

Facultad de Ingeniería
Universidad de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Civil

**Calibración campo-laboratorio del proceso de daño por humedad en mezcla
asfáltica en caliente**

Trabajo de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Daniela García Hidalgo

Director del Proyecto de Graduación:

Luis Guillermo Loría Salazar

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

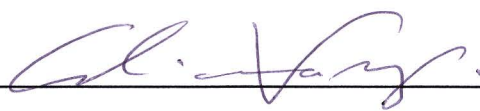
COMITÉ ASESOR



Director: Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D.



Asesor: Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph. D.



Asesora: Ing. Adriana Vargas Nordcbeck, Ph. D.



Estudiante: Daniela García Hidalgo

DERECHOS DE AUTOR

Fecha: 2016, junio, 28

La suscrita, **Daniela García Hidalgo**, cédula 1-1520-0943, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, número de carné **B02544**, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación **Calibración campo-laboratorio del proceso de daño por humedad en mezclas asfálticas**, bajo la Dirección del Ingeniero **Luis Guillermo Loria Salazar**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

DEDICATORIA

A mis padres, mi hermano, mi tita, porque no puedo describir la felicidad de poder compartir este logro con ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por darme el privilegio de tener una educación, quienes me han motivado siempre a tomar mis propias decisiones, y apoyarme y estar conmigo en cada paso de mi vida alentándome y queriéndome.

A mi hermano, por ser el sol de mi vida y siempre estar ahí motivándome a ser una mejor persona.

A todos los compañeros y amigos, con los que tuve la dicha de compartir, en especial a Sebas, Daniel, Mariam, Vivi, Yari, Migue, Erick "Negro", Andrey, Adrian, Kevin; ha sido toda una experiencia pasar todo este tiempo con ustedes y espero poder seguir compartiendo más recuerdos.

A Marco, amor gracias por todo el apoyo y darme una sonrisa y agarrarme la mano fuerte, cada vez que la necesitaba.

A mi comité asesor, Luis Guillermo Loría, Jose Pablo Aguiar y Adriana Vargas por su guía y paciencia durante todo el proceso, y estar dispuestos a compartir su conocimiento y experiencia.

Al Lanamme-UCR por darme la oportunidad de utilizar los recursos necesarios durante todo el proceso del proyecto.

A todo el personal del Lanamme-UCR, por la paciencia y capacitación brindada para todos los ensayos, en especial al técnico Jose Sanabria por toda la ayuda y la amistad brindada a lo largo de todo el proyecto.

Al Consejo Nacional de Viabilidad y a la Constructora Hernán Solís por toda la información y materiales brindados.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE FIGURAS.....	9
TABLA DE CUADROS	12
TABLA DE ABREVIACIONES Y NOMENCLATURAS	14
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación.....	1
1.1.1. Problema	1
1.1.2. Importancia	2
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo General.....	4
1.2.2. Objetivo Específico.....	4
1.3 Delimitación del problema.....	4
1.3.1. Alcances	4
1.3.2. Limitaciones	5
1.4 Antecedentes.....	5
1.5 Metodología.....	9
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Mezcla asfáltica.....	11
2.2 Diseño de mezcla asfáltica en caliente mediante el método Marshall.....	13
2.2. Daño por humedad	19
2.3 Compactador giratorio Superpave.....	23
2.4 Tensión diametral	25
2.5 Módulo de resiliencia	26
2.6. Información de sitio	30

CAPITULO 3. MARCO EXPERIMENTAL	36
3.1 Extracción de núcleos de campo.....	37
3.2 Materiales y Diseño de Mezcla.....	42
3.3. Compactación y acondicionamiento de especímenes	48
3.3 Tensión Diametral	50
3.4 Módulo Resiliente a la Tensión Diametral	52
CAPITULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	55
4.1. Extracción de núcleos.....	55
4.2. Tensión Diametral.....	57
4.3. Módulo Resiliente.....	71
CAPITULO 5. CONCLUSIONES	82
CAPITULO 6. RECOMENDACIONES	86
CAPITULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
ANEXOS	a
Anexo A. Datos adicionales de la zona de estudio.....	a
Anexo B. Información adicional sobre el diseño de mezcla utilizado en laboratorio	e
Anexo C. Resultados complementarios de los especímenes extraídos en campo.	g
Anexo D. Resultados complementarios al ensayo de Tensión Diametral a especímenes de campo	i
Anexo E. Resultados complementarios al ensayo de Modulo Resiliente a la Tensión Diametral a especímenes de campo	l
Anexo F. Resultados complementarios al ensayo de Tensión Diametral a especímenes de laboratorio	n
Anexo G. Resultados complementarios al ensayo de Modulo Resiliente a la Tensión Diametral de especímenes de laboratorio.....	p

Anexo H. Resultados complementarios al análisis estadístico realizado a los resultados de esfuerzo a la tensión diametral y Módulo Resiliente q

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de la metodología.....	9
Figura 2. Flujo de un ligante asfáltico según la temperatura.....	12
Figura 3. Comportamiento visco-elástico del asfalto	12
Figura 4. Compactador del método Marshall	14
Figura 5. Equipo de prueba para flujo y estabilidad Marshall	16
Figura 6. Representación de parámetros volumétricos de mezcla asfáltica.....	18
Figura 7. Esquema del funcionamiento del compactador Superpave.....	24
Figura 8. Espécimen sometido a la tensión diametral.....	26
Figura 9. Deformación mediante un ciclo de carga y descarga.....	27
Figura 10. Deformación permanente luego de varios ciclos de carga.....	28
Figura 11. Ruta Nacional 32	30
Figura 12. TPDA según la zona de control	31
Figura 13. Rango de precipitaciones media anual de la Ruta Nacional 32	32
Figura 14. Precipitación media anual de la Ruta Nacional 32	33
Figura 15. Análisis de mejora de la Ruta Nacional 32 en el año 2014 con respecto al año 2012	34
Figura 16. Estrategia recomendada de conservación vial para Ruta Nacional 32 en el año 2014	35
Figura 17. Diagrama del marco experimental del proyecto.....	36
Figura 18. Ubicación de núcleos extraídos	37
Figura 19. Ubicación de núcleos extraídos en Virilla.....	38
Figura 20. Ubicación de núcleos extraídos en el Zurquí.....	39
Figura 21. Ubicación de núcleos extraídos en Guápiles	40
Figura 22. Proceso de extracción de núcleos en la Ruta Nacional 32	41

Figura 23. Curva granulométrica utilizada en el diseño de mezcla de laboratorio.....	44
Figura 24. Curva granulométrica utilizada en el diseño de mezcla Zurquí.....	46
Figura 25. Curva granulométrica utilizada en el diseño de mezcla Virilla	47
Figura 26. Curva granulométrica utilizada en el diseño de mezcla de Guápiles	47
Figura 27. Compactador Giratorio Superpave utilizado	49
Figura 28. Equipo de falla a tensión diametral.....	51
Figura 29. Equipo para determinar el Módulo Resiliente a Tensión Diametral, UTM	52
Figura 30. Interfaz de entrada del software UTS003 1.41 Indirect Tensile Modulus Test..	53
Figura 31. Interfaz de resultados del software para determinar Módulo Resiliente.....	54
Figura 32. Precipitación media anual tramos estudiados	56
Figura 33. Esfuerzo a la tensión diametral de especímenes de campo	58
Figura 34. Resultados de Tensión Diametral de verificación de calidad de la muestra	61
Figura 35. Esfuerzo a la tensión diametral de especímenes de laboratorio	63
Figura 36. Regresión lineal del esfuerzo a la tensión diametral	65
Figura 37. Comparación de esfuerzo a la tensión diametral de núcleos del Virilla	66
Figura 38. Comparación de esfuerzo a la tensión diametral de núcleos del Zurquí.....	67
Figura 39. Comparación de esfuerzo a la tensión diametral de núcleos de Guápiles.....	68
Figura 40. Regresión lineal de la resistencia retenida a la Tensión Diametral	69
Figura 41. Módulo Resiliente a la tensión diametral de especímenes de campo	72
Figura 42. Módulo Resiliente a la Tensión Diametral de especímenes de laboratorio.....	74
Figura 43. Regresión de Módulo Resiliente a la tensión diametral	76
Figura 44. Comparación de Módulo Resiliente de núcleos del Virilla	77
Figura 45. Comparación de Módulo Resiliente de núcleos del Zurquí.....	78
Figura 46. Comparación de Módulo Resiliente de núcleos de Guápiles.....	79
Figura 47. Resistencia retenida de especímenes de laboratorio.....	80

Figura 48. Resumen de los resultados obtenidos con el ensayo de Tensión Diametral	83
Figura 49. Resumen de los resultados obtenidos del ensayo de Módulo Resiliente	83

TABLA DE CUADROS

Cuadro 1. Resumen de precipitación media anual en rutas primarias de Costa Rica.....	1
Cuadro 2. Número de golpes de compactación según condición de tránsito.....	15
Cuadro 3. Parámetros de aceptación del diseño Marshall	15
Cuadro 4. Parámetros de aceptación de VMA.....	17
Cuadro 5. Porcentaje de la resistencia a tensión indirecta dependiendo de la temperatura de ensayo	29
Cuadro 6. Ensayos aplicados a los agregados	43
Cuadro 7. Granulometría de la mezcla utilizada en laboratorio.....	44
Cuadro 8. Porcentajes de combinación de agregados	45
Cuadro 9. Temperaturas de trabajo de la mezcla asfáltica utilizada en laboratorio	45
Cuadro 10. Granulometría utilizada en el diseño de mezcla del Zurquí	45
Cuadro 11. Porcentajes de agregado utilizado en la mezcla asfáltica del Zurquí	46
Cuadro 12. Parámetros volumétricos de las mezclas utilizadas	48
Cuadro 13. Información de los núcleos extraídos	55
Cuadro 14. Promedios de los resultados del ensayo de Tensión Diametral a especímenes de campo.....	57
Cuadro 15. ANOVA para tensión diametral de especímenes de campo	58
Cuadro 16. Cuadro resumen de comparación mediante el Método de Tukey para esfuerzos a tensión diametral de especímenes de campo	59
Cuadro 17. Promedios de los resultados de ensayo de Tensión Diametral de verificación de calidad de la mezcla	60
Cuadro 18. Comparación de resultados de verificación de calidad con deterioro en campo	61
Cuadro 19. Resultados del ensayo a la tensión diametral a especímenes de laboratorio...	62
Cuadro 20. ANOVA para tensión diametral de especímenes de laboratorio	63

Cuadro 21. Cuadro resumen de comparación mediante el Método de Tukey para esfuerzos a tensión diametral de especímenes de laboratorio	64
Cuadro 22. Cuadro resumen de los resultados de ciclos necesarios a aplicar para alcanzar el deterioro	70
Cuadro 23. Promedio de los resultados del Módulo Resiliente a Tensión Diametral de especímenes de campo.....	71
Cuadro 24. ANOVA para Módulo Resiliente a la Tensión Diametral de especímenes de campo	72
Cuadro 25. Resumen de comparación mediante el Método de Tukey para Módulo Resiliente a tensión diametral de especímenes de campo	73
Cuadro 26. Módulo Resiliente a la tensión diametral de especímenes de laboratorio.....	74
Cuadro 27. ANOVA para Módulo Resiliente a la Tensión Diametral de especímenes de laboratorio.....	75
Cuadro 28. Resumen de comparación mediante el Método de Tukey para Módulo Resiliente a tensión diametral de especímenes de laboratorio	75
Cuadro 29. Cuadro resumen de los ciclos necesarios para alcanzar el Módulo Resiliente..	80
Cuadro 30. Resumen de los resultados obtenidos.....	84
Cuadro 31. Ejemplo de la variación de los porcentajes de aceptación según la precipitación	87

TABLA DE ABREVIACIONES Y NOMENCLATURAS

AASHTO: Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte, por sus siglas en inglés de *American Association of State Highway and Transportation Officials*.

ANOVA: Análisis de Varianza, por sus siglas en inglés de *Analysis of Variance*.

CONAVI: Consejo Nacional de Viabilidad.

CGS: Compactador giratorio SUPERPAVE.

VFA: Vacíos lleno de asfalto, por sus siglas en inglés de *Voids filled with Asphalt*.

Lanamme-UCR: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.

MAC: Mezcla asfáltica en caliente.

MOPT: Ministerios de Obras Públicas y Transportes.

MRTD: Módulo Resiliente a la Tensión Diametral.

RRTD: Resistencia Retenida a la Tensión Diametral.

SUPERPAVE: por sus siglas en inglés de *Superior Performing Asphalt Pavement*.

TD: Tensión Diametral.

VFA: Vacíos lleno de asfalto, por sus siglas en inglés de *Voids filled with asphalt*.

VMA: Vacíos en el agregado mineral, por sus siglas en inglés de *Voids in mineral aggregate*.

García Hidalgo, Daniela Carolina

Calibración campo-laboratorio del proceso de daño por humedad en mezcla asfáltica en caliente.

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.:

D.C.García H., 2016

xv, 88, [18];ils. col. - 36 refs.

RESUMEN

El daño por humedad tiene una gran influencia en el daño prematuro de las mezclas asfálticas en el país. El ensayo Lottman modificado (T-283) es el más utilizado para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas, sin embargo en el país el acondicionamiento aplicado a los especímenes, un ciclo a un baño a 60°C durante 24 h, puede no ser suficiente para predecir adecuadamente la susceptibilidad de la mezcla. Por lo que en el proyecto se pretende observar con cual acondicionamiento se puede relacionar el deterioro de especímenes de campo con especímenes compactados en laboratorio.

En el proyecto se extrajeron núcleos de campo de la Ruta Nacional 32, en segmentos que contaran con diferentes rangos de precipitaciones para evaluar el efecto de esta en la pérdida de resistencia de las mezclas asfálticas mediante ensayos de desempeño. Además se compactaron especímenes de mezcla asfáltica en laboratorio para aplicarle diversos ciclos de acondicionamiento de congelamiento/descongelamiento para poder encontrar con cual acondicionamiento se alcanzan los deterioros de los especímenes de campo. Se aplicaron dos ensayos de desempeño el Lottman modificado (AASHTO T-283) y Módulo Resiliente a la Tensión Diametral (AASHTO TP31-96). Se obtuvo para la condición más crítica son necesarios al menos 13 ciclos de acondicionamiento para poder igualar los esfuerzos a la tensión diametral y los módulos resilientes de los especímenes de campo. D.G.H.

DAÑO POR HUMEDAD, MÓDULO RESILIENTE, ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D.

Escuela

de

Ingeniería

Civil.

CAPITULO 1.INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

1.1.1. Problema

Una mezcla asfáltica debe ser diseñada y construida no solo para que resista las cargas del tránsito; sino también la acción del medio ambiente.

El daño por humedad provoca la mala interacción del ligante asfáltico con el agregado causando un daño prematuro en el pavimento lo cual produce grandes inversiones en mantenimiento, además de la pérdida de capacidad estructural de la mezcla. Debe tomarse en cuenta en los diseños del pavimento en especial en un país tropical con grandes porcentajes de humedad y altas precipitaciones como Costa Rica.

Actualmente las carpetas asfálticas en Costa Rica están expuestas a grandes periodos de precipitación en el año. Por ejemplo, en el Cuadro 1 se observa la precipitación promedio anual en la zona más crítica de las Rutas Primarias del país según informes del Instituto Meteorológico Nacional:

Cuadro 1. Resumen de precipitación media anual en rutas primarias de Costa Rica

Ruta Primaria	Precipitación media anual	Cantón
Ruta 1	3000 - 3500 mm	San Ramón
Ruta 2	4500 – 5000 mm	Golfito
Ruta 27	2500 - 3000 mm	Orotina
Ruta 32	4500 – 5000 mm	Sarapiquí - Pocosí

Fuente: Instituto meteorológico nacional, 2008

Se escogió como área de estudio la Ruta 32, como se puede observar en el Cuadro 1 en una de las que más está sometida a altos niveles de precipitación al año, lo que

provoca que se ocasionen problemas en la mezcla asfáltica como desprendimientos, ahuellamiento prematuro y fisuras en la calzada.

Para evaluar el daño por humedad en la carpeta asfáltica en el país actualmente se utiliza el método de Lottman modificado que corresponde a la norma AASHTO T283 con la variación de que el condicionamiento que se utiliza es un ciclo de humedecimiento/secado en lugar del de congelamiento/descongelamiento. Sin embargo los resultados del ensayo no están siendo representativos con la situación de campo en las carreteras, por lo que se pretende comparar el esfuerzo encontrado en especímenes de mezcla asfáltica extraídos de la carretera con el esfuerzo de especímenes compactados en laboratorio con diversos ciclos de acondicionamiento.

1.1.2. Importancia

Se ha evidenciado un incremento en la demanda por una buena infraestructura vial en el país, lo que genera la necesidad de mejorar los procesos de diseño de pavimentos. Así se hace clara la importancia de una constante investigación en el área para aumentar la resistencia estructural del pavimento. Además para generar desempeño no solo a cargas vehiculares, sino que sean resistentes a otros factores que producen un deterioro significativo.

La Ruta 32, popularmente denominada Carretera Braulio Carrillo conecta San José con Limón, donde se ubica el principal puerto comercial del país. Esto indica que es una de las vías más importantes del país, y que debería de contar con una buena capacidad estructural ya que si la ruta queda inhabilitada representa un paro económico para el país. A pesar de su importancia el deterioro de la ruta es evidente, y gran parte es causado por el daño por humedad ya que es una de las zonas con más precipitaciones en el país; además del gran tránsito pesado que la recorre diariamente, ya que según datos de tránsito del Ministerio de Obras Públicas y Transporte la ruta tiene un tránsito promedio diario (TPDA) de aproximadamente 35000 vehículos en su sección más transitada donde del 10 al 20% son pesados.

La durabilidad de un pavimento flexible depende de la estabilidad de la mezcla entre el agregado y el ligante asfáltico. Se ve afectada por diversos factores como procesos

constructivos, tránsito, cambios de temperatura, humedad; siendo este último un elemento importante por el clima que posee nuestro país al ser un país tropical con altos porcentajes de humedad y constantes precipitaciones.

Es de suma importancia poder predecir los efectos de la humedad en el pavimento, puesto que facilita la determinación del tiempo que se mantendrán los deterioros dentro de rangos aceptables para que no afecte la circulación de los usuarios.

El estudio pretende determinar si la cantidad de ciclos de humedecimiento y secado que se están utilizando actualmente son representativos para poder determinar el daño real del pavimento inducido por la humedad. Además utilizar ciclos de congelamiento/descongelamiento, que actualmente no se encuentra dentro del procedimiento convencional, para determinar si es un acondicionamiento más representativo para determinar el desempeño de la mezcla asfáltica contra el daño por humedad. De esta manera contribuir a la innovación de los ensayos de laboratorio para ampliar la vida útil de las carreteras del país, creando un control sobre las variables a los cuales se enfrentan los pavimentos para producir un mejor desempeño.

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Correlacionar el deterioro al daño por humedad en especímenes de campo con el daño inducido en laboratorio mediante ciclos de acondicionamiento.

1.2.2. Objetivo Específico

- Determinar el esfuerzo a la tensión diametral de núcleos de mezcla asfáltica extraídos de la Ruta Nacional 32, en tres diferentes secciones de control.
- Determinar el módulo de resiliencia a la tensión diametral de núcleos de mezcla asfáltica extraídos de la Ruta Nacional 32, en tres diferentes secciones de control.
- Determinar mediante muestras de mezcla asfáltica reproducidas en laboratorio cuantos ciclos de congelamiento/descongelamiento se necesitan para alcanzar el esfuerzo a la tensión diametral de muestras en sitio.
- Determinar mediante muestras de mezcla asfáltica reproducidas en laboratorio cuantos ciclos de congelamiento/descongelamiento se necesitan para alcanzar el módulo resiliente a la tensión diametral de muestras en sitio.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1. Alcances

- El proyecto se enfocó en el daño por humedad únicamente de la capa de mezcla asfáltica.
- Las muestras de sitio se extrajeron de la Ruta Nacional Braulio Carrillo (ruta 32).
- Se extrajeron 18 núcleos de mezcla asfáltica en al menos 3 tramos diferentes de la ruta 32.
- Todas las pruebas de laboratorio realizadas se ajustan a los procedimientos del AASHTO.
- Se realizaron ciclos de congelamiento/descongelamiento a mezclas vírgenes realizadas en laboratorio.

1.3.2. Limitaciones

- Solo se puede aproximar la carga que ha recibido la mezcla asfáltica, por lo que no se conoce específicamente que deterioro es resultado por agentes externos a la humedad.
- Solo se tienen datos de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona donde se extraen las muestras.
- La mezcla asfáltica utilizada para los especímenes de laboratorio es producida en la planta asfáltica de Hernán Solís, y es de diferente período de producción que la mezcla colocada en los sitios de estudio.
- Todas las secciones de mezcla analizada son de fechas de colocación diferente por lo que han sido sometidos a diferentes deterioros en campo.
- Las muestras a evaluar se diseñaron con el agregado utilizado para el diseño original, las propiedades del mismo pueden variar con el tiempo; por lo que pueden no ser totalmente representativos en el resto del país.
- Depende del espacio y disponibilidad del equipo del laboratorio del LanammeUCR.

1.4 Antecedentes

El daño que produce la humedad a la mezcla asfáltica es un tema altamente estudiado a nivel mundial donde el inicio de sus estudios se registra hasta al menos a 1920, donde se ha intentado implementar ensayos de laboratorio para aplicarle a las mezclas asfálticas de manera que prediga que tan susceptible es una determinada mezcla al daño por humedad. Fue hasta 1950 que se introdujo el primer ensayo "inmersión-compresión", sin embargo hasta 1985 se empezó a conocer el ensayo más utilizado en la actualidad bajo la norma AASTHO T283, Lottman modificado, el cual tuvo un antecesor en 1978 que se desarrolló la metodología del ensayo Lottman.

Hace aproximadamente 20 años se comenzó a investigar sobre modificaciones, que se le pueden hacer al diseño de mezcla para contrarrestar los efectos de humedad en el

pavimento, o modificaciones que se le pueden realizar a los ensayos de laboratorio para que los resultados sean más representativos en campo.

En los artículos y trabajos finales de graduación encontrados tratan sobre los daños que produce la humedad al pavimento y sobre los ensayos existentes de modelación del daño por humedad. Por ejemplo en el trabajo final de graduación "*Evaluación del daño por humedad en mezclas asfálticas típicas en Costa Rica, mediante el ensayo de la Rueda de Hamburgo*"; Granados (2012) expone sobre la evolución del daño por humedad en mezclas asfálticas en Costa Rica mediante el ensayo de la rueda de Hamburgo, realizando el ensayo sobre diferentes diseños de mezcla asfáltica y a diversas temperaturas para ver cuál era la que tenía mejor resultados en el deterioro del daño por humedad.

En el trabajo final de graduación "*Efectos de las Propiedades de los Componentes de la Mezcla Asfáltica sobre la Resistencia al Deterioro por Efecto del Agua*"; Sequeira (2004) investigó sobre las propiedades de la mezcla asfáltica con matriz de agregado grueso y mezclas densas sobre las respuesta en condiciones de humedad. Se hizo mediante ensayos de resistencia mecánica con diversas condiciones de carga y condicionamiento (humedad).

Actualmente la Unidad de Materiales y Pavimentos del Lanamme-UCR, se encuentra realizando una investigación del daño por humedad utilizando varios ciclos de congelamiento/descongelamiento, a diversas mezclas con diferentes fuentes de agregado y utilizando aditivos modificantes, agente antidesnudante líquido o cal. Por ejemplo las publicaciones:

- "*Evaluación del daño por humedad en mezclas asfálticas mediante el ensayo de módulo dinámico*"; donde se utilizó el ensayo de módulo dinámico para determinar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas, además se realizó el ensayo de Lottman modificado utilizando las mismas mezclas y mismos niveles de acondicionamiento (1,3 y 6 ciclos). Se concluyó que el ensayo de Lottman no refleja adecuadamente el desempeño en campo de la mezcla asfáltica, ya que con un ciclo de acondicionamiento que es el solicitado por el diseño todas las mezclas cumplen a pesar de que es conocido que la fuente de agregado utilizada tiende a presentar problemas de desnudamiento. Los resultados de módulo dinámico parecen ser más estrictos y más afín a la experiencia obtenida en campo. En lo

que si concuerdan ambos ensayos es que con el aumento de ciclos de condicionamiento se puede mejorar la correlación en el desempeño en campo. (Vargas et al.,)

- “*Evaluating moisture susceptibility of asphalt concrete mixtures through simple performance tests*”; donde se evaluó el daño por humedad a diferentes mezclas asfálticas en especímenes acondicionados utilizando el ensayo de Lottman modificado, y comparando los resultados con los ensayos de módulo dinámico y flujo. Se concluye que se puede requerir más de un ciclo de acondicionamiento en el ensayo de Lottman modificado para poder simular las condiciones de campo. (Vargas et al., 2015)

A nivel internacional se encontraron varios artículos relacionados sobre limitaciones que poseen los ensayos actuales, y lo variable que pueden ser los resultados llegando al punto de no ser representativos con la situación real; además de cómo se han tratado de implementar diversas técnicas y modelos más reales. A continuación se explican dos de los artículos más relevantes con respecto a lo que se plantea en el proyecto.

En el artículo “*Identification of parameters Related to Moisture Conditioning That Cause Variability in Modified Lottman Test*” los autores mediante el análisis de modelos matemáticos y computacionales; comprueban que el método de Lottman modificado a pesar de ser uno de los ensayos de laboratorio más utilizado para medir el desempeño de mezclas asfálticas al daño por humedad, no siempre da resultados acertados. Con el artículo se pretende demostrar que el ensayo AASTHO T283 da resultados variables ya que no toma en cuenta variables importantes de la mezcla y debería de utilizarse bajo ciertas limitaciones. (Kringos et al., 2009)

La publicación “*Moisture susceptibility of asphalt mixture*” consta de dos partes, en la primera parte expone sobre los diversos mecanismos que generan el daño por humedad en pavimentos así como que efectos que se producen en la carpeta asfáltica y que puede implementarse para reducir los daños. En segunda parte del artículo expone diferentes modelos matemáticos para realizar una representación aproximada sobre el daño por humedad en el pavimento. Además de una recopilación con las características más

representativas de los beneficios de los métodos físicos utilizados actualmente. (Carol et al 2009)

1.5 Metodología

En la Figura 1 se muestra en esquema la metodología a seguir para realizar el proyecto.

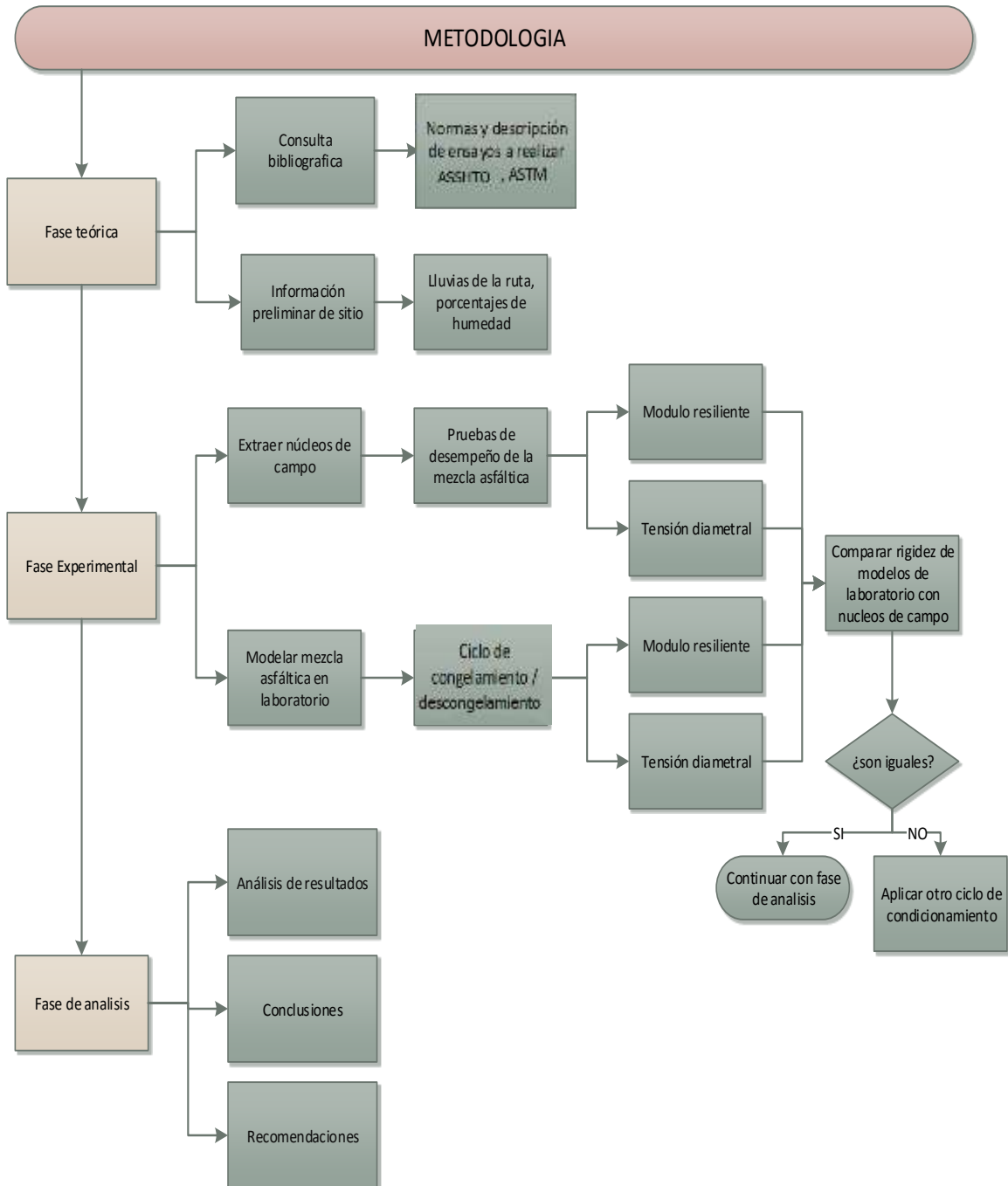


Figura 1. Diagrama de la metodología

La fase teórica cuenta de dos partes; la consulta bibliográfica donde se realiza una investigación exhaustiva sobre investigaciones, publicaciones y tesis realizadas acerca del daño por humedad en pavimentos, además de un análisis sobre las normas vigentes de laboratorio para la realización de los ensayos como lo son las AASHTO y ASTM.

Con respecto a la recopilación de información del sitio se realiza un análisis de la precipitación de la zona, lo cual se hizo con los datos de precipitación otorgados por el Instituto Nacional Meteorológico de las estaciones más cercanas al tramo donde se extraen los núcleos. Además se estimó la fecha de colocación de la carpeta asfáltica en los sitios a analizar, así como su diseño de mezcla respectivo.

Para fase experimental extrajeron núcleos de la carpeta asfáltica de la carretera Braulio Carrillo (Ruta Nacional 32) en tres tramos diferentes de la ruta, distribuyéndolo de manera que los tramos se encuentren antes, después y en el Parque Nacional Braulio Carrillo.

A los núcleos extraídos se le realizaron pruebas de laboratorio para evaluar su desempeño. Se hicieron los ensayos AASHTO T 283 para encontrar la resistencia a la tensión diametral y AASTHO TP31 – 96 para encontrar el módulo resiliente de las muestras de campo. Con esas pruebas se espera determinar la rigidez de la mezcla asfáltica de cada tramo.

Además se hicieron muestras en laboratorio con mezcla obtenida en planta, para mantener en lo posible las mismas características del sitio. Para su compactación se utilizó el Compactador Giratorio Superpave ya que es el método de compactación que ha resultado más representativo a la compactación en campo; a pesar que el diseño de mezcla de los especímenes es bajo la metodología Marshall.

Las muestras de laboratorio se sometieron de igual forma a los ensayos de AASHTO T 283 y AASHTO TP31 – 96, bajo el acondicionamiento de ciclos de congelado / descongelado para simular el daño por humedad de las pastillas de campo.

Por ultimo en la fase de análisis se realiza una recopilación de todos los resultados obtenidos en la fase teórica y experimental, para realizar un informe técnico final, con el análisis de resultados, recomendaciones y conclusiones. Además se realiza un análisis estadístico ANOVA y clasificación de datos mediante el Método de Tukey para respaldar los resultados obtenidos.

CAPITULO 2.MARCO TEÓRICO

2.1 Mezcla asfáltica

Las mezclas asfálticas están conformadas por agregados minerales gruesos/finos, polvo mineral y ligante asfáltico, los valores aproximados a utilizar son 90%, 5% y 5% respectivamente sin embargo pueden variar dependiendo de la mezcla; además puede contener fibras o polímeros como aditivos. Los últimos dos componentes mencionados son los que más influyen en la calidad de la mezcla y su costo final.

El diseño de una mezcla asfáltica consiste básicamente en la selección del agregado y contenido de asfalto, de manera que se logren las propiedades deseadas en la mezcla y los requisitos específicos de cada proyecto. Las propiedades más relevantes en una mezcla son; estabilidad, durabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia al fracturamiento por bajas temperaturas, resistencia al daño por humedad, resistencia al deslizamiento y trabajabilidad. (Garnica et al, 2006)

El agregado es como el esqueleto del mezcla asfáltica y es el que de aporta rigidez y resistencia las aplicaciones de carga repetidas, los de textura rugosa y angulares producen más resistencia que los redondos y de textura lisa. La resistencia al corte del agregado es la característica más importante de la mezcla asfáltica en caliente.

Los ligantes asfálticos son un material viscoso que en las mezclas asfálticas de color café oscuro a negro, que lo constituye principalmente bitúmenes los cuales se obtiene de la naturaleza mediante la destilación del petróleo. Se utiliza para proporcionar una unión y cohesión entre los materiales de la mezcla.

Según Garnica et al (2006) las características más importantes del ligante asfáltico son;

- La susceptibilidad a la temperatura: es la característica más importante ya que conforme disminuye la temperatura se vuelven más rígidos y frágiles, por eso se debe tener mucho cuidado a que temperatura se trabaja los ligantes o las mezclas asfálticas ya que pueden producir análisis erróneos. En la Figura 2 se puede apreciar la diferencia de descarga de un asfalto a una temperatura de 60°C y

25°C, donde en la primera va a fluir más rápido (1 hora), en cambio a 25°C le puede tomar hasta 10 horas.

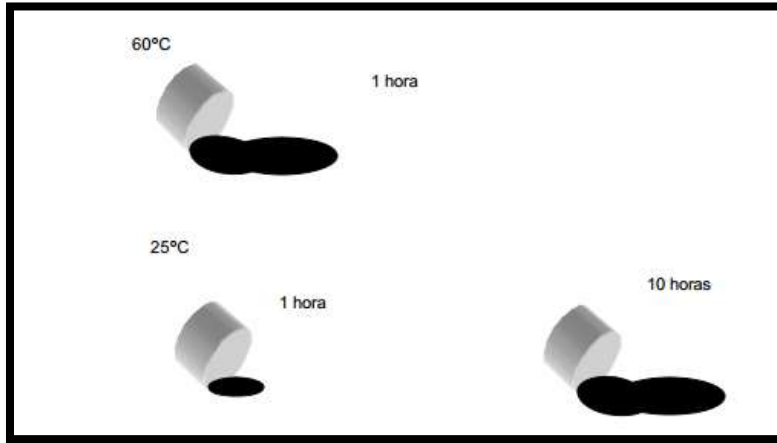


Figura 2. Flujo de un ligante asfáltico según la temperatura

Fuente: Instituto Mexicano de Transporte, 2006

- La visco-elasticidad: Como resultado del comportamiento de sus componentes, las mezclas asfálticas presentan un comportamiento visco-elástico, el cual como se mencionó anteriormente varía según la temperatura, como se observa en la Figura 3.

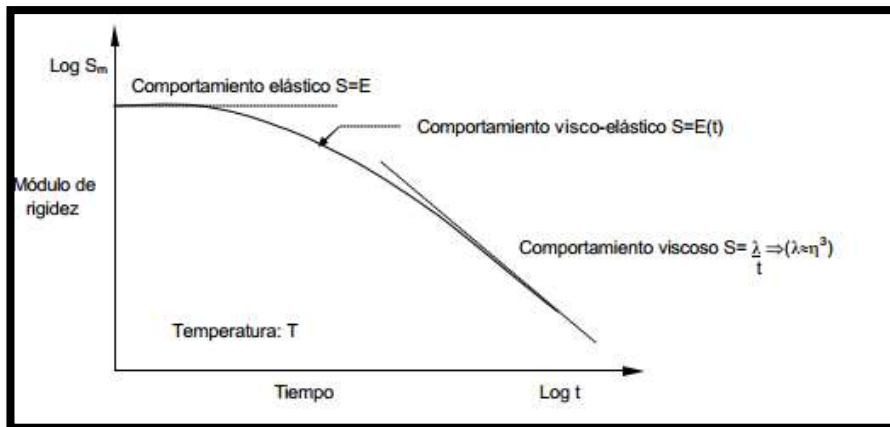


Figura 3. Comportamiento visco-elástico del asfalto

Fuente: Instituto Mexicano de Transporte, 2006

- El envejecimiento: el asfalto tiende a cambiar sus propiedades con el tiempo debido a la pérdida de volátiles (pérdida de componentes más livianos), y oxidación. El proceso de oxidación se da porque el asfalto está compuesto por moléculas orgánicas las cuales reaccionan con el oxígeno produciendo que el asfalto se rigidice y se vuelva más duro y frágil, proceso que se acelera a altas temperaturas.

Los agregados se aglomeran con el ligante asfáltico y mezclados de tal manera que quedan cubierto por un película uniforme de asfalto, depende de sus proporciones es que se determinan las propiedades físicas de la mezcla, y así su comportamiento funcional en el pavimento ya que se le atribuye gran parte de la capacidad soportante. (Bojorque, 2012)

Los factores más importantes que influyen en el comportamiento y las variables de la misma son la naturaleza del cemento asfáltico, contenido de asfalto, porcentaje de vacíos, granulometría, forma y textura del agregado y contenido de finos. (Garnica et al, 2006)

Los tipos básicos de deterioros de las mezclas son la deformación permanente, fisuración por fatiga y fisuración por bajas temperaturas.

2.2 Diseño de mezcla asfáltica en caliente mediante el método Marshall

El método de Marshall fue desarrollado por Bruce Marshall en 1939, se utiliza bajo la norma AASHTO T 245 "Resistencia a la fluencia plástica de mezclas bituminosas utilizando el aparato de Marshall".

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½") y 102 mm (4") de diámetro; con agregado de un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor, sin embargo se hizo una modificación para que se pudieran usar tamaño máximo de 38 mm (1 ½ pulg). Los dos aspectos principales del método Marshall son la densidad y análisis de vacíos, y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. Este método de diseño no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para ligante asfáltico

El diseño de mezcla con el método Marshall consiste en el siguiente procedimiento:

1. Selección del agregado
2. Selección del ligante asfáltico, actualmente en Costa Rica sólo se maneja el AC-30 y es distribuido por RECOPE.
3. Preparación de muestras (mezclado y compactado):

Usualmente se preparan 5 mezclas con diferentes porcentajes de asfalto (donde se hace una variación por encima y por debajo del contenido de asfalto estimado mediante experiencia y conocimiento de los agregados, entre 0,5% - 1%), con 3 especímenes cada mezcla.



Figura 4. Compactador del método Marshall

La compactación de especímenes se realiza mediante una serie de golpes sobre ambas caras con el martillo Marshall (Figura 4) el cual tiene un peso de 4536 g en una altura de

457.2 mm. La elección de número de golpes se hace según el propósito y el tránsito esperado de la mezcla que se está diseñado, como se observa en el

Cuadro 2.

Cuadro 2. Número de golpes de compactación según condición de tránsito

Condición de tránsito que resultan en un ESALs de diseño (millones)	Alto	Medio	Bajo
	>10 hasta 30	Entre 0,3 y 10	<0,3
Número de golpes en cada cara del espécimen de ensayo	75	50	35

Fuente: Especificación AM 2001

Después de compactada la muestra, se debe de comprobar que cumpla los parámetros establecidos en la siguiente figura de manera que se verifique que el porcentaje de asfalto utilizado sea el óptimo.

Cuadro 3. Parámetros de aceptación del diseño Marshall

Criterios para mezcla del Método de Marshall		Clasificación del tránsito					
		Tránsito Pesado		Transito Medio		Transito Liviano	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
Numero de golpes		75		50		35	
Estabilidad	N	8006	-	5338	-	4450	-
Flujo	mm	8	14	8	16	8	20
% Vacíos	%	3	5	3	5	3	5
VFA	%	65	75	65	78	70	80
P/A	%	0,6	1,3	0,8	1,6	0,8	1,6

Fuente: CR-2010

4. Determinación de la estabilidad y flujo Marshall

Para realizar esta prueba se debe acondicionar el espécimen en un baño María a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ de 30 a 40 minutos. Luego se coloca adecuadamente centrado en la mordaza del equipo de carga (Figura 5).



Figura 5. Equipo de prueba para flujo y estabilidad Marshall

El equipo le aplica una carga de prueba al espécimen con una deformación constante de 50.8 mm por minuto, hasta que se alcance la falla, el punto de falla se define por la lectura de carga máxima obtenida. La estabilidad es la carga máxima que soporta un espécimen hasta que falle, en el Cuadro 3 se observa cuáles son los valores mínimos de estabilidad para la aceptación de la muestra según el número de golpes de compactación.

El flujo se da durante la realización de la falla, se debe de medir la deformación que el espécimen presenta y se anota en el momento que se alcanza la carga máxima. La

diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0.25 mm es el valor del flujo Marshall, en el Cuadro 3 se observa cuáles son los rangos de flujo para la aceptación de la muestra según el número de golpes de compactación.

5. Cálculos de los parámetros volumétricos:

La combinación de agregados con el ligante asfáltico debe de cumplir ciertos parámetros volumétricos para garantizar el buen desempeño de la mezcla asfáltica. En el Cuadro 4 se observa la especificación de los parámetros volumétricos en función a la condición de tránsito. En la Figura 6 se observa una representación gráfica de los parámetros volumétricos.

- Vacíos en el agregado mineral (VMA): Son los espacios que quedan entre las partículas de agregado compactado, representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y de aire necesarios en la mezcla. En el Cuadro 4 se observa la especificación de los porcentajes mínimos según el tamaño máximo nominal del agregado.

Cuadro 4. Parámetros de aceptación de VMA

Tamaño máximo en mm	VMA		
	Vacíos de diseño		
	3	4	5
4,75	16	17	18
9,5	14	15	16
12,5	13	14	15
19	12	13	14
25	11	12	13
37,5	10	11	12

Fuente: CR-2010

- Vacíos Rellenos de Asfalto (VFA): Es el porcentaje de vacíos entre agregado (VMA) que son rellenados con asfalto en la mezcla compactada.
- Vacíos de aire: El porcentaje de vacíos de aire se utiliza como parámetro inicial de diseño, se determina que el 4% es el que tiene mejor desempeño en carpetas asfálticas. A mayor porcentaje de vacíos más permeable es la capa lo que produce deterioros por acción del aire y agua, y bajos vacíos pueden generar exudación de asfalto en la mezcla causando problemas de fricción.
- Relación polvo-asfalto (P/A): es la relación en peso del agregado más fino que la malla 200 y la cantidad de asfalto no absorbido. Un valor muy alto puede producir un efecto rigidizador en la mezcla lo que la hace susceptible a fatiga, y bajos valores indica mayor contenido de asfalto lo que conlleva a mezclas inestables.

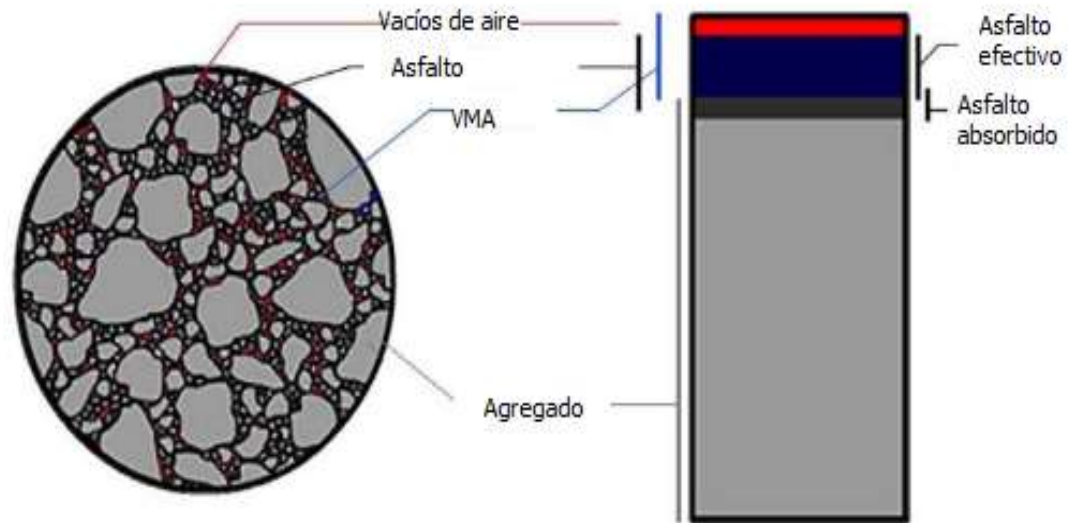


Figura 6. Representación de parámetros volumétricos de mezcla asfáltica

Fuente: Minaya González, 2010

2.2. Daño por humedad

El daño por humedad en pavimentos es definido como el deterioro de la capacidad estructural del pavimento por la presencia de humedad ya sea en estado líquido o estado gaseoso.

El daño por humedad empieza con el transporte de agua al interior de la estructura del material y alcanza la interfaz de interacción del agregado con el ligante, por lo tanto conduce a que se produzcan cambios en su composición disminuyendo considerablemente la capacidad de carga. Según Carol-Spindel y Alvarez-Lugo (2011) el agua se puede transportar en la mezcla asfáltica mediante: (i) infiltración de agua líquida desde la superficie del pavimento hacia el interior de la mezcla por medio de vacíos interconectados, (ii) difusión de agua líquida o vapor de agua a través de los componentes de la mezcla, o (iii) ascensión capilar de agua líquida proveniente de la superficie inferior de la mezcla.

Las manifestaciones de daño por humedad producidas por la pérdida de la unión adhesiva entre el ligante asfáltico y el agregado mineral se presentan a continuación:

- **Desnudamiento:** es la física separación del ligante asfáltico y el agregado debido a la pérdida de adherencia en la interface de los materiales. Este tipo de deterioro se inicia en la parte inferior de la carpeta asfáltica y avanza progresivamente hasta la superficie (Carol et al, 2008). Es un deterioro difícil de identificar ya puede producir deterioros como ahullamiento, grietas prematuras (fatiga o longitudinales), exudación y baches.
- **Desprendimiento del agregado:** es el desprendimiento de las partículas de agregado en la superficie de la mezcla asfáltica por el paso de vehículos, lo que provoca ahuellamiento y baches prematuros en la carpeta asfáltica. (Carol et al, 2008).

La adhesión entre el asfalto y el agregado puede verse afectada por composición química del asfalto y agregado, la viscosidad del asfalto, la textura de los agregados, la porosidad de los agregados, el contenido de arcilla del agregado, el contenido de humedad de los agregados y la temperatura de mezclando.

A continuación se presentan los 4 principales mecanismos que podrían explicar una falla de la adhesión del ligante asfáltico con el agregado según Rusell Hicks (1991):

- Mecánico: se relaciona con las características de la superficie del agregado, ya que se une al ligante asfáltico por sus irregularidades y poros mediante la fuerza de fricción; sin embargo la humedad puede provocar una interferencia con la penetración del asfalto con el agregado.
- Químico: se da producto de una reacción química cuando el asfalto entra en contacto con el agregado, a mayor acidez de la superficie del agregado se da una menor adhesión con el asfalto.
- Tensión de adhesión: la tensión entre el ligante y los agregados suele ser menor a la del agregado con el agua; por lo que si los tres están en contacto el agua tiende a desplazar el asfalto, lo que produce una posible separación del ligante con el agregado.
- Orientación molecular: Cuando las moléculas del asfalto están en contacto con el agregado tienden a orientarse en relación con los iones de la superficie de los agregados, sin embargo cuando entra en contacto con el agua que son moléculas polares puede crear vínculos más débiles entre el agregado y el asfalto.

El daño por humedad también se puede dar por una pérdida de cohesión, falla asociada a la estructura interna del asfalto (pérdida de rigidez de la mezcla), que puede llevar a que la mezcla asfáltica se haga susceptible a fisuramiento prematuro y daños por presión de poros.

Usualmente una falla por adhesión ocurre cuando la capa de ligante que cubre el agregado es delgada, y una falla por cohesión ocurre contrariamente cuando la capa de ligante que cubre el agregado es gruesa. Sin embargo las fallas por adhesión son más comunes en el daño por humedad. (Carol et al., 2008)

Según Bausano et al (2006) existen 6 factores de falla que se les asociado al daño por humedad, los cuales pueden darse simultáneamente.

- Separación: es la separación de la película de asfalto de la superficie del agregado, por una pequeña capa de agua sin un rompimiento de la película de asfalto.
- Desplazamiento: Se diferencia del factor de la "separación" ya que la película de asfalto se rompe, y el agua se introduce y desplaza el asfalto del agregado.
- Emulsión espontánea: Ocurre debido a una emulsión invertida entre el agua y el asfalto, el agua se difunde en el asfalto uniéndose al agregado causando una separación entre el asfalto y el agregado. Emulsificantes como arcillas y aditivos pueden acelerar el proceso.
- Presión de poro: Se puede producir en una mezcla asfáltica debido al agua o al vapor atrapado en la mezcla asfáltica que viaja en los vacíos interconectados. En una mezcla permeable el agua puede fluir, sin embargo en uno impermeable se incrementa la presión de poro pudiendo sobrepasar las resistencia a la tracción de una mezcla y separar el asfalto del agregado creando micro-grietas.
- Socavación: Ocurre en la superficie del pavimento; ya que es el resultado de las llantas de los vehículos cuando transitan en un pavimento saturado, generando presiones delante de la llanta y succión detrás de la misma.
- Efectos ambientales: Factores como la temperatura, aire y agua tiene efectos perjudiciales en la durabilidad de la mezcla asfáltica. Sin embargo, son muy difíciles de controlar y predecir.

Según Solaimanian et al (2003), los ensayos de laboratorio más utilizados para medir el desempeño del daño por humedad en la mezcla asfáltica compactada se explican a continuación:

1. Método de inmersión-compresión (AASHTO T 165):

Se realiza bajo la norma AASTHO T-165 "*Método estándar para la evaluación del daño por humedad en especímenes compactados mediante la compresión uniaxial*". Es de las primeras pruebas para determinar la sensibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica a especímenes de diámetro de 100 mm, se realiza la prueba a 3 especímenes de control y 3 especímenes acondicionados a un baño de agua a 60° C durante 24 horas y 4 horas a 25°C. Luego se fallan a compresión uniaxial, y se calcula la resistencia retenida a la compresión uniaxial para determinar el deterioro al daño por humedad.

2. Método de la tensión indirecta / modificado de Lottman (AASHTO T283):

El método modificado de Lottman se realiza bajo la norma T – 283 "*Resistencia de la mezcla asfáltica compactada al daño por humedad inducido*". Actualmente es el método de laboratorio más utilizado para evaluar los daños por humedad en las muestras asfálticas; el cual considera la pérdida de esfuerzo debido a ciclos de acondicionamiento (congelamiento / agua caliente) comparándolos con especímenes sin acondicionar, midiendo el esfuerzo mediante la tracción indirecta.

Con los valores de las cargas se obtiene la Resistencia Retenida a la Tensión Diametral (RRTD).

$$RRTD = \frac{S_1}{S_2} \quad (1)$$

S_2 = Promedio de resistencia a tensión diametral de los especímenes secos.

S_1 = Promedio de resistencia a tensión diametral de los especímenes acondicionados.

Según el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010), se acepta una resistencia retenida de 75% en el diseño Marshall, sin aplicar ciclos de congelamiento. Sin embargo según la metodología de diseño SuperPave se debe alcanzar una RRTD de 80% con un ciclo de congelamiento/agua caliente.

Los resultados pueden ser utilizados para predecir la susceptibilidad de la mezcla asfáltica y evaluar la correcta adherencia de aditivos que se le agregan al ligante asfáltico con el agregado.

3. Método de la rueda de Hamburgo (AASHTO T 324):

La prueba de Hamburgo se realiza bajo la especificación ASSTHO T324 "*Ensayo de Rueda de Hamburgo en mezcla asfáltica en caliente compactada*", tiene el objetivo de medir la resistencia al desprendimiento de agregado de la mezcla producido por el debilitamiento de la estructura del agregado inducido por la humedad, mediante una rueda de acero sobre especímenes compactados dentro de agua caliente. (Granados, 2012). Para determinar la falla prematura se mide la profundidad de la huella y el número de pasadas necesarias para la falla; para medir el daño por humedad se mide el punto de inflexión de la curva, el cual indica el punto de desnudamiento.

4. Analizador de pavimentos asfálticos (AASHTO T340)

Se realiza bajo la norma AASTHO T340 "*Método estándar para la determinación de la susceptibilidad del ahuellamiento en mezclas asfálticas en caliente mediante el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)*", el objetivo del ensayo es obtener la deformación permanente acelerada mediante la aplicación de cargas cíclicas contralados por medio de una rueda de acero, se aplican 8000 ciclos. Se pueden acondicionar los especímenes realizando el ensayo sumergido en agua.

2.3 Compactador giratorio Superpave

El Compactador Giratorio Superpave fue desarrollado para preparar muestras en laboratorio que simulen mejor la compactación de rodillo que se da en campo, de manera que los ensayos que se le realicen a la muestra sean más representativas. Nació en 1993 como parte del Programa de Investigación Estratégica en Carreteras (SHRP siglas en inglés) realizando una mezcla de dos máquinas de ensayo giratorias que fueron desarrolladas entre 1939 y 1946; una por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada Norteamericana y la otra por los franceses en el Laboratorio Central de Puentes y Vías de Acceso (LCPC siglas en francés).

El Compactador Giratorio Superpave se conforma de los siguientes elementos, en la Figura 7 se puede observar un esquema de su funcionamiento:

6. Un pórtico de reacción: El pórtico de reacción provee una estructura no flexible donde el pistón de carga empuja cuando se compacta el espécimen.
7. Una base rotatoria: La base rota a un ritmo constante de 30 revoluciones por minuto y está fijada al pórtico de carga.
8. Un sistema de carga, un pistón de carga y un medidor de presión: las cargas se aplican mediante un pistón que ejerce una presión de compactación de 600 kPa, mediante un sistema hidráulico o mecánico, el cual tiene un medidor de presión que mide la carga del pistón para que la presión de compactación se mantenga constante.
9. Un sistema de medida y registro de altura: la altura es un parámetro importante, ya que la densidad de las pastillas se puede estimar durante la compactación, si se conocen la masa del material, el diámetro interno y la altura de la muestra. El registro de la altura se efectúa constantemente, midiendo la posición del pistón antes y durante el ensayo.
10. Un molde de 150 mm y un plato base que permite el confinamiento, ambos colocados a un ángulo de 1,25 grados.

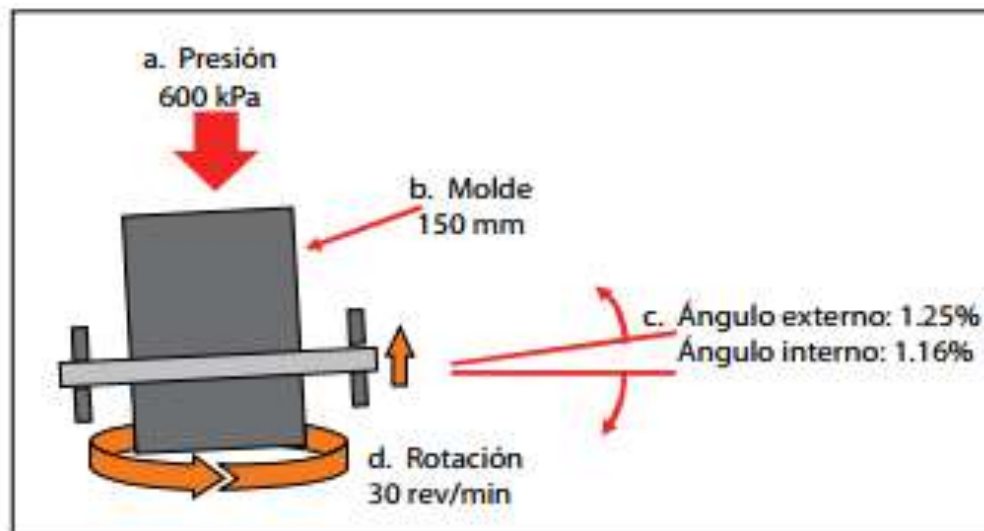


Figura 7. Esquema del funcionamiento del compactador Superpave

Fuente: LanammeUCR, 2012

2.4 Tensión diametral

Someter a un espécimen a la tensión diametral implica la aplicación de una carga de compresión a lo largo de los diametrales, para desarrollar un estado de tensiones de tracción casi uniformes a lo largo del plano diametral. Es un método práctico y sencillo para caracterizar algunas propiedades de la mezcla asfáltica o evaluar el fallo provocado por tensiones de tracción.

Cuando espécimen es cargado diametralmente, como indica Moreno (2005) se reproducen el estado de tensiones en la fibra inferior de la capa asfáltica; causando una deformación perpendicular a la carga lo que lleva al espécimen a fallar por tensión.

La resistencia a tracción del material está dada por:

$$S = \frac{2P}{\pi * t * D} \quad (2)$$

Donde:

s= tensión diametral

P= carga máxima

t=espesor de la muestra

D = diámetro de la muestra

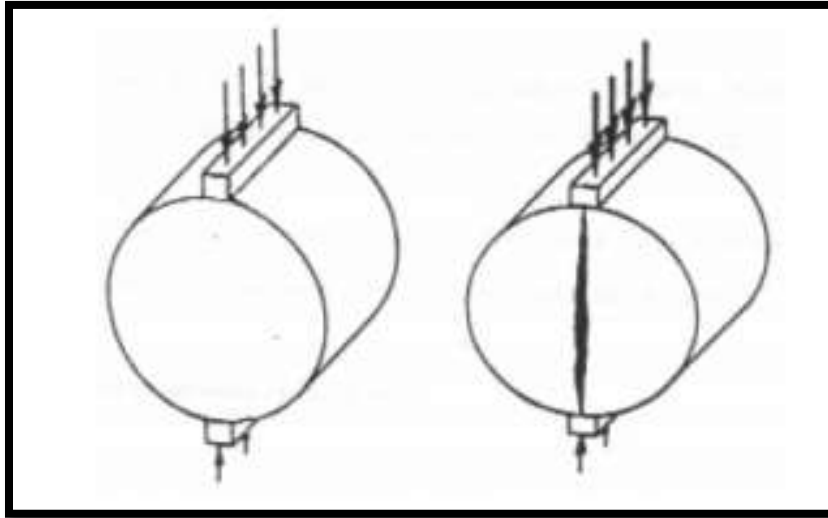


Figura 8. Espécimen sometido a la tensión diametral

Fuente: Universidad de Las Américas Puebla

La tensión diametral da información sobre propiedades elásticas resilientes, fisuración térmica, fisuración por fatiga, deformación permanente y puede utilizarse para evaluar el efecto de la humedad en mezclas asfálticas. El ensayo de tracción indirecta para evaluar la susceptibilidad a la humedad de una mezcla asfáltica se realiza mediante la norma AASHTO T 283.

2.5 Módulo de resiliencia

El módulo del pavimento es una propiedad importante de material para análisis y diseño de pavimentos flexibles, es de los parámetros de entrada más importante sobre propiedad del material ya sea para el procedimiento empírico de diseño (AASHTO 93) o para el diseño mecanístico – empírico. Además de utilizarse para evaluar la calidad de los materiales y el análisis del estado actual del pavimento. Altos módulos indican alta fragilidad y bajos valores tendencia a la deformación plástica.

Según señala Moreno (2005) el módulo de resiliencia se define, como analogía con el módulo de elasticidad, como la relación entre el esfuerzo desviador (σ) y la deformación axial recuperable (ϵ):

$$MR = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

El módulo de resiliencia se compara con el módulo de elasticidad con la diferencia que la carga que se le aplica es rápida y continua, para simular la carga que sufre el pavimento. El pavimento está sometido a gran número de ciclos de carga y descarga que induce a que entre a un estado de esfuerzo y deformaciones variables, en función de la carga y el tiempo que actúe sobre ella. En la Figura 9 se observa que durante un ciclo los materiales no se recuperan en su totalidad de la deformación a la que han sido sometidos, por lo que se divide en una plástica y una elástica. Las deformaciones elásticas son de recuperación instantánea en cambio las plásticas permanecen en el pavimento después de cesar la carga.

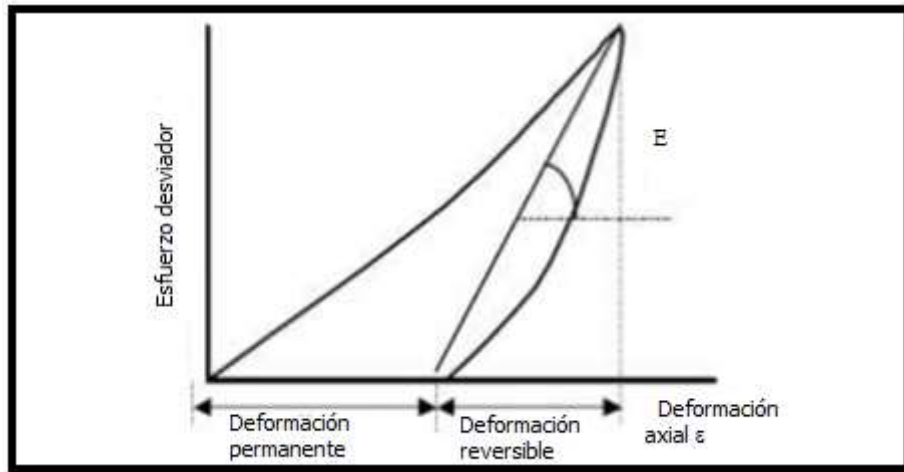


Figura 9. Deformación mediante un ciclo de carga y descarga

Fuente: Moreno, 2005

Conforme se incrementan los ciclos la deformación permanente se va acumulando y hasta que tiende a ser muy pequeña, por lo que el material se considera fundamentalmente elástico; lo que conlleva que el módulo resiliente llega a ser aproximadamente constante. Observando la Figura 10 se puede observar la comparación de la deformación después de varios ciclos de carga y descarga, y como con cada ciclo la deformación permanente desaparece hasta que prácticamente se hace despreciable en los ciclos finales.

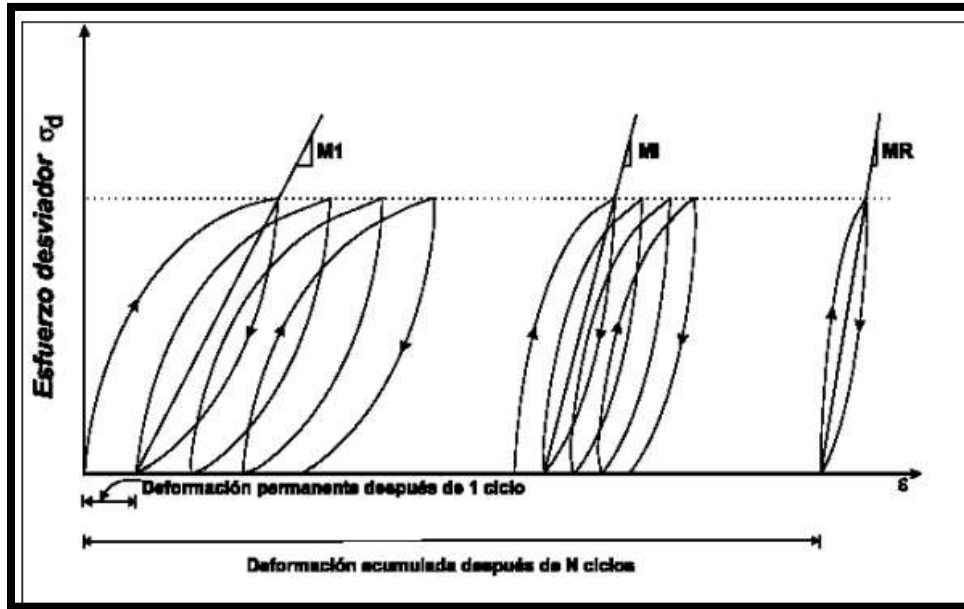


Figura 10. Deformación permanente luego de varios ciclos de carga

Fuente: Moreno, 2005

El método de ensayo para obtener el módulo resiliente a la tensión indirecta en mezclas asfálticas en caliente se realiza bajo la norma de ensayo, AASTHO TP31 – 96 “*Método estándar para la determinación del módulo resiliente de especímenes bituminosos mediante la tensión indirecta*”, el cual consiste en aplicar ciclos de carga diametral, en una magnitud constante (previamente calculada según la temperatura del ensayo), con una duración de 0,1 s con periodos de descanso de 0.9 s a especímenes cilíndricos. Antes de calcular el módulo resiliente final se aplica un pre-acondicionamiento de 50 ciclos de carga para uniformizar el resultado. El módulo resiliente total se calcula con la ecuación 4:

$$\text{MRTD} = \frac{1000 * P(\nu + 0,27)}{t * \Delta H_t} \quad (4)$$

Donde:

P: es la carga repetitiva en N

ν : relación de Poisson (0.4)

t: espesor del espécimen

ΔH_t : deformación horizontal recuperable.

Para el ensayo de mezcla asfáltica compactada en laboratorio primero se debe de fallar un espécimen a la tensión diametral para poder obtener la carga de falla y así determinar la carga repetitiva que se le debe aplicar, que depende de la temperatura a la cual se va a realizar el ensayo.

En la siguiente ecuación se observa cómo se determinó la carga a aplicar.

$$P_{\max}(T) = \frac{S_t P_1 t}{5012,7 \left(\sin\left(\frac{1455,313}{D}\right) - \frac{12,7}{D} \right)} \quad (5)$$

Donde:

S_t es la resistencia a la tracción indirecta, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_t = \frac{50.127 P_0}{t} \left(\sin\left(\frac{1455,313}{D}\right) - \frac{12,7}{D} \right) \quad (6)$$

P_0 es la carga máxima obtenida del ensayo de tensión diametral

P_1 es el porcentaje de la resistencia a la tensión indirecta, varía para cada temperatura (Cuadro 5)

Cuadro 5. Porcentaje de la resistencia a tensión indirecta dependiendo de la temperatura de ensayo

T °C	5	25	40
P₁	30	15	5

Fuente: Norma ASSHTO TP31-96

t es el espesor promedio de cada pastilla.

D es el diámetro promedio de cada pastilla.

De igual manera que el ensayo de tensión diametral se recomienda comparar los módulos resilientes de especímenes de control (secos) con los acondicionados, para calcular un indicativo de deterioro.

2.6. Información de sitio

El sitio de estudio es la Ruta Nacional 32 popularmente llamada Carretera Braulio Carillo, la cual comprende aproximadamente 160 km de las rutas nacionales pavimentadas. Inicia en San José en el periódico la República y termina en Limón en el Muelle Alemán, es una de las vías más importantes de Costa Rica ya que hace la conexión del Puerto Moín, principal puerto comercial del país, al Gran Área Metropolitana; además que en su recorrido se atraviesa el Parque Nacional Braulio Carrillo. En la Figura 11 se observa el recorrido de la Ruta Nacional 32. Para un manejo más ordenado de la vía el país las maneja por secciones de control, las cuales están definidas en el Anexo A.



Figura 11. Ruta Nacional 32

Fuente: Google Earth, 2015

La Ruta Nacional 32 es una vía nacional clasificada de alto tránsito, en la Figura 12 se puede observar el tránsito promedio diario (TPDA) para el año 2013 según la sección de control, el cual se obtuvo de la proyección que realiza la dirección de ingeniería de tránsito a partir de los datos recolectados en el 2012, además de como varía en las diferentes secciones de la ruta. Como es de esperar las zonas con mayor tránsito son las zonas ubicadas en el Gran Área Metropolitana. Al ser una ruta principal y tan transitada se espera que tenga las condiciones necesarias para poder satisfacer las necesidades del usuario, es importante tomar en cuenta que según el Anuario de tránsito 2012 del Ministerios de Obras Públicas, entre el 10 – 20% del TPDA que transita por la ruta es vehículo pesado, ya que influye en el deterioro de la ruta.

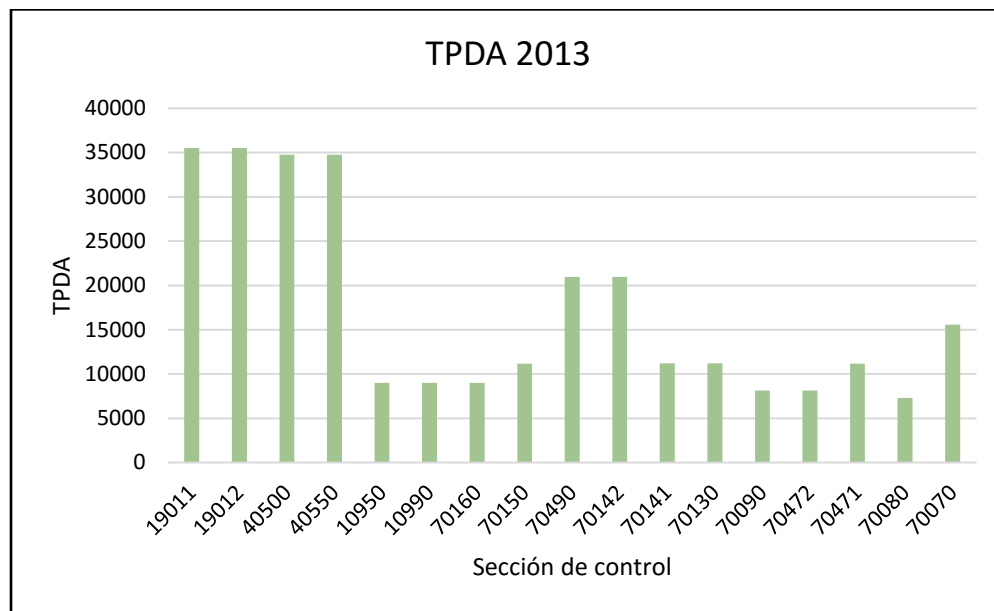


Figura 12. TPDA según la zona de control

Fuente: MOPT, 2012

La Ruta Nacional 32 al ser de un recorrido extenso y atravesar varias zonas del país, tiene un rango de precipitaciones varias que se podrían clasificar según el Instituto Meteorológico Nacional en regiones moderadamente lluviosas con un rango entre 1000 – 2000 mm/anales que corresponde a un 8% de la ruta, un 57% en región lluviosa con un rango de precipitaciones entre 2000 – 4000 mm/anales y un 35% como región

excesivamente lluviosa con precipitaciones mayores a 4000 mm/ anuales, como se observa en la Figura 13.

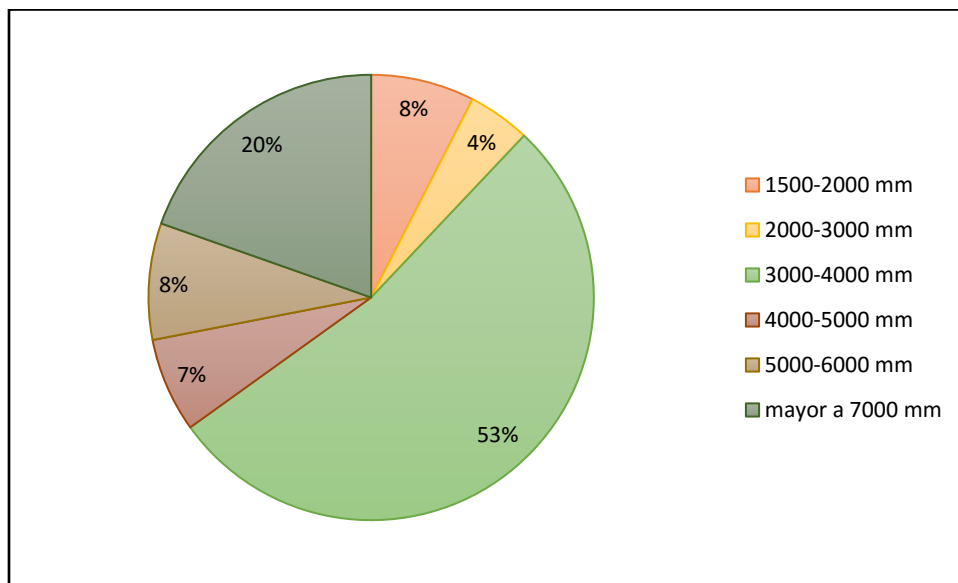


Figura 13. Rango de precipitaciones media anual de la Ruta Nacional 32

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, 2005

En la Figura 14 se puede observar la precipitación máxima y mínima media anual de toda la ruta por secciones de control, según los datos recolectados del mapa de precipitaciones del Instituto Meteorológico Nacional, por lo que se observa que las precipitaciones más altas registradas concuerda donde la carretera atraviesa el Parque Nacional Braulio Carrillo lo que produce que se den muchos derrumbes a lo largo del año, y las más bajas se registran en el Gran Área Metropolitana.

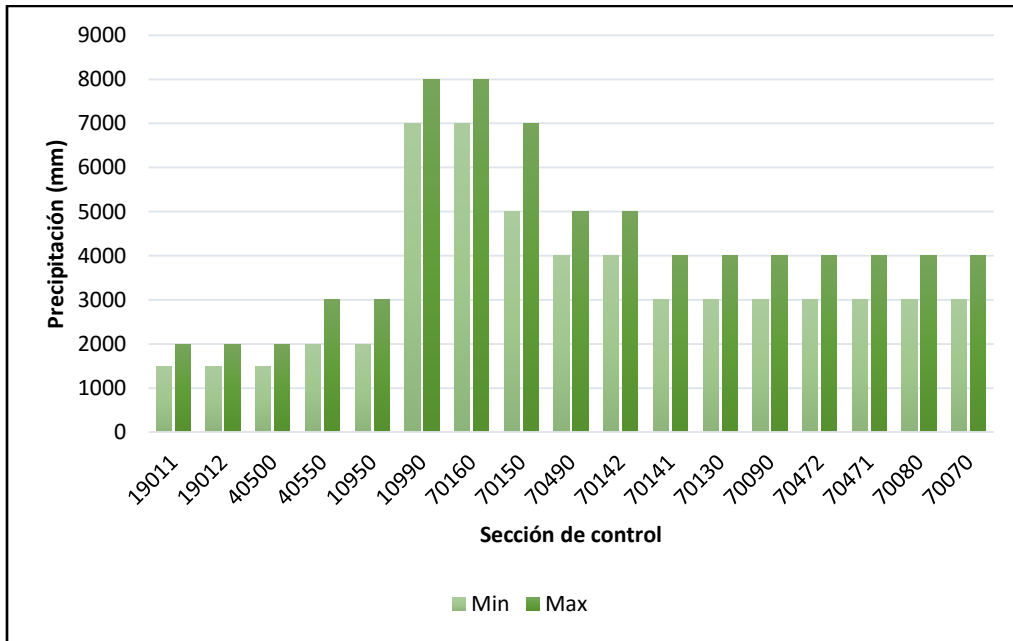


Figura 14. Precipitación media anual de la Ruta Nacional 32

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, 2005

Según la Evaluación de la Red Vial Nacional 2014 realizada por el Lanamme-UCR en la Ruta Nacional 32 se han invertido \$ 7.087.931.059 donde de los 160 km el 53% mantiene la condición del 2012, el 22% se deterioró con respecto al 2012, hubo una mejora del 17% de la ruta y una mejora parcial del 8%. Tal como se observa en la Figura 15.

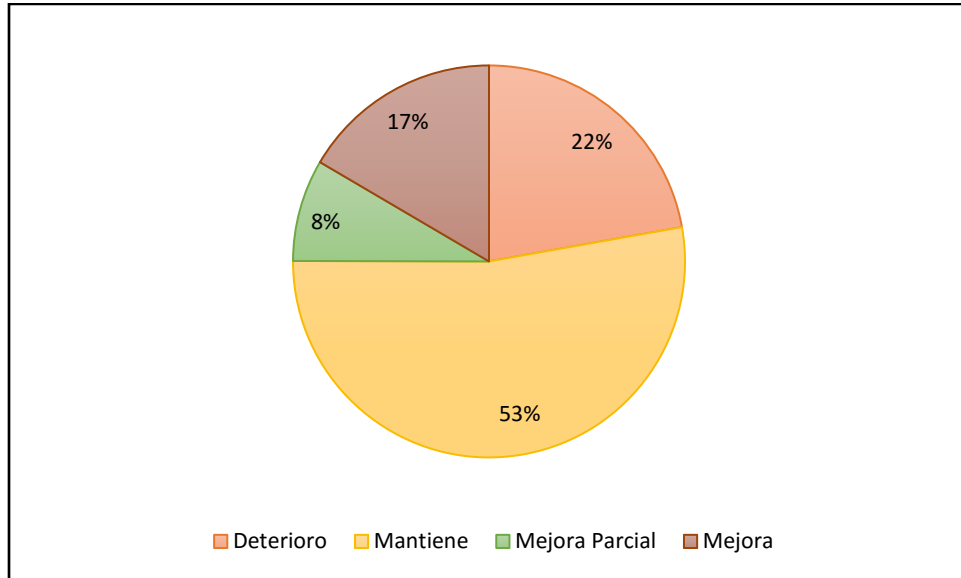


Figura 15. Análisis de mejora de la Ruta Nacional 32 en el año 2014 con respecto al año 2012

Fuente: ERVN Lanamme-UCR, 2014

Además se recomienda como estrategia de conservación vial, tal como se observa en la Figura 16, 110 kilómetros para Mantenimiento de Preservación, 42 kilómetros para Recuperación del índice de regularidad internacional (IRI) y 5 kilómetros para análisis específico de proyecto. Sin embargo donde se obtuvo menor desempeño es el coeficiente de rozamiento de pavimentos el cual indica la capacidad de frenar de un vehículo sobre una superficie de ruedo, en algunos tramos se tuvieron valores menores a 0,50 que indica una condición muy deslizante y algunos entre 0,5 – 0,6 que indican una condición deslizante; lo cual en una ruta que en su 71% del recorrido supera una precipitación de 3500 mm/año produce que se disminuya considerablemente el agarre superficial llanta/carpeta.

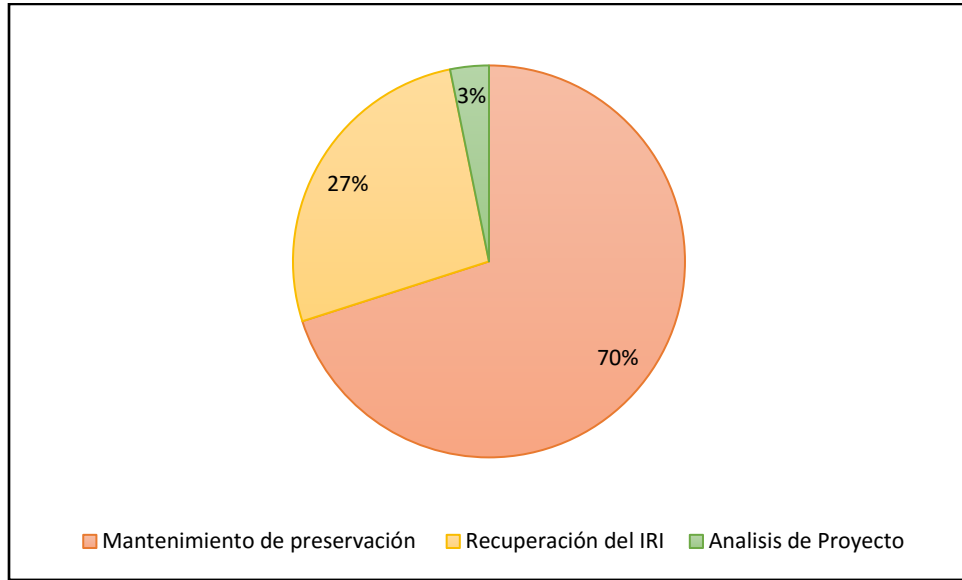


Figura 16. Estrategia recomendada de conservación vial para Ruta Nacional 32 en el año 2014

Fuente: ERVN Lanamme-UCR, 2014

CAPITULO 3. MARCO EXPERIMENTAL

En la Figura 17 se observa el diagrama del marco experimental seguido para el proyecto, a continuación se explican cada uno de los ensayos.

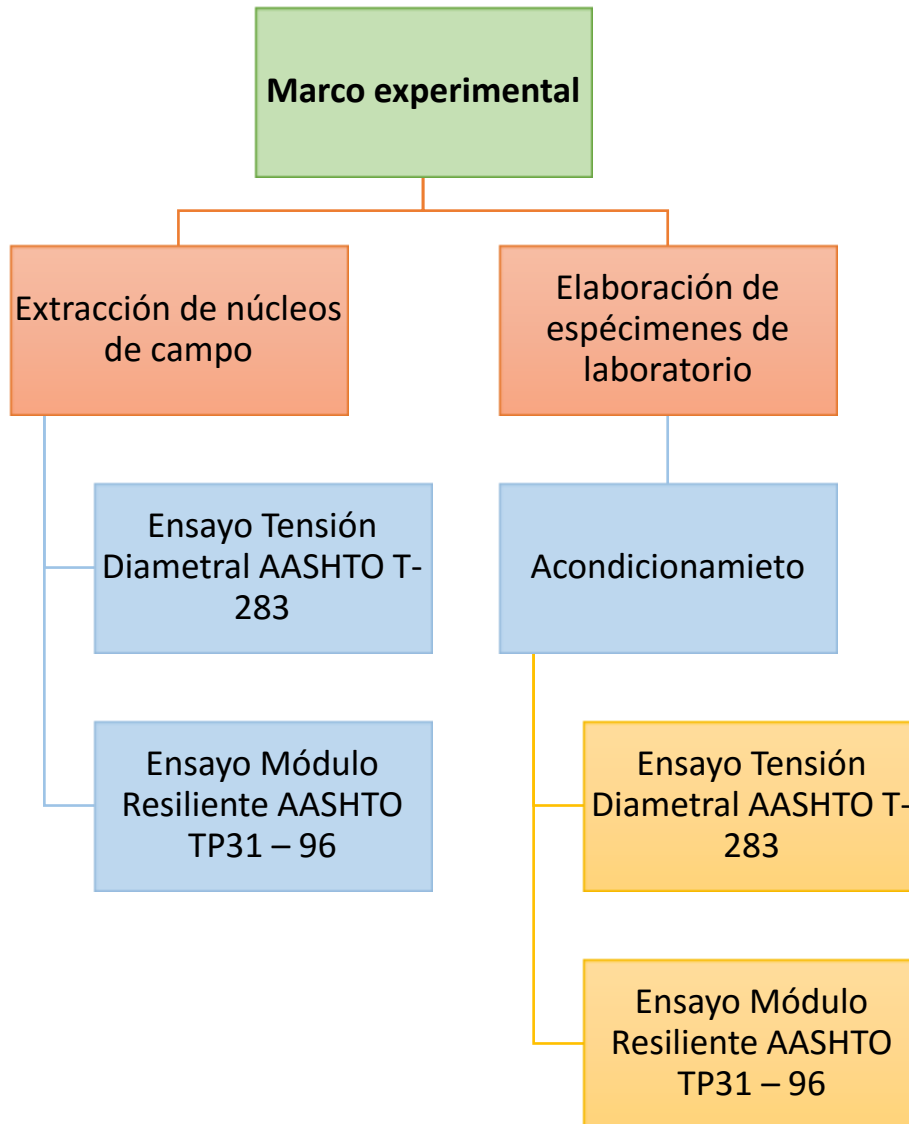


Figura 17. Diagrama del marco experimental del proyecto

3.1 Extracción de núcleos de campo

Para evaluar el daño por humedad en mezcla asfáltica colocada en sitio, se utilizaron núcleos extraídos en campo de la Ruta Nacional 32. Se eligieron 3 puntos diferentes de la ruta los cuales se procura que tengan diferentes rangos de precipitación según la Figura 14. La ubicación de las secciones de extracción se observa en la Figura 18, donde se extrajeron 6 núcleos de cada punto para realizarle los ensayos de desempeño. Se procuró extraer los núcleos lo más cerca posible del espaldón para poder aislar el daño producido por la carga de tránsito.

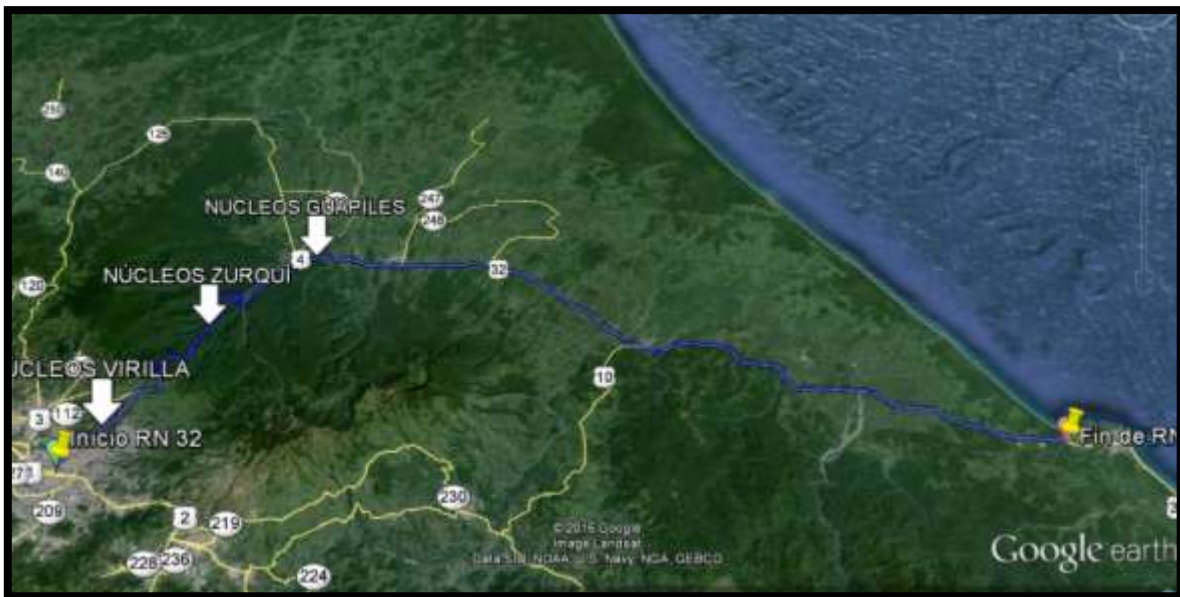


Figura 18. Ubicación de núcleos extraídos

El primer punto donde se realizó la extracción está ubicado en San Miguel, Santo Domingo en la provincia de Heredia, aproximadamente a 3.6 km del puente del Río Virilla en el sentido San José – Guápiles, como se observa en la Figura 19. Este punto es el kilómetro 7 de la RN 32, con coordenadas latitud $9^{\circ}59'18.52''N$ y longitud $84^{\circ}2'35.96''O$.

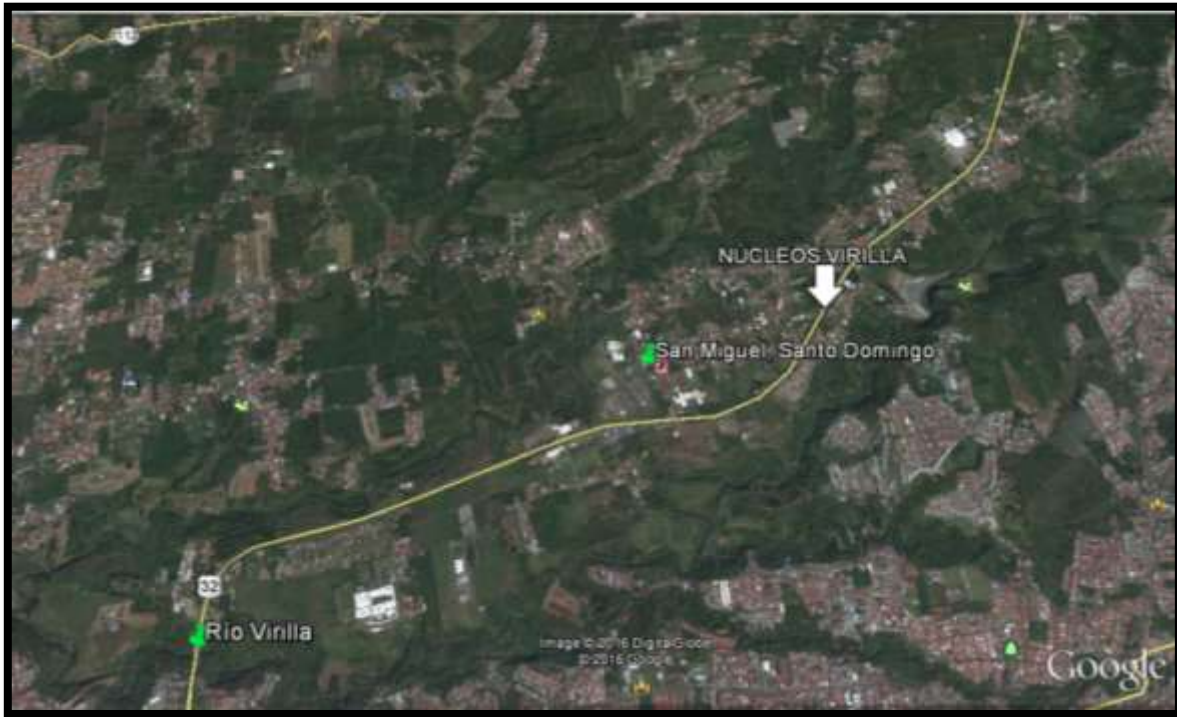


Figura 19. Ubicación de núcleos extraídos en Virilla

El segundo punto donde se realizó la extracción es esta ubicado en el sector del Parque Nacional Braulio Carrillo en la provincia de Heredia, aproximadamente a 13 km antes del puente de Río Sucio en el sentido San José – Guápiles, se observa en la Figura 20. Este punto es el Kilómetro 27 de la RN 32, con coordenadas latitud $10^{\circ}6'39.63''N$ y longitud $83^{\circ}58'27.89''O$.



Figura 20. Ubicación de núcleos extraídos en el Zurquí

El tercer punto donde se realizó la extracción es esta ubicado en el sector del Parque Nacional Braulio Carrillo en la provincia de Limón, aproximadamente a 2 km después del cruce con Ruta Nacional 4 en el sentido San José – Guápiles, frente a la fábrica de prefabricados de concreto ConcrePefa, el punto se observa en la Figura 21. Este punto es el Kilómetro 52 de la RN 32, con coordenadas latitud 10°12´47.79" N y longitud 83°52´46.53"O.



Figura 21. Ubicación de núcleos extraídos en Guápiles

El proceso de extracción de núcleos se realizó con taladro perforador con una broca de 6" (150 mm) como el observado en la Figura 22. Para poder extraer los núcleos adecuadamente se coloca la broca perpendicular al pavimento, y en todo el proceso se debe tener un caudal suficiente de agua para poder refrigerar y así evitar que el núcleo se quede atorado en la broca, luego con unas tenazas metálicas se extrae el núcleo si aún continúa en el pavimento.

Por último, para rellenar el agujero producido por la extracción rellena con mezcla asfáltica en frío y compactar con mazo en una o dos capas dependiendo del espesor.



Figura 22. Proceso de extracción de núcleos en la Ruta Nacional 32

Como en algunas secciones se encontraron carpetas de mezcla asfáltica en caliente con más de una capa, estas se separan, y se pulen con sierra para que queden lo más uniforme posibles.

3.2 Materiales y Diseño de Mezcla

La mezcla asfáltica, tanto la utilizada para realizar los especímenes de laboratorio como los núcleos extraídos de campo en Virilla y Zurquí, corresponde a mezcla asfáltica producida en la planta asfáltica ubicada en Guápiles de la constructora Hernán Solís. La mezcla asfáltica de los núcleos extraídos en Guápiles fue producida por la constructora MECO en su planta asfáltica ubicada en Guápiles.

Todos los diseños de mezcla utilizados fueron diseñados mediante el método de Marshall sin embargo varían ligeramente su granulometría y por consiguiente el porcentaje óptimo de asfalto entre cada diseño, ya que todas son de períodos diferentes de producción.

La mezcla asfáltica tiene un agregado de tamaño máximo nominal de 12.5 mm y proviene de la fuente de agregado del Río Chirripó; a todos los agregados gruesos y finos se les realizó pruebas de calidad presentadas en el Cuadro 6, los resultados de las pruebas se muestran en el Anexo B.

Cuadro 6. Ensayos aplicados a los agregados

Agregado grueso		Agregado fino	
Ensayo	Norma	Ensayo	
Granulometría	AASTHO T-27	Granulometría	
Abrasión	AASTHO T-96	Abrasión	
Sanidad	AASTHO T-104	Sanidad	
Índice de durabilidad	AASTHO T-210	Índice de durabilidad	
Caras Fracturadas	ASTM D-5821	AASHTO T-176	Equivalente de arena
Caras planas o alargadas	ASTM D-4791		
Partículas Friables	AASTHO T-112		

El asfalto utilizado en todas las mezclas fue el AC-30 producido en RECOPE, en el Anexo B se encuentra el certificado de calidad del asfalto para el diseño de mezcla utilizado en los especímenes de laboratorio.

Además se les realiza dos pruebas de desempeño para evaluar el daño por humedad a pastillas compactadas con mezcla asfáltica, el ensayo de resistencia a la tensión diametral AASHTO T-283 y el ensayo de inmersión – compresión AASHTO T-165. Los resultados para todos los diseños de mezcla se encuentran en el Anexo B.

A continuación se presenta un resumen con las características más importantes del diseño de mezcla utilizado en los especímenes compactados en laboratorio y extraídos en laboratorio.

Cuadro 7. Granulometría de la mezcla utilizada en laboratorio

Tamiz	% Pasando				
	Total	Cuartilla	Quinta G	Quinta F	Polvo
19,1 mm	100	100	100	100	100
12,5 mm	95	47	100	100	100
9,5 mm	84	2	36	99	100
N°4	49	1	1	3	96
N°8	33	1	1	2	65
N°16	21	1	1	2	40
N°30	15	1	1	2	28
N°50	11	1	1	2	21
N°200	5,6	0,6	0,6	1,2	10,2

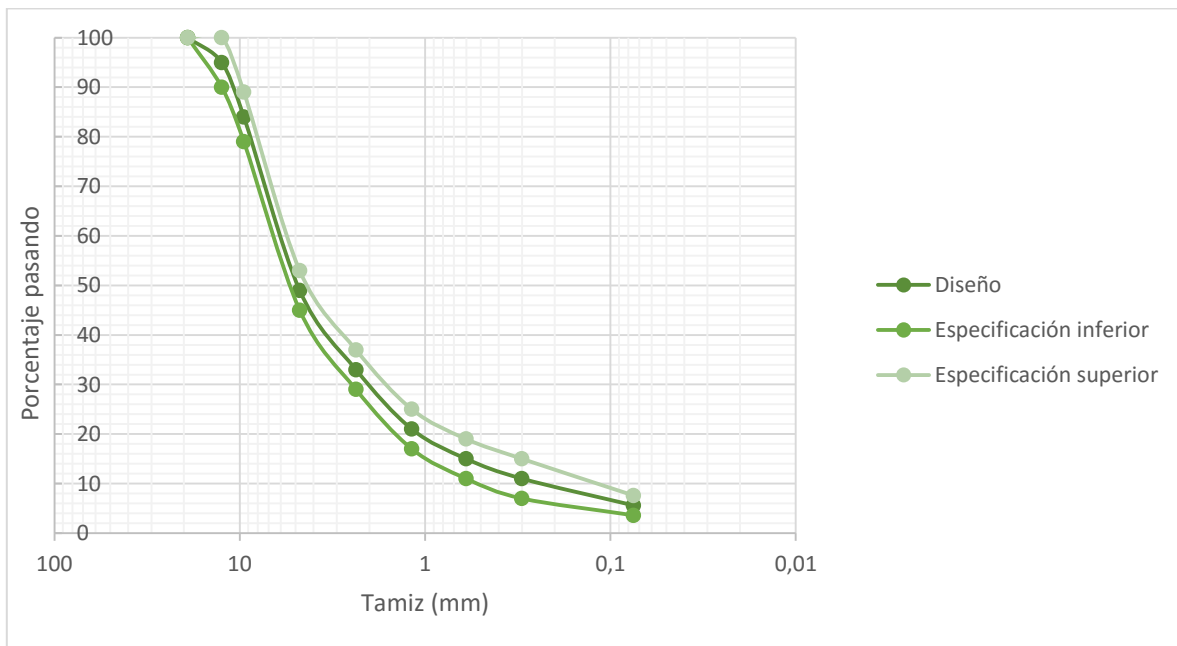


Figura 23. Curva granulométrica utilizada en el diseño de mezcla de laboratorio

Cuadro 8. Porcentajes de combinación de agregados

Cuartilla	Quinta G	Quinta F	Polvo
10%	10%	30%	50%

Cuadro 9. Temperaturas de trabajo de la mezcla asfáltica utilizada en laboratorio

Temperatura de trabajo	Compactación	Mezclado
Máxima (°C)	151	164
Mínima (°C)	145	158

Cuadro 10. Granulometría utilizada en el diseño de mezcla del Zurquí

Tamiz	% Pasando				
	Total	Cuartilla	Quinta G	Quinta F	Polvo
19,1 mm	100	100	100	100	100
12,5 mm	95	65	99	100	100
9,5 mm	83	1	83	100	100
N°4	49	1	1	12	97
N°8	33	1	1	4	67
N°16	22	1	1	3	44
N°30	15	1	1	3	30
N°50	12	1	1	2	23
N°200	5,5	1	0,6	1,7	10,3

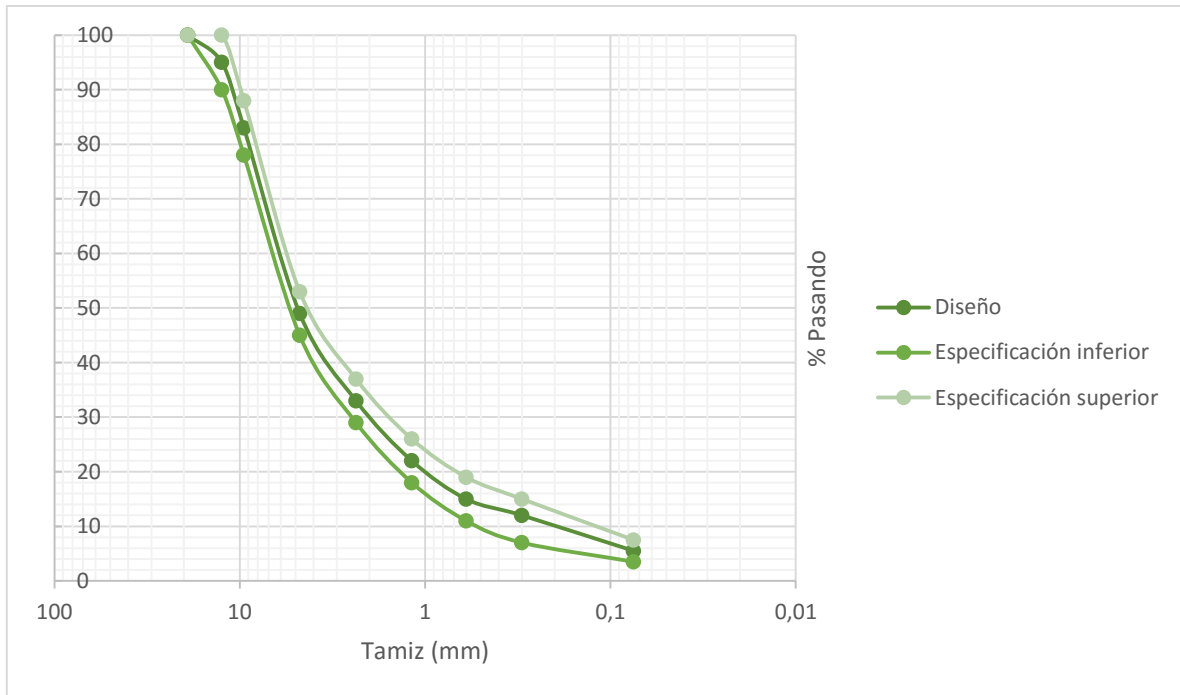


Figura 24. Curva granulométrica utilizada en el diseño de mezcla Zurquí

Cuadro 11. Porcentajes de agregado utilizado en la mezcla asfáltica del Zurquí

Cuartilla	Quinta G	Quinta F	Polvo
14%	20%	18%	48%

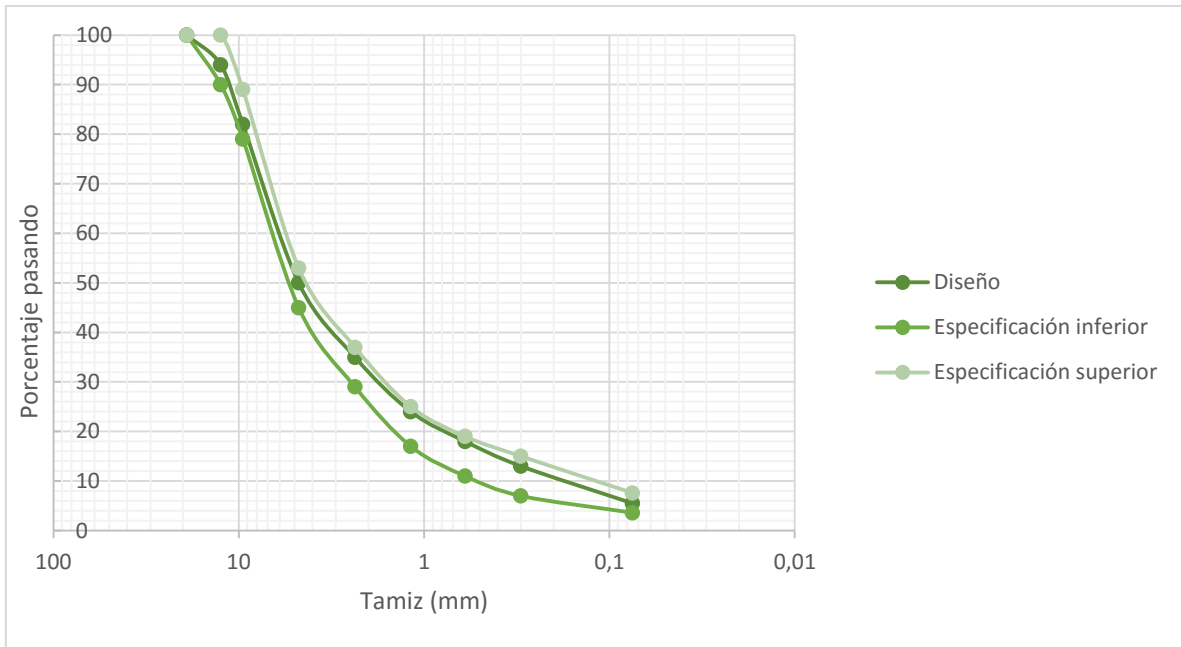


Figura 25. Curva granulométrica utilizada en el diseño de mezcla Virilla

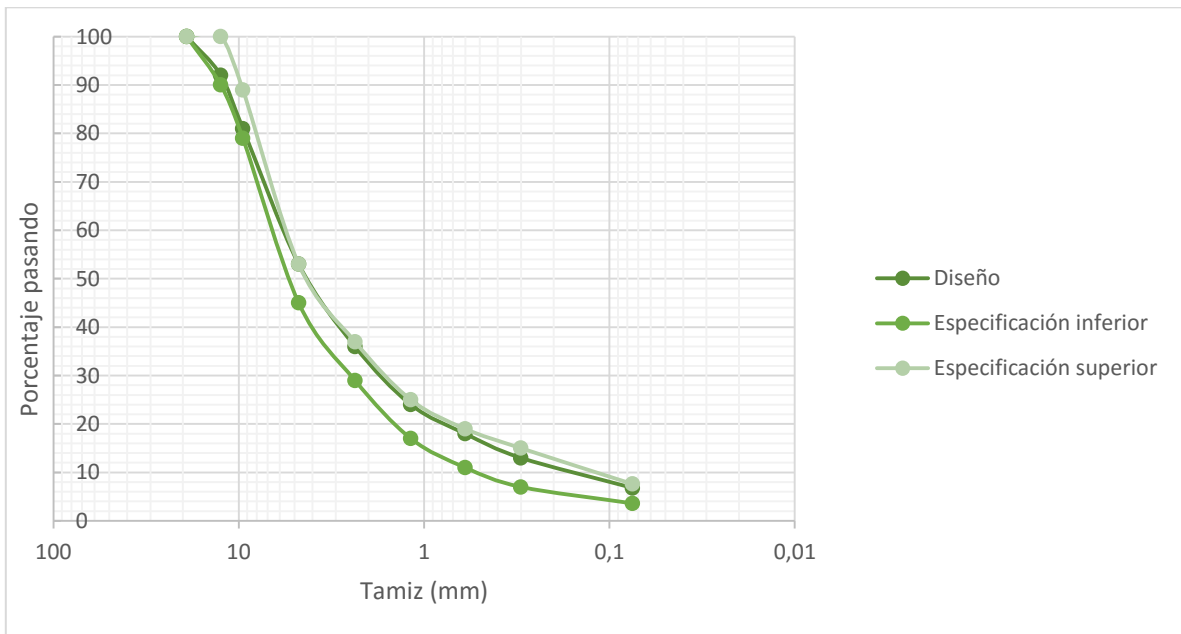


Figura 26. Curva granulométrica utilizada en el diseño de mezcla de Guápiles

Cuadro 12. Parámetros volumétricos de las mezclas utilizadas

Parámetro	Especificación AM-01-2001	Óptimo laboratorio	Óptimo Virilla	Óptimo Zurquí	Óptimo Guápiles
Contenido de asfalto	%	5,9	5,57	5,5	5,37
GBS pastillas	-	2,382	2,392	2,379	2,612
GEMT	-	2,482	2,495	2,477	2,481
Vacíos de aire	3%-5%	4,0%	4,2%	4,0%	4,2%
VMA	13% min	14,6	14,4	14,3	14,2
VFA	65-75%	72,1	72,2	72,3	70,6
Razón polvo/ asfalto	0,6-1,3	1,20	1,21	1,22	1,47
Estabilidad	800 kg min	1908	1564	1392	1706
Flujo	20 - 35 cm/100	32	32,6	31	33,3
Asfalto efectivo	%	4,6	4,55	4,51	4,41

El diseño de mezcla de los especímenes de laboratorio y los extraídos en campo fue realizado por el laboratorio "OJM Consultores de Calidad y Laboratorio S.A.", sin embargo la información se obtuvo mediante el Consejo Nacional de Viabilidad (CONAVI). Como se observa en los cuadros anteriores la mezcla asfáltica utilizada para la fabricación de los especímenes de laboratorio, así como la mezcla utilizada para los especímenes de campo, cumplen con todas las especificaciones requeridas según la Disposición Vial AM-01-2001.

3.3. Compactación y acondicionamiento de especímenes

Para elaborar las pastillas de laboratorio se utilizó el Compactador Giratorio Superpave que se observa en Figura 27. A pesar que la metodología de diseño utilizado para la mezcla asfáltica es el de Marshall se utiliza el Compactador Giratorio Superpave ya que en diversas investigaciones se ha demostrado que es la metodología de compactación en laboratorio que permite simular mejor la compactación con rodillo que se da en el campo.



Figura 27. Compactador Giratorio Superpave utilizado

Antes de compactar las pastillas, se hizo el proceso de cuarteo a la mezcla obtenida en planta para homogenizarla. Luego se hizo un curado de 4 horas a la mezcla a la temperatura de compactación.

Ya compactadas las pastillas se debe esperar a que se enfríen a temperatura ambiente y poder determinar el porcentaje de vacíos de las pastillas. En total se compactaron 28 pastillas de 150 mm de diámetro y una altura de $75 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. Todos los especímenes tienen un porcentaje de vacíos entre 6% y 8%, según la norma AASHTO T 269.

Para llevar acabo los ensayos de Tensión Diametral y Módulo Resiliente a la tensión diametral, y poder evaluar el daño por humedad se les debe de realizar un previo acondicionamiento a las pastillas para acelerar e inducir este deterioro.

Antes de realizar los acondicionamientos los especímenes deben de saturarse según la norma AASHTO T 166 entre 70% a 80%. Se saturan por medio de vacío e inmersión en agua, primero deben de colocarse dentro de la cámara de vacío y llenarse de agua hasta que quede cubierto, luego la aplicación de una presión de vacío de aproximadamente 200

mbar durante 15 segundos. Para calcular la saturación debe tomarse el peso sumergido y el peso superficie saturada seca. Dicha saturación se calcula según la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Saturación} = 100 * \frac{V_{\text{aguaabs}}}{V_a} \quad (7)$$

Donde, el V_{aguaabs} es el volumen de agua absorbida por la pastilla y V_a son los vacíos del espécimen antes de la saturación.

Si el espécimen queda por debajo de una saturación de 70% se vuelve a repetir el proceso, en caso contrario de que la saturación sobrepase el 80% se deteriora la pastilla por lo que ya no puede ser utilizada.

El acondicionamiento de especímenes utilizado consiste en aplicar varios ciclos de congelamiento / agua caliente. El proceso de congelamiento consiste en envolver los especímenes en plástico, meterlos en una bolsa sellada con 10 ± 0.5 ml de agua e introducirlos en un congelador a una temperatura de -22 ± 3 °C por al menos 16 horas.

Luego se sacan del congelador se aplica el proceso de agua caliente por lo que los especímenes se desenvuelven y se colocan en un baño de agua a una temperatura de 60 ± 1 °C por 24 ± 1 horas.

A los grupos de especímenes compactados se les aplicaron 1, 3, 6, 9, 12 y 15 ciclos de acondicionamiento, para poder determinar con cuantos ciclos se alcanzaban los deterioros de las pastillas extraídas de campo.

3.3 Tensión Diametral

Se utilizaron 4 especímenes para cada tipo de acondicionamiento y 4 especímenes de control para la realización del ensayo, con el acondicionamiento previamente mencionado.

Antes de fallarse los especímenes de control deben de envolverse en plástico, y someterse a un baño de agua a una temperatura de 25 ± 0.5 °C por 2 horas \pm 10 minutos.

Los especímenes acondicionados antes de fallarse deben de someterse a un baño de agua a una temperatura de 25 ± 0.5 °C por 2 horas \pm 10 minutos, para que alcancen la temperatura del ensayo.

En la Figura 28 se aprecia el equipo que se utiliza para la falla de los especímenes mediante una carga aplicada diametralmente, debe de tenerse el cuidado de que la pastilla quede lo más centrada posible en la muela para evitar excentricidades.

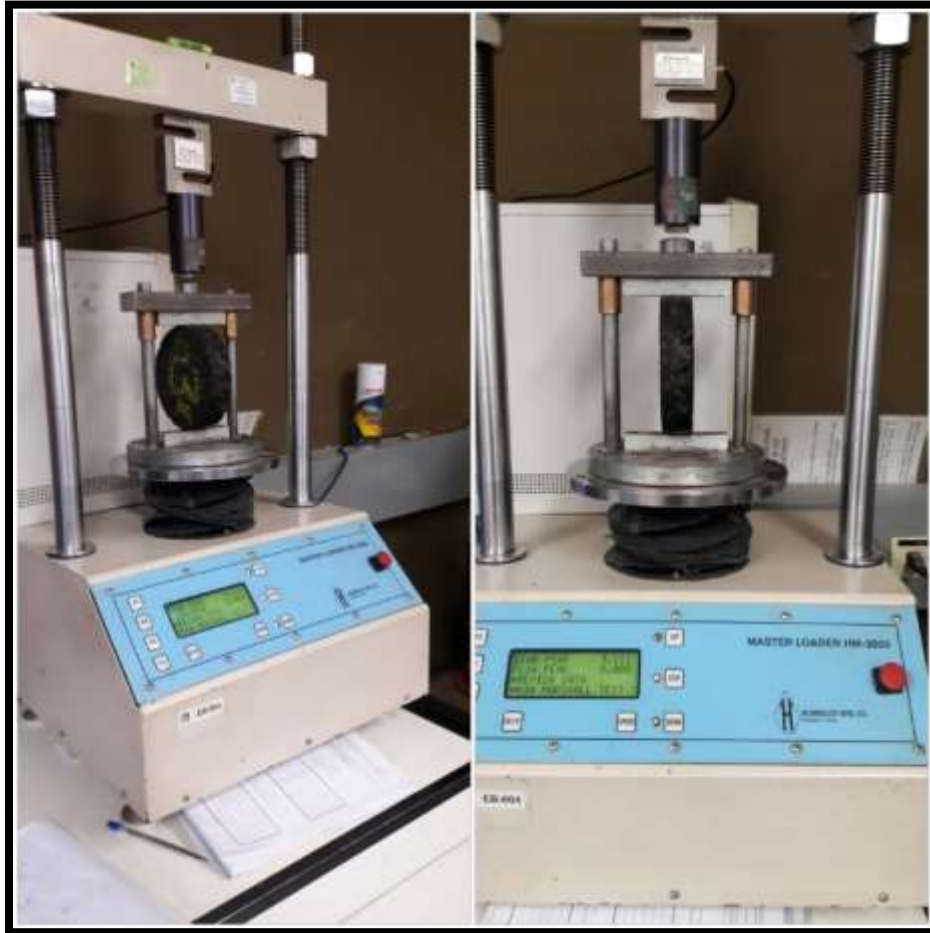


Figura 28. Equipo de falla a tensión diametral

De la falla se registra la carga máxima aplicada con la ecuación 2 se calcula el esfuerzo a tensión y se comparan los especímenes de control con los acondicionados.

El ensayo también se le realiza a 6 núcleos extraídos en sitio, el procedimiento de falla es muy parecido a los compactados en laboratorio con la diferencia de que los ciclos de acondicionamiento y la saturación no se hacen en laboratorio sino de las condiciones recibidas en campo; además de que el espesor no se puede controlar, y una vez extraída el núcleo se debe de cortar en las diferentes capas que se tengan.

3.4 Módulo Resiliente a la Tensión Diametral

Se le realiza módulos a tres especímenes por tipo de acondicionamiento, los cuales se deben de medir muy bien y marcar los centros (altura y cara), esto para que queden bien centrados en la base del equipo, y evitar que se aplique una carga excéntrica. El otro espécimen de cada tipo de acondicionamiento se utiliza para determinar la carga máxima a aplicar.

Antes de iniciar el ensayo se deben de mantener los especímenes dentro de una cámara a la temperatura de ensayo al menos 4 horas, se eligió una temperatura de ensayo de 25°C. El equipo para determinar el Módulo Resiliente se observa en la Figura 29.



Figura 29. Equipo para determinar el Módulo Resiliente a Tensión Diametral, UTM

Para el cálculo del Módulo Resiliente se utiliza el software "UTS003 1.41 Indirect Tensile Modulus Test" el cual se utiliza en la modalidad de un valor de poisson asumido de 0.4, al

ser el más estándar en mezcla asfáltica en caliente, y de entradas se deben de ingresar la carga máxima a aplicar, las dimensiones del espécimen y la frecuencia que se desea utilizar. En la Figura 30 se observa la interfaz de la entrada de datos.

The screenshot shows the 'Set up parameters' tab of the UTS003 1.41 software. The 'Test method' is set to 'ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvlds only, assumed Poisson's ratio)'. The 'Project' is 'Tesis' and the 'Operator' is 'Daniela Garcia'. The 'Template file' is 'C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\Daniela Garcia\1.P003'. The 'Specimen information' table shows dimensions for 6 points, with an average length of 74.8 mm and diameter of 149.7 mm. The 'X-Section area (mm²)' is 17605.5. The 'Tuning (actuator force)' section has Proportional gain at 5000, Integral at 15, and Derivative at 1200. The 'Loading shape' section shows a bell-shaped curve. The 'Test control parameters' section includes Target temperature (25°C), Loading pulse width (100 ms), Pulse repetition period (1000 ms), Conditioning pulse count (50), Peak loading force (2626 N), Estimated Poisson's ratio (0.4), Automatic level control (checked), Sealing force (checked for AASHTO TP31), and Contact force (empty field).

Figura 30. Interfaz de entrada del software UTS003 1.41 Indirect Tensile Modulus Test

El software da como resultado el promedio de los datos obtenidos de los últimos 5 ciclos de carga aplicados al espécimen, entre esos están las deformaciones horizontales (izquierda y derecha), la carga máxima real aplicada, el Módulo Resiliente y la recuperación elástica de la pastilla; además de datos estadísticos como el coeficiente de variación (debe ser menor a 5%) y la desviación estándar. En la Figura 31 se observa la interfaz de los resultados de programa.

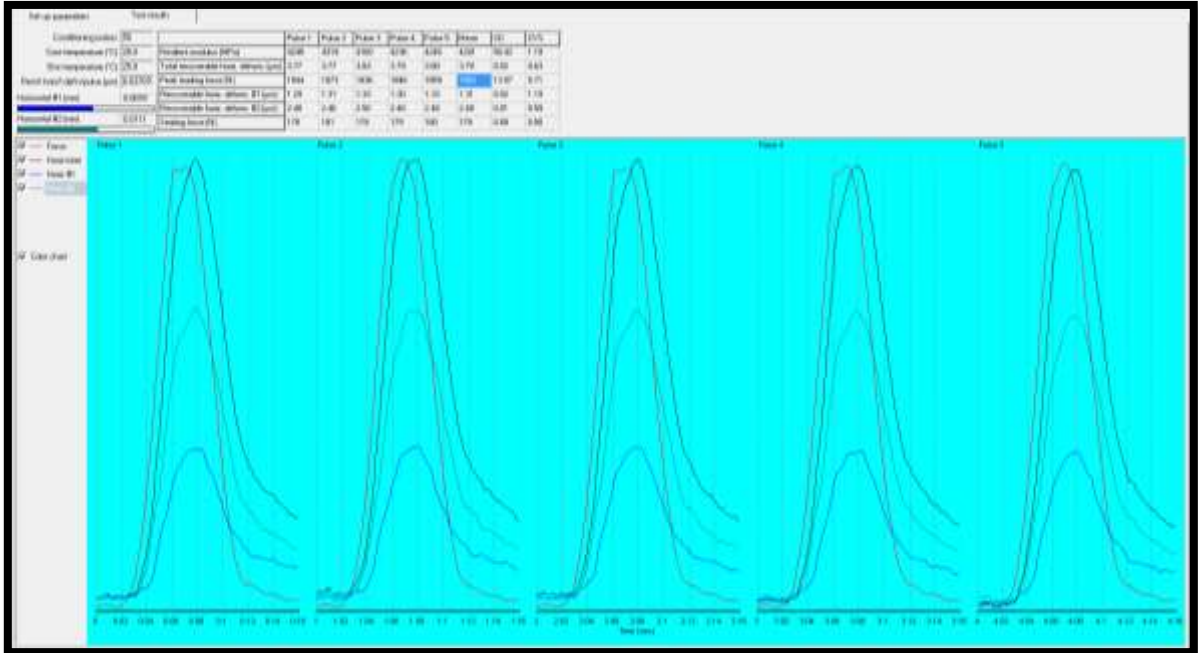


Figura 31. Interfaz de resultados del software para determinar Módulo Resiliente

De igual forma con los especímenes extraídos en sitio, a una pastilla de cada punto de extracción se le determina la carga máxima a la tensión diametral, y se utilizan las 5 pastillas para determinar el Módulo Resiliente. Antes de realizarles el ensayo se deben pulir con sierra.

Por último, al ser el Módulo Resiliente un ensayo no destructivo se fallan los especímenes a la tensión diametral para determinar su resistencia.

CAPITULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Extracción de núcleos

En Cuadro 13 se muestran las características básicas de los núcleos extraídos de campo entre el 27 – 28 de octubre del 2015 de las tres zonas de estudio. Se extrajeron 6 núcleos de 150 mm (6”) por sección para un total de 18 núcleos extraídos. Los datos obtenidos de los porcentajes de vacíos se incluyen en el Anexo C.

Cuadro 13. Información de los núcleos extraídos

Localización		Fecha de colocación	Espesor promedio
Virilla	Una capa	26-30 de noviembre del 2012	75 mm
Zurquí	Capa Superficial	01-02 de octubre del 2014	60 mm
	Capa inferior	Desconocido	65 mm
Guápiles	Capa Superficial	Agosto del 2011	30 mm
	Capa inferior	Desconocido	75 mm

Los núcleos extraídos en campo se separan en secciones dependiendo de su precipitación media anual, como se observa en la Figura 32. Los núcleos extraídos en la zona del Virilla están sujetos a lluvias moderadas con un rango de precipitaciones entre 1500 – 2000 mm/año, y el Zurquí y Guápiles son zonas de lluvias excesivas. Sin embargo, los últimos tienen una diferencia de precipitación de 1000 mm/año; por lo que se espera que la zona de mayor deterioro al daño por humedad sea la zona del Zurquí, seguida por Guápiles y por último Virilla. En el Anexo B se encuentran las precipitaciones medias mensuales para cada una de las secciones de extracción.

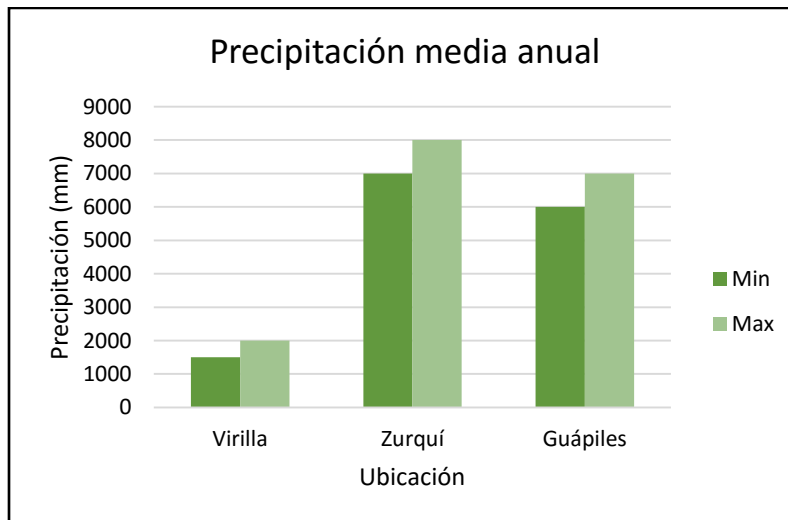


Figura 32. Precipitación media anual tramos estudiados

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, 2005

4.2. Tensión Diametral

En esta sección se muestran los resultados del ensayo de tensión diametral aplicados a los especímenes extraídos de campo y los compactados y acondicionados en laboratorio.

En el Cuadro 14 se pueden observar los promedios de los resultados del ensayo de tensión diametral aplicado a los especímenes de campo, donde se observa el promedio de la carga máxima aplicada en el eje diametral para obtener la falla a tensión diametral a cada pastilla estudiada. Además del promedio del esfuerzo obtenido a partir de la carga máxima aplicada.

Cuadro 14. Promedios de los resultados del ensayo de Tensión Diametral a especímenes de campo

Localización	Capa	Carga máxima (N)	Esfuerzo a tensión (kPa)	Desviación estándar
Virilla	A	14400,50	813,73	118,68
Zurquí	A	7872,67	586,32	31,19
	B	7351,50	476,77	27,27
Guápiles	A	9414,50	1302,77	114,13
	B	10838,33	637,57	50,29

La Figura 33 corresponde al gráfico de comparación de los resultados de esfuerzo a la tensión diametral para poder comparar el comportamiento de cada sección estudiada, como se observa la sección con más deterioro son las dos capas de mezcla asfáltica extraídas es en el Zurquí, seguida por la segunda capa de Guápiles, luego por el Virilla y por último la capa con menos deterioro encontrado es la capa superficial de la zona de Guápiles.

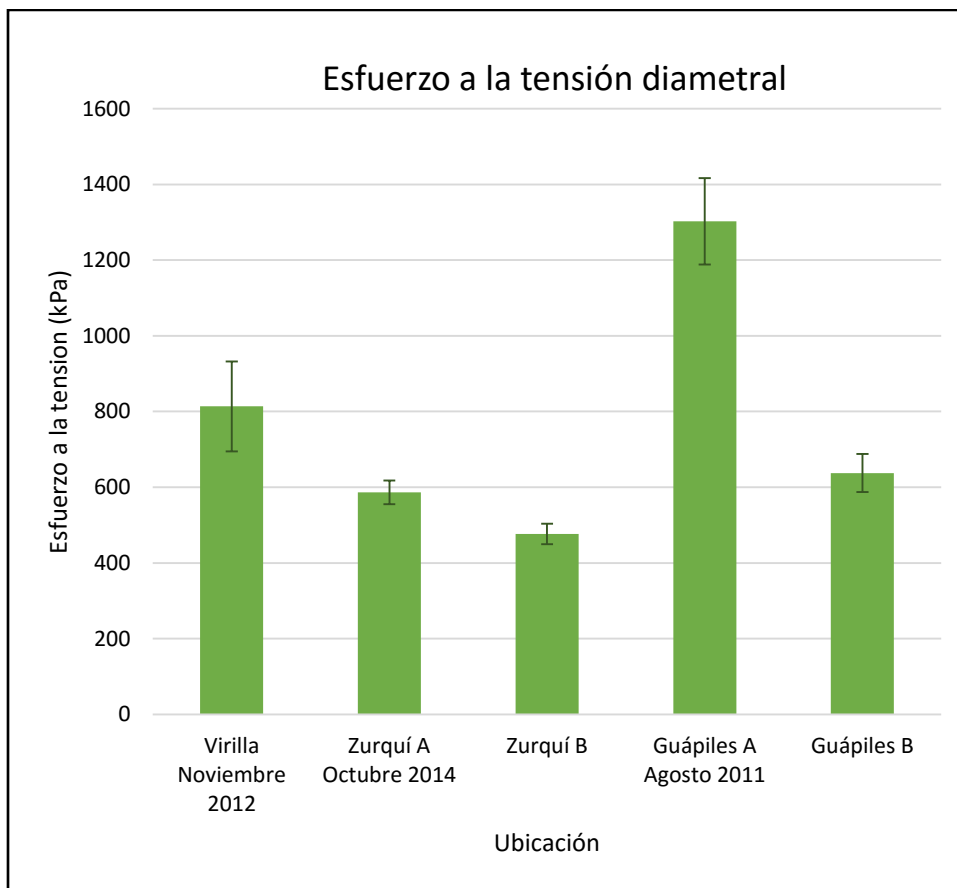


Figura 33. Esfuerzo a la tensión diametral de especímenes de campo

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para confirmar que si existen diferencias estadísticas significativas de una sección a otra, lo que confirmaría que el grado de precipitación que se expone una carpeta asfáltica si influye en su deterioro. Como se observa en el Cuadro 15 al aplicar el ANOVA, se obtiene un valor p mucho menor a 0,05 lo que demuestra que los esfuerzos a la tensión diametral de los núcleos extraídos si son diferentes estadísticamente entre ellos.

Cuadro 15. ANOVA para tensión diametral de especímenes de campo

Fuente	Suma de cuadrados	Estadístico F	p
Lugar	2537810	100,96	<0,0001
Error	157097		
Total	264907		

Como el análisis de varianza generó diferencias significativas entre los resultados de los esfuerzos a tensión diametral de los núcleos de campo se procede a realizar una prueba de comparaciones múltiples mediante el Método de Tukey; lo cual sirve para poder definir en qué clase de datos es donde se encuentran las diferencias significativas encontradas y asimismo cuales datos se pueden considerar como un solo grupo, que no tienen diferencias significativas entre ellos; ya que ANOVA solo nos indica que al menos una media de datos es diferente. Como se observa en Cuadro 16 se agrupan los resultados en 4 grupos, mostrando que solo las capas de la sección del Zurquí no tienen diferencias significativas, además de confirmar que es la sección con mayor deterioro encontrado.

Cuadro 16. Cuadro resumen de comparación mediante el Método de Tukey para esfuerzos a tensión diametral de especímenes de campo

Localización	Promedio	Grupo
Guápiles A	1302,83	A
Virilla	813,83	B
Guápiles B	637,67	C
Zurquí A	586,17	D
Zurquí B	476,67	D

En el Cuadro 17 se puede observar los promedios de los resultados del ensayo de Tensión Diametral realizados para la verificación de calidad de la mezcla asfáltica del día de producción de las diversas secciones estudiadas, en ese ensayo solo se le aplica un ciclo de baño en agua a 60°C durante 24 horas. Se puede denotar que las pastillas en promedio pierden menos de un 20% de resistencia, lo cual es aceptable según el porcentaje de aceptación del ensayo en Costa Rica que es un 75%.

Cuadro 17. Promedios de los resultados de ensayo de Tensión Diametral de verificación de calidad de la mezcla

Localización	Virilla	Zurquí	Guápiles
Esfuerzo a la Tensión (kPa) Control	1336	1177	1412
Desviación estándar	13,1	34	17,4
Esfuerzo a la tensión diametral (kPa) 1 ciclo sin congelamiento	1165	984	1130
Desviación estándar	15,7	15	28,9
Resistencia Retenida	87,2	83,6	80,03

En la Figura 34 se puede observar un gráfico comparativo en el cual se denota que las pastillas si sufren un deterioro con el acondicionamiento de un ciclo a 60°C, sin embargo si se compara con los esfuerzos obtenidos en el laboratorio para la mezcla ya colocada y con un deterioro producido por las condiciones climáticas en campo, realmente no indica si la mezcla es realmente susceptible al daño por humedad, ya que la mezcla obtenida en campo muestra un deterioro mayor que el indicado por la verificación de calidad e incluso en algunas secciones evaluadas en un corto periodo de tiempo.

El caso más crítico de deterioro es el Zurquí ya que es una zona con una precipitación muy alta, se observa que pierde aproximadamente un 51% de resistencia a la tensión diametral en un año de su colocación. Los resultados de la sección del Virilla indican que aproximadamente pierde un 40% de su resistencia en casi tres años desde su colocación. Sin embargo en la capa superior de Guápiles se observa que solo se ha perdido un 4% de esfuerzo a la tensión diametral a casi 4 años de su colocación, sin embargo el espesor de esa capa pudo ser un factor de afectación considerable.

Cuadro 18. Comparación de resultados de verificación de calidad con deterioro en campo

Localización	Esfuerzo a la Tensión control kPa	Esfuerzo a tensión diametral con deterioro de campo (Kpa)	RRTD laboratorio
Virilla	1336,00	813,73	60,91
Zurquí	1177,00	586,32	49,81
Guápiles	1412,00	1302,77	92,26

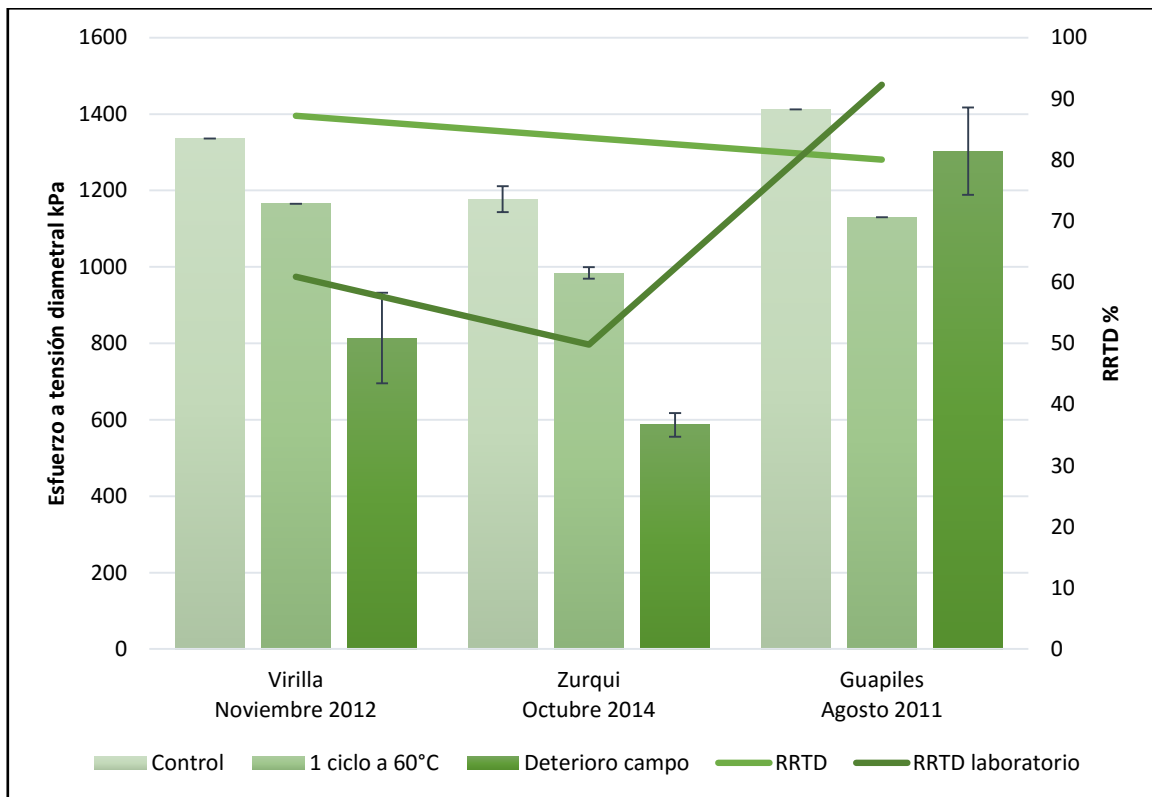


Figura 34. Resultados de Tensión Diametral de verificación de calidad de la muestra

En el Cuadro 19 y la Figura 35, se muestran los resultados de tensión diametral a los especímenes acondicionados con ciclos de congelamiento/descongelamiento en laboratorio. Como es de esperarse en su mayoría disminuye el esfuerzo a tensión conforme se aumentan los ciclos de acondicionamiento. Un punto que es importante destacar es que entre el ciclo 6 y 9 las pastillas prácticamente mantienen el esfuerzo, para después en el ciclo 12 tener el mayor incremento de deterioro, sin embargo entre el ciclo 12 y ciclo 15 se muestra un aumento de resistencia.

Cuadro 19. Resultados del ensayo a la tensión diametral a especímenes de laboratorio

Acondicionamiento	Carga Máxima (N)	Desviación estándar	Esfuerzo a tensión (kPa)	Desviación estándar	Resistencia Retenida a la tensión diametral (%)
Control	17600,67	372,86	1002,67	86,41	100,00
1 ciclo	17024,00	731,94	969,88	42,95	96,73
3 ciclos	14774,75	801,47	843,32	45,32	84,11
6 ciclos	12950,50	850,20	739,09	53,10	73,71
9 ciclos	12949,00	1646,54	735,09	92,17	73,31
12 ciclos	8591,25	280,64	490,09	17,47	48,88
15 ciclos	10431,00	1058,23	596,94	61,48	59,53

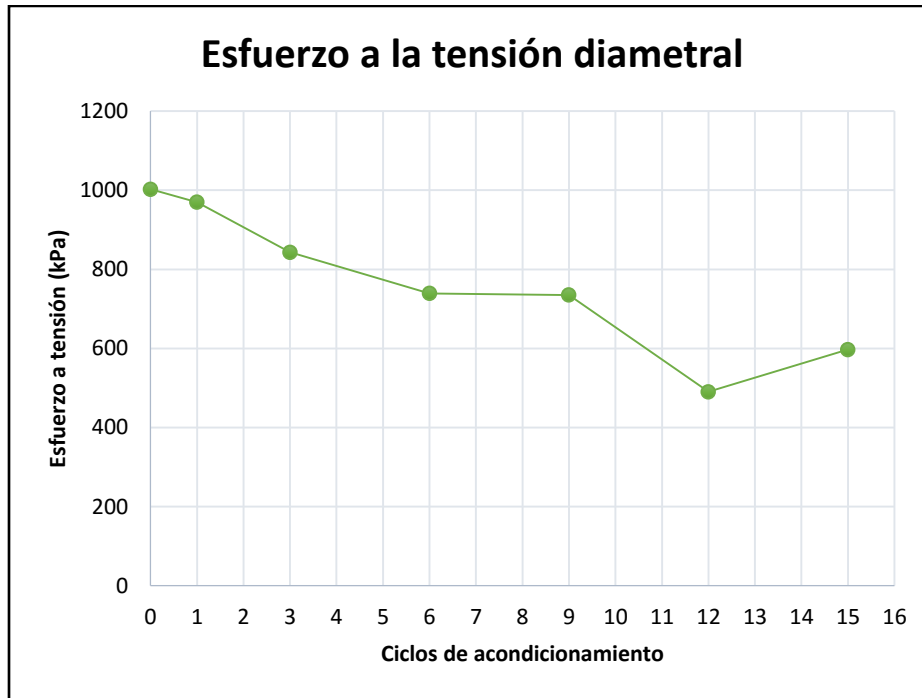


Figura 35. Esfuerzo a la tensión diametral de especímenes de laboratorio

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para confirmar los resultados obtenidos. Como se observa en el Cuadro 20 aplicando un ANOVA para un nivel de significancia de 0,05, se obtiene un valor p mucho menor a 0,05 lo que demuestra que aplicación de ciclos de acondicionamiento a los especímenes realmente genera diferencias estadísticas significativas en el deterioro de los mismos.

Cuadro 20. ANOVA para tensión diametral de especímenes de laboratorio

Fuente	Suma de cuadrados	Estadístico F	P
Acondicionamiento	737 563	40,94	<0.001
Error	57 043		
Total	794 606		

Luego de obtener mediante el análisis de varianza que si hay diferencias significativas se realiza una comparación mediante el Método de Tukey para poder comparar entre que cantidad de ciclos si se generan diferencias estadísticas significativas. Se obtuvo la clasificación mostrada en el Cuadro 21, donde se observa que se agrupan los ciclos de

acondicionamiento en 4 grupos diferentes. Es importante recalcar que a pesar de que pudo generarse un proceso de curado en el 15 ciclo de acondicionamiento según la clasificación de Tukey realmente no hay diferencia significativa entre el 15 y 12 ciclo ya que ambos se clasifican en grupo D. Además se confirma que entre el ciclo 6 y 9 no se genera un deterioro importante ya que no se encuentra diferencias estadísticas entre ambos. En el Anexo H se encuentran los resultados completos del Método de Tukey, donde se comparan todos los ciclos entre ellos y ver cuales si tienen diferencias estadísticas.

Cuadro 21. Cuadro resumen de comparación mediante el Método de Tukey para esfuerzos a tensión diametral de especímenes de laboratorio

Acondicionamiento	N	Promedio	Grupo	
Control	3	1003	A	
1 ciclo	3	970	A	B
3 Ciclos	4	8443	C	B
6 ciclos	4	739	C	
9 ciclos	4	735	C	
12 ciclos	4	597	D	
15 ciclos	4	490	D	

Para tener un cálculo más exacto de la cantidad de ciclos de acondicionamiento para producir un deterioro de los encontrados en los especímenes de campo se realiza una regresión lineal de los resultados, sin embargo se descarta el ciclo 15 para no afectar la pendiente, ya que se tiene la incertidumbre del resultado. En la Figura 36 se muestra la ecuación lineal obtenida con un R^2 de 93,45% el cual es un valor aceptable.

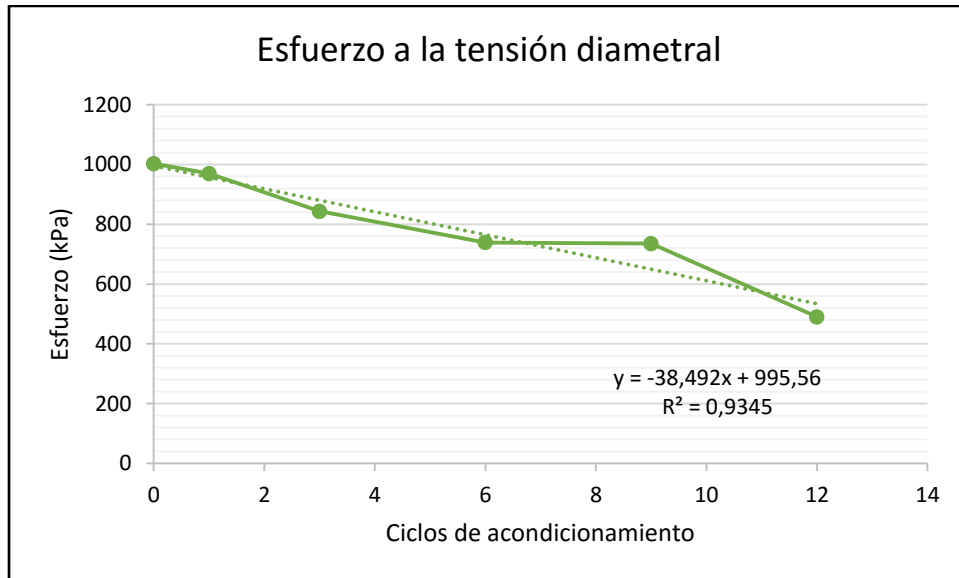


Figura 36. Regresión lineal del esfuerzo a la tensión diametral

En la Figura 37 se muestra el gráfico comparativo de los esfuerzos obtenidos en el ensayo de tensión diametral de los especímenes de laboratorio y el esfuerzo obtenido al evaluar la muestra extraída en la sección del Virilla, donde se muestra que un solo ciclo de acondicionamiento a un baño de 60°C no es suficiente para poder predecir la susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño por humedad. Como se muestra serían necesarios entre 3 a 6 ciclos para poder reproducir el deterioro encontrado en campo con las réplicas compactadas en laboratorio.

Si se utiliza la regresión lineal mostrada en la ecuación de la Figura 36 da como resultado aproximadamente 4,73 ciclos para alcanzar esfuerzo de 813,73 kPa. Esta sección es la que presenta menor deterioro al daño por humedad de todas las analizadas.

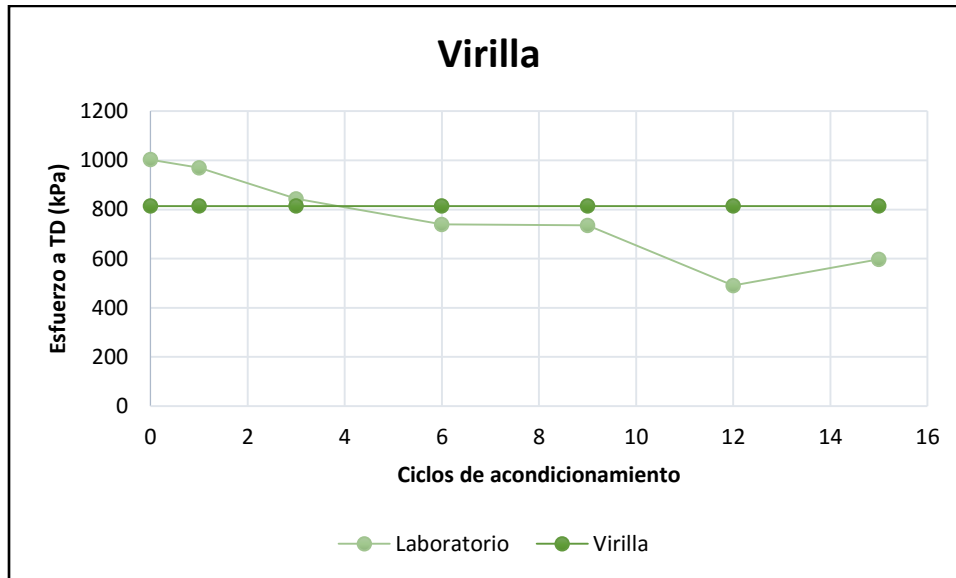


Figura 37. Comparación de esfuerzo a la tensión diametral de núcleos del Virilla

En la Figura 38 se muestra la comparación de los resultados del esfuerzo a la tensión diametral entre los especímenes compactados en laboratorio y los especímenes de ambas capas de la carpeta de la sección del Zurquí, donde de igual forma de lo que sucede en la sección del Virilla es necesario un acondicionamiento más agresivo del aplicado actualmente para poder predecir un deterioro al daño por humedad. Esta es la zona que presenta mayor deterioro, a pesar de que es la carpeta que tiene menos tiempo expuesta (aproximadamente un año), es necesario aplicar entre 9 – 12 ciclos de acondicionamiento para poder alcanzar el deterioro inducido por la humedad en la capa superficial; y mínimo 12 ciclos para alcanzar el deterioro de la segunda capa.

Si se utiliza la regresión lineal mostrada en la ecuación de la Figura 36 da como resultado aproximadamente 10,26 ciclos para alcanzar esfuerzo de 586,32 kPa que es el esfuerzo correspondiente a la capa superficial y 13 ciclos para alcanzar un esfuerzo de 476,77 kPa el cual es la capa inferior de la sección, es la capa con mayor deterioro encontrado.

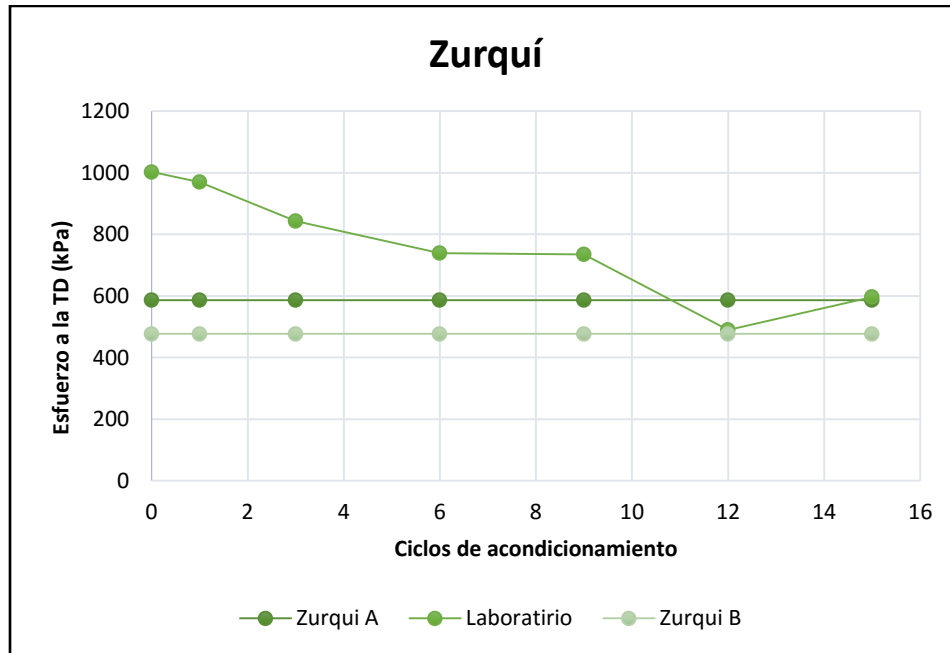


Figura 38. Comparación de esfuerzo a la tensión diametral de núcleos del Zurquí

En la Figura 39 se muestra la comparación de los resultados del esfuerzo a la tensión diametral entre los especímenes compactados en laboratorio y los especímenes de ambas capas de la carpeta de la sección de Guápiles, en esta sección la capa superficial no muestra un deterioro de daño por humedad. Sin embargo en la segunda capa de mezcla es necesario aplicar entre 9 – 12 ciclos de acondicionamiento para poder alcanzar el deterioro inducido por la humedad en campo.

Si se utiliza la regresión lineal mostrada en la ecuación de la Figura 36 da como resultado aproximadamente 9 ciclos para alcanzar esfuerzo de 637,57 kPa que es el esfuerzo correspondiente a la capa, ya que la capa superior tiene un esfuerzo de 1302,77 kPa el cual es superior al esfuerzo de las pastillas de control de laboratorio por lo que no se puede aproximar un ciclo mediante la regresión lineal.

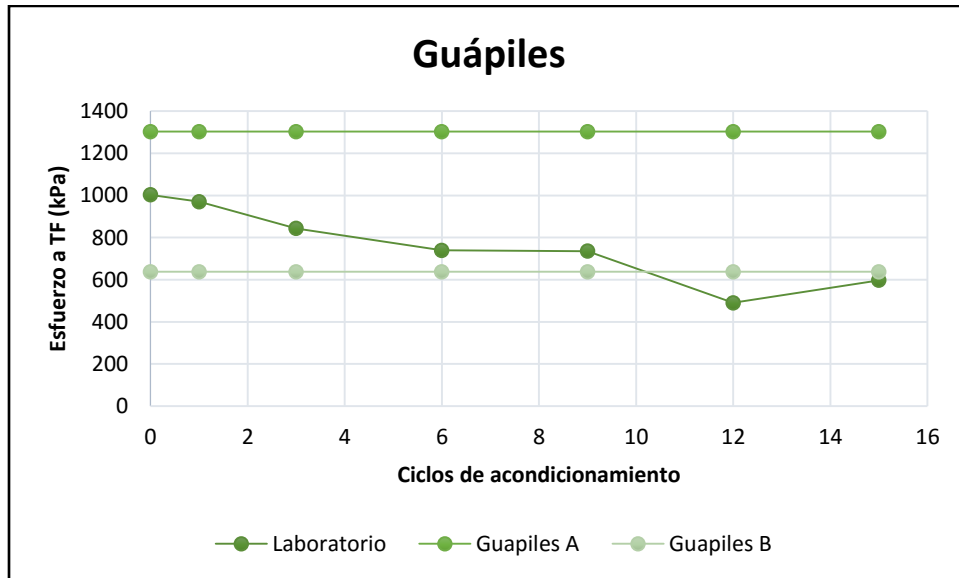


Figura 39. Comparación de esfuerzo a la tensión diametral de núcleos de Guápiles

Adicionalmente se comparan las resistencias retenidas obtenidas del ensayo a tensión diametral de especímenes de laboratorio mostradas en el Cuadro 19, con las resistencias retenidas de los especímenes de campo obtenidas al comparar el esfuerzo a control de los ensayos de verificación de calidad con los esfuerzos obtenidos del ensayo realizado a los especímenes de campo mostrados en el Cuadro 18. Se hace la comparación mediante una regresión lineal, de la misma forma con los esfuerzos a la tensión diametral se omiten los resultados del ciclo 15, por lo que se obtiene la ecuación de regresión lineal observada en Figura 40 con un R^2 de 93,45% el cual es un ajuste aceptable.

Cabe mencionar que sólo se pueden comparar las RRTD de las carpetas superficiales de cada sitio de estudio, ya que no se poseen datos de verificación de calidad de las capas inferiores.

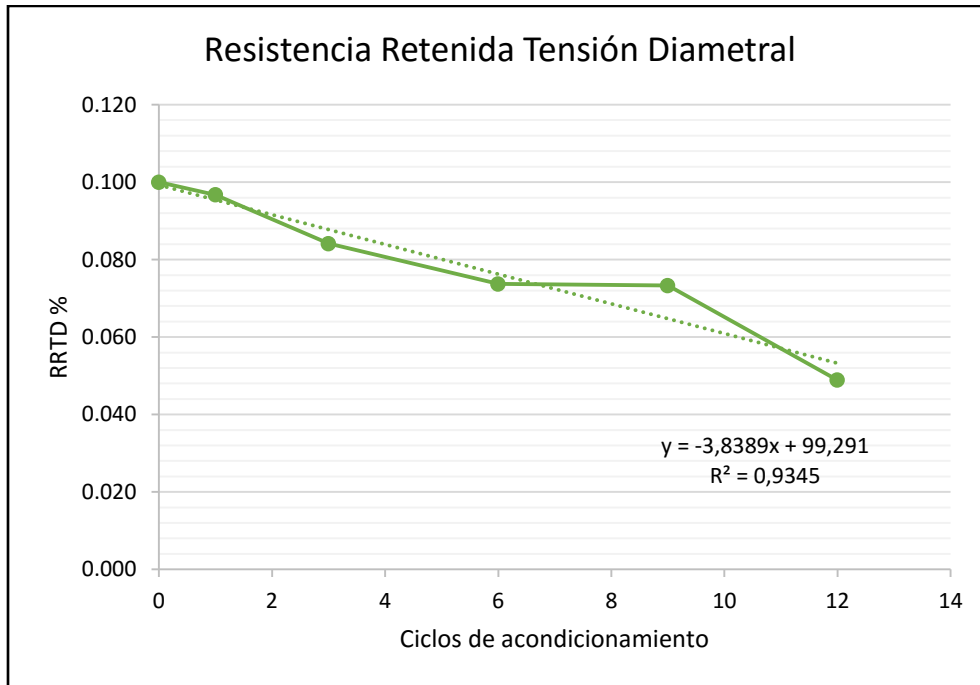


Figura 40. Regresión lineal de la resistencia retenida a la Tensión Diametral

Por lo que al utilizarse la regresión lineal obtenida en la Figura 40 se concluye que es necesario 9,7 ciclos de acondicionamiento para alcanzar la RRTD de 60,91% encontrada en los núcleos del Virilla a diferencia de los casi 5 ciclos necesitados para alcanzar el esfuerzo. En la sección del Zurquí son necesarios 12,5 ciclos de acondicionamiento para alcanzar la RRTD de 49,81% encontrada en campo a diferencia de los casi 10,37 ciclos para alcanzar el esfuerzo; y por último en la sección de Guápiles es necesario 2 ciclos de acondicionamiento para alcanzar una RRTD de 92,26% a diferencia del esfuerzo que no se pudo determinar un numero de ciclos. Para las carpetas inferiores de las secciones del Zurquí y Guápiles no se puede calcular un número de ciclos para alcanzar la RRTD, ya que no se tienen datos de verificación de calidad a la mezcla asfáltica. En el Cuadro 22 se muestra un cuadro resumen comparativo de los ciclos necesarios a aplicar para alcanzar la condición de deterioro encontrada.

Cuadro 22. Cuadro resumen de los resultados de ciclos necesarios a aplicar para alcanzar el deterioro

Localización	Esfuerzo a la tensión diametral kPa	Ciclos necesarios para alcanzar el esfuerzo	RRTD %	Ciclos necesarios para alcanzar RRTD
Virilla	813,7	4,7	60,9	9,7
Zurquí	586,3	10,3	49,8	12,4
	476,8	12,9	**	**
Guápiles	1302,8	*	92,3	2,0
	637,6	9,0	**	**

*No se puede obtener el número de ciclos necesarios, ya que el esfuerzo a la tensión diametral es mayor a los obtenidos de laboratorio.

**No se puede obtener el número de ciclos necesarios para alcanzar la RRTD, ya que no se tienen datos iniciales de verificación de calidad de la mezcla.

Cabe mencionar que los ciclos mostrados no se redondearon por efectos de análisis de comparación, sin embargo para efectos de ensayo de laboratorio es necesario redondear al ciclo superior.

Son necesarios más ciclos de acondicionamiento para alcanzar las resistencias retenidas de los especímenes de campo, esto es debido a que los esfuerzos de control obtenidos los ensayos de verificación de calidad son mayores que el esfuerzo de control obtenido en los especímenes de laboratorio, puede ser ya que a pesar de que se están trabajando con mezclas de una misma fuente de agregado y mismo asfalto, las granulometrías son un poco diferentes al igual que los contenidos de asfalto.

4.3. Módulo Resiliente

En los siguientes cuadros y figuras se encuentran los resultados obtenidos del ensayo de Módulo Resiliente a la tensión diametral que se le aplicó a los especímenes compactados en laboratorio y los extraídos de las diferentes zonas de estudio. A diferencia del esfuerzo a tensión diametral, no se obtienen datos iniciales de control de los núcleos de campo ya que el Módulo Resiliente no es un parámetro que se utiliza en la verificación de calidad de la mezcla asfáltica.

En el Cuadro 23 se observan los promedios de los resultados de Módulo Resiliente obtenidos de los núcleos extraídos en sitio. Se registra el promedio de la carga máxima aplicada en el eje diametral y el Módulo Resiliente promedio obtenido a partir de la carga máxima aplicada.

Cuadro 23. Promedio de los resultados del Módulo Resiliente a Tensión Diametral de especímenes de campo

Localización	Capa	Carga aplicada (N)	Desviación estándar	Módulo Resiliente (MPa) 25°C, 10Hz	Desviación estándar
Virilla	A	2306,20	52,03	2936,20	845,03
Zurquí	A	1239,40	133,51	2180,20	353,88
	B	1135,00	90,84	1971,60	315,49
Guápiles	B	1720,60	158,41	3907,20	122,33

En la Figura 41 se puede observar un gráfico comparativo de los Módulos Resilientes obtenidos, y como estos tienen el mismo comportamiento que los esfuerzos a la tensión diametral. Las dos capas de la sección del Zurquí son las que registran módulos más bajos, sin embargo a diferencia del esfuerzo a tensión diametral los módulos obtenidos no tienen una diferencia significativa. La sección del Virilla tiene un deterioro intermedio, en cambio la sección de Guápiles es la que presenta un módulo más alto, indicando ser el menor deterioro.

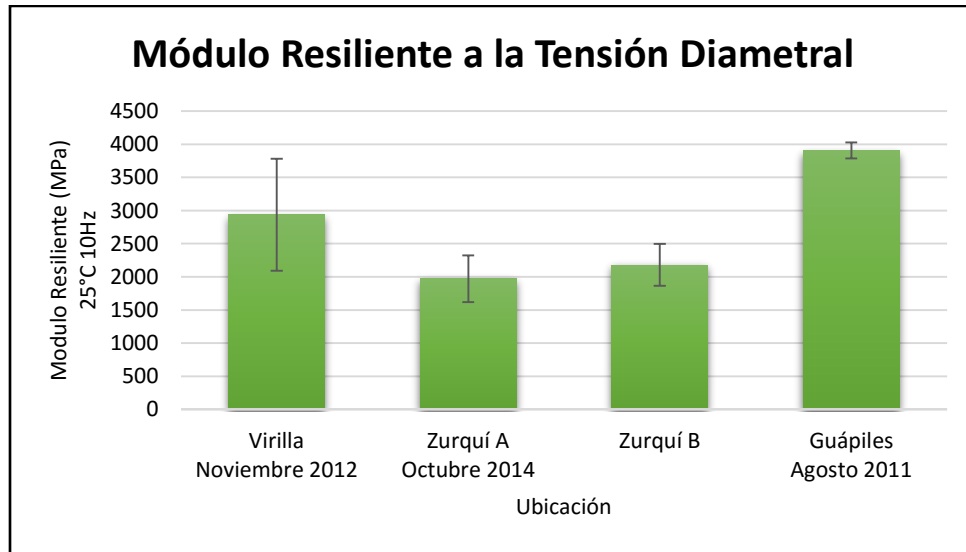


Figura 41. Módulo Resiliente a la tensión diametral de especímenes de campo

De igual manera que con los resultados de esfuerzo a la tensión diametral se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con los resultados de Módulo Resiliente obtenidos de los especímenes de campo. Como se observa en el Cuadro 24 Cuadro 15 al aplicar el ANOVA, se obtiene un valor p mucho menor a 0,05 lo que demuestra que los Módulos Resilientes al igual que los esfuerzos a la tensión diametral de los núcleos extraídos si tienen diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

Cuadro 24. ANOVA para Módulo Resiliente a la Tensión Diametral de especímenes de campo

Fuente	Suma de cuadrados	Estadístico F	p
Lugar	11521776	12,96	0,0001
Error	4741090		
Total	16262865		

Como el análisis de varianza generó diferencias significativas entre los resultados de los Módulos Resilientes a tensión diametral de los núcleos de campo se procedió a realizar una clasificación mediante el Método de Tukey para determinar entre que sitios existen esas diferencias. Como se observa en Cuadro 25 Como el análisis de varianza generó

diferencias significativas entre los resultados de los esfuerzos a tensión diametral de los núcleos de campo se procede a realizar una prueba de comparaciones múltiples mediante el Método de Tukey; lo cual sirve para poder definir en qué clase de datos es donde se encuentran las diferencias significativas encontradas y asimismo cuales datos se pueden considerar como un solo grupo, que no tienen diferencias significativas entre ellos; ya que ANOVA solo nos indica que al menos una media de datos es diferente. Como se observa en Cuadro 16 se agrupan los resultados en 4 grupos, mostrando que solo las capas de la sección del Zurquí no tienen diferencias significativas, además de confirmar que es la sección con mayor deterioro encontrado.

Cuadro 16 se agrupan los resultados en 3 grupos, las mismas agrupaciones que se obtuvieron en los esfuerzos a la tensión diametral.

Cuadro 25. Resumen de comparación mediante el Método de Tukey para Módulo Resiliente a tensión diametral de especímenes de campo

Lugar	Promedio	Grupo
Guápiles	3907,2	A
Virilla	2936,2	B
Zurquí A	586,17	C
Zurquí B	476,67	C

En el Cuadro 26 y Figura 42 se observan los resultados del Módulo Resiliente de los especímenes compactados en laboratorio. Como es de esperarse a mayor número de ciclos de acondicionamiento en su mayoría tiende a decrecer el módulo. De igual manera que el esfuerzo a la tensión diametral el ciclo 15 tiene un comportamiento no esperado, aumenta el módulo, sin embargo se puede deber a lo explicado anteriormente. Además en el Módulo Resiliente del ciclo 9 muestra un ligero aumento con respecto al ciclo 6, sin embargo es bastante insignificante para considerar un efecto de curado en la mezcla.

Cuadro 26. Módulo Resiliente a la tensión diametral de especímenes de laboratorio

Acondicionamiento	Carga Aplicada (N)	Desviación estándar	Módulo Resiliente (MPa) 25°C, 10 Hz	Desviación estándar	Resistencia Retenida (%)
Control	2186,00	10,58	4567,00	219,25	100,00
1 ciclo	2620,00	24,04	4414,00	111,72	96,65
3 ciclos	2182,33	11,93	3223,67	474,99	70,59
6 ciclos	1848,00	11,00	2876,00	374,58	62,97
9 ciclos	1552,00	13,11	3372,00	78,25	73,83
12 ciclos	1231,00	5,20	2035,67	80,06	44,57
15 ciclos	1384,67	4,16	2863,00	60,65	56,12

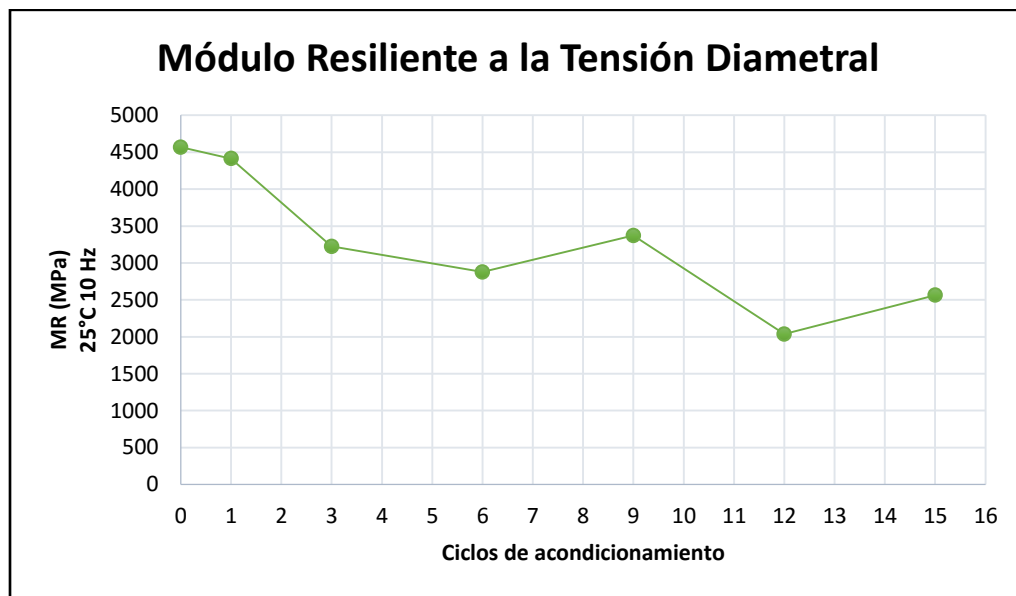


Figura 42. Módulo Resiliente a la Tensión Diametral de especímenes de laboratorio

De igual forma que a los resultados del ensayo tensión diametral, se le realizó el análisis de varianza a los resultados obtenidos del ensayo de Módulo Resiliente a la tensión diametral. El resumen de los resultados se expone en el Cuadro 27 donde se observa que da un valor de p mucho menor a 0,05 lo cual confirma que aplicarle ciclos de acondicionamiento a la mezcla da diferencias estadísticas significativas por lo que se puede decir que si contribuye al daño por humedad.

Cuadro 27. ANOVA para Módulo Resiliente a la Tensión Diametral de especímenes de laboratorio

Fuente	Suma de cuadrados	Estadístico F	P
Acondicionamiento	14215963	35,29	<0.001
Error	872891		
Total	15088854		

Además se realizó una comparación estadística mediante el Método de Tukey para agrupar en cuales ciclos de acondicionamiento hay diferencias significativas, por lo que en el Cuadro 28 se puede observar que se crean 3 grupos de acondicionamiento que son estadísticamente diferentes entre ellos, además que se confirma que a pesar de que en el ciclo 9 se obtuvo un aumento del módulo este no muestra diferencias significativas con 3 y 6 ciclos ya que ambos se agrupan en el grupo B.

Cuadro 28. Resumen de comparación mediante el Método de Tukey para Módulo Resiliente a tensión diametral de especímenes de laboratorio

Acondicionamiento	N	Promedio	Grupo
Control	3	4567	A
1 ciclo	2	4414	A
3 Ciclos	3	3223,7	B
6 ciclos	3	2876	B
9 ciclos	3	3372	B
12 ciclos	3	2035,67	C
15 ciclos	3	2563	C

Para hacer una aproximación más exacta de los ciclos necesarios a aplicar para alcanzar una condición de deterioro se realiza una regresión lineal de los datos de Módulo Resiliente obtenidos en laboratorio, sin embargo se aplicó una ecuación polinómica de grado 2 para mejorar el factor de ajuste, ya que con la lineal se obtenía un R^2 de 74%. Para encontrar la ecuación se divide en dos partes de 0 a 6 ciclos y de 6 a 12 ciclos con las ecuaciones mostradas en la Figura 43 con un factor de ajuste de 95,3% y 100%

respectivamente. Se descartó el punto de 15 ciclos para que no desajustara la ecuación, además como entre el punto 6 y 9 no se encuentran diferencias significativas se modificó el punto 9 en el modelo para mejorar la línea de ajuste.

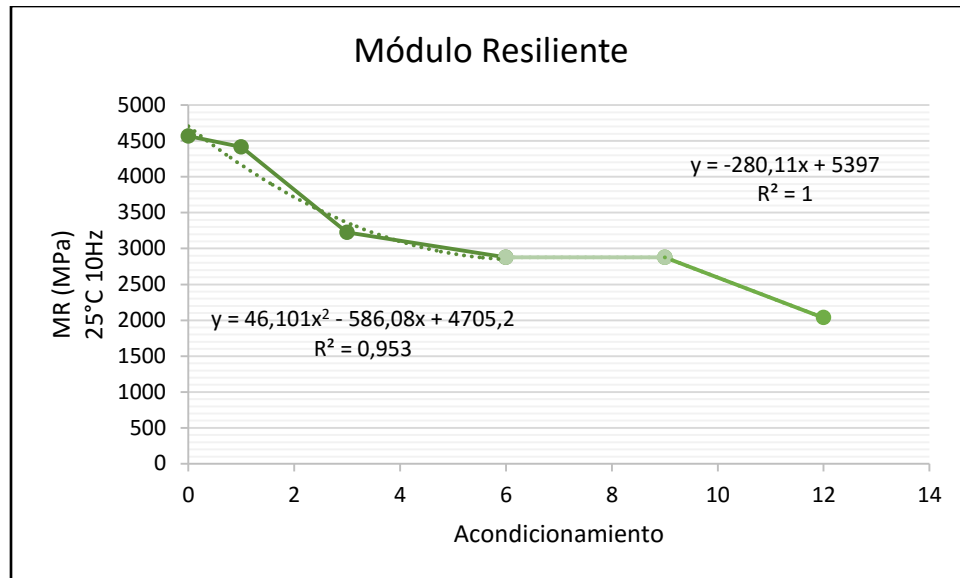


Figura 43. Regresión de Módulo Resiliente a la tensión diametral

En la Figura 44 se presenta el gráfico comparativo de los Módulos de Resiliencia obtenidos entre los núcleos de extraídos en la sección del Virilla y los compactados en el laboratorio, donde se observa que son necesarios aproximadamente 6 ciclos de acondicionamiento para igualar los módulos, utilizando la ecuación de la Figura 43 se obtiene que se necesitan 5,8 ciclos para alcanzar un Módulo Resiliente de 2 936,2 MPa. Al igual los ensayos de tensión diametral evidencia que un solo ciclos de baño de agua a 60°C no es suficiente para predecir el deterioro real de la muestra.

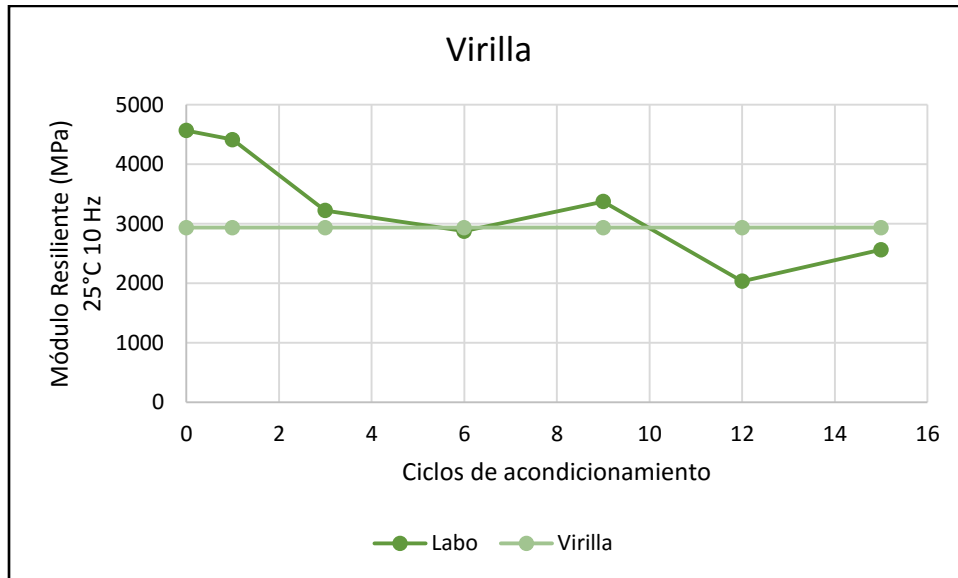


Figura 44. Comparación de Módulo Resiliente de núcleos del Virilla

En la Figura 45 se presenta el gráfico comparativo de los Módulos de Resiliencia obtenidos entre los núcleos de extraídos en la sección del Zurquí y los compactados en el laboratorio, donde se observa que son necesarios al menos 12 ciclos o más de acondicionamiento para igualar los módulos en ambas capas del Zurquí, lo cual se confirma utilizando la ecuación de la Figura 43; al igual que en los resultados del esfuerzo a la tensión diametral es la sección de estudio con más deterioro encontrado.

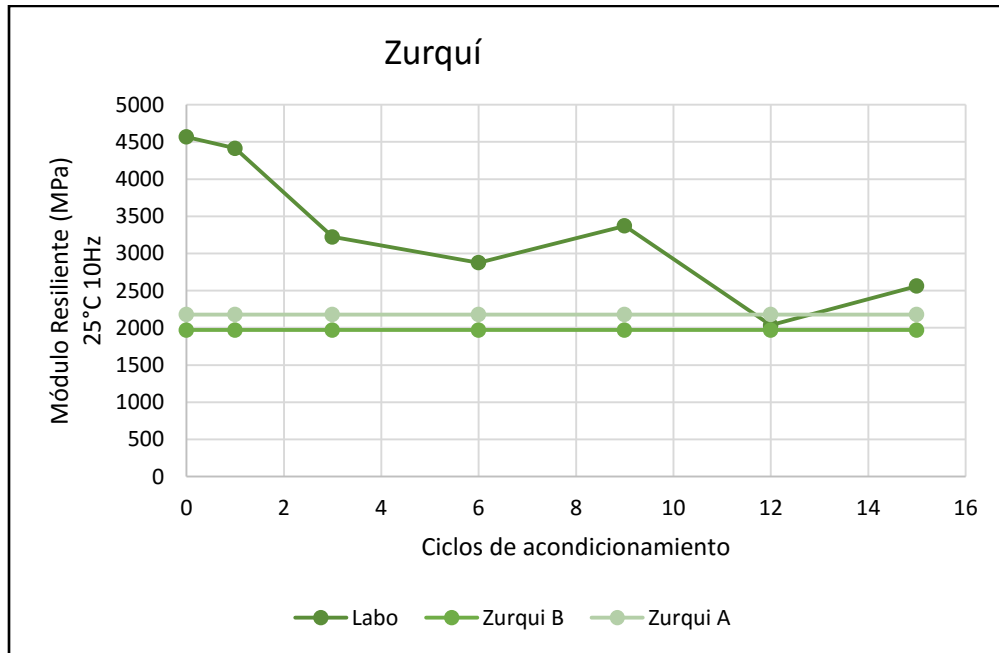


Figura 45. Comparación de Módulo Resiliente de núcleos del Zurquí

En la Figura 46 se presenta el gráfico comparativo de los Módulos Resilientes obtenidos de los especímenes de campo de Guápiles y los compactados en laboratorio, donde se observa que son necesarios de 1 a 3 ciclos de acondicionamiento para poder obtener el deterioro de campo. Al utilizar la ecuación de la Figura 43 se obtiene que se necesitan 1,55 ciclos de acondicionamiento para alcanzar un Módulo Resiliente de 3 907,2 MPa. Al igual que con los resultados obtenidos a partir de la tensión diametral la capa de Guápiles es la que presenta muy poco deterioro, sin embargo en los resultados de tensión diametral no era necesario aplicarle ningún ciclo de acondicionamiento ya que la pastilla tenía un esfuerzo mayor al de control de laboratorio .

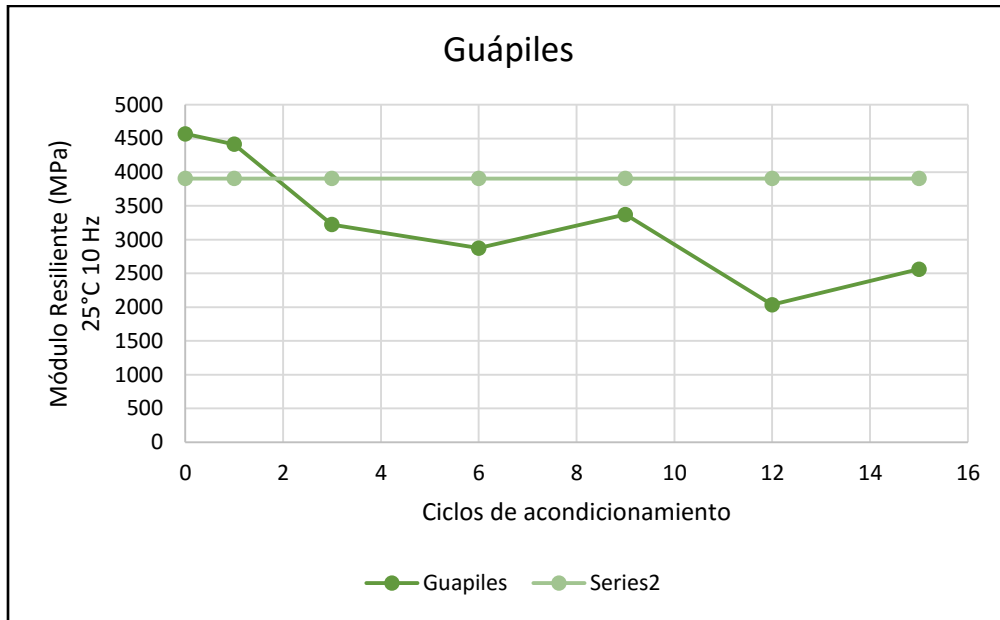


Figura 46. Comparación de Módulo Resiliente de núcleos de Guápiles

Según la Figura 47 se pueden observar las Resistencias Retenidas del esfuerzo y del Módulo Resiliente a la tensión diametral de las pastillas compactadas en laboratorio. Se denota un comportamiento muy similar entre ellos a mayor ciclos de acondicionamiento mayor el deterioro de la pastilla, donde en el primer ciclo no se obtiene un deterioro muy acelerado, ya en el 3 y 6 ciclo se empieza a deteriorar más la pastilla, sin embargo en 9 ciclo prácticamente no sufre ningún deterioro con respecto al anterior, para luego en el 12 ciclo tener el mayor deterioro inducido.

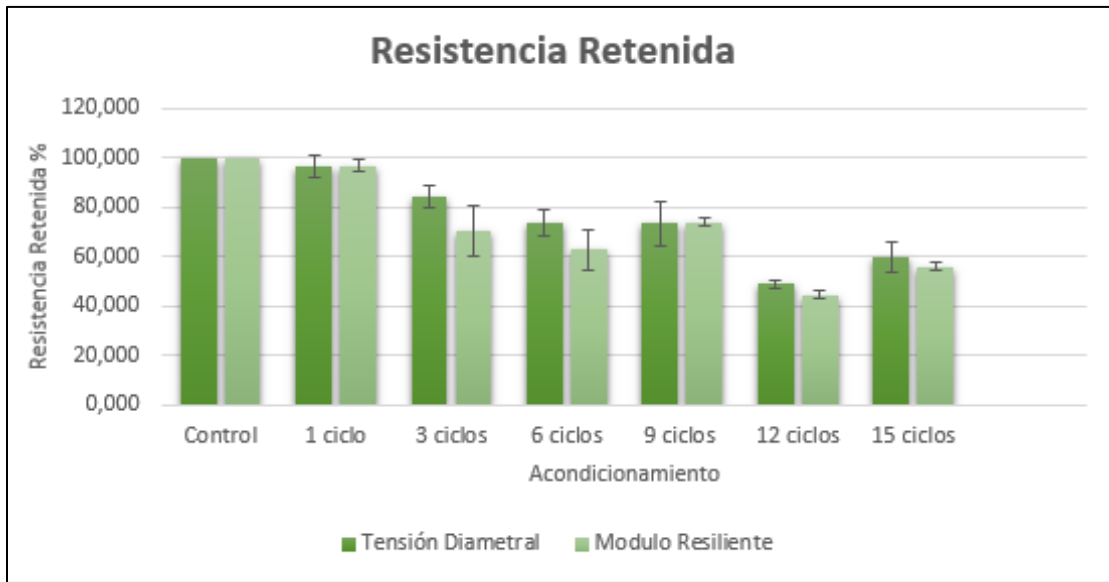


Figura 47. Resistencia retenida de especímenes de laboratorio

Si se comparan los resultados de esfuerzo a la tensión diametral con los de Módulo Resiliente, se observa que en general es necesario aplicar más ciclos de acondicionamiento a las pastillas de laboratorio para alcanzar los Módulos Resilientes que se obtuvieron de las pastillas de campo, esto debido a que se cree que el Módulo Resiliente es más susceptible a los cambios en las propiedades del ligante asfáltico y la sensibilidad de la mezcla al daño por humedad (Epps, y otros, 2000).

Cuadro 29. Cuadro resumen de los ciclos necesarios para alcanzar el Módulo Resiliente

Localización	Módulo Resiliente (MPa) 25°C 10 Hz	Ciclos necesarios para alcanzar el módulo
Virilla	2936,20	5,8
Zurquí	2180,20	>12
	1971,60	>12
Guápiles	3907,20	1,55

Los resultados de la sección del Virilla fueron los esperados tanto en esfuerzo a la tensión diametral como en el Módulo Resiliente, ya que fue la sección con menos deterioro encontrado y la que necesita menos ciclos de acondicionamiento lo cual es esperable por los rangos de precipitación que tiene la zona.

Los resultados de la sección del Zurquí también fueron los esperados, ya que ambas capas son las que muestran mayor deterioro y son las que más están expuestas a condiciones climáticas extremas, por lo que es la que necesita mayor ciclos de acondicionamiento.

Los resultados de la capa de Guápiles A, no dieron según lo supuesto ya que para su fecha de colocación y su precipitación media anual se obtuvieron muestras con menor deterioro que los otros especímenes. Puede ser debido al poco espesor de la capa, ya que lo que se colocó en zona fue lo que se conoce comúnmente como un "tratamiento superficial" o una capa no estructural que tiene como objetivo mejorar la transividad de la vía. Cuando se tienen pastillas de espesores muy alejados a lo que indica la norma, a pesar de que los ensayos tomen en cuenta las dimensiones de la pastilla se puede generar una disminución en la representatividad del ensayo. Además en una capa con un espesor menor a lo recomendado (4 veces el tamaño máximo del agregado) puede generar problemas de compactación in situ, así como fracturación de las caras del agregado, entre otras cosas.

Otro resultado que no fue como el esperado fue en las pastillas con un acondicionamiento de 15 ciclos donde se puede observar un incremento en la resistencia con respecto al 12 ciclo, sin embargo se debe tomar en cuenta que hubo un inconveniente en el procedimiento de ensayo ya que por razones ajenas se tuvo que pausar el ciclo 15 del acondicionamiento, lo que pudo crear un proceso de curación a la mezcla. Otra razón pudo ser que ya a partir de un número de ciclos, este tipo de acondicionamiento para inducir el daño por humedad a la pastilla deje de ser efectivo.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

Al analizarse los resultados de las muestras de los sitios de extracción se puede intuir que la precipitación a la que está expuesta la carpeta asfáltica a lo largo de su vida tiene gran influencia en el deterioro prematuro de la mezcla asfáltica, de manera que si no se logra predecir si una mezcla es susceptible o no al daño por humedad puede generar pérdidas económicas en reparaciones prematuras que podrían evitarse, o perderse el confort adecuado de la carretera cuando ya el daño ha avanzado mucho, generando baches o fisuramiento prematuro.

Calibrar los ensayos que se realizan en los laboratorios, con su desempeño en campo es muy importante, ya que es donde realmente se puede decidir si la mezcla tiene una alta resistencia ya sea a las cargas de tráfico o ambientales. Además que las inversiones de tiempo y económicas que se le realiza a los ensayos de laboratorio estarían respaldados, así como la confiabilidad de los mismos.

Si se comparan los resultados obtenidos de los ensayos de desempeño aplicados a las tres secciones de estudio, se puede observar que la zona con mayor deterioro es la del Zurquí con aproximadamente una pérdida de esfuerzo en tensión diametral del 49%, lo que era lo esperado ya que posee un rango de precipitaciones que pueden clasificarla como una zona con lluvias excesivas; a pesar de ser la carpeta asfáltica colocada más reciente. En cambio la zona del Virilla, que es la sección de estudio con el menor rango de precipitación, muestra un deterioro menor, tal como se observan en las Figuras 48 y 49.

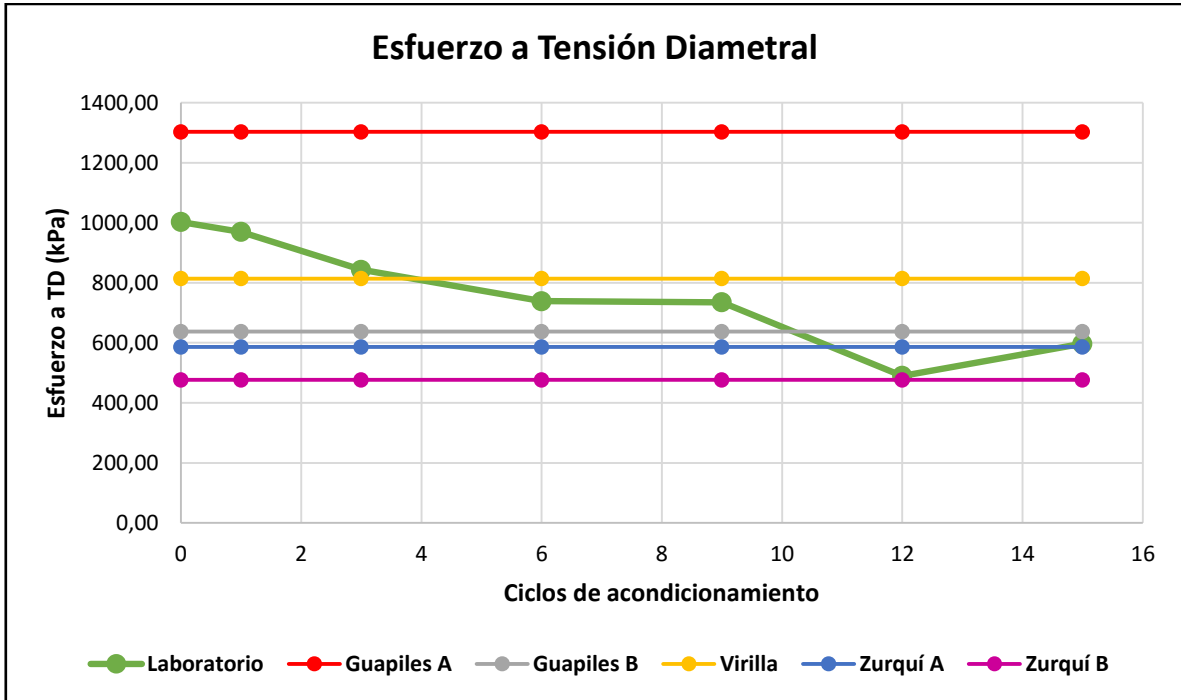


Figura 48. Resumen de los resultados obtenidos con el ensayo de Tensión Diametral

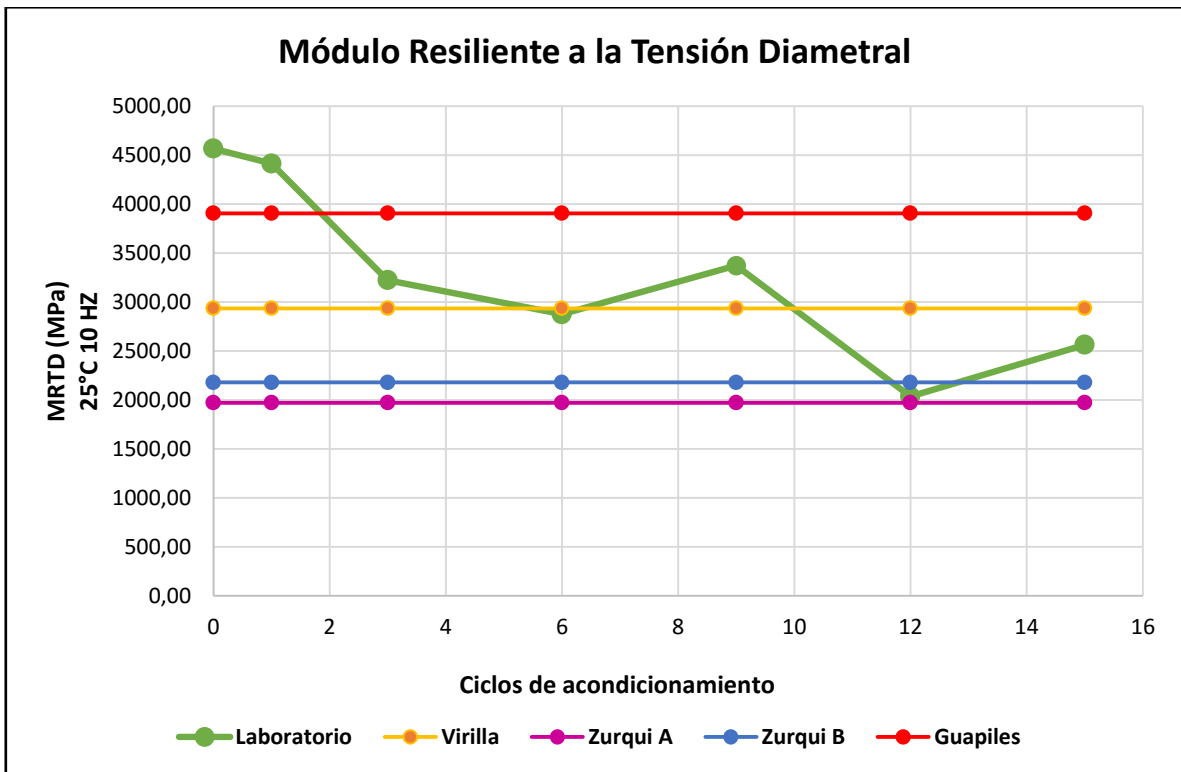


Figura 49. Resumen de los resultados obtenidos del ensayo de Módulo Resiliente

Por lo que un adecuado acondicionamiento de las muestras de laboratorio puede ayudar a predecir si una mezcla se va a deteriorar o no en la presencia de agua, sin embargo el acondicionamiento que se utiliza actualmente en el país de un baño de agua a 60°C por 24 horas puede no ser suficiente si se tienen rangos de precipitaciones muy altas, para una adecuada predicción.

Según los resultados obtenidos es necesario al menos 12 ciclos de congelamiento / descongelamiento para poder deteriorar los especímenes compactados en laboratorio de manera que se alcancen los esfuerzos o Módulos Resilientes de los especímenes de campo con deterioro más crítico. Incluso son necesarios al menos 3 ciclos de congelamiento / descongelamiento en el esfuerzo de tensión diametral y al menos 5 ciclos en Módulo Resiliente para inducir a especímenes de campo el deterioro encontrado en la sección menos crítica encontrada, tal como se observa en el Cuadro 30.

Cuadro 30. Resumen de los resultados obtenidos

Espécimen	Esfuerzo a la tensión diametral (kPa)	Ciclos necesarios para alcanzar el esfuerzo	RRTD %	Ciclos necesarios para alcanzar RRTD	Módulo Resiliente (Mpa) 25°C 10 Hz	Ciclos necesarios para alcanzar el MR
Virilla	813,7	4,7	60,9	9,7	2936,2	5,8
Zurquí	586,3	10,3	49,8	12,4	2180,2	>12
	476,8	12,9	**	**	1971,6	>12
Guápiles	1302,8	*	92,3	2,0	3907,2	1,5
	637,6	9,0	**	**		

A pesar que los resultados de esfuerzo de tensión diametral y Módulo Resiliente tienen el mismo comportamiento, suelen disminuir conforme se le van aumentando los ciclos de acondicionamiento. Como se observa en el Cuadro 30 el número de ciclos de acondicionamiento necesarios varía dependiendo del ensayo de desempeño utilizado, ya

que es necesario más ciclos de acondicionamiento aplicados a las pastillas de Módulo Resiliente para igualarlos con los especímenes de campo, esto infiere a que el Módulo Resiliente es menos susceptible al daño por humedad que el esfuerzo a Tensión Diametral.

De los sesgos que pudieron alterar los resultados del proyecto se encuentran, primero que se tuvo que detener el último ciclo de acondicionamiento a las pastillas de 15 ciclos por dos días por razones ajenas a la investigación, lo que pudo ocasionar un proceso de curado, ya que tanto los módulos como los esfuerzos dieron más altos en el 15 ciclo que en 12 ciclos.

Los ensayos de desempeño realizados a la carpeta superficial de Guápiles no arrojaron resultados según lo esperado, ya que obtuvo que es la capa con menor deterioro a pesar que llevan más tiempo colocados y están expuestos a una precipitación promedio anual entre 6000 y 7000 mm. Sin embargo esta carpeta es lo que popularmente en Costa Rica se denomina "tratamiento superficial", que corresponde a una capa de 3 cm de espesor, y a pesar que los resultados del ensayo de Tensión Diametral y Módulo Resiliente si tomen en cuenta la altura del espécimen, mientras más se aleje está a la propuesta de la norma menos representativo es el ensayo.

Otro factor que pudo alterar los resultados, fue que a pesar se utilizara una mezcla asfáltica producida en la misma planta de producción y con una misma fuente de agregado que las mezclas asfálticas colocadas en las tres secciones de estudio, difieren entre ellas en periodos de producción por lo que los diseños de mezcla varían ligeramente.

CAPITULO 6.RECOMENDACIONES

Incluir la parte de congelamiento, no sólo las 24 horas en agua a 60°C cuando se realiza el ensayo de Tensión Diametral, ya que solo el agua caliente prácticamente no genera deterioro.

Realizar los ensayos para otras mezclas producidas en Costa Rica, así como en otras carreteras con diferentes rangos de precipitación para poder realizar análisis estadísticos más detallados que incluyan un análisis experimental; y empezar a diseñar mezclas tomando en cuenta un factor tan importante para el país como es el clima al cual se somete el pavimento.

Se obtuvieron diferentes resultados de acondicionamiento según su rango de precipitación, por lo que debería de tomarse en cuenta el clima de la zona cuando se realiza el diseño de la mezcla asfáltica a utilizar, así como sus parámetros de aceptación de los ensayos de calidad.

Empezar a calibrar los ensayos de verificación de calidad con el desempeño obtenido de las mezclas asfálticas colocadas.

Se obtuvo que se requieren aproximadamente 13 ciclos de acondicionamiento para alcanzar el deterioro más crítico encontrado; por lo que realizar ese tipo de acondicionamiento para el ensayo en verificación de calidad de una muestra no es factible para un laboratorio, ya que representa mucho tiempo de espera, por tanto se recomienda hacer un estudio para replantear el porcentaje de aceptación actual del ensayo según el rango de precipitaciones de la zona así como el número de ciclos de acondicionamiento aplicados a los especímenes compactados, como se observa en el Cuadro 31. Cabe mencionar que esos porcentajes de aceptación se muestran de manera de ejemplo y se obtuvieron con los resultados obtenidos en el proyecto, por lo que para aplicarlos a otras condiciones se tiene que tomar en cuenta el alcance y limitaciones del presente proyecto.

Cuadro 31. Ejemplo de la variación de los porcentajes de aceptación según la precipitación

Precipitación media anual (mm)	Porcentajes de aceptación					
	1 ciclo	3 ciclos	6 ciclos	9 ciclos	10 ciclos	13 ciclos
1500-2000	106,7	94,1	83,7	83,3	75,0	-
>7000	121,9	109,3	98,9	98,5	86,1	75,0

Como se observa en el Cuadro 31 para ambos rangos de precipitaciones a un ciclo de acondicionamiento supera el 100% de resistencia retenida, por lo que se recomienda incluir a la mezcla asfáltica aditivos que ayuden a mejorar la adhesión entre el ligante y el agregado para poder disminuir el daño por humedad y mejorar el desempeño de las carreteras.

Se recomienda cuando se realicen ensayos incluyendo especímenes extraídos en campo, extraer núcleos sólo para los poder determinar el porcentaje de vacíos.

Aplicar más ciclos de acondicionamiento utilizando más mezclas para ver si en algún punto este tipo de inducción de deterioro deja de ser efectivo a la mezcla.

CAPITULO 7.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO . (2011). *T 283, Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt to Moisture Induced Damage.*
- AASHTO. (1996). *TP31-96 Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension.*
- Aguiar Moya, J. (2004). *Valoración de Resistencia al Daño por Humedad y a la Defromación Permanente en Mezclas Asfálticas con Matriz de agregado Grueso de Origen Volcanico.*
- Aguiar Moya, J. (2014). *Caracterización del daño por humedad en mezclas asfálticas. Construyendo Caminos.*
- ASTM. (1995). *D 4123 Standar Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures.*
- Bausano , J., Kvasnak, A., & Williams, C. (5 de Abril de 2006). *Development of SImple Performance Test Using Laboratory Test Procedures to Illustrate the Effects of Moisture Damage of Hot Mix Asphalt.*
- Bojorque, J. (2012). *Diseño de Mezclas Asfálticas Mediante el Método Superpave.* Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Carol, S., Masad, E., Bhasin, A., & Little, D. (2008). *Moisture susceptibility of asphalt mixture Part 1 and 2. International Journal of Paviment Engineering, 81 - 98.*
- Caro-Spindel , S., & Alvarez-Lugo, A. E. (Marzo de 2011). *valuación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas. (58), 95-104.* Medellín, Colombia: *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia.* Recuperado el 01 de Marzo de 2016, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43021467010ER>
- Castro, P. (2016). *Documentos de clase TEC.*
- Elizondo, F. (2015). *Notas de clase de curso de laboratorio de pavimentos.* UCR.
- Epps, J., Sebaaly, P., Peneranda , J., Maher, M., McCann, M., & Hand, A. (2000). *Compatibility of a test for moisture-induced damage with Superpave volumetric mix design. Transportation Research Board.*
- Federal Highway Administration. (2012). *Superpave gyratory compactors. Pavement Technology.*
- FHWA. (1994). *Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave.* Lexington.

- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., & Sandoval Sandoval, C. (2005). Análisis comparativo de los métodos marshall y superpave para compactación de mezclas asfálticas. *Sanfandila*.
- Garnica Anguas, P., Flores Flores, M., Góme López, J., & Delgado Alamilla, H. (2005). *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas*. Mexico: Sanfandila.
- Hicks, R. (1991). *Moisture Damage in Asphalt Concrete*. Washington: Transportation Research Board.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2005). Caracterización geomecánica de las mezclas asfálticas. Sanfandila, Mexico. Recuperado el 16 de Marzo de 2016, de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt267.pdf>
- Jiménez Acuña, M. (2012). Consideraciones generales sobre la compactación de especímenes de mezcla asfáltica en caliente en el Compactador Giratorio Superpave. *Métodos y Materiales*.
- Kringos, N., Azari, H., & Scarpas, A. (2009). Identification of Parameters Related to Moisture Conditioning That Cause Variability in Modified Lottman Test. *Transportation Research Record*, 1-11.
- Kringos, N., Azari, H., & Scarpas, A. (s.f.). Identification of Parameters Related to Moisture Conditioning That Cause Variability in Modified Lottman Test. *Transportation Research Record*.
- LanammeUCR. (2014-2015). *Informe de Evaluación de la Red Vial Pavimentada de Costa Rica*. San José.
- Minaya Gonzales, S., & Ordoñez Huaman, A. (2010). *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes*.
- Ministerio de Obras Publicas y Transportes. (2012). *Anuario de informacion de tránsito*. Recuperado el marzo de 2016, de <http://srvinternet.mopt.go.cr/centrodeinformacion/Digitalizados/AnuarioTr%C3%A1nsito2013.pdf>
- Pavement Interactive*. (22 de Abril de 2001). Recuperado el 22 de setiembre de 2014, de <http://www.pavementinteractive.org/article/moisture-susceptibility/>
- Rivera, D. G. (2012). *Evaluacion del daño por humedad en mezclas asfalticas tipicas en Costa Rica mediante el ensayo de la Rueda de Hamburgo*. San Jose.
- Solaimanian, M., Harvey , J., Tahmoressi, M., & Tandon, V. (2003). Test Methods to predict moisture sensitivity of hot-mix asphalt pavements. *Moisture sensitivity of*

asphalt pavement (págs. 77-111). San Diego, California: Transportation Research Board.

Solano, J., & Villalobos, R. (s.f.). *Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica*. Instituto Meteorológico Nacional.

Transportation Board research. (2003). Moisture Sensitivity of asphalt pavements.

Universidad Nacional de Costa Rica. (Marzo de 2016). *Mapoteca Virtual Universidad Nacional Costa Rica*. Obtenido de <http://www.mapoteca.geo.una.ac.cr/index.php/coleccion-de-mapas.html>

Vargas-Nordbeck, A., Leiva-Villalobos, F., Aguiar-Moya, J. P., & Loria-Salazar, L. (31 de Julio de 2015). Evaluating moisture susceptibility of asphalt concrete mixture through simple performance tests. Lanamme-UCR.

Vargas-Nordbeck, A., Leiva-Villalobos, F., Aguiar-Moya, J. P., & Loria-Salazar, L. G. (s.f.). *Evaluación del daño por humedad en mezclas asfálticas mediante el ensayo de módulo dinámico*. Lanamme-UCR.

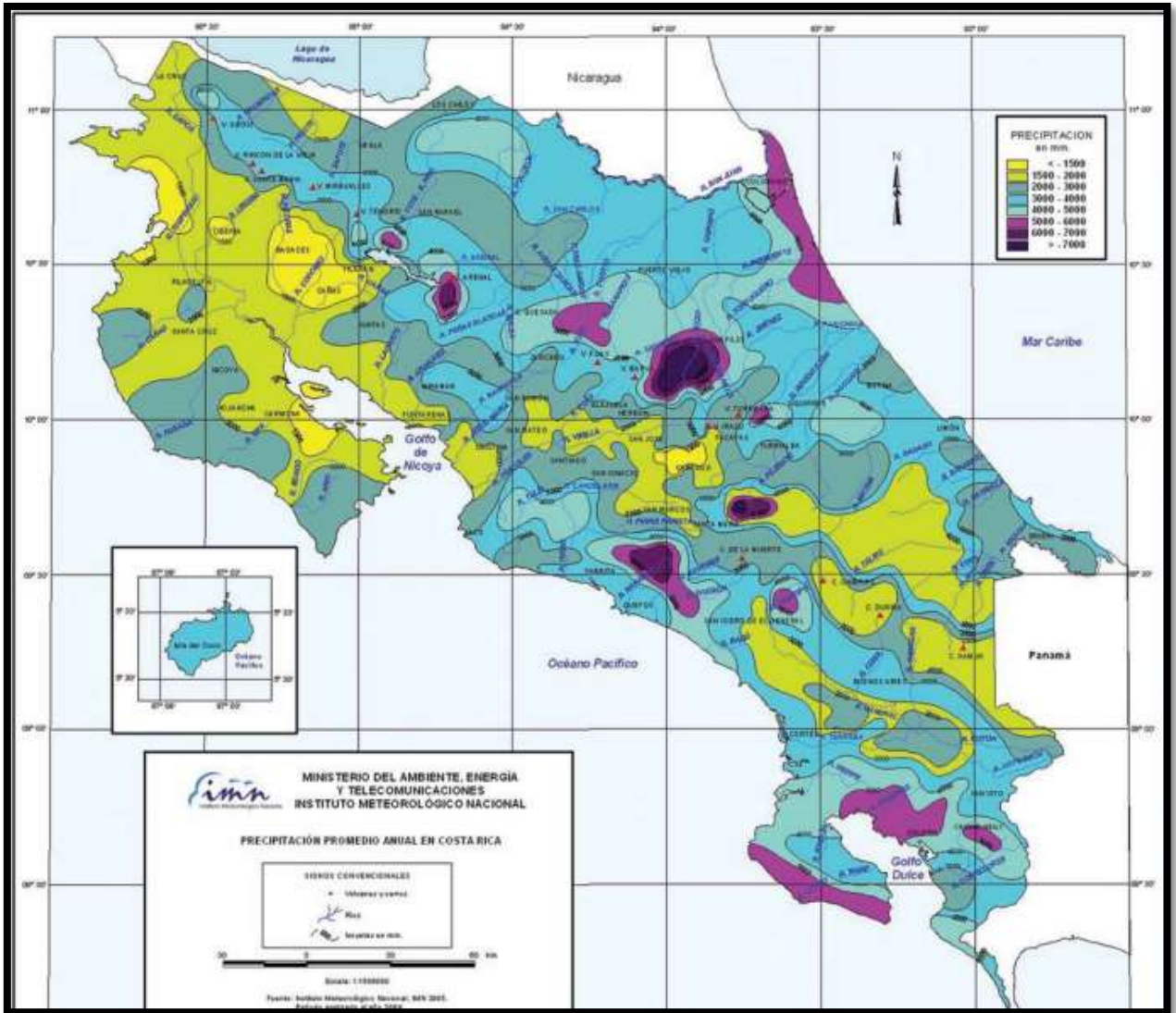
ANEXOS

Anexo A. Datos adicionales de la zona de estudio

Sección de control	Ubicación	Longitud
19011	San Jose(Barrio Tournon)(R.108)-Lte Cant.Goicoechea/Tibas(Queb.Rivera)	1,29
19012	Lte Cant.Goicoechea/Tibas(Q.Rivera)-Lte Prov.San Jose/Heredia(R.Virilla)	1,86
40500	Lte S.J./Heredia(R.Virilla)-Lte Sto Domingo/San Isidro(Calle Yerbabuena)	8,67
40550	Lte Santo Domingo/San Isidro(C.Yerbabuena)-Lte Hered/S.J.(R.Para Blanco)	2,04
10950	Lte Heredia/San Jose(R.Para Blanco)-Lte Moravia/V.Coronado(R. Zurquí)	5,05
10990	Lte Cant.Moravia/V.Coronado(R. Zurquí)-Lte Prov.San Jose/Limon(R.Sucio)	20,41
70160	Lte Prov.San Jose/Limon(R.Sucio)-La Y Griega(R.4)	10,35
70150	La Y Griega(R.4)-Guapiles(R.247)(Calle Emilia)	13,26
70490	Guapiles(R.247)(Calle Emilia)-Lte Cant.Pococi/Guacimo(R.Jimenez)	4,45
70142	Lte Cant.Pococi/Guacimo(R.Jimenez)-Guacimo(R.248)	6,30
70141	Guacimo(R.248)-Lte Cant.Guacimo/Siquirres(R.Destierro)	10,65
70130	Lte Cant.Guacimo/Siquirres(R.Destierro)-Siquirres(R.10)	12,53
70090	Siquirres(R.10)-Lte Cant.Siquirres/Matina(R.Madre De Dios)	12,93
70472	Lte Cant.Siquirres/Matina(R.Madre De Dios)-San Miguel(Entrada Principal)	9,85
70471	San Miguel(Entrada Principal)-Lte Cant.Matina/Limon(R.Toro)	15,59
70080	Lte Cant.Matina/Limon(R.Toro)-Liverpool(Escuela)	9,60
70070	Liverpool(Escuela)-Limon(Muelle Aleman)	12,05

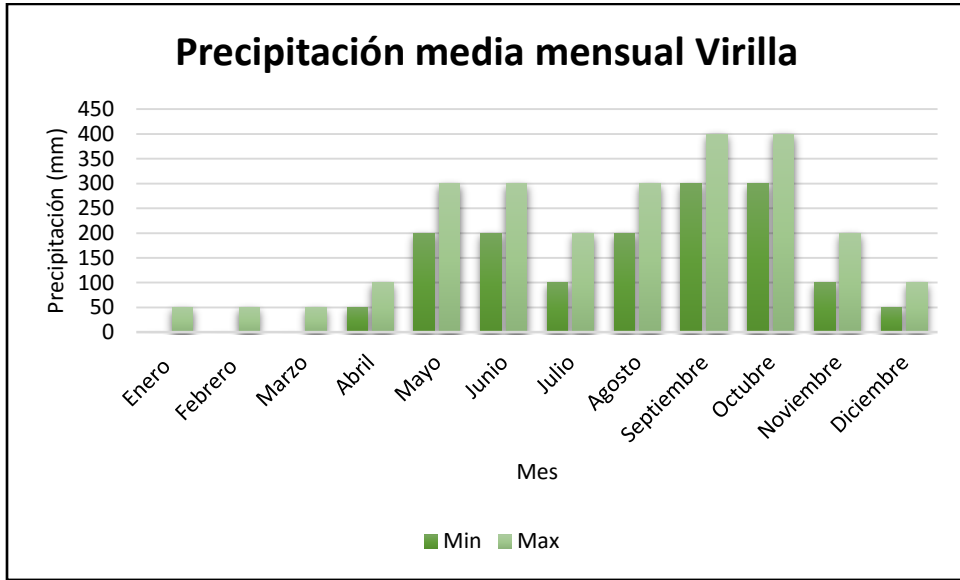
Anexo A. 1. Secciones de control RN 32

Fuente: Conavi, 2016



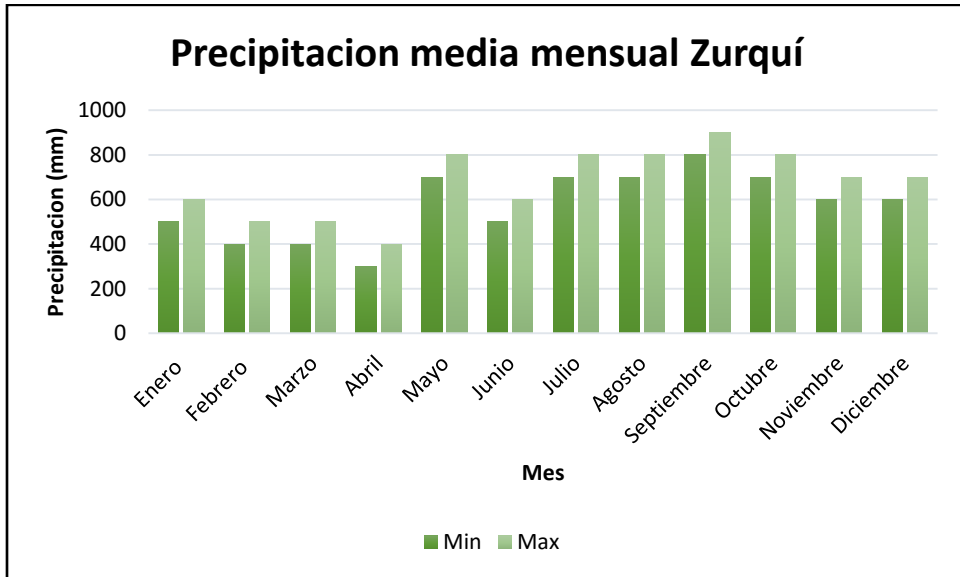
Anexo A. 2. Precipitación media anual de Costa Rica

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, 2005



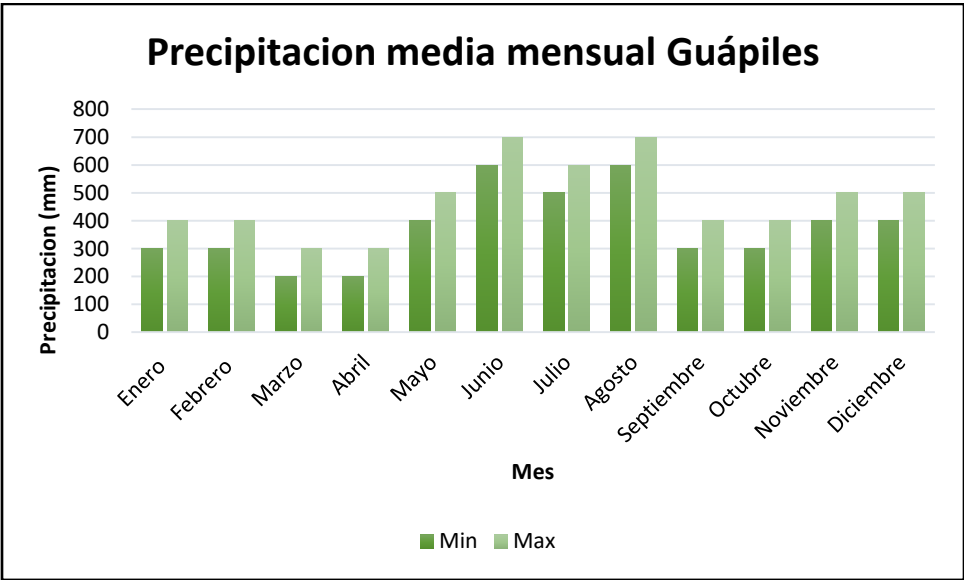
Anexo A. 3. Precipitación media mensual sección Virilla

Fuente: IMN, 2005



Anexo A. 4. Precipitación media mensual sección Guápiles

Fuente: IMN, 2005



Anexo A. 5. Precipitación media mensual sección Guápiles

Fuente: IMN, 2005

Anexo B. Información adicional sobre el diseño de mezcla utilizado en laboratorio

Ensayo	Norma	Especificación	Mezcla laboratorio
Sanidad	AASTHO T-104	15% máx.	2,70%
Índice de durabilidad	AASTHO T-210	35% min	85,60%
Abrasión	AASTHO T-96	40% máx.	21,50%
Caras fracturadas	ASTM D 5821	95/90% min	100/100%
Residuos insolubles	ASTM D 3042	25% min	88,70%
Partículas planas y elongadas	ASTM D 4791	10% máx.	1,90%
Contenido de arcilla	AASTHO T-112	2% máx.	0,30%

Anexo B.1. Resultados de ensayos realizados al agregado grueso

Ensayo	Norma	Especificación	Mezcla laboratorio
Índice de Plasticidad	AASTHO T-90	-	NP
Abrasión	AASTHO T-96	40 máx.	26,20%
Equivalente de arena	AASTHO T-176	50% min	81,40%
Sanidad	AASTHO T-104	15% máx.	2%
Durabilidad	AASTHO T-210	35% máx.	84,50%

Anexo B.2. Resultados de ensayos realizados al agregado fino



Laboratorio Moín
Informe de Pruebas de Laboratorio
AS-08-06-005

No. 2147M15

Hoja 1 de 01
 2015-07-03
 Versión 0

Solicitado por: Depto. Proceso
 No. registro: 3607
 Tipo de muestra: ASFALTO AC-20

Procedencia: Refinería Moín
 Fecha Muestra: 2015-07-03
 Fecha de Recepción: 2015-07-03

Lote No.: A:(63)2015-0703-214
 Tanque No.: 7814
 Volumen (en m³): 8 540,05

Método de Ensayo (1)	Prueba	Resultado	Límites de especificación	Analista y fecha
** ASTM D-70	Densidad a 15 °C	(1940,0 ± 0,1) kg/m ³	No Aplica	D.V.A. 2015-07-03
** ASTM D-87	Temperatura de inflamación	(108 ± 18) °C	Mínimo 232 °C	W.C.M. 2015-07-03
** ASTM D-2170	Viscosidad a 135 °C	(470 ± 47) mm ² /s	Mínimo 550 mm ² /s	D.V.A. 2015-07-03
** ASTM D-2170	Viscosidad a 165 °C	(144 ± 13) mm ² /s	No aplica	D.V.A. 2015-07-03
** ASTM D-2171	Viscosidad a 60 °C	(234 ± 23) Pa·s	(100 ± 60) Pa·s	WPM 2015-07-03
* ASTM D-5	Penetración (a 25 °C, carga 100 g ± 2g)	(65 ± 3,3) 1/10 mm	Máximo 80 - 170 mm	D.V.A. 2015-07-03
** ASTM D-2002	Stabilidad en solubilización expresada como fracción masa de asfalto	99,5 %	Mínimo 99,0 %	W.C.M. 2015-07-03
* ASTM D-1734	Resistencia al agua y agua material asfáltico (expresado como fracción de asfalto)	(5,10 ± 0,06) %	Máximo 1,0 %	D.V.A. 2015-07-03
** ASTM D-2171	Viscosidad post-périda a 60 °C	(791 ± 79) Pa·s	Máximo 1000 Pa·s	D.V.A. 2015-07-03
** ASTM D-113	Ductilidad post-périda a 25 °C	(90 ± 20) cm	Mínimo 40 cm	D.V.A. 2015-07-03
** Cálculo	Índice de susceptibilidad (Índice VTR)	2,6 unidades	(2,2 a 3,0) unidades	D.V.A. 2015-07-03
** Cálculo	Relación de Viscosidades Absolutas	2,4 unidades	Máximo 3 unidades	D.V.A. 2015-07-03
* ASTM D4057	Muestra de Muestra para petróleo y Derivados	No Aplica	No Aplica	C.T.B. 2015-07-03

REGULACIÓN: KPCA 72.01.22-04, 26501-MRUC-MDPT, 8611-MRUC-MOPT, Tabla III, Decreto N° 32812-COMEX-SEGEPLAN-2011
 Los resultados de los análisis ejecutados cumplen con el Reglamento Técnico Centroamericano

OBSERVACIONES: *Ensayo acreditado bajo norma. **Ensayo no acreditado. Acreditación de acuerdo a la norma INTL-ISO/IEC 17025:2005. Ver siempre en www.recope.or.cr. Los valores de punto de inflamación son corregidos a 101,3 kPa: 20 mm de muestra se ejecuta de acuerdo al "Manual para la prueba de muestras" AS-08-03-017. El dato de la viscosidad a 165°C se toma del informe 2130615 entregado en este momento.

Cálculo de temperaturas de trabajo

	Comprobación	Resultado
Máximo	151	164
Mínimo	128	138

Las temperaturas de cálculo de acuerdo a ASTM 1755, se informan como referencia para aplicaciones en diseños de mezcla

ANA ISABEL ALFARO MURILLO (SIRMA)



Responsable Técnico: LISSE ANA ISABEL ALFARO MURILLO

Fecha

2015-07-03

Fecha finalización de análisis

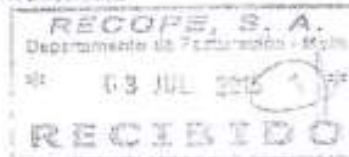
Los resultados de los análisis no pueden ser reproducidos parcialmente sin previa autorización del laboratorio. Se prohíbe la publicación de resultados, con o sin fines de exhibición, sin el consentimiento del laboratorio.

Organismo Receptor: Asfalto 1915-Lasca

Centro Laboratorio: Departamento Control de Calidad

Tel/Fax: (506) 2115-3337

E-mail: ControlCalidad@recope.or.cr



Anexo B.3. Certificado de calidad del asfalto utilizado en la mezcla asfáltica

Anexo C. Resultados complementarios de los especímenes extraídos en campo.

Capa	No. Espécimen	W SECO	W SUM	W SSS	Gbs	% VACÍOS
		A	B	C	A / (C - B)	
A	13	3029,9	1736,4	3032,6	2,338	6,3
	14	3074	1766,6	3077,8	2,344	6,0
	15	3086,2	1790,2	3089,7	2,375	4,8
	16	2971,2	1708,4	2975,1	2,346	6,0
	17	2918,6	1682,5	2922,4	2,354	5,7
	18	3161,5	1808,5	3164,9	2,331	6,6

Anexo C.1. Porcentaje de vacíos de los núcleos extraídos en Virilla

Capa	No. Espécimen	W SECO	W SUM	W SSS	Gbs	% VACÍOS
		A	B	C	A / (C - B)	
A	7	2148,6	1245,3	2152,5	2,363	4,4
	8	2092,7	1210,8	2094,6	2,359	4,5
	9	2183,1	1263,1	2185,9	2,359	4,5
	10	2585,9	1495,8	2589,5	2,360	4,5
	11	2613,4	1514,5	2616,8	2,366	4,2
	12	2429	1411,2	2430,8	2,376	3,8
B	7	2751,7	1543,8	2754,4	2,264	8,4
	8	2834,7	1588,1	2836,8	2,259	8,6
	9	2489,6	1402,5	2493,8	2,229	9,8
	10	2437,8	1370	2439,2	2,265	8,3
	11	2425,4	1361,3	2428,7	2,258	8,6
	12	2704	1520,2	2710,1	2,261	8,5

Anexo C.2. Porcentaje de vacíos de los núcleos extraídos en Zurquí

Capa	No. Espécimen	W SECO	W SUM	W SSS	Gbs	% VACÍOS
		A	B	C	A / (C - B)	
A	1	1193,0	676,1	1203,6	2,262	8,5
	2	1189,4	681,2	1195,6	2,312	6,4
	3	1322,4	755	1334,6	2,282	7,6
	4	1177,5	672,3	1184,5	2,299	6,9
	5	1118,2	636,9	1123,5	2,298	7,0
	6	1276,4	724,4	1276,3	2,313	6,4
B	1	2888,7	1636,9	2933,8	2,227	9,8
	2	2948,4	1688,8	2996,6	2,254	8,7
	3	2526,4	1445,8	2564	2,259	8,5
	4	2712,1	1543,7	2737,2	2,272	8,0
	5	2803,2	1608,6	2847,4	2,263	8,4
	6	2695	1537,8	2720,8	2,278	7,8

Anexo C.3. Porcentaje de vacíos de los núcleos extraídos en Guápiles

Anexo D. Resultados complementarios al ensayo de Tensión Diametral a especímenes de campo

	No. Espécimen	Promedio Diámetro (mm)	Promedio Altura (mm)	Carga máxima (N)	Esfuerzo a tensión (kPa)
Virilla	13	150,46	74,85	17774	1005
	14	150,25	75,31	14786	832
	15	150,37	75,48	13702	769
	16	150,53	73,90	11583	663
	17	150,03	71,84	12548	741
	18	150,46	77,59	16010	873
	Promedios	150,35	74,83	14401	814
	Desv. Est.	0,18	1,90	2279	119

Anexo D.1. Resultados del ensayo de Tensión Diametral de especímenes extraídos en Virilla

Zurquí	No. Espécimen	Promedio Diámetro (mm)	Promedio Altura (mm)	Carga máxima (N)	Esfuerzo a tensión (kPa)
A	7	150,08	52,28	7470	606
	8	150,26	51,09	6405	531
	9	150,41	52,81	7405	594
	10	150,13	62,72	8450	571
	11	150,33	63,30	8926	597
	12	150,14	58,82	8580	618
	Promedios	150,22	56,83	7873	586
	Desv. Est.	0,13	5,48	946	31
B	7	150,33	69,13	8036	492
	8	150,44	70,88	7559	451
	9	150,50	62,05	6365	434
	10	150,24	60,62	7149	500
	11	150,52	60,65	7004	488
	12	150,53	68,34	7996	495
	Promedios	150,42	65,28	7352	477
	Desv. Est.	0,12	4,67	642	27

Anexo D.1. Resultados del ensayo de Tensión Diametral de especímenes extraídos en Zurquí

Guápiles	No. Espécimen	Promedio Diámetro (mm)	Promedio Altura (mm)	Carga máxima (N)	Esfuerzo a tensión (kPa)
A	1	149,95	31,18	9112	1241
	2	149,96	29,68	9871	1412
	3	150,12	33,38	9479	1204
	4	149,73	29,43	8990	1299
	5	149,98	28,18	7914	1192
	6	149,74	32,20	11121	1469
	Promedios	149,91	30,67	9415	1303
	Desv. Est.	0,15	1,93	1063	114
B	1	149,53	75,71	10895	613
	2	150,27	77,15	11720	644
	3	150,23	65,92	10980	706
	4	150,00	70,64	9375	563
	5	149,78	73,92	11783	677
	6	149,66	70,22	10277	623
	Promedios	149,91	72,26	10838	638
	Desv. Est.	0,30	4,14	911	50

Anexo D.3. Resultados del ensayo de Tensión Diametral de especímenes extraídos en Guápiles

Anexo E. Resultados complementarios al ensayo de Modulo Resiliente a la Tensión Diametral a especímenes de campo

Guápiles			
No. Espécimen	Temperatura (°C)	Carga Aplicada (N)	Módulo Resiliente (MPa)
1	25,0	1815,0	4084
2	25,0	1852	4241
3	25,0	1561,0	4325
4	25,0	1673,0	3103
6	25,1	1702,0	3783
Promedio	25,0	1720,6	3907
Desvest	0,0	158,4	122

Anexo E.1. Resultados del ensayo de Módulo Resiliente de especímenes extraídos en Guápiles

Zurquí A			
No. Espécimen	Temperatura (°C)	Carga Aplicada (N)	Módulo resiliente (MPa)
7	24,9	1151,0	1821
8	24,8	1137	2221
9	24,9	1142,0	1766
10	24,8	1352,0	1596
11	24,9	1415,0	2454
Promedio	24,9	1239,4	1971,6
Desvest	0,1	133,5	353,9

Anexo E.2. Resultados del ensayo de Módulo Resiliente de especímenes de la capa superficial del Zurquí

Zurquí B			
No. Espécimen	Temperatura (°C)	Carga Aplicada (N)	Módulo resiliente (MPa)
7	25,0	1222,0	2379
8	25,0	1245	1897
9	25,0	1079,0	1791
10	25,1	1076,0	2331
11	25,0	1053,0	2503
Promedio	25,0	1135,0	2180
Desvest	0,0	90,8	315

Anexo E.3. Resultados del ensayo de Módulo Resiliente de especímenes de la capa inferior del Zurquí

Virilla			
No. Espécimen	Temperatura (°C)	Carga Aplicada (N)	Módulo Resiliente (MPa)
13	24,9	2378,0	4325
14	24,8	2310	2699
15	24,8	2307,0	3086
16	25,0	2305,0	2221
17	25,0	2231,0	2350
Promedio	25	2306	2936
Desvest	0,1	52,0	846,0

Anexo E.3. Resultados del ensayo de Módulo Resiliente de especímenes extraídos en Virilla

Anexo F. Resultados complementarios al ensayo de Tensión Diametral a especímenes de laboratorio

No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Tipo de acondicionamiento	Promedio Diámetro (mm)	Promedio Altura (mm)	Saturación (%)	Carga máxima (N)	Esfuerzo tensión (kPa)	RRTD (%)
8	6,9	Seco	149,07	74,45	-	14527	833	-
32	7,1		149,62	74,68	-	17947	1023	
33	7,0		149,76	74,66	-	17649	1005	
35	6,9		149,90	74,53	-	17206	981	
Promedios	7,0	-	149,59	74,58	-	17601	1003	
Desv. Est.	0,1	-	0,36	0,11	-	373	86	
34	6,8	1 ciclos	149,58	74,65	76,6	17781	1014	96,7
30	7,2		149,66	74,59	74,4	16971	968	
31	6,7		149,72	74,78	74,2	16320	928	
36	7,9		147,25	74,75	75,9		0	
Promedios	7,2	-	149,05	74,69	75,2	17024	970	
Desv. Est.	0,5	-	1,20	0,09	1,2	732	486	
1	7,7	3 ciclo con cong.	149,85	74,44	79,3	13907	794	84,1
22	6,7		149,17	74,48	78,9	14497	831	
24	7,4		149,89	74,68	78,9	14878	846	
25	6,9		149,99	74,37	77,4	15817	903	
Promedios	7,2	-	149,73	74,49	78,6	14775	843	
Desv. Est.	0,4	-	0,37	0,13	0,8	801	45	
2	7,0	6 ciclos con cong.	150,18	74,68	72,7	12382	703	73,7
15	6,8		149,17	74,36	79,1	13900	798	
16	6,9		149,35	74,35	71,3	13420	769	
17	7,4		150,60	74,53	74,7	12100	686	
Promedios	7,0	-	149,82	74,48	74,5	12951	739	
Desv. Est.	0,3	-	0,68	0,16	3,4	850	53	
7	6,9	9 ciclos con cong.	150,34	74,35	76,2	10486	597	73,3
18	7,1		150,60	74,53	77,5	13654	774	
19	6,7		150,60	74,53	72,4	13717	778	
20	7,1		150,60	74,53	76,2	13939	791	
Promedios	7,0	-	150,53	74,48	75,6	12949	735	
Desv. Est.	0,2	-	0,13	0,09	2,2	1647	92	

5	7,1	12 ciclos con cong.	150,80	73,98	72,2	8678	495	48,9
6	7,0		149,67	73,83	72,0	8713	502	
21	6,7		150,60	74,53	77,9	8797	499	
4	7,5		150,04	74,74	75,0	8177	464	
Promedios	7,0	-	150,28	74,27	74,3	8591	490	
Desv. Est.	0,3	-	0,52	0,43	2,8	281	17	
9	6,5	15 ciclos con cong.	149,36	74,50	71,9	11790	675	59,5
10	7,2		149,39	74,50	73,1	9915	567	
11	6,8		149,06	74,33	74,0	10677	613	
12	6,6		149,67	74,62	72,7	9342	533	
Promedios	6,8	-	149,37	74,49	72,9	10431	597	
Desv. Est.	0,3	-	0,25	0,12	0,9	1058	61	

Anexo F.1. Resultados del ensayo de Tensión Diametral de especímenes de laboratorio

Anexo G. Resultados complementarios al ensayo de Modulo Resiliente a la Tensión Diametral de especímenes de laboratorio

Acondicionamiento	No. Espécimen	Temperatura (°C)	Carga Aplicada (N)	Módulo resiliente (MPa) 25°C 10 Hz
Control	32	24,8	2174,0	4342
	33	24,9	2194,0	4579
	35	24,8	2190,0	4780
	Promedio	24,8	2186,0	4567,0
	Desvest	0,1	10,6	219,2
1 ciclo	30	24,8	2603,0	4335
	31	24,7	2637,0	4493
	Promedio	24,8	2620,0	4414,0
	Desvest	0,1	24,0	111,7
3 ciclos	1	24,7	2186,0	2719
	24	24,7	2192,0	3290
	25	24,7	2169,0	3662
	Promedio	24,7	2182,3	3223,7
	Desvest	0,0	11,9	475,0
6 ciclos	15	24,9	1848,0	3255
	16	24,8	1837,0	2867
	17	24,9	1859,0	2506
	Promedio	24,9	1848,0	2876,0
	Desvest	0,1	11,0	374,6
9 ciclos	18	24,9	1550,0	3353
	19	24,7	1566,0	3305
	20	24,8	1540,0	3458
	Promedio	24,8	1552,0	3372,0
	Desvest	0,1	13,1	78,2
12 ciclos	21	24,9	1225	2100
	5	24,8	1234,0	1946
	6	24,9	1234,0	2061
	Promedio	24,9	1231,0	2035,7
	Desvest	0,1	5,2	80,1
15 ciclos	9	24,9	1388,0	2621
	10	24,8	1386,0	2868
	11	24,9	1380,0	2500
	Promedio	24,9	1384,7	2863,0
	Desvest	0,1	4,2	60,7

Anexo G.1. Resultados del Módulo Resiliente de especímenes de laboratorio

Anexo H. Resultados complementarios al análisis estadístico realizado a los resultados de esfuerzo a la tensión diametral y Módulo Resiliente

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means						
Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value	
Guapiles B-Guapiles A	-665.17	45.77	(-799.47, -530.86)	-14.53	<0.0001	
Virilla-Guapiles A	-489.00	45.77	(-623.30, -354.70)	-10.68	<0.0001	
Zurqui A-Guapiles A	-716.67	45.77	(-850.97, -582.36)	-15.66	<0.0001	
Zurqui B-Guapiles A	-826.17	45.77	(-960.47, -691.86)	-18.05	<0.0001	
Virilla-Guapiles B	176.17	45.77	(41.86, 310.47)	3.85	0.0060	
Zurqui A-Guapiles B	-51.50	45.77	(-185.80, 82.80)	-1.13	0.7918	
Zurqui B-Guapiles B	-161.00	45.77	(-295.30, -26.70)	-3.52	0.0133	
Zurqui A-Virilla	-227.67	45.77	(-361.97, -93.36)	-4.97	0.0004	
Zurqui B-Virilla	-337.17	45.77	(-471.47, -202.86)	-7.37	<0.0001	
Zurqui B-Zurqui A	-109.50	45.77	(-243.80, 24.80)	-2.39	0.1504	

Individual confidence level = 99.29%

Anexo H. 1. Resultados completos del análisis de comparación por el método de Tukey para el esfuerzo a tensión diametral a especímenes de campo

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means						
Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value	
12 ciclos-1 ciclo	-480.00	41.85	(-617.60, -342.40)	-11.47	<0.0001	
15 ciclos-1 ciclo	-373.00	41.85	(-510.60, -235.40)	-8.91	<0.0001	
3 ciclos-1 ciclo	-126.50	41.85	(-264.10, 11.10)	-3.02	0.0836	
6 ciclos-1 ciclo	-231.00	41.85	(-368.60, -93.40)	-5.52	0.0004	
9 ciclos-1 ciclo	-235.00	41.85	(-372.60, -97.40)	-5.62	0.0004	
Control-1 ciclo	33.00	44.74	(-114.10, 180.10)	0.74	0.9882	
15 ciclos-12 ciclos	107.00	38.74	(-20.39, 234.39)	2.76	0.1360	
3 ciclos-12 ciclos	353.50	38.74	(226.11, 480.89)	9.12	<0.0001	
6 ciclos-12 ciclos	249.00	38.74	(121.61, 376.39)	6.43	<0.0001	
9 ciclos-12 ciclos	245.00	38.74	(117.61, 372.39)	6.32	<0.0001	
Control-12 ciclos	513.00	41.85	(375.40, 650.60)	12.26	<0.0001	
3 ciclos-15 ciclos	246.50	38.74	(119.11, 373.89)	6.36	<0.0001	
6 ciclos-15 ciclos	142.00	38.74	(14.61, 269.39)	3.67	0.0229	
9 ciclos-15 ciclos	138.00	38.74	(10.61, 265.39)	3.56	0.0284	
Control-15 ciclos	406.00	41.85	(268.40, 543.60)	9.70	<0.0001	
6 ciclos-3 ciclos	-104.50	38.74	(-231.89, 22.89)	-2.70	0.1526	
9 ciclos-3 ciclos	-108.50	38.74	(-235.89, 18.89)	-2.80	0.1268	
Control-3 ciclos	159.50	41.85	(21.90, 297.10)	3.81	0.0168	
9 ciclos-6 ciclos	-4.00	38.74	(-131.39, 123.39)	-0.10	1.0000	
Control-6 ciclos	264.00	41.85	(126.40, 401.60)	6.31	<0.0001	
Control-9 ciclos	268.00	41.85	(130.40, 405.60)	6.40	<0.0001	

Individual confidence level = 99.61%

Anexo H. 1. Resultados completos del análisis de comparación por el método de Tukey para el esfuerzo a tensión diametral a especímenes de laboratorio

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means						
Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value	
Virilla-Guapiles	-971.0	344.3	(-1956.9, 14.9)	-2.82	0.0540	
Zurqui A-Guapiles	-1935.6	344.3	(-2921.5, -949.7)	-5.62	0.0002	
Zurqui B-Guapiles	-1727.0	344.3	(-2712.9, -741.1)	-5.02	0.0007	
Zurqui A-Virilla	-964.6	344.3	(-1950.5, 21.3)	-2.80	0.0560	
Zurqui B-Virilla	-756.0	344.3	(-1741.9, 229.9)	-2.20	0.1666	
Zurqui B-Zurqui A	208.6	344.3	(-777.3, 1194.5)	0.61	0.9287	

Individual confidence level = 98.87%

Anexo H. 2. Resultados completos del análisis de comparación por el método de Tukey para el Módulo Resiliente a la tensión diametral de especímenes de campo

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means						
Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value	
12 ciclos-1 ciclo	-2378.3	236.5	(-3194.6, -1562.1)	-10.05	<0.0001	
15 ciclos-1 ciclo	-1851.0	236.5	(-2667.2, -1034.8)	-7.83	<0.0001	
3 ciclos-1 ciclo	-1190.3	236.5	(-2006.6, -374.1)	-5.03	0.0033	
6 ciclos-1 ciclo	-1538.0	236.5	(-2354.2, -721.8)	-6.50	0.0003	
9 ciclos-1 ciclo	-1042.0	236.5	(-1858.2, -225.8)	-4.41	0.0096	
Control-1 ciclo	153.0	236.5	(-663.2, 969.2)	0.65	0.9935	
15 ciclos-12 ciclos	527.3	211.6	(-202.7, 1257.4)	2.49	0.2378	
3 ciclos-12 ciclos	1188.0	211.6	(457.9, 1918.1)	5.62	0.0012	
6 ciclos-12 ciclos	840.3	211.6	(110.3, 1570.4)	3.97	0.0203	
9 ciclos-12 ciclos	1336.3	211.6	(606.3, 2066.4)	6.32	0.0004	
Control-12 ciclos	2531.3	211.6	(1801.3, 3261.4)	11.96	<0.0001	
3 ciclos-15 ciclos	660.7	211.6	(-69.4, 1390.7)	3.12	0.0877	
6 ciclos-15 ciclos	313.0	211.6	(-417.1, 1043.1)	1.48	0.7517	
9 ciclos-15 ciclos	809.0	211.6	(78.9, 1539.1)	3.82	0.0263	
Control-15 ciclos	2004.0	211.6	(1273.9, 2734.1)	9.47	<0.0001	
6 ciclos-3 ciclos	-347.7	211.6	(-1077.7, 382.4)	-1.64	0.6603	
9 ciclos-3 ciclos	148.3	211.6	(-581.7, 878.4)	0.70	0.9902	
Control-3 ciclos	1343.3	211.6	(613.3, 2073.4)	6.35	0.0004	
9 ciclos-6 ciclos	496.0	211.6	(-234.1, 1226.1)	2.34	0.2939	
Control-6 ciclos	1691.0	211.6	(960.9, 2421.1)	7.99	<0.0001	
Control-9 ciclos	1195.0	211.6	(464.9, 1925.1)	5.65	0.0012	

Individual confidence level = 99.57%

Anexo H. 3. Resultados completos del análisis de comparación por el método de Tukey para el Módulo Resiliente a la tensión diametral de especímenes de laboratorio