.2	RESULTADOS DEL ENSAYO MD .....	32
6.2.1	<i>ENERGÍA DE COMPACTACIÓN.....</i>	<i>32</i>
6.3	GENERACIÓN DE CURVAS MAESTRAS .....	37
6.4	SÍNTESIS DE RESULTADOS DE MD .....	40
6.5	ANÁLISIS DEL ENSAYO DE MD .....	40
<b>7</b>	<b>ENSAYO APA .....</b>	<b>41</b>
7.1	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO .....	41

7.1.1	<i>EQUIPO</i> .....	41
7.1.2	<i>ESPECÍMENES DE ENSAYO</i> .....	42
7.1.3	<i>RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO</i> .....	42
7.2	RESULTADOS DEL ENSAYO APA.....	43
7.2.1	<i>ENERGÍA DE COMPACTACIÓN</i> .....	43
7.3	SÍNTESIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO APA.....	46
7.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO APA.....	47
7.4.1	<i>COMPARACIÓN RESPECTO A LAS ESPECIFICACIONES</i> .....	49
<b>8</b>	<b>ENSAYO DE CREEP DINÁMICO (FLOW NUMBER)</b> .....	<b>49</b>
8.1	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE FLOW NUMBER .....	49
8.1.1	<i>EQUIPO</i> .....	49
8.1.2	<i>ESPECÍMENES DE ENSAYO</i> .....	50
8.1.3	<i>RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO</i> .....	50
8.2	RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLOW NUMBER .....	51
8.2.1	<i>ENERGÍA DE COMPACTACIÓN</i> .....	51
8.3	SÍNTESIS DE RESULTADOS DE FLOW NUMBER.....	53
8.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE FLOW NUMBER.....	54
8.4.1	<i>COMPARACIÓN RESPECTO A LAS ESPECIFICACIONES</i> .....	55
<b>9</b>	<b>ENSAYO DE RESISTENCIA RETENIDA A LA TENSIÓN DIAMETRAL (RRTD)</b> .....	<b>56</b>
9.1	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO RRTD.....	56
9.1.1	<i>EQUIPO</i> .....	56
9.1.2	<i>ESPECÍMENES DE ENSAYO</i> .....	57
9.1.3	<i>RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO</i> .....	57
9.2	RESULTADOS DEL ENSAYO RRTD .....	58
9.2.1	<i>ENERGÍA DE COMPACTACIÓN</i> .....	58
9.3	SÍNTESIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO RRTD .....	60
9.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO RRTD .....	61
9.4.1	<i>COMPARACIÓN RESPECTO A LAS ESPECIFICACIONES</i> .....	62
<b>10</b>	<b>ENSAYO DE VIGA A FLEXOTRACCIÓN</b> .....	<b>63</b>
10.1	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE FATIGA .....	63
10.1.1	<i>EQUIPO</i> .....	63

10.1.2	ESPECÍMENES DE ENSAYO .....	64
10.1.3	RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO.....	64
10.2	RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA .....	65
10.3	SÍNTESIS DE RESULTADOS DE FATIGA.....	67
10.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA.....	69
10.4.1	COMPARACIÓN RESPECTO A LAS ESPECIFICACIONES .....	71
<b>11</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>73</b>
<b>12</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>75</b>
	<b>APÉNDICE A. DISEÑO DE MEZCLA SUPERPAVE .....</b>	<b>76</b>
	<b>APÉNDICE B. ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO .....</b>	<b>77</b>
	<b>APÉNDICE C. ENSAYO DE APA.....</b>	<b>78</b>
	<b>APÉNDICE D. ENSAYO DE FLOW NUMBER .....</b>	<b>79</b>
	<b>APÉNDICE E. ENSAYO DE RESISTENCIA RETENIDA A LA TENSIÓN DIAMETRAL .....</b>	<b>80</b>
	<b>APÉNDICE F. ENSAYO DE FATIGA .....</b>	<b>81</b>
	<b>APÉNDICE G. REPETICIONES DEL ENSAYO DE FLOW NUMBER .....</b>	<b>82</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1.</b>	<b>NORMAS DE REFERENCIAS PARA CADA PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.....</b>	<b>11</b>
<b>TABLA 2.</b>	<b>CAMBIOS DE MASA EXPERIMENTADOS EN LA FIBRA PRODUCTO DEL SEGUNDO ANÁLISIS TGA.....</b>	<b>13</b>
<b>TABLA 3.</b>	<b>GRANULOMETRÍAS DE PRUEBA .....</b>	<b>23</b>
<b>TABLA 4.</b>	<b>RESULTADOS ESTIMADOS AL 4% DE VACÍOS EN LAS 3 GRANULOMETRÍAS DE PRUEBA.....</b>	<b>25</b>
<b>TABLA 5.</b>	<b>CONFIGURACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA .....</b>	<b>26</b>
<b>TABLA 6.</b>	<b>RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA DE CONTROL .....</b>	<b>27</b>
<b>TABLA 7.</b>	<b>RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA MODIFICADA AL 0,15 % DE FIBRA DRYMIX... 28</b>	<b>28</b>
<b>TABLA 8.</b>	<b>RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA MODIFICADA AL 0,30 % DE FIBRA DRYMIX... 28</b>	<b>28</b>
<b>TABLA 9.</b>	<b>TRATAMIENTOS FINALES UTILIZADOS EN EL PROYECTO .....</b>	<b>29</b>

<b>TABLA 10.</b> RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA MODIFICADA AL 0,15 % DE FIBRA DRYMIX (T2).....	29
<b>TABLA 11.</b> RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA MODIFICADA AL 0,20 % DE FIBRA DRYMIX (T3).....	30
<b>TABLA 12.</b> ENERGÍA DE COMPACTACIÓN PARA LOS ESPECÍMENES DEL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO .....	32
<b>TABLA 13.</b> RESULTADOS PROMEDIO DEL ENSAYO DE MD PARA EL TRATAMIENTO T1.....	33
<b>TABLA 14.</b> RESULTADOS PROMEDIO DEL ENSAYO DE MD PARA EL TRATAMIENTO T2.....	34
<b>TABLA 15.</b> RESULTADOS PROMEDIO DEL ENSAYO DE MD PARA EL TRATAMIENTO T3.....	35
<b>TABLA 16.</b> RESULTADOS DEL MÉTODO DE TUKEY PARA EL ENSAYO DE APA .....	41
<b>TABLA 17.</b> ENERGÍA DE COMPACTACIÓN PARA LOS ESPECÍMENES DEL ENSAYO DE APA.....	43
<b>TABLA 18.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS APA.....	44
<b>TABLA 19.</b> ANÁLISIS ANOVA PARA LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE APA.....	47
<b>TABLA 20.</b> RESULTADOS DEL MÉTODO DE TUKEY PARA EL ENSAYO DE APA .....	47
<b>TABLA 21.</b> ENERGÍA DE COMPACTACIÓN PARA LOS ESPECÍMENES DEL ENSAYO DE FLOW NUMBER.....	51
<b>TABLA 22.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO FN DE LA MEZCLA DE CONTROL, SIN CONTENIDO DE FIBRA DRYMIX (T1).....	51
<b>TABLA 23.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO FN DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,15 % DE FIBRA DRYMIX (T2).....	52
<b>TABLA 24.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO FN DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,20 % DE FIBRA DRYMIX (T3).....	52
<b>TABLA 25.</b> RESULTADOS ADICIONALES DEL ENSAYO FN DE LA MEZCLA DE CONTROL, SIN CONTENIDO DE FIBRA DRYMIX (T1).....	53
<b>TABLA 26.</b> RESULTADOS ADICIONALES DEL ENSAYO FN DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,15 % DE FIBRA DRYMIX (T2).....	53
<b>TABLA 27.</b> RESULTADOS ADICIONALES DEL ENSAYO FN DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,20 % DE FIBRA DRYMIX (T3).....	53
<b>TABLA 28.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLOW NUMBER .....	54

<b>TABLA 29.</b> ANÁLISIS ANOVA PARA LOS RESULTADOS DE NÚMERO DE CICLOS DEL ENSAYO DE FLOW NUMBER.....	55
<b>TABLA 30.</b> ANÁLISIS ANOVA PARA LOS RESULTADOS DE DEFORMACIÓN DEL ENSAYO DE FLOW NUMBER.....	55
<b>TABLA 31.</b> REQUERIMIENTOS MÍNIMOS RECOMENDADOS DE NÚMERO DE FLUJO .....	56
<b>TABLA 32.</b> ENERGÍA DE COMPACTACIÓN PARA LOS ESPECÍMENES DEL ENSAYO DE RRTD .....	58
<b>TABLA 33.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO RRTD PARA EL TRATAMIENTO T1 .....	59
<b>TABLA 34.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO RRTD PARA EL TRATAMIENTO T2 .....	59
<b>TABLA 35.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO RRTD PARA EL TRATAMIENTO T3 .....	60
<b>TABLA 36.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE RRTD PARA LOS TRES TRATAMIENTOS .....	60
<b>TABLA 37.</b> ANÁLISIS ANOVA PARA LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE RRTD .....	61
<b>TABLA 38.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA A 600 MSTRAIN DE LA MEZCLA DE CONTROL, SIN CONTENIDO DE FIBRA DRYMIX (T1) .....	65
<b>TABLA 39.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA A 400 MSTRAIN DE LA MEZCLA DE CONTROL, SIN CONTENIDO DE FIBRA DRYMIX (T1) .....	66
<b>TABLA 40.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA A 600 MSTRAIN DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,15 % DE FIBRA DRYMIX (T2) .....	66
<b>TABLA 41.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA A 400 MSTRAIN DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,15 % DE FIBRA DRYMIX (T2) .....	66
<b>TABLA 42.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA A 600 MSTRAIN DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,20 % DE FIBRA DRYMIX (T3) .....	67
<b>TABLA 43.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA A 400 MSTRAIN DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,20 % DE FIBRA DRYMIX (T3) .....	67
<b>TABLA 44.</b> RESUMEN DE NÚMERO DE CICLOS A LA FATIGA PARA CADA TRATAMIENTO .....	68
<b>TABLA 45.</b> ANÁLISIS ANOVA PARA LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA A 600 MSTRAIN .....	70
<b>TABLA 46.</b> ANÁLISIS ANOVA PARA LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA A 400 MSTRAIN .....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1. ESQUEMA EXPERIMENTAL DEL PROYECTO</b> .....	11
<b>FIGURA 2. ANALIZADOR TERMOGRAVIMÉTRICO</b> .....	13
<b>FIGURA 3. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO EN LA MUESTRA DE FIBRA DRYMIX DEL SEGUNDO ANÁLISIS</b> .....	14
<b>FIGURA 4. MEZCLA MAL HOMOGENIZADA Y FORMACIÓN DE GRUMOS</b> .....	15
<b>FIGURA 5. PRUEBAS DE MEZCLADO</b> .....	17
<b>FIGURA 6. PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES</b> .....	18
<b>FIGURA 7. MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRA DRYMIX</b> .....	19
<b>FIGURA 8. PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO</b> .....	20
<b>FIGURA 9. COMPACTADOR GIRATORIO SUPERPAVE (CGS)</b> .....	21
<b>FIGURA 10. GRANULOMETRÍAS DE PRUEBA DE 12,5 MM DE TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL</b> .....	24
<b>FIGURA 11. CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA</b> .....	26
<b>FIGURA 12. ASPHALT MIXTURE PERFORMANCE TESTER AMPT</b> .....	31
<b>FIGURA 13. RESULTADOS DEL ENSAYO MD DE LA MEZCLA DE CONTROL, SIN CONTENIDO DE FIBRA DRYMIX (T1)</b> .....	36
<b>FIGURA 14. RESULTADOS DEL ENSAYO MD DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,15 % DE FIBRA DRYMIX (T2)</b> .....	36
<b>FIGURA 15. RESULTADOS DEL ENSAYO MD DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,20 % DE FIBRA DRYMIX (T3)</b> .....	37
<b>FIGURA 16. CURVA MAESTRA DE MD DE LA MEZCLA DE CONTROL, SIN CONTENIDO DE FIBRA DRYMIX (T1)</b> .....	38
<b>FIGURA 17. CURVA MAESTRA DE MD DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,15 % DE FIBRA DRYMIX (T2)</b> .....	38
<b>FIGURA 18. CURVA MAESTRA DE MD DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,20 % DE FIBRA DRYMIX (T3)</b> .....	39



<b>FIGURA 19.</b> COMPARACIÓN DE MÓDULOS PREDICTIVOS ENTRE LOS TRATAMIENTOS T1, T2 Y T3 .....	39
<b>FIGURA 20.</b> APA A. EQUIPO B. POSICIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE ENSAYO C. ESPECÍMENES DEFORMADOS .....	42
<b>FIGURA 21.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO APA DE LA MEZCLA DE CONTROL, SIN CONTENIDO DE FIBRA DRYMIX (T1).....	44
<b>FIGURA 22.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO APA DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,15 % DE FIBRA DRYMIX (T2).....	45
<b>FIGURA 23.</b> RESULTADOS DEL ENSAYO APA DE LA MEZCLA MODIFICADA AL 0,20 % DE FIBRA DRYMIX (T3).....	45
<b>FIGURA 24.</b> COMPARACIÓN DE LAS DEFORMACIONES PROMEDIO ENTRE TRATAMIENTOS .....	46
<b>FIGURA 25.</b> ENSAYO DE CREEP DINÁMICO A. ASPHALT MIXTURE PERFORMANCE TESTER AMPT B. ESPÉCIMEN POSTERIOR A LA FALLA.....	50
<b>FIGURA 26.</b> EQUIPO DE TENSIÓN DIAMETRAL .....	57
<b>FIGURA 27.</b> A. MARCO DE VIGAS DE FATIGA B. COMPACTADOR DE VIGAS .....	63
<b>FIGURA 28.</b> ESQUEMA DE CARGA DEL ESPÉCIMEN DURANTE CADA CICLO DE CARGA .....	65
<b>FIGURA 29.</b> RESULTADOS DE NÚMERO DE CICLOS A LA FATIGA PROMEDIO PARA CADA TRATAMIENTO .....	69
<b>FIGURA 30.</b> NÚMERO DE CICLOS MÍNIMOS ESPECIFICADOS EN COSTA RICA .....	72

## 1 INTRODUCCIÓN

El siguiente documento corresponde a la consecución de la solicitud realizada por la empresa Sudamericana de Fibras S.A en la cual se busca la evaluación de la fibra DRYMIX como modificador de mezclas asfálticas en caliente.

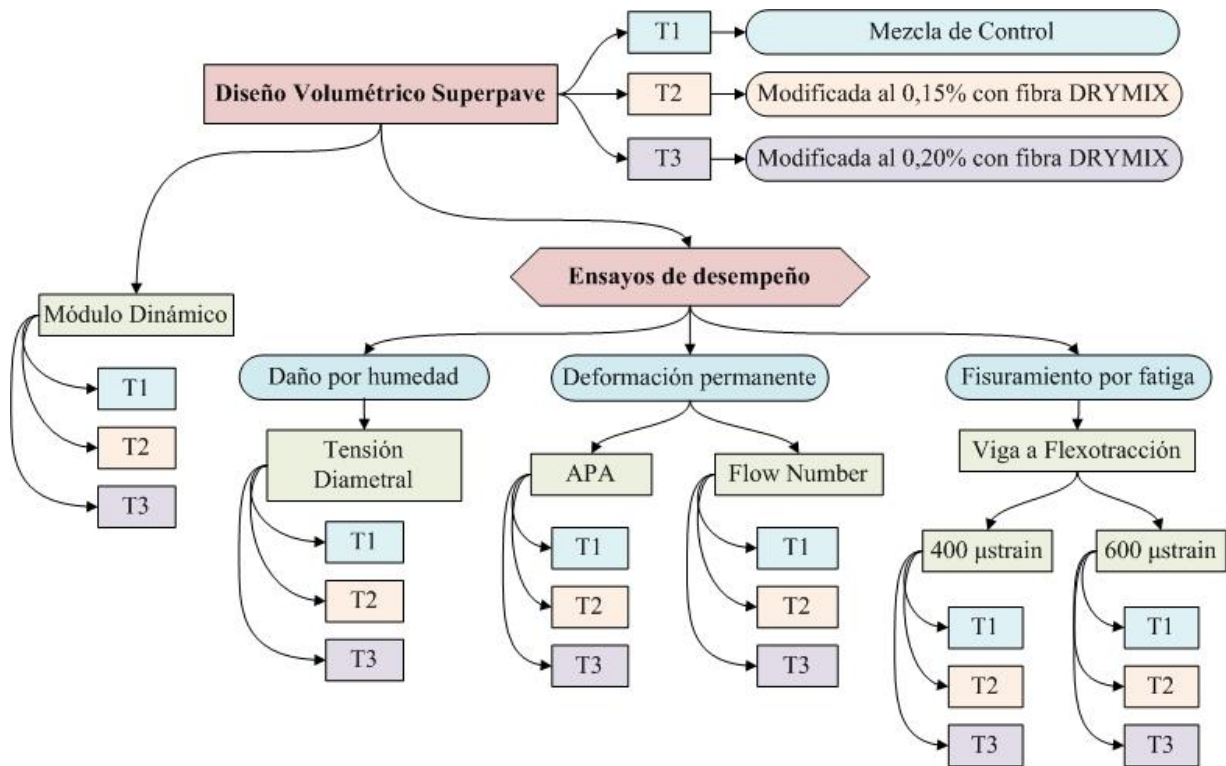
El objetivo principal del proyecto consiste en determinar si existe un aporte en el desempeño de las mezclas asfálticas densas a partir de la adición de la fibra DRYMIX y para qué porcentaje de modificación se obtiene el mejor comportamiento. Para esto se plantea un programa experimental en donde se analiza el desempeño de una mezcla de control y de dos mezclas modificadas con diferentes porcentajes de fibra, preliminarmente definidas por el Contratante.

La información que se mostrará a continuación contiene los resultados de la investigación producto de los ensayos de laboratorio, así como un análisis e interpretación de los mismos.

## 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL DEL PROYECTO

El programa experimental abarca el diseño de tres mezclas asfálticas a partir de la metodología Superpave. Estas consisten en una mezcla asfáltica convencional de control y dos mezclas asfálticas modificadas con fibra DRYMIX de 12 mm en porcentajes preliminares de 0,15 y 0,30 %, sobre el peso total de la mezcla completa, la dosificación de 0,30 % se redujo a 0,20 % por razones que serán comentadas más adelante. Posterior a esto se plantea la ejecución de ensayos de desempeño a las mezclas asfálticas, con el fin de analizar la susceptibilidad ante deterioros típicos, tales como daño por humedad, fisuramiento por fatiga y deformación permanente.

En la **Figura 1** se muestra un esquema metodológico del proyecto.



**Figura 1.** Esquema experimental del proyecto

Todos los procedimientos de ensayo propuestos corresponden a normativa internacional, asociados a la capacidad instalada en laboratorio, las normas de referencia para la ejecución de los mismos aparecen en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Normas de referencias para cada procedimiento de ensayo

Ensayos de laboratorio	Norma de referencia
Diseño Volumétrico Superpave completo	AASHTO M 323
Tensión Diametral RR 6 pulg	AASHTO T 283
Módulo Dinámico	AASHTO TP 62
APA	AASHTO T 340
Creep Dinámico (Flow Number)	NCHRP 465
Fatiga a 2 deformaciones 400-600 microstrain	AASHTO T 321

### 3 FIBRAS PARA LA MODIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

#### 3.1 Usos de las fibras en mezclas asfálticas

Las fibras sintéticas han sido utilizadas con mayor frecuencia en la modificación de mezclas discontinuas, mejor conocidas como mezclas SMA, las cuales se caracterizan por la ausencia de partículas de tamaños intermedios de agregados. En este sentido, este material ha sido introducido principalmente para retener el asfalto en la mezcla y de esta forma mejorar la resistencia a la susceptibilidad al daño por humedad y a la abrasión, lo cual se refleja en un aumento en la durabilidad de las mismas.

Por otro lado, se han desarrollado investigaciones de diversas fuentes, entre ellas en la Universidad Politécnica de Cataluña, respecto al uso de fibras sintéticas en mezclas asfálticas densas. Dentro de los estudios se hace alusión al uso de fibras en la modificación de mezclas densas como refuerzo ante esfuerzos de tracción, para mejorar la resistencia a la apertura de fisuras. El principal problema de estas fibras es que se cargan electroestáticamente lo que las lleva a adherirse a las palas de los mezcladores de forma que su distribución en la mezcla es muy irregular. No obstante, La fibra Drymix que se utilizará en el proyecto contiene un 0,26% de ensimaje antiestático, lo cual evita estos problemas causados por el roce con metales.

En este sentido, el proyecto se basará en la evaluación de la influencia de la fibra Drymix en la modificación de la mezcla asfáltica utilizando fibra Drymix, haciendo énfasis en mejorar la resistencia al fisuramiento por fatiga sin detrimento de otras propiedades de desempeño. Por tanto, la selección de los materiales se sustentará en la búsqueda de un diseño de mezcla en el cual sea posible evaluar el aporte de la fibra ante este deterioro. Lo anterior implica que la configuración granulométrica del material consistirá en una curva abierta, dentro de los rangos especificados por la metodología Superpave para una mezcla densa, lo cual se traduce en un contenido de asfalto óptimo alto. No obstante, se realizaron ensayos de desempeño para evaluar la deformación permanente y el daño por humedad con el objetivo de identificar si adicionalmente la fibra genera algún efecto ante este tipo de deterioros.

#### 3.2 Análisis termogravimétrico (TGA)

La fibra Drymix fue analizada a partir de un ensayo de termogravimetría con la intención de verificar la información suministrada por el fabricante en cuanto a la temperatura de descomposición. La prueba

se realizó en el Analizador termogravimétrico Q5000IR de TA Instruments (**Figura 2**), utilizando gas Nitrógeno Ultra alta pureza (25 ml/min). El procedimiento de ensayo consiste someter a una muestra del material a una rampa de temperatura de 0 °C a 1000 °C a razón de 10 °C/min. Los resultados del análisis se muestran a continuación.



**Figura 2.** Analizador Termogravimétrico

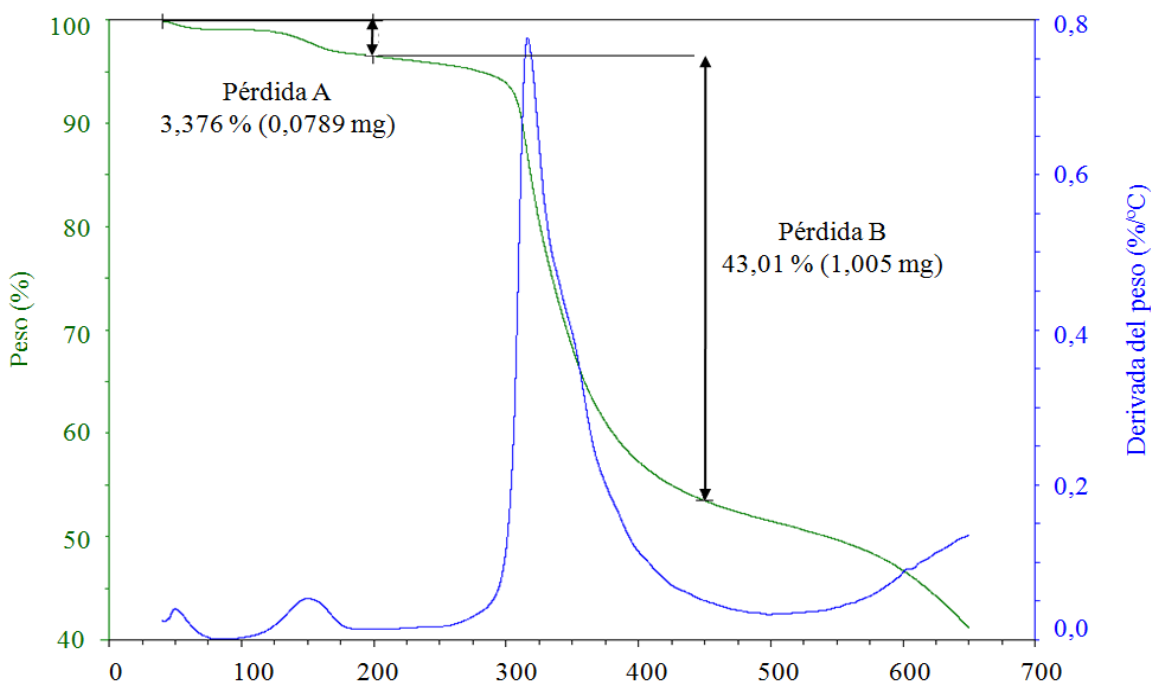
Los cambios de masa importantes se muestran en la **Tabla 2**, como resultado del barrido de temperatura al cual se sometió la muestra, mientras que en la **Figura 3** aparece el resultado gráfico del análisis.

**Tabla 2.** Cambios de masa experimentados en la fibra producto del segundo análisis TGA

Rango de temperatura (°C)		Pérdida de masa		Identificado como
Inicio	Final	mg	%	
36,84	197,35	0,0789	3,38	Pérdida A
197,35	450,21	1,005	43,01	Pérdida B

Informe LM-PI-C-UMP-017-R2	Fecha de emisión: Mayo, 2015	Página 13 de 82
----------------------------	------------------------------	-----------------



**Figura 3.** Análisis termogravimétrico en la muestra de fibra Drymix del segundo análisis

### 3.3 Análisis del ensayo TGA

Para la ejecución del ensayo se realizó una modificación en la microbalanza del equipo, colocando la muestra sobre un plato con tapa, con la intención de que la fibra no se eleve con el flujo del aire.

En la **Figura 3** se identifican 3 eventos importantes en la historia del material, el primero corresponde a una deshidratación de la fibra, lo cual ocurre cerca de los 50 °C, posteriormente al sobrepasar los 150 °C se identifica una pérdida de solventes y el evento más importante consiste en la descomposición de la fibra cerca de los 330 °C, siendo un valor típico para fibra orgánica.

Al iniciar la degradación después de los 200 °C se observa una estabilidad térmica media, lo cual para efectos de la investigación es suficiente considerando que habitualmente la temperatura de mezclado no sobrepasa los 168 °C. Adicionalmente al observar la derivada de la curva se aprecia que el único cambio de masa considerable sucede en el rango de la pérdida B. Posterior a esto no se detecta ningún cambio significativo.

A nivel general, la descomposición de la muestra ocurre en un proceso simple, una vez que se degrada, la tasa de pérdida se reduce sustancialmente, hasta la finalización del ensayo.

#### 4 INCORPORACIÓN DE LA FIBRA A LA MEZCLA ASFÁLTICA

La definición del procedimiento de mezclado consistió en el primer paso para la elaboración de las mezclas en laboratorio. Inicialmente se realizaron pruebas con base a las consideraciones emitidas por el Contratante en cuanto a la incorporación de la fibra. Sin embargo, el proceso tuvo que ser modificado por diversas razones, tal y como se detalla a continuación.

##### 4.1 Pruebas de mezclado

Según el procedimiento propuesto por el Contratante, el material se incorpora en 4 capas conformadas por el agregado, seguido de la fibra y posteriormente el ligante. Puesto que es un procedimiento más largo, se tomó la consideración de calentar el agregado a 178 °C, es decir 20 °C por encima de la temperatura de mezclado (158 °C). No obstante, al tratarse de 4 capas de material el proceso se tornó mucho más lento de lo habitual y por tanto la temperatura, al completar las 4 capas, estuvo por debajo del rango de temperatura permitido para el mezclado, lo cual redujo considerablemente la trabajabilidad y no permite una adecuada homogenización. Adicionalmente se identifica la formación de grumos. En consiguiente este procedimiento fue descartado.



**Figura 4.** Mezcla mal homogenizada y formación de grumos

Como segunda opción, para reducir la pérdida de temperatura, se aplicó el mismo procedimiento pero distribuido en dos capas en la misma secuencia (agregados, fibra y ligante asfáltico). En este caso se mejoró un poco la distribución, no obstante se evidenció la presencia de grumos de fibra y asfalto. Adicionalmente, la mezcla fue poco trabajable y se perdieron 30 °C en la temperatura, y por tanto nuevamente no se cumplió con el rango de mezclado. Finalmente este procedimiento también fue descartado.

Se consideró como tercera opción la colocación de los materiales en una sola capa, con la misma secuencia (agregados, fibra y ligante asfáltico). Para este caso, y a pesar de que la pérdida de temperatura se redujo considerablemente y los materiales se mantuvieron dentro del rango de mezclado, se observaron grumos de la fibra con el asfalto. Por tanto, nuevamente se descarta el procedimiento.

En la **Figura 2** se muestran imágenes de algunas de las pruebas de mezclado.





**Figura 5.** Pruebas de mezclado

Finalmente, debido a que adicionar el ligante asfáltico directamente después de la fibra generaba la formación de grumos, se decidió homogenizar el agregado con la fibra antes de adicionar el ligante asfáltico, mediante un movimiento suave que no provoque que la fibra se corte. Adicionalmente para obtener una mejor homogenización, se decidió realizar este procedimiento en dos capas y una vez con los materiales incorporados y homogenizados, se incorpora la totalidad del ligante y se realiza la mezcla. Para este caso no se observaron grumos de fibra y asfalto, la trabajabilidad mejoró considerablemente y la temperatura estuvo dentro del rango establecido. Este último procedimiento fue adoptado para la elaboración de las mezclas en laboratorio.

## 4.2 Procedimiento de mezclado

El procedimiento de mezclado definido según las consideraciones anteriores se resume a continuación:

### 4.2.1 Preparación de los materiales

1. Precalentar los agregados 20 °C, por encima de la temperatura de mezclado, durante una hora previo al mezclado.
2. Precalentar el ligante asfáltico a la temperatura de mezclado una hora antes de la mezcla.
3. Pesar la cantidad de fibra requerida según corresponda el tratamiento y la cantidad de material de cada mezcla.
4. Antes de iniciar con el proceso de mezclado, precalentar el recipiente de mezclado y las espátulas.



**Figura 6.** Preparación de los materiales

#### 4.2.2 Incorporación de los materiales y procedimiento de mezclado

1. Iniciar con el proceso de mezclado incorporando la mitad de los agregados.
2. Incorporar la mitad de la fibra, previamente pesada, desmenuzando el material, de manera que exista una mejor distribución de la fibra en todo el agregado.
3. Homogenizar la capa de agregado y fibra, con un movimiento envolvente que incorpore la fibra dentro de la matriz de agregados sin cortar la misma.
4. Incorporar la segunda mitad del agregado, posteriormente la otra mitad de la fibra y repetir el proceso de homogenización.
5. Agregar la totalidad del asfalto sobre la mezcla de agregado y fibra.
6. Mezclar todos los materiales hasta obtener una mezcla homogénea (**Figura 7**).
7. Durante el proceso de mezclado debe verificarse la temperatura de los materiales.
8. Finalmente, la mezcla se introduce al horno durante 2 horas para el proceso de curado.



**Figura 7.** Mezcla asfáltica modificada con fibra DRYMIX

En la **Figura 6** se muestran imágenes de procedimiento de mezclado definido para el proyecto.



**Figura 8.** Procedimiento de mezclado

## 5 DISEÑO DE MEZCLA SUPERPAVE

El diseño de mezcla Superpave fue desarrollado a fines de los 80 y a principios de los 90 a través del Proyecto de Investigación Estratégico de Carreteras (SHRP, por sus siglas en inglés). Dicho procedimiento es utilizado para producir una mezcla asfáltica en caliente que satisfaga los requerimientos para el diseño volumétrico de Superpave. Este método estándar sirve para la evaluación del diseño de mezcla que utiliza las propiedades de los agregados y de las mezclas para producir la fórmula de trabajo de la mezcla asfáltica en caliente, el cual está basado en las propiedades volumétricas de la mezcla en términos de los vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos llenos de asfalto (VFA).

### 5.1.1 Equipo

En la **Figura 9** se muestra una imagen del Compactador Giratorio Superpave utilizado en el proyecto.



**Figura 9.** Compactador Giratorio Superpave (CGS)

### 5.1.2 Especímenes de ensayo

La muestra consiste en agregados y asfalto, los cuales son dosificados, mezclados y compactados con el Compactador Giratorio Superpave (CGS) a 100 giros de compactación, lo cual corresponde a un diseño para alto volumen de tránsito.

### 5.1.3 Resumen del procedimiento

El procedimiento de diseño volumétrico se basa en 4 etapas:

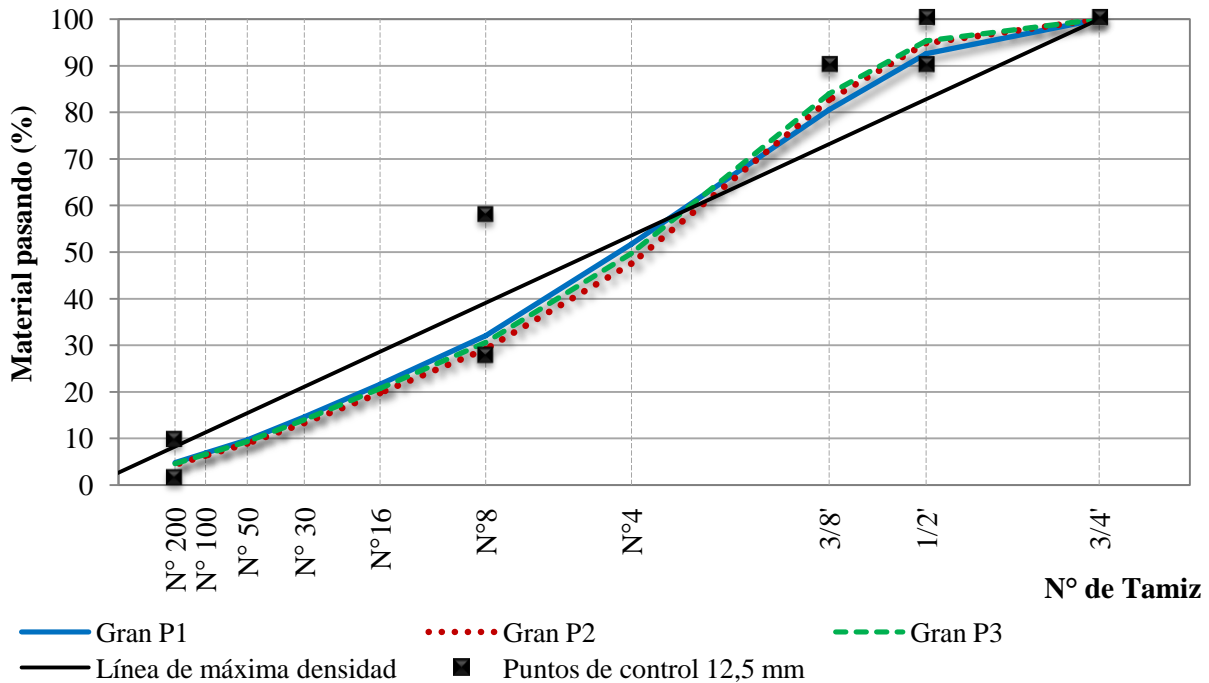
1. Selección de los materiales: el asfalto y los apilamientos de agregados se seleccionan de acuerdo con los requerimientos ambientales y de tránsito aplicables al proyecto de pavimentación.
2. Diseño de la granulometría: se recomienda que se prueben al menos 3 graduaciones de los apilamientos disponibles. Para cada granulometría, se determina un contenido de asfalto de prueba, y al menos 2 especímenes se compactan de acuerdo con el método de ensayo AASTHO T 312.
3. Selección del contenido de asfalto de diseño: Se compactan 3 especímenes duplicados de acuerdo con el método de ensayo AASTHO T 312 con el contenido de asfalto estimado de diseño y adicionalmente con  $\pm 0.5\%$  y  $\pm 1.0\%$  a partir del contenido de asfalto estimado. El contenido de asfalto de diseño se selecciona de acuerdo al cumplimiento de los requisitos dados en la Especificación AASHTO M 323 para %Vacíos, VMA, VFA y la relación polvo/asfalto para el número de giros de diseño ( $N_{\text{diseño}}$ ) y para la densidad relativa al número de giros inicial ( $N_{\text{inicial}}$ ) y número de giros máximo ( $N_{\text{máx}}$ ).
4. Evaluación de la susceptibilidad al agua: La susceptibilidad al agua de la granulometría de diseño es evaluada con el contenido de asfalto de diseño. La mezcla es preparada de acuerdo con el procedimiento de acondicionamiento de la mezcla para el diseño volumétrico expuesto en la Tabla 1 del método de ensayo AASTHO T 312, se deben compactar los especímenes a un nivel de vacíos de  $7,0 \pm 0,5 \%$  de acuerdo con el mismo método, y se debe evaluar la mezcla de acuerdo con el método IT-MB-07. El diseño debe cumplir con el requerimiento de resistencia retenida de la Especificación AASHTO M 323, el cual corresponde a un valor de Resistencia Retenida (TSR, por sus siglas en inglés) mayor al 80%.

## 5.2 Selección de la granulometría

Para la selección de la granulometría óptima en el diseño Superpave, se conformaron 3 configuraciones granulométricas de prueba. En primera instancia las granulometrías preliminares se seleccionaron buscando una curva discontinua dentro de los rangos permitidos para mezclas asfálticas densas, de manera que las mezclas generadas a partir de las mismas posean un alto VMA y consecuentemente un contenido de asfalto óptimo y de esa forma evaluar de mejor forma el desempeño de las mismas, tal y como se muestra en la **Figura 10**. Adicionalmente en la **Tabla 3** aparecen los porcentajes pasando en cada malla para cada configuración.

**Tabla 3.** Granulometrías de prueba

Malla (US)	Malla (mm)	GRAN P1	GRAN P2	GRAN P3
3/4"	19,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,5	93,8	95,9	96,2
3/8"	9,5	82,2	85,2	86,4
N° 4	4,75	54,1	50,5	52,6
N° 8	2,36	34,3	31,6	33,0
N° 16	1,18	22,5	20,6	21,6
N° 30	0,600	15,0	13,9	14,5
N° 50	0,300	10,1	9,4	9,8
N° 100	0,150	6,5	6,0	6,2
N° 200	0,075	4,0	3,7	3,8
<b>Gravedad específica bruta</b>		<b>2,599</b>	<b>2,591</b>	<b>2,595</b>



**Figura 10.** Granulometrías de prueba de 12,5 mm de tamaño máximo nominal

Las granulometrías de prueba son evaluadas mediante la estimación de los parámetros volumétricos de diseño a un 4 % de vacíos a partir de los resultados de especímenes elaborados con un porcentaje de vacíos de 6,2 % y un contenido de asfalto de 5,8 % por peso total de mezcla (PTM).

Los resultados de todos los procedimientos para cada una de las granulometrías de prueba se encuentran contenidos en el **Apéndice A**, correspondiente al informe de ensayo I-1333-14 emitido por los Laboratorios de Infraestructura Vial del LanammeUCR. A continuación se muestra un resumen de los resultados de dichas estimaciones para el 4 % de vacíos de diseño.



**Tabla 4.** Resultados estimados al 4% de vacíos en las 3 granulometrías de prueba

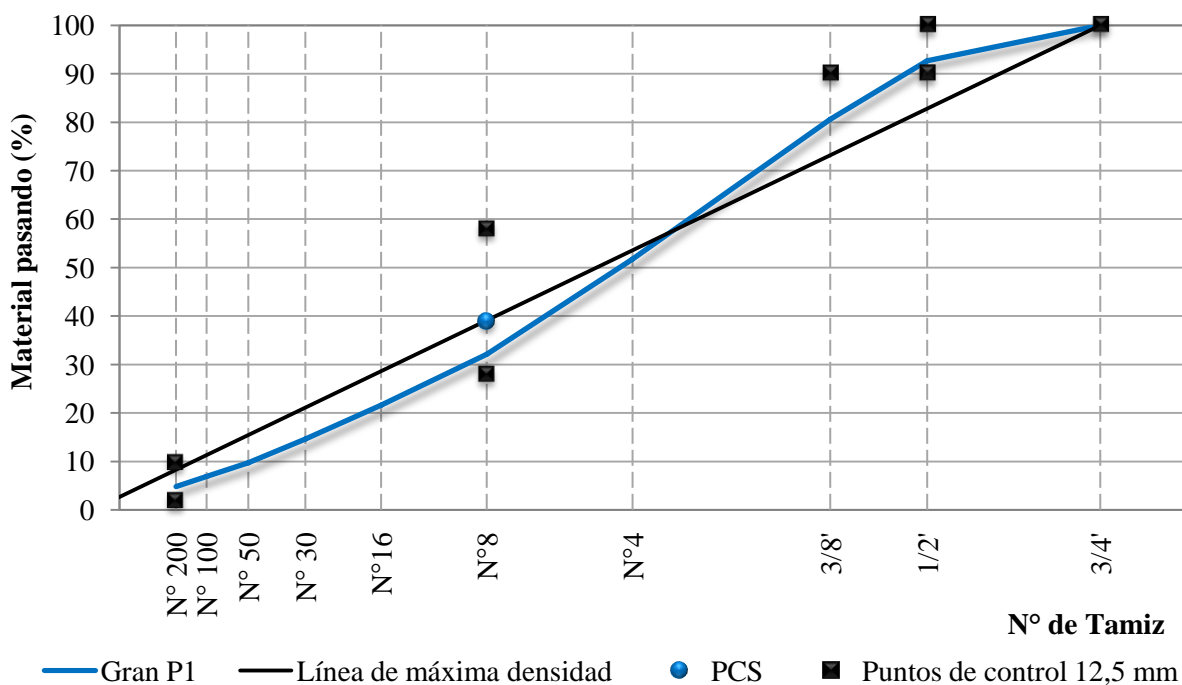
Propiedad	GRAN P1		GRAN P2		GRAN P3		Requisitos a cumplir
	Medido	Estimado al 4%	Medido	Estimado al 4%	Medido	Estimado al 4%	
$G_b$	1,030		1,030		1,030		
% Asfalto (PTA)	6,2	7,2	6,2	7,2	6,2	7,2	
% Asfalto (PTM)	5,8	6,7	5,8	6,7	5,8	6,8	
% Vacíos	6,2	<b>4,0</b>	6,2	<b>4,0</b>	6,3	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>
% VMA	15,5	<b>15,1</b>	15,3	<b>14,9</b>	15,6	<b>15,1</b>	<b>14</b>
% VFA	60,0	<b>73,5</b>	59,7	<b>73,2</b>	59,8	<b>73,6</b>	<b>65-75</b>
Polvo/asfalto	1,16	<b>0,96</b>	1,08	<b>0,89</b>	1,11	<b>0,91</b>	<b>0,6-1,2</b>
% $G_{mm}$ @ $N_{ini}$	84,2	<b>86,4</b>	84,3	<b>86,5</b>	84,1	<b>86,4</b>	<b>&lt; 89,0</b>
% $G_{mm}$ @ $N_{dis}$	93,8	<b>96,0</b>	93,8	<b>96,0</b>	93,7	<b>96,0</b>	<b>96,0</b>

Con base a los resultados mostrados en la **Tabla 4** se define la granulometría óptima a utilizar en el proyecto. En dicha tabla se aprecia que los parámetros estimados para las tres granulometrías de prueba son muy similares entre sí y a su vez cumplen con los establecidos en la especificación Superpave, no obstante de las tres configuraciones se seleccionó la curva con la configuración con mayor contenido de finos, la cual corresponde a la Granulometría 1.

En el laboratorio se trabajó con 4 apilamientos, de los cuales 2 corresponden a agregado grueso y 2 a agregado fino. En la **Tabla 5** se muestra la configuración de cada apilamiento y las dosificaciones por apilamiento para conformar la granulometría del diseño final. Adicionalmente, en la **Figura 11** se muestra la curva granulométrica para dicha configuración, así como los puntos de control establecidos en la especificación.

**Tabla 5.** Configuración granulométrica de la mezcla asfáltica

% Apilamiento		18	18	21	43	Granulometría Final
Malla (US)	Malla (mm)	Porcentaje Pasando				
3/4"	19,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>82,0</b>
1/2"	12,5	60,0	99,0	100,0	100,0	<b>81,8</b>
3/8"	9,5	16,0	76,0	100,0	100,0	<b>77,7</b>
N° 4	4,75	4,0	7,0	73,0	80,0	<b>51,0</b>
N° 8	2,36	2,0	2,0	47,0	50,0	<b>31,7</b>
N° 16	1,18	2,0	2,0	32,0	33,0	<b>21,3</b>
N° 30	0,600	2,0	2,0	19,0	23,0	<b>14,2</b>
N° 50	0,300	2,0	2,0	12,0	15,0	<b>9,3</b>
N° 100	0,150	1,1	1,1	8,9	10,7	<b>6,7</b>
N° 200	0,075	0,5	0,5	6,6	7,5	<b>4,7</b>



**Figura 11.** Curva granulométrica de la mezcla asfáltica

Donde Gran P1 corresponde a la curva de la granulometría óptima y PCS al punto de control que determina si la mezcla es densa fina o densa gruesa. Para este caso, dado que el material posee una cantidad de material pasando el tamiz N° 8 menor al 40%, la mezcla corresponde a una mezcla densa gruesa.

### 5.3 Resultados del diseño de mezcla

La propuesta inicial contempla el diseño de tres mezclas asfálticas, correspondientes a una mezcla de control y dos mezclas modificadas con fibra Drymix en porcentajes de 0,15 y 0,30 % sobre el peso total de mezcla, utilizando una temperatura de mezclado de 158 °C y de 148 °C de compactación. Tales porcentajes de modificación fueron definidos por el Contratante. Los resultados de los diseños iniciales aparecen de la **Tabla 6** a la **Tabla 8**.

**Tabla 6.** Resultados del diseño de mezcla de control

Propiedad de la mezcla	Resultado	Criterio	Aceptación
% Asfalto (PTA)	7,08	-	-
% Asfalto (PTM)	6,61	-	-
% Vacíos	4,0	4,0	Cumple
% VMA	15,5	14,0	Cumple
% VFA	73,1	65-75	Cumple
Polvo/asfalto	1,0	0,6-1,2	Cumple
% G <sub>mm</sub> @ N <sub>ini</sub> = 8	85,8	< 89,0	Cumple

**Tabla 7.** Resultados del diseño de mezcla modificada al 0,15 % de fibra Drymix

Propiedad de la mezcla	Resultado	Criterio	Aceptación
% Asfalto (PTA)	7,71	-	-
% Asfalto (PTM)	7,16	-	-
% Vacíos	4,0	4,0	Cumple
% VMA	16,0	14,0	Cumple
% VFA	74,8	65-75	Cumple
Polvo/asfalto	0,9	0,6-1,2	Cumple
% $G_{mm}$ @ $N_{ini} = 8$	85,9	< 89,0	Cumple

**Tabla 8.** Resultados del diseño de mezcla modificada al 0,30 % de fibra Drymix

Propiedad de la mezcla	Resultado	Criterio	Aceptación
% Asfalto (PTA)	9,21	-	-
% Asfalto (PTM)	8,43	-	-
% Vacíos	4,0	4,0	Cumple
% VMA	19,7	14,0	Cumple
% VFA	80,9	65-75	No cumple
Polvo/asfalto	0,6	0,6-1,2	Cumple
% $G_{mm}$ @ $N_{ini} = 8$	85,6	< 89,0	Cumple

En los resultados obtenidos de los tres diseños iniciales, se aprecia que los parámetros volumétricos de la mezcla de control y la mezcla modificada al 0,15 % de fibra Drymix, cumplen con los rangos especificados. No obstante, en los resultados obtenidos de la mezcla modificada al 0,30 % se identifica un incumplimiento en el parámetro de vacíos llenos con asfalto (VFA, según sus siglas en inglés). Adicionalmente, para ambos diseños de mezcla modificadas con fibra se obtuvo valores de contenido de asfalto óptimo por encima de los valores típicos para estas granulometrías, esto es de 7,71 % (PTA) para la mezcla modificada al 0,15 % y de 9,21 % (PTA) para la mezcla modificada al 0,30 %.

Por tanto, debido al incumplimiento en el diseño de la mezcla modificada al 0,30 % de fibra Drymix y los altos contenidos de asfalto óptimo se modificaron dos condiciones: 1) se ajustó el contenido de

fibra alto a 0,2% y 2) se aumentó la energía de compactación a partir de un incremento en la temperatura de mezclado y compactación de los diseños modificados con fibra, lo anterior debido a que fue evidente un aumento en la consistencia del asfalto tras la incorporación de la fibra, por lo que se persigue mejorar la trabajabilidad tras el aumento de la temperatura. El diseño de la mezcla de control se mantuvo idéntico respecto a las condiciones iniciales.

Bajo estas conclusiones se determinaron los tres diseños finales, las nuevas condiciones definidas para cada tratamiento se muestran en la **Tabla 9**. Adicionalmente, en la **Tabla 10** y la **Tabla 11** aparecen los resultados de los nuevos parámetros volumétricos de diseño correspondientes a los tratamientos del proyecto modificados con Fibra Drymix.

**Tabla 9.** Tratamientos finales utilizados en el proyecto

Tratamiento	Contenido de fibra DRYMIX	Temperatura de mezclado	Temperatura de compactación
T1	0 %	158 °C	148 °C
T2	0,15 %	165 °C	155 °C
T3	0,20 %	165 °C	155 °C

**Tabla 10.** Resultados del diseño de mezcla modificada al 0,15 % de fibra Drymix (T2)

Propiedad de la mezcla	Resultado	Criterio	Aceptación
% Asfalto (PTA)	7,06	-	-
% Asfalto (PTM)	6,59	-	-
% Vacíos	4,0	4,0	Cumple
% VMA	15,9	14,0	Cumple
% VFA	74,9	65-75	Cumple
Polvo/asfalto	0,9	0,6-1,2	Cumple
%G <sub>mm</sub> @ N <sub>ini</sub> = 8	86,0	< 89,0	Cumple

**Tabla 11.** Resultados del diseño de mezcla modificada al 0,20 % de fibra Drymix (T3)

Propiedad de la mezcla	Resultado	Criterio	Aceptación
% Asfalto (PTA)	7,15	-	-
% Asfalto (PTM)	6,67	-	-
% Vacíos	4,0	4,0	Cumple
% VMA	16,4	15,0	Cumple
% VFA	75,6	65-75	No cumple
Polvo/asfalto	0,9	0,6-1,2	Cumple
% G <sub>mm</sub> @ N <sub>ini</sub> = 8	86,0	< 89,0	Cumple

Respecto al efecto de las modificaciones en las condiciones de diseño planteadas al inicio del proyecto, se aprecia que los contenidos de asfalto óptimos para los tres tratamientos se lograron obtener en un rango de 7,06 a 7,15 % sobre el peso total de la mezcla, lo cual favorece el objetivo de la investigación, debido a que la similitud entre dichos contenidos permite afirmar que los resultados de las evaluaciones posteriores obedecen únicamente a las variaciones en los contenidos de fibra Drymix. Adicionalmente, se logró reducir el incumplimiento en el parámetro VFA a 75,6 %, muy cercano al límite del rango establecido.

Una vez definidos los tratamientos de la investigación, se procedió a la evaluación de las mezclas mediante ensayos de laboratorio. Los cuales se presentarán en los siguientes apartados.

## 6 ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO (MD)

El parámetro de Módulo Dinámico se define como la razón de la amplitud del esfuerzo senoidal medido a una frecuencia y a una temperatura determinada y la amplitud de la deformación senoidal medida a la misma frecuencia y temperatura. El Método de ensayo para la determinación del módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente (Curva Maestra), corresponde a una prueba en la cual se evalúan las propiedades mecánicas del material en diferentes condiciones de temperaturas y velocidades de carga. La importancia de la obtención de este parámetro radica en que este se ha constituido como un elemento fundamental en el diseño de pavimentos, puesto que permite caracterizar de manera racional el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales que conforman la estructura de la mezcla asfáltica.

## 6.1 Descripción del ensayo MD

### 6.1.1 Equipo

El equipo utilizado para el ensayo de Módulo Dinámico se muestra en la **Figura 12**.



**Figura 12.** Asphalt Mixture Performance Tester AMPT

### 6.1.2 Especímenes de ensayo

La muestra consiste en mezcla asfáltica reproducida en el LanammeUCR, y compactada en el compactador giratorio Superpave (CGS). Las dimensiones de los núcleos es de  $100 \pm 2$  mm de diámetro y  $150 \pm 2,5$  mm de altura. La cantidad de especímenes depende del coeficiente de variación que se desea obtener en el ensayo, no obstante para condiciones típicas se elaboran 3 especímenes mediante el compactador giratorio Superpave (CGS) de donde se extraen sus 3 núcleos para la realización del ensayo.

### 6.1.3 Resumen del procedimiento

La serie de prueba consiste en realizar el ensayo mediante un barrido de 5 temperaturas (-10; 4,4; 21,1; 37,8; y 54,4 °C) a 6 frecuencias de carga (0,1; 0,5; 1,0; 5; 10 y 25 Hz). Se aplica una carga haversiana de compresión con esfuerzos cíclicos repetidos de magnitud fija que dependen de las frecuencias.

Antes de iniciar el ensayo se pre-acondicionan los especímenes 200 ciclos a 25 Hz. Luego, a 10 Hz se aplican 200 ciclos, a 5 Hz 100 ciclos, a 1 Hz 20 ciclos, 0,5 Hz 15 ciclos y a 0,1 Hz 15 ciclos.

## 6.2 **Resultados del ensayo MD**

### 6.2.1 Energía de compactación

La elaboración de los especímenes del ensayo de Módulo Dinámico para alcanzar una altura de 150 mm comprende la configuración de energía de compactación mostrada en la **Tabla 12**.

**Tabla 12.** Energía de compactación para los especímenes del ensayo de Módulo Dinámico

Especimen	Giros de compactación Superpave		
	T1	T2	T3
1	25	32	45
2	29	29	38
3	27	32	44
<b>Giros promedio MD</b>	<b>27</b>	<b>31</b>	<b>42</b>
<b>Desviación estándar</b>	2	2	4
<b>Temperatura de compactación</b>	148 °C	158 °C	158 °C

Los resultados promedio obtenidos para el ensayo de módulo dinámico aparecen de la **Tabla 13** a la **Tabla 15** y gráficamente se muestran de la **Figura 13** a la **Figura 15**. Los resultados puntuales para los tres tratamientos aparecen detalladamente en el **Apéndice B**, en donde se adjunta el informe I-0074-15 emitido por los Laboratorios de Infraestructura Vial del LanammeUCR.



**Tabla 13.** Resultados promedio del ensayo de MD para el tratamiento T1

Frecuencia (Hz)	Temperatura (°C)	Módulo dinámico (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)	Ángulo de fase (°)	Desviación estándar (°)
25,0	-10,0	18509	147	0,8	3,8	0,1
10,0	-10,0	17877	269	1,5	4,4	0,5
5,0	-10,0	17330	206	1,2	4,8	0,1
1,0	-10,1	15858	113	0,7	5,7	0,0
0,5	-10,1	15208	151	1,0	6,1	0,1
0,1	-10,1	13668	107	0,8	7,3	0,1
25,0	4,1	13386	339	2,5	8,4	0,2
10,0	4,1	12583	234	1,9	9,6	0,7
5,0	4,1	11812	314	2,7	10,3	0,2
1,0	4,1	9790	283	2,9	12,1	0,3
0,5	4,1	8977	271	3,0	13,1	0,3
0,1	4,1	7182	204	2,8	16,1	0,4
25,0	21,1	7222	81	1,1	21,8	1,1
10,0	21,1	6530	48	0,7	23,8	0,6
5,0	21,1	5506	53	1,0	23,2	0,8
1,0	21,1	3662	26	0,7	25,4	1,1
0,5	21,1	3058	45	1,5	26,6	1,3
0,1	21,1	1980	91	4,6	28,4	1,6
25,0	37,8	2374	103	4,4	28,1	0,5
10,0	37,8	1768	83	4,7	29,5	2,3
5,0	37,9	1412	103	7,3	27,7	0,9
1,0	37,9	881	101	11,5	24,2	1,7
0,5	37,8	748	100	13,3	22,1	1,7
0,1	37,9	554	96	17,3	16,5	1,4
25,0	54,5	784	120	15,3	27,0	1,2
10,0	54,5	607	93	15,2	21,7	1,6
5,0	54,4	519	77	14,7	19,6	0,8
1,0	54,4	404	60	14,7	14,9	0,6
0,5	54,4	372	52	14,0	13,2	0,4
0,1	54,5	321	42	13,1	9,9	0,4

**Tabla 14.** Resultados promedio del ensayo de MD para el tratamiento T2

Frecuencia (Hz)	Temperatura (°C)	Módulo dinámico (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)	Ángulo de fase (°)	Desviación estándar (°)
25,0	-10,0	18290	385	2,1	3,8	0,3
10,0	-10,0	17704	590	3,3	4,4	0,4
5,0	-10,0	17090	471	2,8	4,8	0,2
1,0	-10,1	15567	312	2,0	5,6	0,2
0,5	-10,1	15157	291	1,9	6,0	0,4
0,1	-10,1	13355	279	2,1	7,0	0,4
25,0	4,1	13492	142	1,1	7,8	1,1
10,0	4,1	12621	98	0,8	8,8	0,6
5,0	4,1	11962	51	0,4	9,5	0,6
1,0	4,1	10181	271	2,7	11,3	0,5
0,5	4,1	9208	174	1,9	11,8	0,8
0,1	4,1	7428	233	3,1	14,3	1,1
25,0	21,1	7594	91	1,2	17,3	1,4
10,0	21,1	6953	253	3,6	19,8	1,8
5,0	21,1	6137	139	2,3	20,0	1,1
1,0	21,1	4357	152	3,5	20,9	1,0
0,5	21,1	3787	136	3,6	22,0	1,0
0,1	21,1	2781	129	4,6	25,2	1,0
25,0	37,8	2564	379	14,8	29,1	1,5
10,0	37,8	1926	338	17,6	28,1	1,3
5,0	37,9	1570	275	17,5	27,8	0,5
1,0	37,9	973	159	16,3	26,1	1,3
0,5	37,8	813	123	15,2	24,7	1,9
0,1	37,9	567	65	11,5	20,5	3,1
25,0	54,5	1087	108	9,9	26,3	4,7
10,0	54,5	846	86	10,1	23,6	1,6
5,0	54,4	728	76	10,4	21,8	1,6
1,0	54,4	541	42	7,7	16,2	1,2
0,5	54,4	497	35	7,1	14,4	1,4
0,1	54,5	424	29	6,8	11,4	1,3

**Tabla 15.** Resultados promedio del ensayo de MD para el tratamiento T3

Frecuencia (Hz)	Temperatura (°C)	Módulo dinámico (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)	Ángulo de fase (°)	Desviación estándar (°)
25,0	-10,0	17663	713	4,0	3,4	0,4
10,0	-10,0	17175	759	4,4	4,4	0,5
5,0	-10,0	16570	741	4,5	4,8	0,1
1,0	-10,1	15213	724	4,8	5,7	0,1
0,5	-10,1	14580	679	4,7	6,2	0,2
0,1	-10,1	13078	611	4,7	7,3	0,2
25,0	4,1	12997	148	1,1	8,2	0,2
10,0	4,1	12237	172	1,4	9,5	0,5
5,0	4,1	11322	50	0,4	9,7	0,8
1,0	4,1	9551	189	2,0	11,7	0,8
0,5	4,1	8789	242	2,8	12,7	1,0
0,1	4,1	7119	378	5,3	15,5	1,2
25,0	21,1	7375	173	2,3	19,8	1,5
10,0	21,1	6845	110	1,6	23,2	2,4
5,0	21,1	5847	156	2,7	22,1	1,4
1,0	21,1	4008	182	4,5	23,6	1,5
0,5	21,1	3414	219	6,4	24,9	1,6
0,1	21,1	2364	228	9,6	28,0	1,4
25,0	37,8	2869	298	10,4	28,7	2,9
10,0	37,8	2249	325	14,4	28,6	1,0
5,0	37,7	1852	288	15,5	25,8	1,6
1,0	37,7	1241	236	19,0	22,3	1,5
0,5	37,8	1082	223	20,6	20,7	1,2
0,1	37,8	837	196	23,4	17,2	0,6
25,0	54,4	968	75	7,8	24,7	1,4
10,0	54,5	747	63	8,4	21,6	1,1
5,0	54,4	633	53	8,4	19,4	0,9
1,0	54,4	491	46	9,3	15,4	0,8
0,5	54,4	454	45	9,9	13,7	0,7
0,1	54,4	390	49	12,6	10,3	0,8

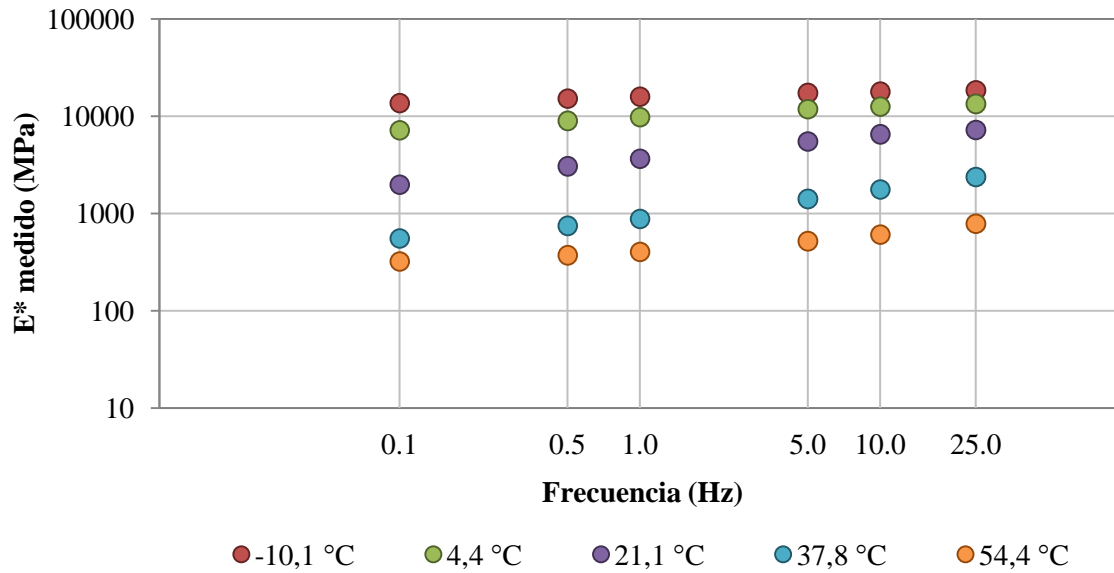


Figura 13. Resultados del ensayo MD de la mezcla de control, sin contenido de fibra Drymix (T1)

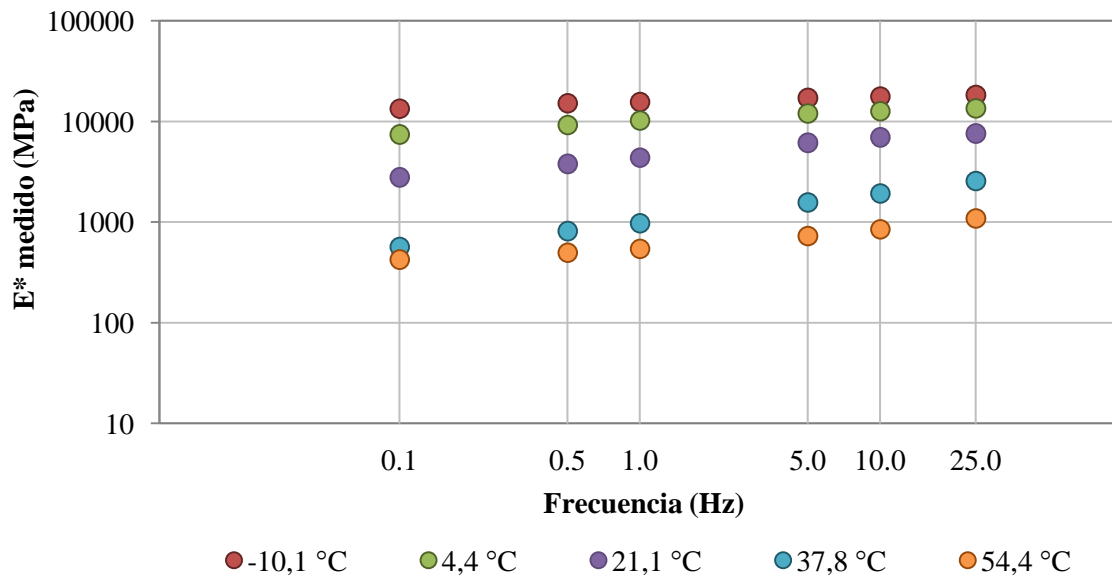
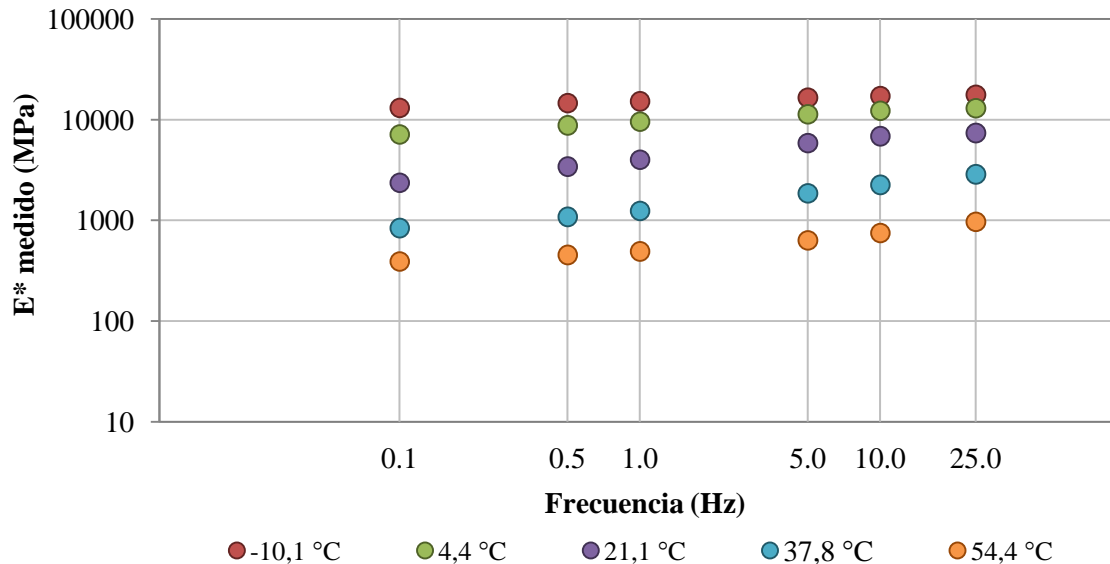


Figura 14. Resultados del ensayo MD de la mezcla modificada al 0,15 % de fibra Drymix (T2)



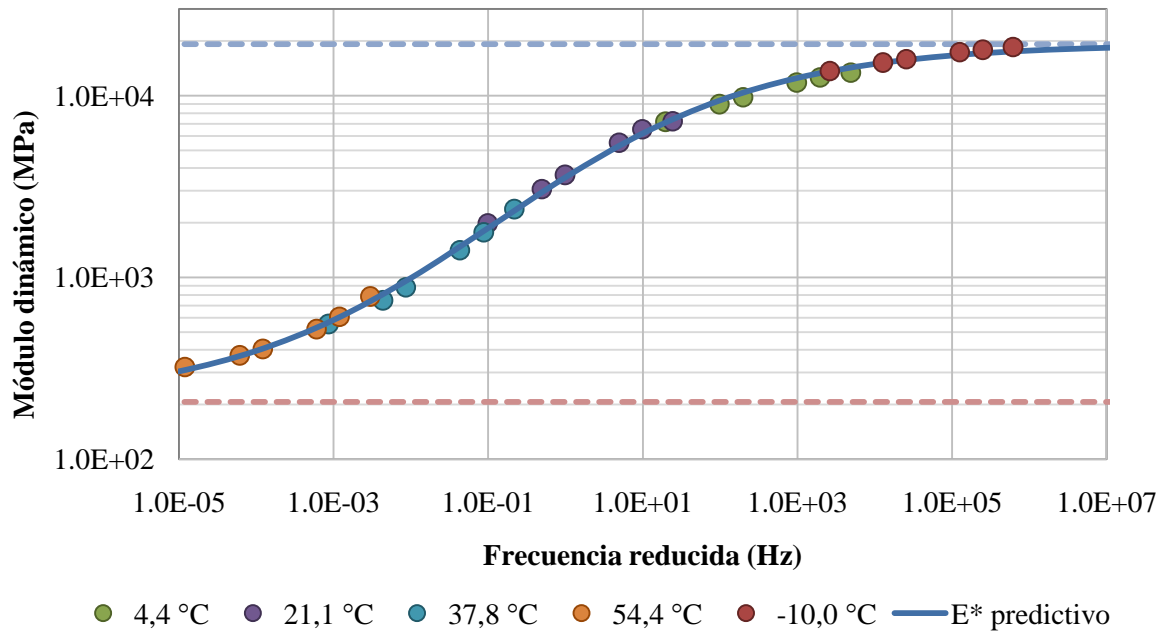
**Figura 15.** Resultados del ensayo MD de la mezcla modificada al 0,20 % de fibra Drymix (T3)

Las propiedades del módulo de mezclas asfálticas son función de: temperatura, razón de carga, envejecimiento y características de la mezcla como viscosidad y contenido del ligante, granulometría del agregado y vacíos. Una manera de sintetizar los resultados es mediante la contabilización de los efectos de la temperatura y la razón de carga a partir de una curva maestra de módulo dinámico.

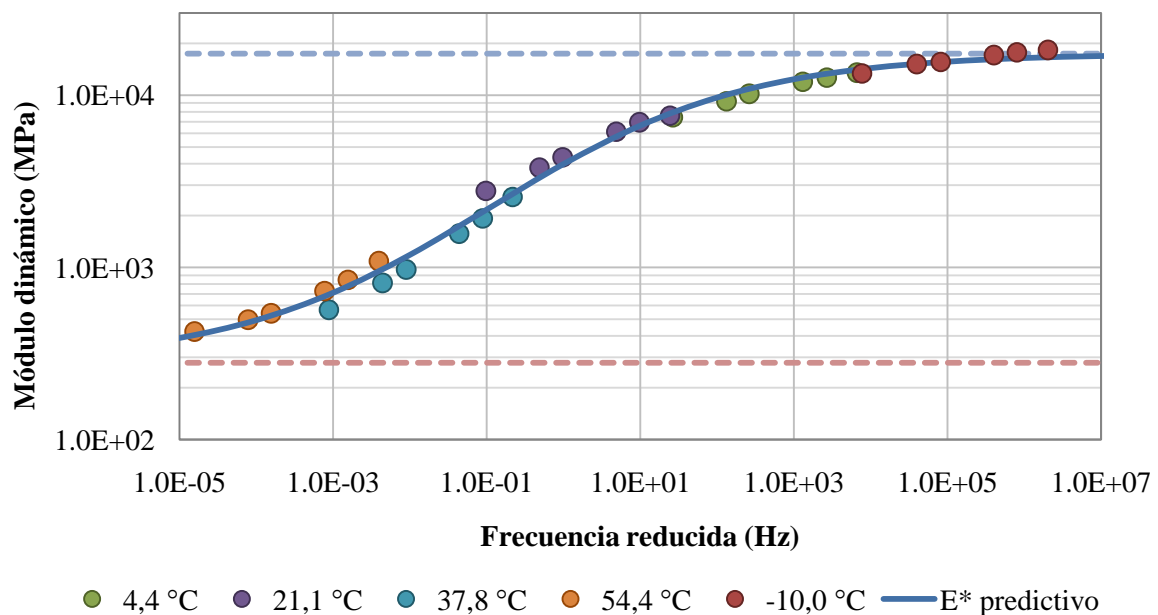
### 6.3 Generación de curvas maestras

Las curvas maestras se construyen utilizando el principio de superposición tiempo-temperatura. El procedimiento para la elaboración de estas consiste básicamente en seleccionar una temperatura estándar de referencia (en este caso 21,1 °C) y posteriormente ajustar los datos de las demás temperaturas de ensayo con respecto al tiempo hasta que las curvas se unan en una única función suavizada.

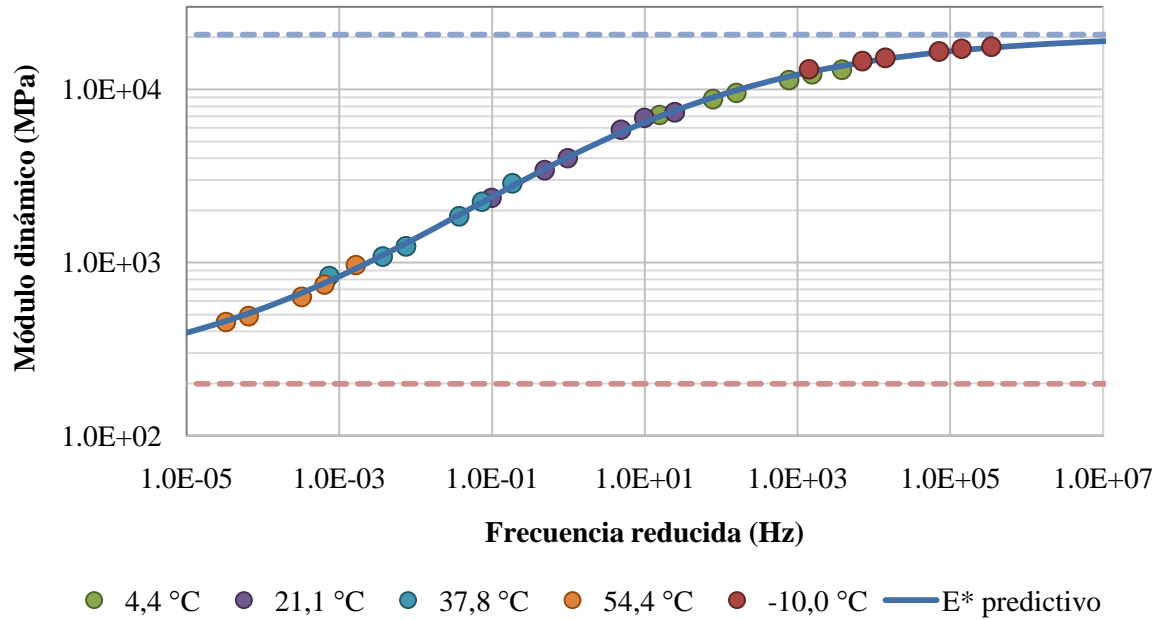
Para la calibración de las curvas maestras a partir de los resultados del proyecto se utilizó la fórmula general Sigmoidal y el factor de ajuste de William-Landel-Ferry, para los cuales se obtuvieron excelentes bondades de ajuste, en un rango de 97 y 99 % de representatividad de los resultados. Las curvas maestras generadas se muestran de la **Figura 16** a la **Figura 18**. A manera de comparación, la **Figura 19** muestra las tres curvas maestras de módulo dinámico estimadas para cada tratamiento.



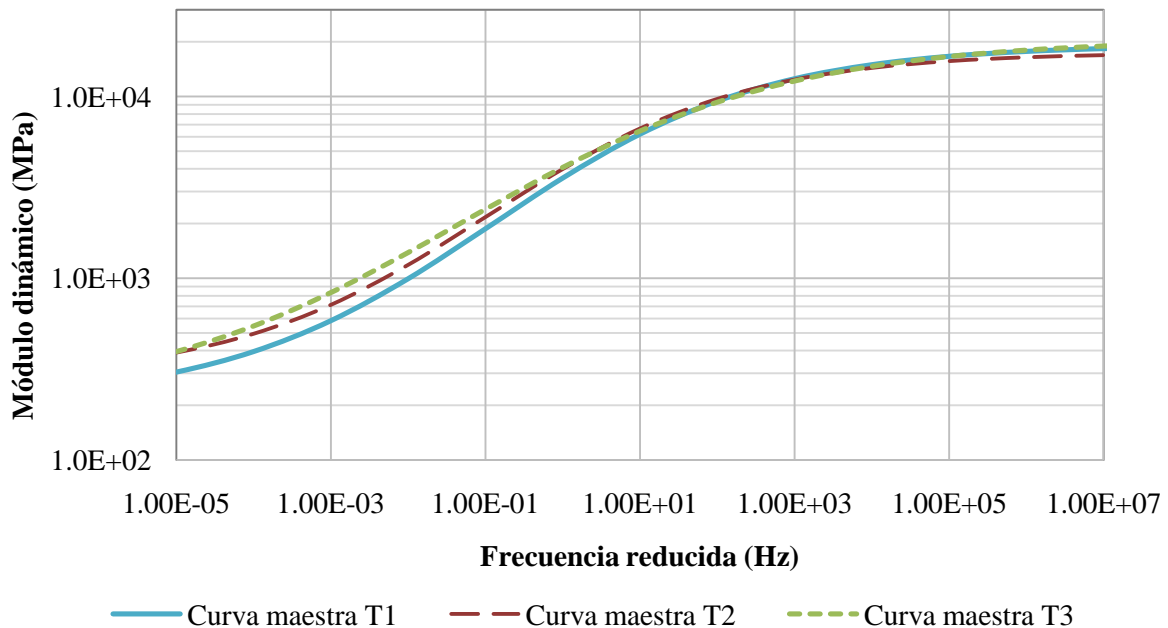
**Figura 16.** Curva maestra de MD de la mezcla de control, sin contenido de fibra Drymix (T1)



**Figura 17.** Curva maestra de MD de la mezcla modificada al 0,15 % de fibra Drymix (T2)



**Figura 18.** Curva maestra de MD de la mezcla modificada al 0,20 % de fibra Drymix (T3)



**Figura 19.** Comparación de módulos predictivos entre los tratamientos T1, T2 y T3

#### 6.4 Síntesis de resultados de MD

De los resultados mostrados anteriormente se destacan las siguientes conclusiones:

- A partir de la comparación de las curvas maestras de módulos predictivos se observa que a temperaturas bajas (cola superior), los valores de rigidez son muy similares entre las tres condiciones, los tratamientos T1 y T3 describen prácticamente la misma curva, mientras que el tratamiento T2 se separa ligeramente por debajo de las otras curvas.
- A temperaturas altas y/o frecuencias de carga bajas se identifica una distinción entre las curvas maestras, lo cual obedece a diferencias importantes en las magnitudes de los módulos registrados para la mezcla sin modificar respecto a las mezclas con contenidos de fibra Drymix, considerando que la escala de la **Figura 19** para el eje de  $E^*$  es logarítmica.
- Analizando los resultados de manera puntual, se aprecia que a temperaturas altas los valores de MD son ligeramente mayores para el tratamiento T2, mientras que a temperaturas bajas el comportamiento se invierte, en donde el tratamiento T1 presenta valores de MD mayores respecto a T2.

#### 6.5 Análisis del ensayo de MD

El objetivo principal de la generación de curvas maestras consiste en caracterizar la mezcla asfáltica como material viscoelástico mediante una propiedad fundamental del material, como lo es el módulo elástico. Para efectos del proyecto, estas fueron construidas con el ajuste a una función Sigmoidal a partir de las mediciones de módulo dinámico empleando técnicas de regresión no lineales de mínimos cuadrados.

Para analizar las diferencias observadas en los resultados del ensayo de Módulo Dinámico, se sometieron los resultados a un análisis de varianza. Para esta prueba se utilizaron los datos de las tres repeticiones de cada tratamiento y mediante el Método de Tukey para un nivel de confianza del 95 %, se determinó que no existen diferencias significativas entre los tratamientos del proyecto. Para la realización de este análisis de varianza se utilizó el software estadístico Stata. Los resultados del análisis estadístico aparecen en la **Tabla 16**.



**Tabla 16.** Resultados del Método de Tukey para el ensayo de APA

<i>Tratamiento</i>	<i>Muestra</i>	<i>Agrupación<sup>1</sup></i>
T1	90	A
T3	90	A
T2	90	A

<sup>1</sup>Los tratamientos que no comparten una misma letra son diferentes significativamente

En la tabla anterior, el número de muestra corresponde a la cantidad de mediciones realizadas, contemplando los tres especímenes de repetición para cada tratamiento y en donde para cada uno de ellas se registran 30 mediciones de módulo (5 temperaturas a 6 frecuencias de ensayo). Respecto a la agrupación, puesto que los tres tratamientos comparten la misma letra se interpreta que entre tratamientos no existen diferencias significativas.

A partir del criterio anterior se concluye que la adición de la fibra a la mezcla asfáltica no genera un aporte o una reducción en capacidad mecánica del material, lo cual es una consideración importante debido a que en cuanto a la volumetría de mezcla asfáltica, parte de la fibra se incorpora dentro de los agregados como material de relleno y por tanto no se espera ninguna afectación en las propiedades mecánicas a dosificaciones bajas, como ocurre en el proyecto.

En general la mezcla asfáltica utilizada en el proyecto comprende una estructura granulométrica robusta, adicional al uso de un ligante asfáltico AC-30, lo cual se refleja en una mezcla rígida, tal y como se observa en los resultados.

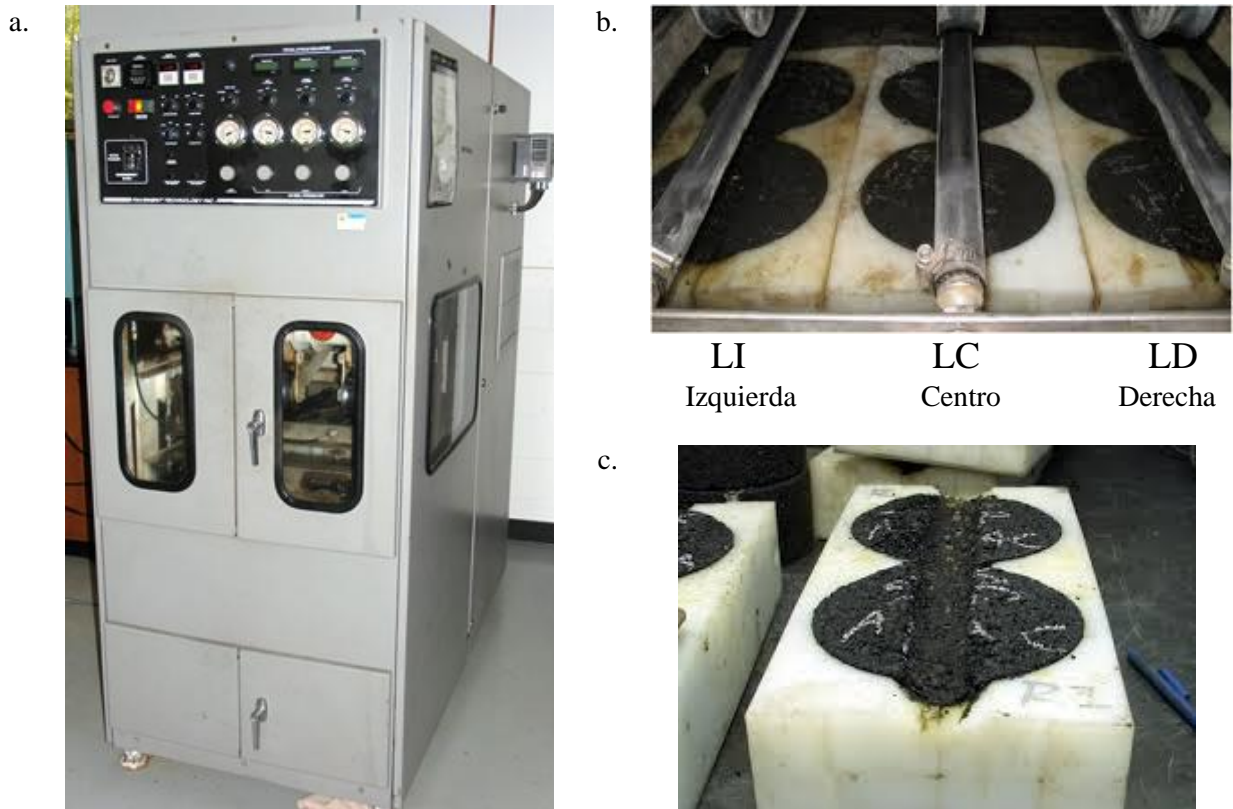
## 7 ENSAYO APA

### 7.1 Descripción del ensayo

La prueba en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA, por sus siglas en inglés), corresponde a un ensayo de desempeño a partir del cual se evalúa la susceptibilidad de las mezclas a la deformación permanente. El ensayo de laboratorio se realiza basado en las normas AASHTO TP 63.

#### 7.1.1 Equipo

En la **Figura 20** se muestran fotografías del equipo y los especímenes de ensayo.



**Figura 20.** APA a. Equipo b. Posición de los especímenes de ensayo c. Especímenes deformados

### 7.1.2 Especímenes de ensayo

La muestra consiste en mezcla asfáltica reproducida en el LanammeUCR, y compactada en el compactador giratorio Superpave (CGS). Las dimensiones de los especímenes son de 150 mm de diámetro y 75 mm de altura, de los cuales se requieren 6 pastillas del CGS de cada tratamiento.

### 7.1.3 Resumen del procedimiento

El ensayo consiste en la lectura de la deformación ante la aplicación de repetidos ciclos de carga. Inicialmente los especímenes se acondicionan a la temperatura de ensayo (60 °C al tratarse de una prueba de deformación plástica), una vez que alcanzan la temperatura, se procede a introducir los especímenes al equipo APA (previamente llevado a 60 °C durante una hora), se aplica una presión de 100 psi a las mangueras por las cuales correrá sobre cada una de ellas una llanta metálica acanalada con una carga de 100 lb y se programan 8050 ciclos de carga. El equipo al presionar el botón de

encendido automáticamente registrará la deformación en dos puntos sobre la superficie de los especímenes. Una vez alcanzados los ciclos de ensayo se reporta la deformación en cada punto de los especímenes y su promedio, además del gráfico de deformación en función del número de ciclos.

## 7.2 Resultados del ensayo APA

### 7.2.1 Energía de compactación

El procedimiento de compactación consiste en aplicar una cantidad de giros a los especímenes hasta alcanzar la altura especificada para el ensayo, en el caso de APA se requiere una altura de 75 mm a un contenido de vacíos que debe encontrarse entre  $7 \pm 1$  %. La elaboración de los especímenes del ensayo de APA comprende la configuración de energía mostrada en la **Tabla 17** para la compactación.

**Tabla 17.** Energía de compactación para los especímenes del ensayo de APA

Especímen	Giros de compactación Superpave		
	T1	T2	T3
1	32	95	78
2	35	84	86
3	57	77	94
4	29	73	83
5	46	77	88
6	38	81	70
<b>Giros promedio APA</b>	<b>40</b>	<b>81</b>	<b>83</b>
<b>Desviación estándar</b>	10	8	8
<b>Temperatura de compactación</b>	148 °C	158 °C	158 °C

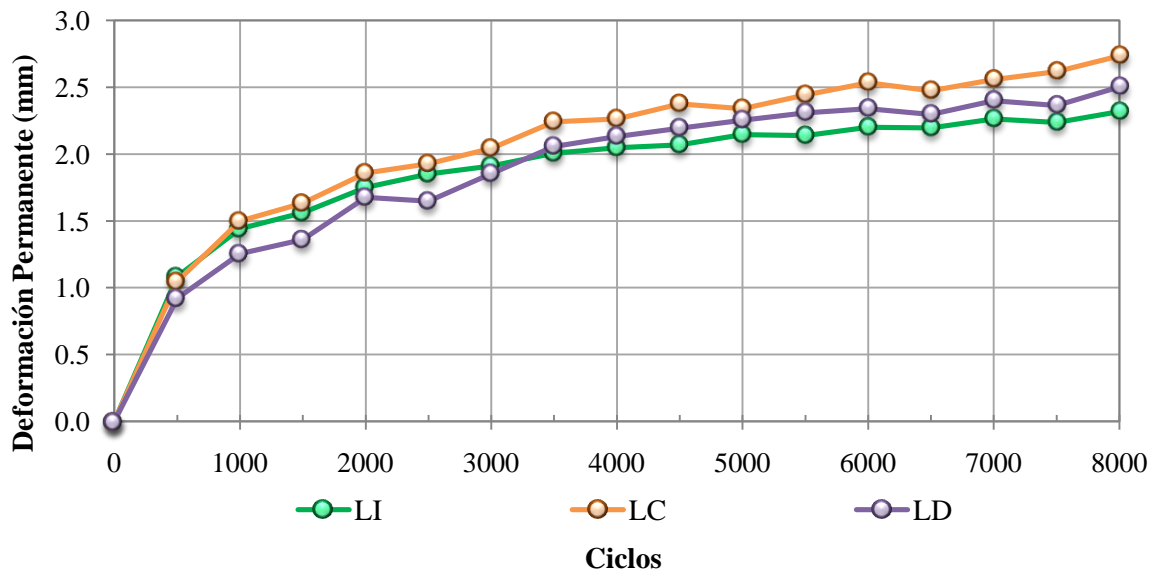
Los resultados del ensayo de APA para los tres tratamiento aparecen detalladamente en el **Apéndice C**, el cual se adjunta el informe I-1443-14 emitido por el Laboratorio de Ensayos Dinámicos. A continuación se muestra un resumen de los principales hallazgos del ensayo.

**Tabla 18.** Resumen de los resultados APA

Tratamiento	T1		T2		T3	
	Deformación promedio	% Vacíos promedio	Deformación promedio	% Vacíos promedio	Deformación promedio	% Vacíos promedio
LI	2,317	7,81	1,602	7,06	2,115	7,50
LC	2,735	7,56	1,720	7,27	2,171	7,25
LD	2,502	7,39	1,504	7,38	1,526	7,18
<b>Promedio</b>	<b>2,518</b>	<b>7,59</b>	<b>1,608</b>	<b>7,24</b>	<b>1,937</b>	<b>7,31</b>

Las posiciones LI, LC y LD se describen en la **Figura 20**, correspondiente a los especímenes colocados a la izquierda, centro y derecha en la cámara del equipo.

Gráficamente, los resultados para cada tratamiento aparecen de la **Figura 21** a la **Figura 23**. Adicionalmente la **Figura 24** muestra una comparación de las deformaciones promedio entre cada tratamiento.



**Figura 21.** Resultados del ensayo APA de la mezcla de control, sin contenido de fibra Drymix (T1)

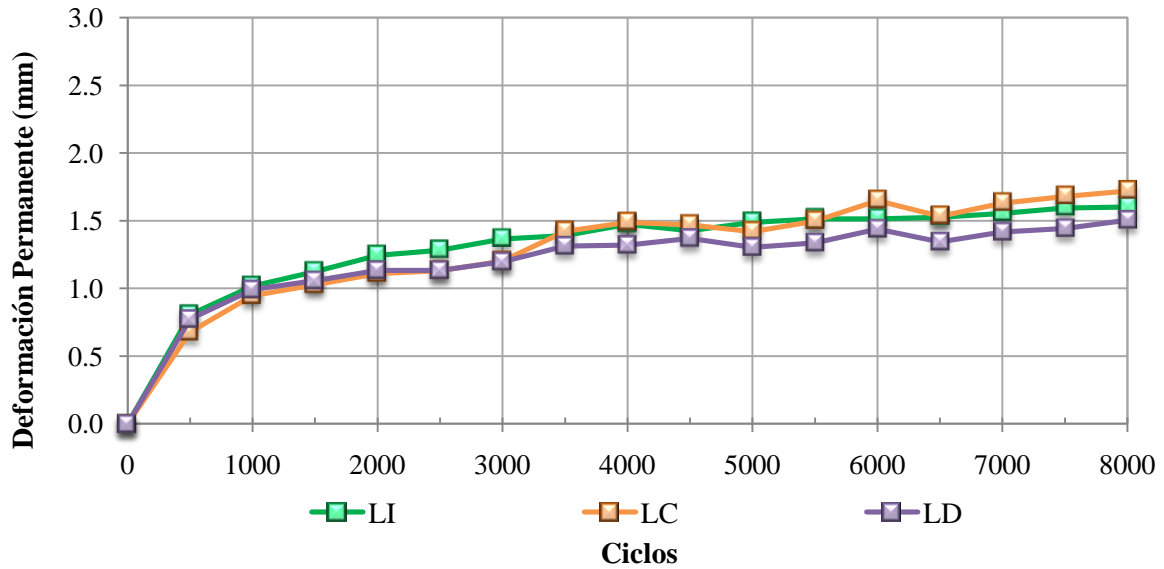


Figura 22. Resultados del ensayo APA de la mezcla modificada al 0,15 % de fibra Drymix (T2)

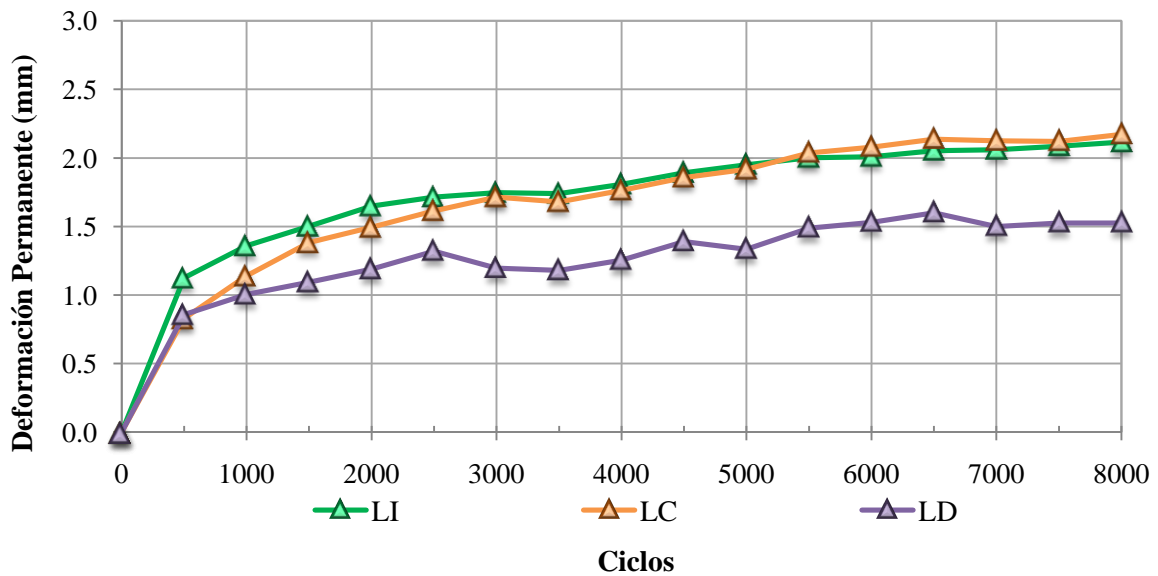
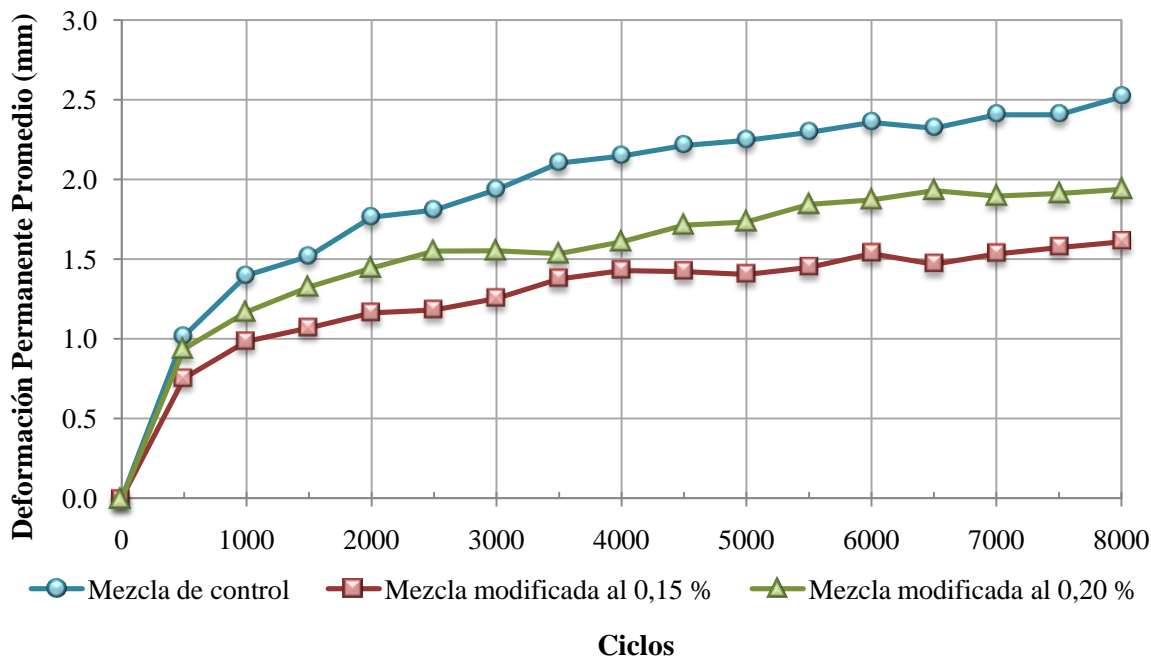


Figura 23. Resultados del ensayo APA de la mezcla modificada al 0,20 % de fibra Drymix (T3)



**Figura 24.** Comparación de las deformaciones promedio entre tratamientos

### 7.3 Síntesis de resultados del ensayo APA

El ensayo APA se plantea con el objetivo de analizar la susceptibilidad a la deformación permanente de las mezclas asfálticas con diferentes contenidos de fibra, con el objetivo de cuantificar el aporte de la fibra Drymix ante este tipo de deterioro. Los principales hallazgos se enumeran a continuación:

- La deformación promedio que experimentaron los especímenes del tratamiento T1, correspondiente a la mezcla asfáltica de control, fue de 2,52 mm, tales especímenes presentaron un nivel de vacíos del 7,59 %. Para este tratamiento se obtuvo la mayor deformación permanente.
- La deformación promedio que experimentaron los especímenes del tratamiento T2, correspondiente a la mezcla asfáltica modificada al 0,15 % de fibra, fue de 1,61 mm, tales especímenes presentaron un nivel de vacíos promedio del 7,24 %. Tal condición presentó los menores niveles de deformación.
- La deformación promedio que experimentaron los especímenes del tratamiento T3, correspondiente a la mezcla asfáltica modificada al 0,20 % de fibra, fue de 1,94 mm, tales especímenes presentaron un nivel de vacíos promedio del 7,31 %.

#### 7.4 Análisis de resultados del ensayo APA

Mediante el ensayo de APA se evaluó preliminarmente el comportamiento a la deformación de las mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de fibra Drymix. Tal y como se menciona anteriormente, el tratamiento T2 mostró el mejor desempeño. No obstante, para evaluar las diferencias entre tratamientos, los resultados fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) para un nivel de significancia de 0,05 utilizando la función de análisis de datos de Excel. Los resultados del análisis de muestran en la **Tabla 19**.

**Tabla 19.** Análisis ANOVA para los resultados del ensayo de APA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1,272	2	0,636	10,409	0,011	5,143
Dentro de los grupos	0,367	6	0,061			
Total	1,639	8				

A partir del análisis de varianza se determina que existen diferencias significativas entre los resultados del ensayo de APA respecto a los diferentes tratamientos del proyecto. Por tanto se procede a determinar entre cuales tratamientos existen diferencias significativas, para esto se utiliza el método de Tukey. Los resultados del análisis se muestran a continuación.

**Tabla 20.** Resultados del Método de Tukey para el ensayo de APA

<i>Tratamiento</i>	<i>Muestra</i>	<i>Promedio</i>	<i>Agrupación<sup>1</sup></i>	
T1	3	2,518	A	
T3	3	1,937	A	B
T2	3	1,608		B

<sup>1</sup>Los tratamientos que no comparten una misma letra son diferentes significativamente

Para el análisis mostrado en la tabla anterior, se tiene un total de 3 especímenes de repetición, correspondiente al número de muestra, para cada uno de ellos se reporta una deformación promedio final.

Mediante la interpretación de los resultados del Método de Tukey se determina que existen diferencias significativas entre el tratamiento T1 y el tratamiento T2, es decir, estadísticamente existe una variación importante en la resistencia a la deformación permanente de la mezcla modificada al 0,15 % de fibra respecto a la mezcla sin modificar. No sucede lo mismo entre los tratamientos T1 y T3, ni entre las mezclas modificadas a diferentes porcentajes de fibra (T2 y T3), en donde estadísticamente no se identifican diferencias significativas, por tanto las discrepancias entre tales tratamientos se atribuyen a la incertidumbre y variabilidad de los ensayos.

Por otro lado, al observar los resultados mostrados en la **Figura 23** se aprecia que la medición realizada en las pastillas al lado derecho del equipo muestra una historia de deformación considerablemente menor respecto a las pastillas del centro y de la izquierda. No ocurre lo mismo en la **Figura 21** y la **Figura 22**, correspondientes a los tratamientos T1 y T2. Esta mayor variabilidad en los resultados del tratamiento T3 podría estar asociada a una menor trabajabilidad de las mezclas durante la elaboración y compactación de los especímenes.

Adicionalmente, el porcentaje de vacíos presente en las pastillas de los tratamientos T2 y T3 son menores respecto al tratamiento T1, lo cual se asocia directamente con la energía de compactación (**Tabla 17**), en donde se detecta que tanto la temperatura como la cantidad de giros requeridos para los tratamientos modificados aportan mayor energía al proceso. Esta consideración es importante en cuanto a las medidas que deben tomarse en la producción y colocación de mezclas modificadas con fibra Drymix.

Como se mencionó anteriormente, la mezcla posee un esqueleto granulométrico robusto que aporta rigidez a la estructura, no obstante el enfoque del diseño se basa en evaluar la resistencia al agrietamiento por fatiga. De ahí que el principal hallazgo del ensayo consiste en que se detectó que la adición de fibra favorece la resistencia a la deformación permanente medida mediante este método empírico y no genera un efecto negativo en el desempeño de la mezcla a la deformación.



#### 7.4.1 Comparación respecto a las especificaciones

Basándose en la propuesta de especificación elaborada en el LanammeUCR, para mezclas asfálticas de alto desempeño para rutas con altos volumen de tránsito se requiere del cumplimiento del siguiente parámetro respecto al ensayo de APA:

- Deformación plástica luego de 8000 ciclos de carga a  $60^{\circ}\text{C} \leq 2,5$  mm.

Por otra parte, según el Reporte 673 del National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), correspondiente al Manual de Diseño de Mezclas en Caliente se recomienda para un nivel de tráfico superior a 30 millones de ESALs, un valor máximo de deformación de 3 mm. Para la especificación anterior se debe tomar en cuenta que el ensayo debe ser realizado a la temperatura correspondiente al grado de desempeño PG de la zona donde se utilizará la mezcla asfáltica (temperatura superior del grado de desempeño) por lo que es de esperar que existan variaciones en la deformación obtenida al variar la temperatura.

Con base a la recomendación de la NCHRP, los 3 tratamientos experimentaron deformaciones menores a 3 mm. No obstante, según la especificación definida en el LanammeUCR, el criterio de aceptación para deformación medida en el ensayo de APA es más riguroso y para esta condición se obtuvo que la mezcla asfáltica correspondiente al Tratamiento T1 (sin modificar), no cumple con el parámetro especificado. Caso contrario ocurre con las mezclas modificadas con fibra Drymix, siendo el tratamiento T2 el que experimentó mayor resistencia a la deformación plástica.

## 8 ENSAYO DE CREEP DINÁMICO (FLOW NUMBER)

El ensayo de Flow Number corresponde a un ensayo alternativo al ensayo de Módulo Dinámico para evaluar la resistencia a la deformación permanente.

### 8.1 Descripción del ensayo de Flow Number

#### 8.1.1 Equipo

En la Figura a continuación se muestra el equipo utilizado para el ensayo de Flow Number.



**Figura 25.** Ensayo de Creep Dinámico a. Asphalt Mixture Performance Tester AMPT b. Espécimen posterior a la falla.

### 8.1.2 Especímenes de ensayo

La muestra consiste en mezcla asfáltica reproducida en el LanammeUCR, y compactada en el compactador giratorio Superpave (CGS). Las dimensiones de los núcleos es de  $100 \pm 2$  mm de diámetro y  $150 \pm 2,5$  mm de altura. Para cada ensayo se elaboran 3 núcleos extraídos de las pastillas del CGS en cada tratamiento.

### 8.1.3 Resumen del procedimiento

El ensayo de Creep Dinámico o Flow Number consiste en la aplicación de un pulso repetido de esfuerzo en compresión a un espécimen de mezcla asfáltica. Cada repetición de carga genera una deformación permanente en el espécimen, la cual es registrada por el equipo. Antes de iniciar el ensayo se le aplica únicamente una presión de contacto de 30 kN (sin confinamiento). La cámara se ambienta a una temperatura de  $58^{\circ}\text{C}$ , para efectos de la presente investigación y se inicia con la aplicación de los

pulsos de carga, los cuales consisten en un esfuerzo desviador de 600 kPa a cada segundo de carga. A partir de dicha información se genera una curva de deformación permanente contra ciclos de carga y finalmente se reporta el número de flujo como el valor de la curva en donde la tasa de deformación permanente acumulada registra el valor mínimo.

## 8.2 Resultados del ensayo de Flow Number

### 8.2.1 Energía de compactación

La elaboración de los especímenes del ensayo de Flow Number para alcanzar una altura de 150 mm comprende la configuración de energía de compactación mostrada en la **Tabla 21**.

**Tabla 21.** Energía de compactación para los especímenes del ensayo de Flow Number

Especimen	Giros de compactación Superpave		
	T1	T2	T3
1	27	38	59
2	22	42	61
3	22	35	53
<b>Giros promedio FN</b>	<b>24</b>	<b>38</b>	<b>58</b>
<b>Desviación estándar</b>	3	4	4
<b>Temperatura de compactación</b>	148 °C	158 °C	158 °C

Las tablas a continuación muestran un resumen de principales resultados del ensayo de Creep Dinámico para los tres tratamientos aplicados. Los resultados puntuales de los ensayos de Flow Number para los tres tratamiento aparecen detalladamente en el **Apéndice D**, en donde se adjunta el informe I-0021-15 emitido por el Laboratorio de Ensayos Dinámicos.

**Tabla 22.** Resultados del ensayo FN de la mezcla de control, sin contenido de fibra Drymix (T1)

Especimen	Flow Number (Ciclos)	Deformación permanente @ FN ( $1 \times 10^{-6}$ mm/mm)
1	159	18751
2	195	22812
3	200	19975
<b>Promedio</b>	<b>185</b>	<b>20513</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>22</b>	<b>2083</b>

**Tabla 23.** Resultados del ensayo FN de la mezcla modificada al 0,15 % de fibra Drymix (T2)

Espécimen	Flow Number (Ciclos)	Deformación permanente @ FN ( $1 \times 10^{-6}$ mm/mm)
1	162	21695
2	126	26098
3	151	25985
<b>Promedio</b>	<b>146</b>	<b>24593</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>18</b>	<b>2510</b>

**Tabla 24.** Resultados del ensayo FN de la mezcla modificada al 0,20 % de fibra Drymix (T3)

Espécimen	Flow Number (Ciclos)	Deformación permanente @ FN ( $1 \times 10^{-6}$ mm/mm)
1	154	24213
2	344	22798
3	127	23560
<b>Promedio</b>	<b>208</b>	<b>23524</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>118</b>	<b>708</b>

Como se observa en la **Tabla 24**, el tratamiento T3 alcanzó 208 ciclos antes de empezar a fluir, no obstante la variabilidad del ensayo es muy alta. Es posible identificar que el espécimen 2 de este tratamiento registro un número de ciclos de 344, mucho mayor a los especímenes 1 y 3. Estadísticamente, la probabilidad de que otro espécimen del tratamiento T3 alcance un número de ciclos de 344 o mayor, es menor al 10 %. Por tanto el espécimen se asocia a un valor atípico, fuera de los umbrales esperados. Por lo tanto, este dato fue descartado del análisis y se repitieron dos especímenes más de este tratamiento.

Adicionalmente, debido a que las tendencias obtenidas no fueron consistentes respecto a los demás resultados de la investigación, se repitieron de igual forma dos especímenes más para los tratamientos T1 y T2. Los resultados de los especímenes adicionales se muestran en la **Tabla 25**, mientras que los resultados puntuales se muestran en el **Apéndice G**, en donde se adjunta el informe I-0179-15 emitido por el Laboratorio de Ensayos Dinámicos.

Como se podrá observar en los resultados, los especímenes del tratamiento T3 que fueron repetidos desarrollaron capacidades muy similares respecto a las mostradas por los especímenes 1 y 3 del ensayo inicial.

**Tabla 25.** Resultados adicionales del ensayo FN de la mezcla de control, sin contenido de fibra Drymix (T1)

Espécimen	Flow Number (Ciclos)	Deformación permanente @ FN ( $1 \times 10^{-6}$ mm/mm)
4	115	26016
5	93	23637
<b>Promedio</b>	<b>104</b>	<b>24827</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>16</b>	<b>1682</b>

**Tabla 26.** Resultados adicionales del ensayo FN de la mezcla modificada al 0,15 % de fibra Drymix (T2)

Espécimen	Flow Number (Ciclos)	Deformación permanente @ FN ( $1 \times 10^{-6}$ mm/mm)
4	115	26239
5	186	25559
<b>Promedio</b>	<b>151</b>	<b>25899</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>50</b>	<b>481</b>

**Tabla 27.** Resultados adicionales del ensayo FN de la mezcla modificada al 0,20 % de fibra Drymix (T3)

Espécimen	Flow Number (Ciclos)	Deformación permanente @ FN ( $1 \times 10^{-6}$ mm/mm)
4	136	29512
5	143	27543
<b>Promedio</b>	<b>140</b>	<b>28528</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>5</b>	<b>1392</b>

### 8.3 Síntesis de resultados de Flow Number

En la **Tabla 28** se muestra un resumen de los resultados del ensayo de Flow Number.

**Tabla 28.** Resumen de los resultados del ensayo de Flow Number

Espécimen	Deformación permanente @ FN (1x10-6 mm/mm)			Flow Number (ciclos)		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
<b>Tratamiento</b>						
1	18751	21695	24213	159	162	154
2	22812	26098	-	195	126	-
3	19975	25985	23560	200	151	127
4	26016	26239	29512	115	115	136
5	23637	25559	27543	93	186	143
<b>Promedio</b>	<b>22238</b>	<b>25115</b>	<b>26207</b>	<b>152</b>	<b>148</b>	<b>140</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>2909</b>	<b>1929</b>	<b>2810</b>	<b>48</b>	<b>28</b>	<b>11</b>

Respecto a la **Tabla 28** se enumeran las siguientes conclusiones:

- El mayor número de ciclos promedio se registró para el tratamiento T1, en donde se reportaron 152 ciclos antes del flujo plástico. Posterior a este, para el tratamiento T2 los especímenes en promedio registraron 148 ciclos y finalmente, el tratamiento T3 alcanzó 140 ciclos.
- En cuanto a deformaciones medidas en el ensayo de Flow Number, los resultados son consistentes en cuanto a la tendencia mostrada para el número de flujo. El tratamiento T1 reportó la menor deformación, seguido por el tratamiento T2 y finalmente el tratamiento T3 con la mayor deformación.
- La mayor variabilidad reportada en los resultados de Flow Number se obtuvo en el tratamiento T1, tanto en el número de ciclos antes de flujo plástico como en los valores de deformación.

#### 8.4 Análisis de resultados de Flow Number

El ensayo de Flow Number permite evaluar mediante un método empírico la susceptibilidad a la deformación permanente de los especímenes. Tal y como se observa en los resultados, el tratamiento de la mezcla sin modificar es el que presenta un número de ciclos mayor respecto a los demás tratamientos. No obstante, para esta condición se presenta a su vez una variabilidad mayor entre muestras.

Para el análisis de las variaciones entre tratamientos, los resultados se sometieron a análisis ANOVA con un nivel de significancia de 0,05, con el objetivo de identificar diferencias significativas. Los resultados se muestran en la **Tabla 29**.

**Tabla 29.** Análisis ANOVA para los resultados de número de ciclos del ensayo de Flow Number

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	346	2	173	0,150	0,862	3,982
Dentro de los grupos	12663	11	1151			
Total	13009	13				

Como se aprecia en los resultados obtenidos, se concluye que estadísticamente no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Respecto a los valores de deformación permanente de cada tratamiento, la menor deformación se obtuvo en las mezclas sin modificar, no obstante mediante un análisis ANOVA (**Tabla 30**) es posible determinar que estadísticamente no existen diferencias significativas respecto a los demás tratamientos. Las diferencias que se aprecian entre mediciones se asocian a la variabilidad intrínseca del ensayo.

**Tabla 30.** Análisis ANOVA para los resultados de deformación del ensayo de Flow Number

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	38985446	2	19492723	2,961	0,094	3,982
Dentro de los grupos	72410966	11	6582815			
Total	111396411	13				

A nivel del proyecto, estos resultados permiten concluir que no existe una afectación de la fibra en cuanto a la resistencia a la deformación plástica medida a partir del ensayo de Flow Number.

#### 8.4.1 Comparación respecto a las especificaciones

Según el Reporte 673 del National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), correspondiente al Manual de Diseño de Mezclas en Caliente se recomiendan el cumplimiento de los parámetros mostrados en la **Tabla 31**.

**Tabla 31.** Requerimientos mínimos recomendados de número de flujo

Nivel de tráfico (Millones de ESALs)	Número de Flujo Mínimo (ciclos)
< 3	-
3 a < 10	53
10 a < 30	190
≥ 30	740

Para la clasificación anterior, las tres mezclas se ubican en una categoría entre 3 y 10 millones de ejes equivalentes. Dentro de esto se destaca que al no existir un aumento significativo entre tratamientos respecto al número de ciclos, se concluye que la fibra no genera ningún efecto en la resistencia del material ante el ingreso al flujo terciario.

## 9 ENSAYO DE RESISTENCIA RETENIDA A LA TENSIÓN DIAMETRAL (RRTD)

### 9.1 Descripción del ensayo RRTD

El ensayo de Resistencia Retenida a la Tensión Diametral se realiza con el objetivo de registrar la susceptibilidad al daño por humedad que presentan las mezclas. Mediante la prueba se mide la pérdida de capacidad a tensión del material al someterlo a un proceso de acondicionamiento. El ensayo de laboratorio se realiza basado en las normas AASHTO T283, ASTM D4867 y IT-MB-07.

#### 9.1.1 Equipo

La **Figura 26** muestra una imagen del equipo utilizado para el ensayo de Resistencia Retenida a la Tensión Diametral.





**Figura 26.** Equipo de Tensión Diametral

### 9.1.2 Especímenes de ensayo

Para realizar el ensayo se necesitan 6 especímenes compactados con el método de ensayo AASTHO T 312. Los especímenes deben tener una altura de 38 mm como mínimo hasta 76 mm como máximo y el diámetro debe ser de 97,8 como mínimo y de 105,4 como máximo.

### 9.1.3 Resumen del procedimiento

El ensayo consiste en inducir a los especímenes a un esfuerzo de tensión indirecta mediante la aplicación de una carga axial al diámetro del espécimen. Para un mismo tratamiento se realizan pruebas en condiciones secas y pruebas posteriores a un acondicionamiento en el cual se saturan los especímenes y se obtiene la capacidad de los mismos. Posterior a esto se cuantifica la diferencia entre las capacidades de los especímenes ensayados en un estado seco y los acondicionados.

Para la realización del ensayo los especímenes se compactan a un nivel de vacíos correspondientes al nivel de vacíos esperados en el campo, el rango usual está entre 6 y 8%. Los especímenes se dividen en

dos subgrupos que tengan un contenido de vacíos aproximadamente iguales. Un subgrupo se mantiene en condiciones secas mientras que el otro se acondiciona. La resistencia a la tensión de cada subgrupo se determina en la falla a la tensión diametral. El potencial al daño por humedad se indica como la relación de resistencias entre el subgrupo seco y el grupo acondicionado, siendo el valor de RRTD el porcentaje del promedio de los 3 especímenes fallados en condición húmeda entre el promedio de los 3 especímenes en condición seca.

## 9.2 Resultados del ensayo RRTD

### 9.2.1 Energía de compactación

La elaboración de los especímenes del ensayo de RRTD para alcanzar una altura de 100 mm comprende la configuración de energía de compactación mostrada en la **Tabla 32**.

**Tabla 32.** Energía de compactación para los especímenes del ensayo de RRTD

Especímen	Giros de compactación Superpave		
	T1	T2	T3
1	46	7	74
2	48	70	74
3	51	62	79
4	40	71	81
5	47	75	85
6	46	76	81
<b>Giros promedio MD</b>	<b>46</b>	<b>60</b>	<b>79</b>
<b>Desviación estándar</b>	4	27	4
<b>Temperatura de compactación</b>	148 °C	158 °C	158 °C

En las Tablas a continuación aparecen los resultados del ensayo de RRTD para los tres tratamientos del proyecto. Los resultados puntuales del ensayo RRTD para los tres tratamiento aparecen detalladamente en el **Apéndice E**, en donde se adjunta el informe I-1392-14 emitido por los Laboratorios de Infraestructura Vial del LanammeUCR.

**Tabla 33.** Resultados del ensayo RRTD para el tratamiento T1

No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Tipo de acondicionamiento	Saturación (%)	Carga máxima (N)	Esfuerzo a tensión (kPa)	RRTD (%)
4	7,0	Secas + 2 horas a 25 °C	-	20462	916	-
5	7,3		-	20240	906	
6	6,9		-	20503	919	
<b>Promedio</b>	<b>7,1</b>	-	-	<b>20402</b>	<b>914</b>	
<b>Desv. Est.</b>	<b>0,2</b>	-	-	<b>142</b>	<b>7</b>	
7	7,1	Saturación + 16 horas a -18 °C + 24 horas a 60 °C + 2 horas a 25 °C	72.9	17552	787	<b>91,4</b>
8	6,6		70	20196	906	
9	6,8		72.1	18092	812	
<b>Promedio</b>	<b>6,8</b>	-	<b>71,7</b>	<b>18613</b>	<b>835</b>	
<b>Desv. Est.</b>	<b>0,2</b>	-	<b>1,5</b>	<b>1397</b>	<b>63</b>	

**Tabla 34.** Resultados del ensayo RRTD para el tratamiento T2

No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Tipo de acondicionamiento	Saturación (%)	Carga máxima (N)	Esfuerzo a tensión (kPa)	RRTD (%)
4	6,6	Secas + 2 horas a 25 °C	-	21110	942	-
5	6,5		-	21036	943	
6	6,7		-	21520	962	
<b>Promedio</b>	<b>6,6</b>	-	-	<b>21222</b>	<b>949</b>	
<b>Desv. Est.</b>	<b>0,1</b>	-	-	<b>261</b>	<b>11</b>	
7	6,4	Saturación + 16 horas a -18 °C + 24 horas a 60 °C + 2 horas a 25 °C	77.5	19338	864	<b>96,3</b>
8	6,3		77.4	19859	889	
9	6,2		79.2	22119	989	
<b>Promedio</b>	<b>6,3</b>	-	<b>78,0</b>	<b>20439</b>	<b>914</b>	
<b>Desv. Est.</b>	<b>0,1</b>	-	<b>1,0</b>	<b>1478</b>	<b>66</b>	

**Tabla 35.** Resultados del ensayo RRTD para el tratamiento T3

No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Tipo de acondicionamiento	Saturación (%)	Carga máxima (N)	Esfuerzo a tensión (kPa)	RRTD (%)
4	6,8	Secas + 2 horas a 25 °C	-	23007	1024	-
5	7,2		-	22848	1017	
6	7,1		-	21483	956	
<b>Promedio</b>	<b>7,0</b>	-	-	<b>22446</b>	<b>999</b>	
<b>Desv. Est.</b>	<b>0,2</b>	-	-	<b>838</b>	<b>37</b>	
7	6,9	Saturación + 16 horas a -18 °C + 24 horas a 60 °C + 2 horas a 25 °C	72,5	18813	839	<b>88,1</b>
8	7,1		72,4	19630	875	
9	7,1		72,6	20847	926	
<b>Promedio</b>	<b>7,0</b>	-	<b>72,5</b>	<b>19763</b>	<b>880</b>	
<b>Desv. Est.</b>	<b>0,1</b>	-	<b>0,1</b>	<b>1024</b>	<b>44</b>	

### 9.3 Síntesis de resultados del ensayo RRTD

El ensayo de RRTD permite cuantificar la pérdida de capacidad de un espécimen ante la presencia de agua, por tanto representa un ensayo que permite la evaluación de la susceptibilidad de las mezclas al daño por humedad. En la **Tabla 36** aparece un resumen de los resultados más importantes del ensayo.

**Tabla 36.** Resumen de los resultados de RRTD para los tres tratamientos

Tratamiento	Condición	% Vacíos promedio	Esfuerzo promedio (kPa)	% RRTD
<b>T1</b>	Seca	7,1	914	<b>91,4</b>
	Acondicionada	6,8	835	
<b>T2</b>	Seca	6,6	949	<b>96,3</b>
	Acondicionada	6,3	914	
<b>T3</b>	Seca	7,0	999	<b>88,1</b>
	Acondicionada	7,0	880	

A partir de la tabla resumen se enumeran las siguientes conclusiones:

- El tratamiento T1, correspondiente a la mezcla de control mostró una capacidad retenida a la tensión diametral de 91,4 %. Por otro lado, para las mezclas modificadas se obtuvo porcentajes de 96,3 y 88,1 % para los tratamientos T2 y T3, respectivamente.
- El tratamiento T2 obtuvo un mejor desempeño ante la resistencia a la humedad, mientras que el tratamiento T3 fue el que mostró el resultado menor entre los tres tratamientos del proyecto.
- En cuanto a la elaboración de los especímenes, se aprecia que las pastillas de mezcla asfáltica correspondientes al tratamiento T2, los cuales contienen un 0,15 % de fibra Drymix, presentan un promedio de vacíos menor respecto a los tratamientos T1 y T3, lo cual es posible asociarlo a una mayor trabajabilidad de la mezcla.

#### 9.4 Análisis de resultados del ensayo RRTD

El ensayo de RRTD permite evaluar la susceptibilidad de las mezclas al daño por humedad. En los resultados obtenidos se observa que el tratamiento T2 muestra un mejor desempeño ante este fenómeno, no obstante para evaluar las diferencias obtenidas entre tratamiento, se realiza un análisis de ANOVA para un nivel de significancia de 0,05. Los resultados del análisis aparecen en la **Tabla 37**.

**Tabla 37.** Análisis ANOVA para los resultados del ensayo de RRTD

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	97	2	49	0,973	0,431	5,143
Dentro de los grupos	300	6	50			
Total	397	8				

Como se aprecia en los resultados a pesar de la diferencia en los porcentajes de RRTD, estadísticamente no se obtienen diferencias significativas. No obstante es evidente que existe un aporte en la resistencia al daño por humedad en las mezclas modificadas al 0,15 %, en donde a partir de este tratamiento se aumentó en un 5% el valor de RRTD. Para las cuales a su vez presentan un promedio de vacíos menor a los demás tratamientos, lo cual se relaciona a la mayor energía de compactación que se les aplica respecto a la condición sin modificar.

Como principal conclusión de este ensayo, se destaca el efecto que genera la fibra Drymix en diferentes porcentajes de modificación, donde el tratamiento modificado al 0,15 % muestra un mejor desempeño respecto al tratamiento sin modificar, y por otro lado, al trabajar con un porcentaje del 0,20 % de fibra, los resultados se tornan más variables y por tanto menos repetibles producto de una baja trabajabilidad, para finalmente generar mezclas con un menor desempeño respecto a la condición de control. Esta característica de mayor variabilidad producto de una aparente afectación a la trabajabilidad del tratamiento T3 es también evidente en el resto de los ensayos realizados.

#### 9.4.1 Comparación respecto a las especificaciones

La metodología Superpave especifica un valor de Resistencia Retenida a la Tensión Diametral del 80 %. Por su parte, según la propuesta de especificación elaborada en el LanammeUCR, para mezclas asfálticas de alto desempeño para rutas con altos volumen de tránsito se requiere del cumplimiento de dos parámetros respecto a este ensayo, a saber:

- Resistencia a la tensión diametral retenida  $\geq 85$  %
- Resistencia a la tensión diametral retenida a 25 °C  $\geq 700$  kPa

A partir de los resultados obtenidos es posible concluir que los tres tratamientos analizados cumplen con los valores especificados por la normativa costarricense y por tanto según lo que establece Superpave. Siendo el tratamiento de la mezcla modificada al 0,15 % de fibra el que mostró una mejor resistencia al daño por humedad. Es importante enfatizar que los problemas en el ensayo de RRTD se deben generalmente a problemas de afinidad entre el agregado pétreo y el asfalto, los materiales para el proyecto fueron seleccionados evitando problemas de afinidad, por lo que es posible concluir que la adición de la fibra no provoca una afectación negativa en mezcla asfáltica, en contraposición se detectó un aporte del 5 % en el valor de RRTD del tratamiento T2 respecto al tratamiento T1 correspondiente, no obstante para las condiciones de ensayo tal diferencia no es significativa estadísticamente.

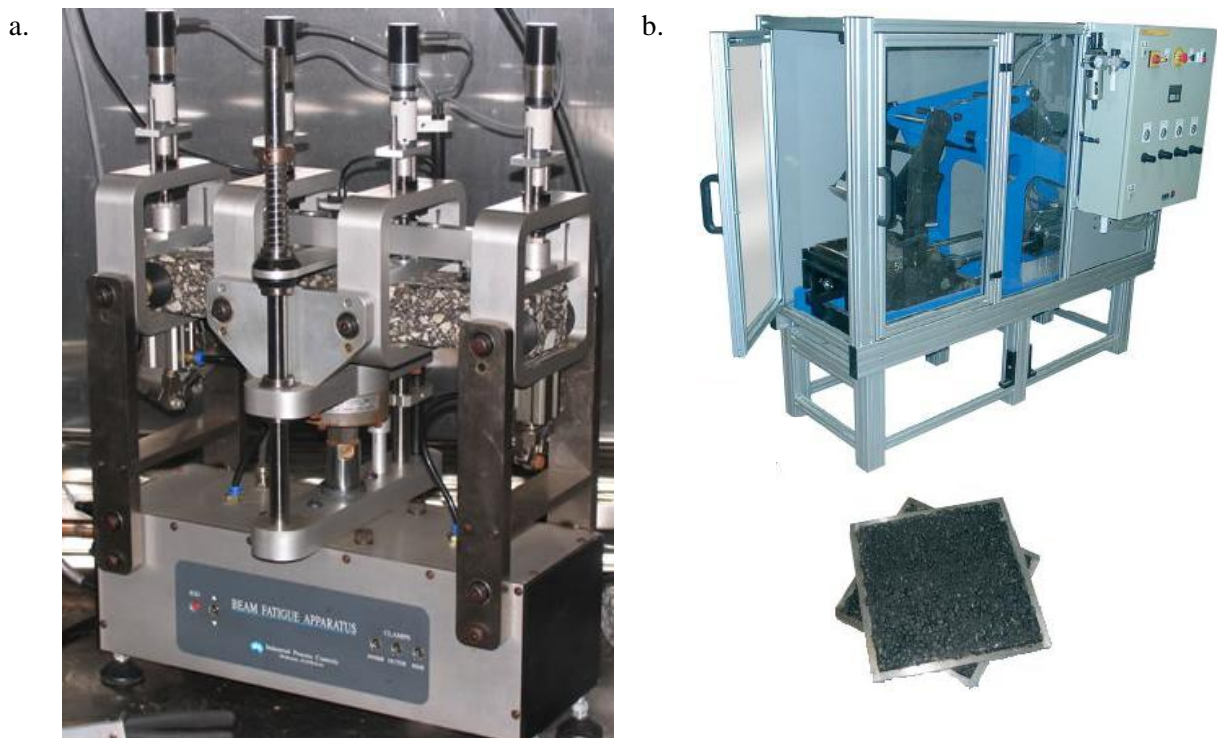
## 10 ENSAYO DE VIGA A FLEXOTRACCIÓN

El ensayo de viga a flexotracción se plantea con la intención de evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica al agrietamiento por fatiga, el cual se define como un fisuramiento longitudinal a lo largo de la huella (área de contacto entre la llanta del vehículo y el pavimento) producto de la aplicación reiterada de esfuerzos de tensión en la parte inferior de la capa asfáltica, debilitándola y llevándola progresivamente a la falla.

### 10.1 Descripción del ensayo de fatiga

#### 10.1.1 Equipo

En la **Figura 27** se muestra una imagen del equipo requerido para el ensayo de fatiga.



**Figura 27.** a. Marco de vigas de fatiga b. Compactador de vigas

### 10.1.2 Especímenes de ensayo

Para ejecución del ensayo de fatiga se requiere de 3 vigas de mezcla asfáltica en caliente, las cuales son extraídas de bloque un compactado con el método IT-ED-05. Los requisitos finales de dimensión para cada espécimen posterior a ser cortados, son de  $380 \pm 6$  mm de largo,  $50 \pm 6$  mm de altura y  $63 \pm 6$  mm de ancho.

### 10.1.3 Resumen del procedimiento

Una vez compactados los bloques se deben pre-acondicionar durante 5 días a  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Una vez hecho esto, se cortan las vigas según las dimensiones antes mencionadas.

Para la realización del ensayo se coloca la viga en el equipo y se enciende la cámara ambientadora para alcanzar una temperatura de  $20 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y se aplican 50 ciclos de carga a una deformación constante de 250 a 750 microstrain (deformación expresada en partes por millón). Posteriormente se determina la rigidez del espécimen al ciclo de carga número 50. Esta rigidez corresponde a un estimado de la rigidez inicial, la cual se utiliza como referencia para determinar la falla del espécimen. Para efectos de la presente investigación se realizaron ensayos a dos niveles de deformación de 400 y 600 microstrain. Se debe tener presente la consideración que los niveles de deformación seleccionados deben sobrepasar un mínimo de 10.000 ciclos de carga antes que la rigidez de la viga se reduzca en al menos un 50 % respecto a su valor inicial, lo cual representa la falla del espécimen para efectos del ensayo.

En la **Figura 28** se muestra un esquema del modo de carga del espécimen, en donde se aprecia que la viga se coloca sobre dos apoyos simples y en cada ciclo se aplican cargas en los tercios medios del espécimen, de manera que en la sección central de la viga, el material experimenta únicamente esfuerzos de flexión.

Posterior a la selección de los parámetros de entrada, se inicia con el ensayo. Para esto se activan los componentes de control y registro de datos para que los resultados de ensayo sean monitoreados y registrados en el intervalo seleccionado de ciclo de carga, asegurándose que el sistema de ensayo está operando correctamente. Cuando el espécimen experimente una reducción del más del 50 % de la rigidez, el ensayo finaliza.



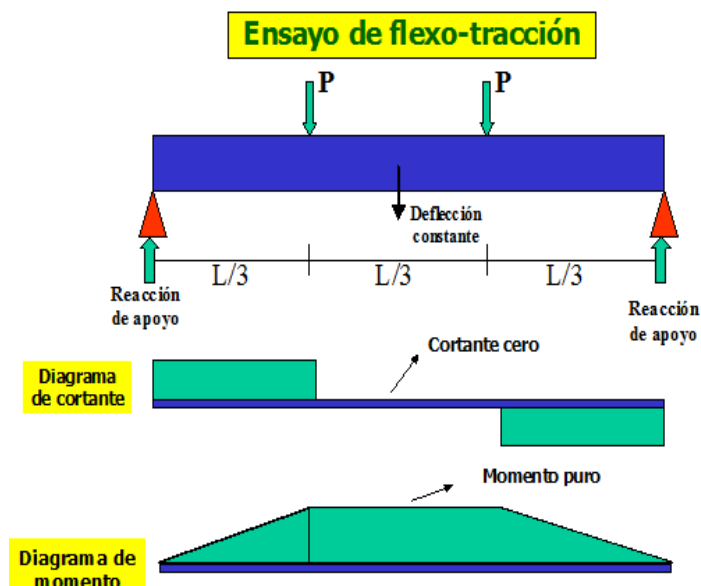


Figura 28. Esquema de carga del espécimen durante cada ciclo de carga

## 10.2 Resultados del ensayo de fatiga

En las Tablas que aparecen a continuación se muestra un resumen de los resultados de los ensayos de fatiga para los tres tratamientos analizados. Los resultados puntuales del ensayo de fatiga para los tres tratamientos aparecen detalladamente en el **Apéndice F**, en donde se adjunta el informe I-0176-15 emitido por los Laboratorios de Infraestructura Vial del LanammeUCR.

**Tabla 38.** Resultados del ensayo de fatiga a 600  $\mu$ strain de la mezcla de control, sin contenido de fibra Drymix (T1)

No. Espécimen	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Ángulo de fase (°)	Número de ciclos de fatiga
B1-V1	5420	2704	2884	20,8	44790
B1-V2	5578	2766	2950	21,8	38170
B1-V3	4709	2348	2507	17,3	39910
<b>Promedio</b>	<b>5236</b>	<b>2606</b>	<b>2780</b>	<b>20,0</b>	<b>40957</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>463</b>	<b>226</b>	<b>239</b>	<b>2,4</b>	<b>3432</b>

**Tabla 39.** Resultados del ensayo de fatiga a 400  $\mu$ strain de la mezcla de control, sin contenido de fibra Drymix (T1)

No. Espécimen	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Ángulo de fase (°)	Número de ciclos de fatiga
B2-V1	6184	4176	4458	17,1	162800
B2-V2	6601	3286	3503	15,9	280470
B2-V3	5489	2729	2914	20,2	393480
<b>Promedio</b>	<b>6091</b>	<b>3397</b>	<b>3625</b>	<b>17,7</b>	<b>278917</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>562</b>	<b>730</b>	<b>779</b>	<b>2,2</b>	<b>115348</b>

**Tabla 40.** Resultados del ensayo de fatiga a 600  $\mu$ strain de la mezcla modificada al 0,15 % de fibra Drymix (T2)

No. Espécimen	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Ángulo de fase (°)	Número de ciclos de fatiga
B1-V1	4707	2347	2504	19,9	54400
B1-V2	4971	2478	2641	19,0	69530
B1-V3	4321	2145	2291	21,5	35940
<b>Promedio</b>	<b>4666</b>	<b>2323</b>	<b>2479</b>	<b>20,1</b>	<b>53290</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>327</b>	<b>168</b>	<b>176</b>	<b>1,3</b>	<b>16822</b>

**Tabla 41.** Resultados del ensayo de fatiga a 400  $\mu$ strain de la mezcla modificada al 0,15 % de fibra Drymix (T2)

No. Espécimen	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Ángulo de fase (°)	Número de ciclos de fatiga
B2-V1	5522	2732	2911	20,5	356940
B2-V2	5643	2796	2986	16,6	299520
B2-V3	5215	2602	2778	12,7	318110
<b>Promedio</b>	<b>5460</b>	<b>2710</b>	<b>2892</b>	<b>16,6</b>	<b>324857</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>221</b>	<b>99</b>	<b>105</b>	<b>3,9</b>	<b>29299</b>

**Tabla 42.** Resultados del ensayo de fatiga a 600  $\mu$ strain de la mezcla modificada al 0,20 % de fibra Drymix (T3)

No. Espécimen	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Ángulo de fase (°)	Número de ciclos de fatiga
B1-V1	5341	2649	2829	19,3	25230
B1-V2	5153	2551	2723	17,9	48300
B1-V3	4905	2422	2610	18,4	20160
<b>Promedio</b>	<b>5133</b>	<b>2541</b>	<b>2721</b>	<b>18,5</b>	<b>31230</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>219</b>	<b>114</b>	<b>110</b>	<b>0,7</b>	<b>14999</b>

**Tabla 43.** Resultados del ensayo de fatiga a 400  $\mu$ strain de la mezcla modificada al 0,20 % de fibra Drymix (T3)

No. Espécimen	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Ángulo de fase (°)	Número de ciclos de fatiga
B2-V1	5974	2957	3156	18,6	300250
B2-V2	6033	3013	3216	15,7	288460
B2-V3	5427	2700	2883	16,3	467840
<b>Promedio</b>	<b>5811</b>	<b>2890</b>	<b>3085</b>	<b>16,9</b>	<b>352183</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>334</b>	<b>167</b>	<b>177</b>	<b>1,5</b>	<b>100335</b>

### 10.3 Síntesis de resultados de fatiga

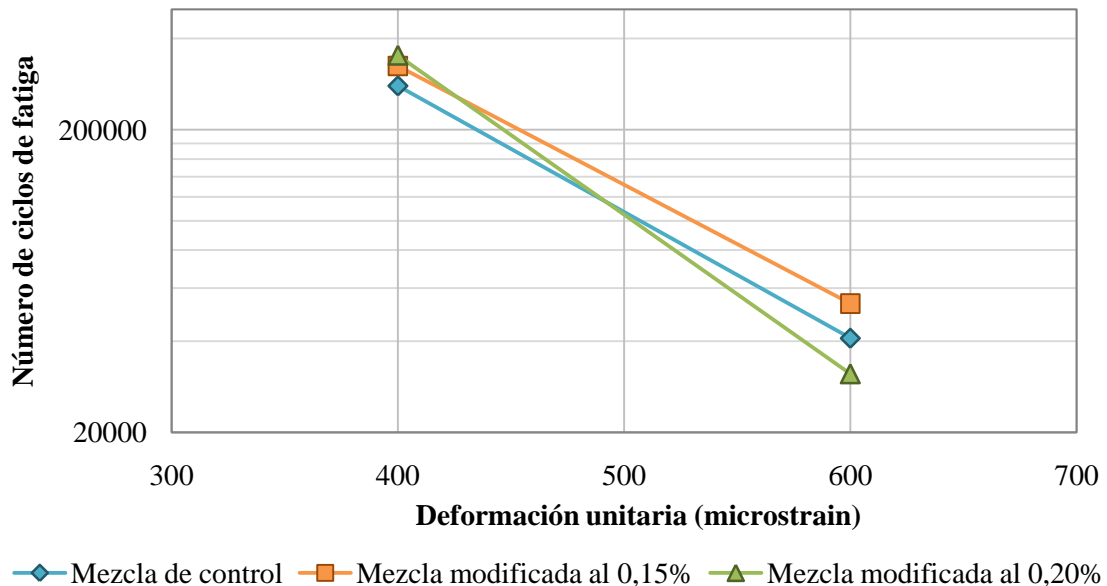
Los resultados del ensayo de fatiga se resumen en la **Tabla 44**, adicionalmente se grafican en la **Figura 29**. A continuación se mencionan los principales hallazgos:

- El número de ciclos de carga promedio que soportan las vigas de mezcla asfáltica sin contenido de fibra Drymix son de 40.957 repeticiones para un nivel de deformación de 600 microstrain y de 27.8917 repeticiones para un nivel de deformación de 400 microstrain.
- El número de ciclos de carga promedio que soportan las vigas de mezcla asfáltica con 0,15 % de contenido de fibra Drymix son de 53.290 repeticiones para un nivel de deformación de 600 microstrain y de 32.4857 repeticiones para un nivel de deformación de 400 microstrain.

- El número de ciclos de carga promedio que soportan las vigas de mezcla asfáltica con 0,20 % de contenido de fibra Drymix son de 31.230 repeticiones para un nivel de deformación de 600 microstrain y de 352.183 repeticiones para un nivel de deformación de 400 microstrain.
- Para el nivel de deformación de 600 microstrain se obtuvo mejores resultados en el tratamiento T2, para el cual se alcanzó un 30 % más de repeticiones respecto al tratamiento T1 (mezcla sin modificar). Por otro lado, el tratamiento T3 presentó el comportamiento más deficiente, reduciendo la resistencia a la fatiga en un 24 % respecto a la condición sin modificar.
- Para el nivel de deformación de 400 microstrain, el tratamiento T3 mostró el mejor desempeño, alcanzado un número de repeticiones de carga en un 26 % mayor que la mezcla sin modificar. Adicionalmente el tratamiento T2 reportó una resistencia a la fatiga un 16 % mayor que la condición sin modificar.
- La mayor variabilidad de resultados entre muestras de una misma mezcla se presenta en el tratamiento T3, donde se obtuvo coeficientes de variación de 28 y 48 % para las deformaciones de 400 y 600  $\mu$ strain, respectivamente.

**Tabla 44.** Resumen de número de ciclos a la fatiga para cada tratamiento

Tratamiento	T1		T2		T3	
	600 $\mu$ strain	400 $\mu$ strain	600 $\mu$ strain	400 $\mu$ strain	600 $\mu$ strain	400 $\mu$ strain
<b>Nivel de deformación</b>						
<b>Número de repeticiones de carga</b>	44.790 38.170 39.910	162.800 280.470 393.480	54.400 69.530 35.940	356.940 299.520 318.110	25.230 48.300 20.160	300.250 288.460 467.840
<b>Promedio</b>	40.957	278.917	53.290	324857	31.230	352.183
<b>Desv. Estándar</b>	3.432	115.348	16.822	29.299	14.999	100.335
<b>Coef. Variación</b>	8%	41%	32%	9%	48%	28%



**Figura 29.** Resultados de número de ciclos a la fatiga promedio para cada tratamiento

#### 10.4 Análisis de resultados del ensayo de fatiga

A nivel general, los resultados muestran consistencia respecto a los obtenidos en los otros ensayos de laboratorio, en tanto que se aprecia un aporte en el desempeño de la mezcla modificada al 0,15 % de fibra Drymix respecto a la mezcla sin modificar. Al comparar los resultados entre los tratamientos T1 y T2, se identifica una tendencia definida entre los datos, en donde la mezcla modificada con fibra al 0,15 % soporta un número de ciclos mayor a los dos niveles de deformación. No obstante al introducir el tratamiento T3 dentro del análisis, no se obtienen resultados consistentes (**Figura 29**). Para este tratamiento la variabilidad de los especímenes de la misma condición corresponde a la más alta entre tratamientos y sumado a la inconsistencia de los resultados, se descarta dicha condición dentro del análisis. Es importante destacar que en general los especímenes con contenidos de 0,20 % muestran una alta variabilidad, producto de una baja trabajabilidad respecto a las demás condiciones.

Para evaluar la aparente ganancia de resistencia al fisuramiento por fatiga del tratamiento T2 para el ensayo correspondiente a la deformación unitaria de 600  $\mu$ strain, se sometieron los resultados a un análisis ANOVA con un nivel de significancia de 0,05, los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 45**.

**Tabla 45.** Análisis ANOVA para los resultados del ensayo de fatiga a 600  $\mu$ strain

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	733362756	2	366681378	2,117	0,202	5,143
Dentro de los grupos	1039477467	6	173246244			
Total	1772840222	8				

Como se aprecia en los resultados de la prueba, estadísticamente no existen diferencias significativas entre los tratamientos. No obstante el promedio de la ganancia en cuanto al número de ciclos es del 30 % del tratamiento T2 respecto a tratamiento T1. Sin embargo la variabilidad tan elevada entre especímenes del mismo tratamiento no permite identificar diferencias importantes, lo cual representa una limitación del ensayo.

A su vez, se aplicó nuevamente el análisis ANOVA a los resultados para un nivel de deformación de 400  $\mu$ strain, en donde para esta condición el tratamiento T3 resistió en promedio la mayor cantidad de ciclos, los resultados aparecen a continuación.

**Tabla 46.** Análisis ANOVA para los resultados del ensayo de fatiga a 400  $\mu$ strain

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	8225234756	2	4112617378	0,509	0,625	5,143
Dentro de los grupos	48461253800	6	8076875633			
Total	56686488556	8				

Nuevamente de los resultados se concluye que no existen diferencias significativas entre los ensayos. A pesar de esta conclusión producto del análisis estadístico, las tolerancias para el análisis del ensayo son altas, puesto que se conoce que existe una alta variabilidad propia del ensayo, lo cual se asocia al procedimiento establecido de compactación, posibles imperfecciones en el espécimen, distribución de vacíos dentro de la viga, entre otros. Por lo tanto, aunque estadísticamente no se identifican diferencias

significativas, es evidente que existe un aporte en la resistencia al fisuramiento por fatiga a los dos niveles de deformación, en donde el tratamiento T2 continúa siendo consistente en la medida que presenta un mejor desempeño respecto a la mezcla sin modificar, siendo así que en la condición de deformación más crítica de 600 microstrain desarrolló en promedio un 30 % más de resistencia al fisuramiento y más de un 15 % para un nivel de deformación unitaria menor de 400 microstrain.

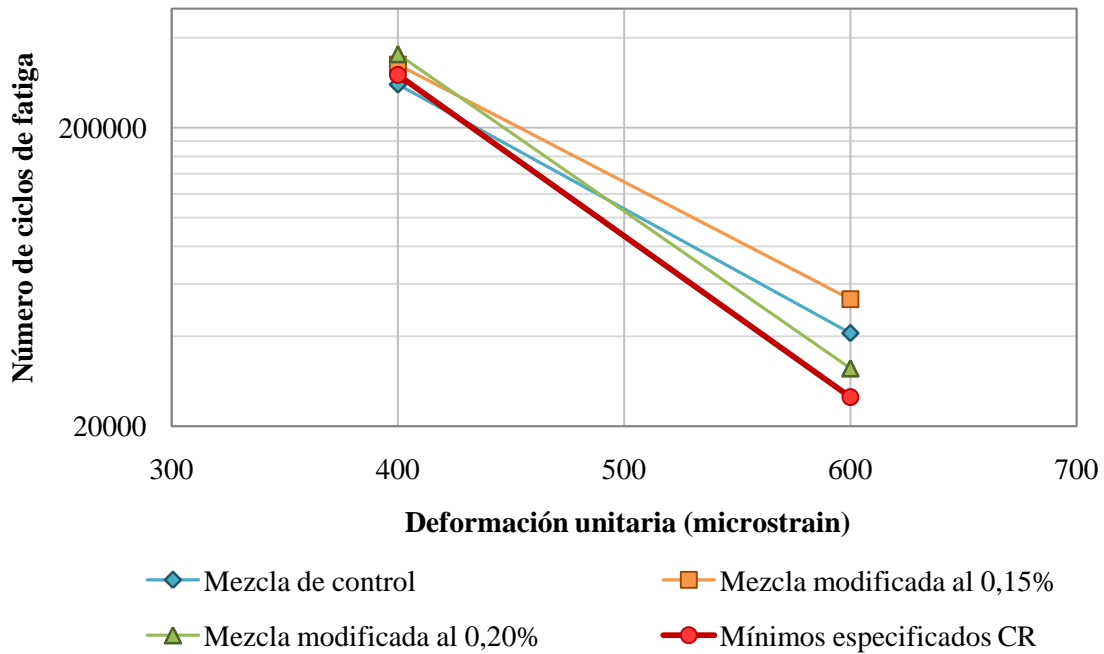
Finalmente debe destacarse que en el caso del tratamiento T3 se obtuvo un comportamiento inconsistente en cuanto a la tendencia de los datos las dos deformaciones de ensayo. Debido a esto y la variabilidad tan elevada para este tratamiento, no es posible obtener una conclusión valiosa y confiable respecto a la mezclas modificadas al 0,20 % de fibra Drymix y su desempeño a la fatiga.

#### 10.4.1 Comparación respecto a las especificaciones

La propuesta de especificación elaborada en el LanammeUCR, para mezclas asfálticas de alto desempeño para rutas con altos volumen de tránsito requiere del cumplimiento de los siguientes parámetros para el ensayo de fatiga:

- Cantidad de repeticiones para la falla por fatiga a 20°C para un nivel de deformación unitaria controlada de 400 E-6 mm/mm  $\geq 300.000$ .
- Cantidad de repeticiones para la falla por fatiga a 20°C para un nivel de deformación unitaria controlada de 600 E-6 mm/mm  $\geq 25.000$ .

Para esta especificación, gráficamente los resultados se muestran en la **Figura 30**, en donde se aprecia que para la deformación unitaria de 400 microstrain, la mezcla asfáltica sin modificar no cumple con el requisito mínimo especificado, mientras que las mezclas modificadas con fibra cumplen con l requisito propuesto. Para la deformación de 600 microstrain, todos los 3 tratamientos cumplen con la especificación. En términos del proyecto cabe destacar que los tratamientos modificados con la fibra Drymix cumplen con la especificación para ambos niveles de deformación, lo cual se traduce en una mejora en el desempeño del material.



**Figura 30.** Número de ciclos mínimos especificados en Costa Rica



## 11 CONCLUSIONES

Una vez completado el esquema experimental y los análisis individuales de cada uno de los ensayos, se destacan las siguientes conclusiones generales:

- 1) Al realizar la comparación entre los tres tratamientos del proyecto, los mejores resultados fueron obtenidos para la condición de mezcla asfáltica modificada con 0,15 % de fibra Drymix, la cual para todos los ensayos del proyecto cumplió con los valores especificados y recomendados de desempeño para rutas de alto volumen de tránsito. Este tratamiento mostró resultados consistentes a lo largo del esquema experimental.
- 2) Uno de los cambios en los diseños de mezcla iniciales se basó en el aumento de la temperatura de compactación de las mezclas modificadas con fibra. No obstante, pese al incremento de energía de compactación para estos tratamientos, se identificó que adicionalmente se requiere de una cantidad de giros significativamente mayor respecto a la mezcla sin modificar. Este hallazgo resulta muy valioso en el sentido que para lograr resultados consistentes en campo respecto a los obtenidos en laboratorio, se requiere de un estricto control en cuanto a las temperaturas y los procesos de compactación.
- 3) La mezcla asfáltica diseñada se compone de una configuración granulométrica robusta y un ligante asfáltico AC-30, ambos factores generan una estructura rígida y por tanto resistente a la deformación permanente, a pesar de que no haya sido diseñada para tal criterio. Respecto a los ensayos de desempeño para evaluar este efecto, mediante el ensayo de APA se identifica un aporte significativo de la fibra Drymix en la resistencia a la deformación permanente de la mezcla modificada al 0,15 %, lo cual es una condición inesperada debido al enfoque del diseño, pero positiva en cuanto a que se identificó una mejora en el desempeño de la mezcla a la deformación a partir de la modificación con fibra Drymix.
- 4) Adicionalmente, respecto a los ensayos de desempeño para la evaluación de la deformación permanente, el ensayo de Flow Number demuestra que para los materiales y la configuración del diseño del proyecto no existen diferencias significativas en los tratamientos en cuanto a la resistencia de los especímenes para ante el fenómeno de fluencia o flujo terciario. Ante esto se concluye que la modificación con fibra Drymix no genera un efecto negativo en la resistencia al flujo plástico.
- 5) El ensayo de Resistencia Retenida a la Tensión Diametral evidenció que existe un aporte de la fibra Drymix en la disminución de la susceptibilidad al daño por humedad, no obstante las

diferencias no son significativas estadísticamente, el tratamiento modificado al 0,15 % muestra un mejor desempeño respecto al tratamiento sin modificar aumentando la resistencia al daño por humedad en un 5%, mientras que al utilizar una mezcla modificada al 0,20 % de fibra, los resultados se tornan menos repetibles y con un menor desempeño respecto a la mezcla sin modificar asociado con problemas de trabajabilidad durante la elaboración de las muestras.

- 6) El ensayo de desempeño a la fatiga evidenció que existe un aporte de la fibra Drymix en la resistencia al fisuramiento, a pesar que las ganancias de resistencia de la mezcla modificada al 0,15 % respecto a la mezcla original no son estadísticamente significativas, se obtuvo resultados consistentes y adicionalmente con un mejor desempeño para la condición más crítica asociada al mayor nivel de deformación.
- 7) A nivel general, los resultados de los ensayos de la mezcla modificada al 0,20 % de fibra Drymix, mostraron una alta variabilidad. Este comportamiento está ligado a problemas de trabajabilidad durante los procesos de elaboración de los especímenes, los cuales adicionalmente requieren de una energía de compactación mayor respecto a los demás tratamientos, por tanto no es posible establecer un criterio confiable en cuanto al efecto de efecto de la fibra en tal dosificación.
- 8) La modificación de la mezcla asfáltica con fibra Drymix en un porcentaje de adición de 0,30 % provoca un incumplimiento en los parámetros volumétricos de la mezcla según la metodología Superpave, específicamente en el parámetro de vacíos llenos con asfalto. Se identificó que aumentos sensibles en los contenidos de fibra dentro de la mezcla asfáltica generan variaciones muy importantes a nivel de mezcla debido al incremento en la superficie específica de la fibra por cubrir y en consecuencia un mayor requerimiento de ligante, lo que su vez genera una reducción importante en la relación polvo asfalto. Todo esto se traduce en una mezcla inestable y con baja resistencia al corte.

## 12 RECOMENDACIONES

A continuación se plantean recomendaciones en función de la experiencia obtenida al finalizar el esquema experimental:

- 1) Debido al aumento en la energía de mezclado y compactación requerida para los tratamientos modificados con fibra Drymix, se recomienda que exista un control riguroso tanto en la planta como en campo durante los procesos de mezclado y colocación, los cuales garanticen una correcta incorporación de los materiales y compactación de la mezcla modificada con fibra Drymix.
- 2) Respecto al porcentaje de dosificación de la fibra Drymix, no se recomienda la adición de contenidos mayores a 0,15 % sobre el peso total de la mezcla asfáltica, puesto que los resultados obtenidos para mezclas modificadas con fibra Drymix en contenidos superiores a 0,15 % mostraron una alta variabilidad y evidenciaron una afectación negativa a la trabajabilidad de los materiales.
- 3) Se recomienda evaluar el desempeño a la fatiga para los tratamientos T1 y T2 para los diseños de mezcla del proyecto a un 5 % de vacíos, con el objetivo de medir el aporte de la fibra Drymix en mezclas con menor contenido de asfalto y por tanto más susceptibles al agrietamiento por fatiga.



PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE



## APÉNDICE A. DISEÑO DE MEZCLA SUPERPAVE



PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE



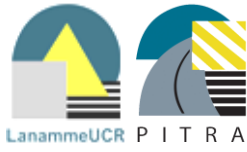
## APÉNDICE B. ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO



PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE



## APÉNDICE C. ENSAYO DE APA



PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE



## APÉNDICE D. ENSAYO DE FLOW NUMBER



PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE



## **APÉNDICE E. ENSAYO DE RESISTENCIA RETENIDA A LA TENSIÓN DIAMETRAL**





PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE



## APÉNDICE F. ENSAYO DE FATIGA



PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE



## **APÉNDICE G. REPETICIONES DEL ENSAYO DE FLOW NUMBER**