



COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE MEZCLAS ABIERTAS MODIFICADAS CON FIBRAS

TRABAJO DE GRADO

Presentado por

NATALY DEL PILAR PEÑA MEJIA

Presentado como requisito parcial para optar al título de

MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Bogotá D.C., Colombia

(Junio 2018)

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE MEZCLAS ABIERTAS
MODIFICADAS CON FIBRAS**

NATALY DEL PILAR PEÑA MEJIA

APROBADO:

Oscar Javier Reyes Ortiz
Tutor

Nombres del primer jurado
Firma

Nombres del segundo jurado
Firma

Bogotá D.C. 13 de junio de 2018

NOTA DE ADVERTENCIA

“La universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus estudiantes en sus proyectos de trabajo de grado, sólo velará por la calidad académica de los mismos, en procura de garantizar su desarrollo de acuerdo con la actualidad del área disciplinar respectiva. En el caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, el estudiante – autor asumirá toda la responsabilidad y saldrá en defensa de los derechos. Para todos los derechos la universidad actúa como un tercero de buena fe”. (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995)

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Militar Nueva Granada, casa de estudios, que me ha permitido realizar mis estudios de Maestría en Ingeniería Civil.

Al Ingeniero Oscar Javier Reyes O., quien confió en mis capacidades y como director de esta tesis ha sido guía primordial en su desarrollo.

Al Ingeniero Alex Álvarez, quien como codirector de la tesis me ha fortalecido con sus enseñanzas y experiencia en la investigación.

A el Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la UMNG y en especial al Ingeniero Franceth Eduardo Castellanos y Nelson Sánchez quienes prestaron toda su colaboración para el desarrollo de ensayos de laboratorio.

A la Facultad de Ingeniería Civil quien facilitó el material para la elaboración de los ensayos de laboratorio.

A la empresa Concol by WSP, en especial al ingeniero Jabuer Tahir Parra quien me ha brindado el apoyo necesario para cumplir con la totalidad de requerimientos de esta maestría.

DEDICATORIA

“Basta un poco de espíritu aventurero para estar satisfechos, pues en esta vida, gracias a Dios nada sucede como deseamos, como suponemos, ni como teníamos previsto, sencillamente suceden mejor” Noel Clarasó

A la luz del faro que alumbró mi camino, al que solo es digno de recibir la gloria, la honra y el poder, Dios todopoderoso creador de todas las cosas, gracias por todo, por mi felicidad y la de las personas a mí alrededor.

A mi madre y a mi padre quienes forjaron mi camino hasta el día de hoy, enseñándome que el que persevera alcanza. Nunca dejaré de agradecerles que hayan hecho de mí una persona confiable y comprometida.

A mi hermano Andrés, quién con su esfuerzo y dedicación apoyo este trabajo de grado, conociendo cada detalle y proceso.

A mis familiares, sin ustedes muchos de los instantes de mi vida, incluyendo este no hubiesen sido posibles.

A Martha Mejía, quien colmo mi vida de esperanza, transmitiendo ese ímpetu especial a mi espíritu, dándome apoyo en todos los momentos de mi vida de forma incondicional.

A mis maestros y tutores, quienes me enseñaron que el éxito solo lo logramos gracias a la disciplina, la perseverancia y el amor por lo que hacemos.

A mis amigos y compañeros en el viaje de la vida, por las múltiples sonrisas a su lado, por sus palabras de aliento que en el momento justo lograron cambiarme la vida.

Tabla de Contenido

Capítulo 1	Introducción.....	17
1.1	Planteamiento del problema.....	19
1.2	Justificación.....	20
1.3	Objetivos.....	20
1.3.1	Objetivo General.....	21
1.3.2	Objetivos específicos.....	21
1.4	Presentación del documento.....	21
Capítulo 2	Marco Teórico.....	23
2.1.	Mezclas drenantes.....	23
2.2.	Microaglomerados.....	24
2.4.	Módulo resiliente.....	26
2.5.	Resistencia a la tracción indirecta.....	29
2.6.	Procedimiento Fénix.....	31
2.7.	Ensayo de Viga Semicircular Simplemente Apoyada (SCB).....	32
2.8.	Método Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL).....	33
Capítulo 3	Antecedentes.....	36
3.1.	Mezclas drenantes y microaglomerados.....	36
3.2.	Desempeño de mezclas porosas con fibras celulósicas.....	44
3.3.	Desempeño de mezclas porosas con fibras híbridas y nano-sílices.....	45
3.4.	Evaluación de la durabilidad y el rendimiento funcional del poliuretano en un pavimento poroso ⁴⁷	
3.5.	Optimización de la composición y el proceso de mezcla de un asfalto poroso autorreparable.....	50
3.6.	Efectos estabilizadores y reforzantes de diferentes fibras sobre el rendimiento de pavimentos.....	51
3.7.	El asfalto y su posible influencia en el daño por humedad en una mezcla asfáltica porosa	53
3.8.	Mejora del rendimiento del pavimento de asfalto poroso usando barro rojo como filler	55
Capítulo 4	Marco Metodológico.....	57
4.1.	Curvas Granulométricas.....	57
4.2.	Materiales.....	60
4.2.1.	Agregado pétreo para mezclas asfálticas.....	60
4.2.2.	Asfaltos.....	61
4.2.3.	Fibras sintéticas.....	68
4.3.	Determinación de la gravedad máxima teórica Gmm.....	68
4.4.	Elaboración de mezclas drenantes y microaglomerados.....	69
4.4.1.	Preparación de la mezcla asfáltica.....	69
4.5.	Permeabilidad de las mezclas.....	70
4.6.	Ensayos mecánicos y dinámicos.....	72

4.6.1. Susceptibilidad al daño por humedad.....	72
4.6.2. Método de caracterización de ligantes - UCL	73
4.6.3. Módulo resiliente.....	74
4.6.4. Ensayo Fénix y SCB.....	74
Capítulo 5	Análisis de Resultados.....77
5.1. Determinación % óptimo de asfalto de las mezclas drenantes y microaglomerados	77
5.2. Determinación del porcentaje de vacíos.....	78
5.3. Permeabilidad.....	81
5.4. Susceptibilidad al daño por humedad.....	83
5.5. Procedimiento UCL.....	87
5.6. Módulo resiliente.....	93
5.7. Ensayo SCB.....	97
5.8. Procedimiento Fénix	99
Capítulo 6	Conclusiones y Recomendaciones102
Bibliografía.....	105

Lista de Tablas

Tabla 1. Principales ventajas y desventajas de las mezclas drenantes.....	24
Tabla 2. Tecnologías en pavimentos que modifican los problemas ambientales	39
Tabla 3 Tamaño de partículas para mezclas porosas con poliuretano (PPM)	48
Tabla 4. Granulometría mezclas por normatividad.....	59
Tabla 5 Características del agregado	60
Tabla 6 Resultados ensayo punto de ablandamiento	62
Tabla 7 Resultados ensayo de penetración Asfalto 1.....	63
Tabla 8 Resultados ensayo de penetración Asfalto 2.....	63
Tabla 9. Viscosidad vs temperatura Asfaltos 1 y 2.....	65
Tabla 10 Características fibras sintéticas utilizadas en las mezclas	68
Tabla 11. Gravedad Máxima Teórica	68
Tabla 12. Porcentaje de vacíos por tipo de mezcla.....	79
Tabla 13. Coeficientes de permeabilidad promedio	81
Tabla 14. Resultados IRC	83
Tabla 15. Efecto de las fibras en el desgaste de las mezclas a 0°C.....	90
Tabla 16. Efecto de las fibras en el desgaste de las mezclas a 10°C.....	91
Tabla 17. Efecto de las fibras en el desgaste de las mezclas a 20°C.....	92
Tabla 18. Efecto de las fibras en el desgaste de las mezclas a 30°C.....	92
Tabla 19. Resistencia de las mezclas respecto a una MDC-19.....	95

Lista de Figuras

Figura 1. Mezclas drenantes	23
Figura 2 Curva Porcentaje óptimo de asfalto.....	26
Figura 3 Ensayo de tensión indirecta	27
Figura 4 Carga típica y deformación vs. Relaciones de tiempo para ensayo de tensión indirecta con carga repetida.....	28
Figura 5 Distribución de esfuerzos teóricos sobre los planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta.....	29
Figura 6 Configuración del ensayo y respuesta de la probeta	30
Figura 7 Curva carga-desplazamiento del procedimiento Fénix y parámetros del ensayo.....	32
Figura 8 Montaje del ensayo SCB y respuesta de la probeta.....	33
Figura 9 Influencia de la temperatura en el comportamiento de los ligantes bituminosos (curva de estado).....	34
Figura 10. Movimiento del agua en función del tipo de mezcla	39
Figura 11. Distancias de frenado en pavimentos secos y húmedos	40
Figura 12. Resultados del coeficiente de permeabilidad mezclas con y sin fibras celulósicas	44
Figura 13. Ensayos de tracción indirecta y escurrimiento para evaluar el efecto del uso de fibra de vidrio y fibras de polipropileno	45
Figura 14. Ensayos de tracción indirecta y escurrimiento para evaluar el efecto del uso de nano-sílices	46
Figura 15. Ensayos de tracción indirecta y escurrimiento para evaluar el efecto del porcentaje óptimo de asfalto.....	47
Figura 16. Ensayos de tracción indirecta y escurrimiento para evaluar el efecto de la cal en polvo	47
Figura 17. Tasa de obstrucción de las mezclas	48
Figura 18. Pérdidas de desgaste Cántabro para mezclas porosas convencionales y mezclas porosas con poliuretano	49
Figura 19. Contenido óptimo de asfalto para diferentes mezclas porosas modificadas	51
Figura 20. Resultados de escurrimiento para (a) Mezcla C, (b) Mezcla C-F, (c) Mezcla SBS, (d) Mezcla SBS-F, (e) Mezcla CRM5%, y (f) Mezcla CRM12%.....	52
Figura 21. Resultados del ensayo de tracción indirecta para especímenes secos y condicionados.....	52
Figura 22. Índice de Resistencia Conservada para diferentes mezclas porosas modificadas	53
Figura 23. Resultados del ensayo cántabro para muestras con diferente relación Filler/Asfalto (FB)	56
Figura 24. Metodología desarrollada.....	58
Figura 25. Rangos de granulometría media para mezclas drenantes (MDR-15 y Drenante única INVIAS).....	59
Figura 26. Rangos de granulometría media para microaglomerados (MM-10 y M-13)	60
Figura 27. Ensayo Punto de ablandamiento.....	62
Figura 28. Equipo de penetración de asfaltos	63

Figura 29. Ensayo Punto de ignición y llama.	64
Figura 30. Curva viscosidad vs Temperatura Asfaltos 1 y 2	65
Figura 31. Reómetro de corte directo	66
Figura 32. Módulo complejo G^* de los asfaltos 50/60 y 60/70.....	66
Figura 33. Curva de Creep del asfalto 50/60, con dos niveles de esfuerzo (100 y 3200 Pa) y 10 ciclos por cada nivel de esfuerzo.	67
Figura 34. Curva de Creep del asfalto 60/70, con dos niveles de esfuerzo (100 y 3200 Pa) y 10 ciclos por cada nivel de esfuerzo.	67
Figura 35. Fibras de aramida, poliolefina y otros polímeros.	68
Figura 36. Probetas Mezclas Drenantes y Microaglomerados.....	70
Figura 37. Montaje Ensayo de Permeabilidad con el Permeámetro de Cabeza Constante.....	71
Figura 38 Permeabilidad Mezclas Drenantes y Microaglomerados	71
Figura 39 Ensayo Resistencia a la Tracción Indirecta Mezcla Drenante.....	72
Figura 40 Procedimiento UCL.....	73
Figura 41 Módulo Resiliente	74
Figura 42 Ensayo Fénix	75
Figura 43 Ensayo SCB Microaglomerado con Fibras	76
Figura 44 Porcentaje óptimo de asfalto para mezclas drenantes	77
Figura 45 Porcentaje óptimo de asfalto para mezclas drenantes	78
Figura 46 Mezcla drenante en las tres condiciones.	79
Figura 47 Porcentaje de vacíos por tipo de mezcla.....	80
Figura 48 Densidad volumétrica por tipo de mezcla	80
Figura 49 Red Tridimensional Asfalto-Fibra-Agregado pétreo.....	81
Figura 50 Ensayo de permeabilidad de cabeza constante	82
Figura 51 Coeficiente de permeabilidad por tipo de mezcla	83
Figura 52 Resistencia conservada.....	84
Figura 53 Resistencia a la Tracción Indirecta Mezcla Drenante Asfalto 50/60	85
Figura 54 Resistencia a la Tracción Indirecta Mezcla Drenante Asfalto 60/70	85
Figura 55 Resistencia a la Tracción Indirecta Microaglomerado 50/60	86
Figura 56 Resistencia a la Tracción Indirecta Microaglomerado Asfalto 60/70	87
Figura 57 Procedimiento UCL Drenantes estado seco	88
Figura 58 Procedimiento UCL Drenantes estado húmedo	88
Figura 59 Procedimiento UCL Microaglomerados estado seco	89
Figura 60 Procedimiento UCL Microaglomerados estado húmedo	90
Figura 61 Variación en el desgaste de las mezclas por el efecto de las fibras a 0°C	91
Figura 62 Variación en el desgaste de las mezclas por el efecto de las fibras a 10°C	91
Figura 63 Variación en el desgaste de las mezclas por el efecto de las fibras a 20°C	92
Figura 64 Variación en el desgaste de las mezclas por el efecto de las fibras a 30°C	93
Figura 65 Módulo Resiliente a 10° C	94
Figura 66 Módulo Resiliente a 15° C	95
Figura 67 Módulo Resiliente a 20° C	96
Figura 68 Ensayo SCB Mezclas Drenantes	97
Figura 69 Ensayo SCB Microaglomerados.....	98
Figura 70 Falla Microaglomerado 1 con fibras Ensayo SCB	99
Figura 71 Falla Microaglomerado 2 con fibras Ensayo SCB	99
Figura 72 Ensayo Fénix Mezclas Drenantes.....	100

Figura 73 Ensayo Fénix Microaglomerados 101

Lista de Anexos

Anexo A. Caracterización de materiales.....	111
Anexo B. Diseño de Mezclas.....	111
Anexo C. Cálculo del Porcentaje de vacíos	111
Anexo D. Permeabilidad.....	111
Anexo E. Susceptibilidad al daño por humedad	111
Anexo F. Procedimiento UCL	111
Anexo G. Módulo Resiliente	111
Anexo H. Ensayo SCB - Viga Semicircular Simplemente Apoyada.....	111
Anexo I. Ensayo Fénix.....	111

Resumen

Son múltiples los factores que influyen en el diseño, construcción y mantenimiento de una carretera en Colombia. La ubicación geográfica del país entre el macizo andino, la costa Caribe y zona selvática, así como las condiciones geotécnicas del terreno, su inclinación o pendiente y los materiales utilizados se suman a las cambiantes condiciones del clima en esta región del continente, afectado no sólo por el calentamiento global sino por fenómenos localizados como ‘El niño’ o ‘La niña’; los cuales, a su vez, tienen implicaciones tanto en la frecuencia y volumen de las lluvias como en la funcionalidad y vulnerabilidad económica de las vías. En las zonas tropicales la intensidad de precipitación en diferentes épocas del año es elevada, lo cual genera fuertes escorrentías superficiales, empozamientos de agua, inseguridad vial y deterioro de los pavimentos. Dichos fenómenos pueden ser contrarrestados con el uso de mezclas drenantes y microaglomerados como capa de rodadura de los pavimentos. Así mismo, las características primordiales que se examinan en el comportamiento de los pavimentos durante su vida útil son la resistencia, seguridad y confort. Estas cualidades se adquieren con un adecuado diseño, materiales de calidad y sistemas constructivos eficientes e innovadores. El mejoramiento de estas cualidades se debe apoyar con la construcción de obras que garanticen la durabilidad de la estructura.

En un país como Colombia, la durabilidad de las estructuras se encuentra directamente relacionada con su respuesta a cambios climáticos repentinos. Cuando las intensidades de las lluvias son permanentes, y no se alcanzan a evacuar rápida y correctamente sus escorrentías, estructuras viales empiezan a presentar daños permanentes. De otra parte, la presencia de agua sobre el pavimento dificulta el contacto del neumático con la superficie del pavimento, generando un riesgo alto de accidentalidad para los usuarios de la vía. A partir de estas razones, surge la idea de usar mezclas drenantes y microaglomerados como solución.

Las mezclas asfálticas drenantes y microaglomerados permiten una filtración rápida y constante del agua de lluvia y la conducen hacia elementos adicionales de drenaje, evitando su presencia en la superficie de la capa de rodadura, incluso bajo precipitaciones intensas y prolongadas. La evaluación del comportamiento mecánico y dinámico de éstas, es entonces, de vital importancia, puesto que su uso lograría contrarrestar en gran medida los problemas mencionados anteriormente. Sin embargo, la resistencia de dichas mezclas asfálticas es baja para las solicitudes de tránsito de vías de gran importancia. Por ello, la adición de fibras y diferentes tipos de asfalto permite plantear un mayor uso y contrarrestar las debilidades aumentando su resistencia, durabilidad, adhesividad, manejabilidad y estabilidad. Este trabajo de grado tuvo como finalidad la evaluación de mezclas drenantes y microaglomerados a partir del desarrollo de ensayos de laboratorio tales como permeabilidad de cabeza constante, Módulo Resiliente, viga semicircular simplemente apoyada (SCB), Fénix y Curva de Estado (UCL).

Los resultados permitieron establecer que la adición de fibras no genera pérdida de permeabilidad en la mezcla, pero aumentan su resistencia entre un 8% y 12% en el ensayo de Módulo Resiliente. Igualmente puede concluirse que el aporte estructural de una mezcla abierta puede variar entre una tercera parte de la resistencia de una mezcla cerrada, cuando se le agregan fibras y una cuarta parte cuando no se hacen modificaciones en la mezcla.

Adicionalmente, la totalidad de las mezclas cumple con una resistencia conservada mayor al 80%, pero se incrementa cuando tiene una adición de fibras sintéticas.

Por otro lado, la metodología UCL, permite concluir que las fibras generan un menor desgaste en las muestras (alrededor del 3%) lo cual representa un aumento en su cohesión y adhesión indirecta, puesto que crean una estructura tridimensional con el agregado que evita el deshilachado de la mezcla.

Finalmente se logró valorar la pertinencia del ensayo SCB y el procedimiento Fénix, para evaluar el comportamiento de mezclas abiertas, sus resultados concuerdan con los obtenidos en los ensayos UCL y Módulo Resiliente, ratificando el mejoramiento del rendimiento de las mezclas al adicionar fibras, sin generar pérdidas de funcionalidad respecto a su permeabilidad.

Palabras clave: fibras sintéticas, hidropelante, mezcla drenante, microaglomerado, permeabilidad, resistencia, seguridad vial.

Abstract

There are multiple factors that influence the design, construction and maintenance of a road in Colombia. The geographical location of the country between the Andean massif, the Caribbean coast and the jungle zone, as well as the Geotechnical conditions of the terrain, its slope or slope and the materials used add to the changing climate conditions in this region of the continent, affected not only by global warming and by local phenomena such as 'El Niño' or 'La Niña'; which, in turn, have implications in the frequency and volume of rainfall as well as in the functionality and economics.

In a country like Colombia, the duration of the structures is directly related to their response to sudden climatic changes. When the intensities of the rains are permanent, a rapid and correct evacuation of their runoff, road structures and permanent damage can not be achieved. On the other hand, the presence of water on the pavement makes the contact of the tire with the surface of the pavement difficult, generating a high risk of accidents for road users. For these reasons, the idea of using porous mixtures as a solution emerges.

Porous pavements allow rapid and constant detection of rainwater and conductivity towards additional drainage elements, avoiding their presence on the surface of the tread, even under intense and prolonged rainfall. The evaluation of the mechanical and dynamic behavior of these, then, is of vital importance, since their use managed to largely counteract the problems previously. However, the resistance of chemical mixtures is low for traffic requests of major roads. Therefore, the addition of fibers and different types of asphalt makes it possible to propose greater use and counteract weaknesses by increasing their strength, durability, adhesiveness, manageability and stability. The purpose of this graduate work was to evaluate porous mixtures from the development of laboratory tests such as constant head permeability, Resilient Module, semi-circular bend Test (SCB), Fénix process and State Curve (UCL).

The results allowed to establish that the addition of fibers does not generate loss of permeability in the mixture but increase their resistance between 8% and 12% in the Resilient Module test. It can also be concluded that the structural contribution of an open mixture can vary between a third of the strength of a closed mixture, when fibers are added and a quarter when no modifications are made in the mixture.

Additionally, the entire mixture complies with a conservative strength greater than 80% but is increased when it has an addition of synthetic fibers.

On the other hand, the UCL methodology allows us to conclude that the fibers generate less wear on the samples (around 3%), which represents an increase in their indirect adhesion, the position that creates a three-dimensional structure with the aggregate that avoids fraying of the mixture.

Finally, the relevance of the SCB test and the Fénix procedure was approved to evaluate the behavior of the open tests, the results of the UCL study and the Resilient Module, ratifying the improvement of the performance of the mixtures when adding fibers, without generating loss of functionality with respect to their permeability.

Keywords: Porous pavement, road safety, synthetic fibers, hydroplaning, PFC

Capítulo 1 Introducción

La humanidad y su evolución a través de la historia ha generado un mejoramiento continuo en todas las áreas del conocimiento, y las vías de comunicación son un campo en permanente estudio. El hombre ha tenido una permanente necesidad de transportarse, y es así, como la creación de vías de excelente calidad, durabilidad y seguridad ha dejado de ser una ventaja y se ha convertido en una necesidad para países como Colombia, que mueven gran parte de su economía y desarrollo a través de la red vial. (Pérez V., 2005)

La construcción de dichas vías requiere de la optimización de diseños, el mejoramiento de las técnicas constructivas, la implementación de tecnología de punta y la utilización de materiales de características óptimas para cumplir los requerimientos del diseño. (Morales, 2008)

La incursión de nuevos aditivos y productos sintéticos en el mercado, ha permitido la optimización de materiales que constituyen la estructura vial. (Lopes Alfonso, Dinis-Almeida, & Sena Fael, 2017) (Shadman & Ziari, 2017) (Tanzadeh & Shahrezagamasaei, Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures, 2017). Entidades públicas y privadas están de acuerdo en afirmar que, Colombia requiere de un ambicioso desarrollo de obras viales, proyectos con especificaciones de alta calidad que estimulen la competitividad del país y de sus regiones. Es muy común relacionar el progreso de una región con la calidad de sus vías, siendo el índice global de competitividad un factor que evidencia dicha relación y que se basa en el análisis de 12 pilares: instituciones, infraestructura, entorno macroeconómico, salud y educación primaria, educación superior y capacitación, eficiencia del mercado de bienes, eficiencia del mercado laboral, desarrollo del mercado financiero, preparación tecnológica, tamaño del mercado, innovación y sofisticación de negocios. (Foro Económico Mundial (WEF), 2015).

El ritmo de vida actual de los colombianos se ha acelerado y dentro de las poblaciones se genera un caos permanente por el estado de la infraestructura vial. Las personas viven con una necesidad constante de movilizarse de forma rápida y segura, y para cumplir dichos requerimientos, es necesario contar con estructuras viales que respondan a las exigencias del clima y las solicitudes del tránsito, conformadas por capas de materiales adecuados de acuerdo a las condiciones de la subrasante, y con una capa de rodadura que resista a los esfuerzos transmitidos por los vehículos y condiciones climatológicas y que mantenga unas condiciones de seguridad óptimas para el usuario. (Clavijo García, Álzate Ospina, & Mantilla Meza, 2015)

En nuestro país son de gran utilización las mezclas asfálticas densas calientes, estructuras prácticamente impermeables que mantienen el agua lluvia sobre la capa de rodadura y la evacuan por medio de sus pendientes transversales y longitudinales hasta dispositivos finales. Sin embargo, el uso de mezclas drenantes y microaglomerados es bajo dada su capacidad de soporte y alto mantenimiento.

A gran escala, Colombia se encuentra en pleno desarrollo de las Vías 4G y 5G, corredores interdepartamentales que incluyen la construcción y operación de más de 8.000 km de carreteras

(Andrade, 2015), impulsando de forma radical la construcción de corredores viales de alta velocidad, donde el agua se convierte en el enemigo número uno para garantizar la seguridad y confort de los usuarios.

Por otra parte, vale la pena destacar que, a nivel local, ciudades como Bogotá, establecen un ambicioso plan para aumentar su red vial, que incluye la ejecución de proyectos como la ampliación de la Autopista Norte y la Avenida Longitudinal de Occidente (IDU Instituto de Desarrollo Urbano, 2017) entre otros. Dichos proyectos, poseen los mismos niveles de riesgo que las autopistas intermunicipales.

Algunas de las adversidades que deben sobrellevar las nuevas estructuras de pavimentos nacionales, intermunicipales y urbanas, se relacionan con la disminución de los efectos del hidroplaneo, (fenómeno que disminuye el contacto de los neumáticos de los vehículos con el pavimento), el ruido alto, la disminución de la visibilidad para los usuarios en días lluviosos y encandilamiento de los vehículos con el tránsito que circula en sentido opuesto; influyendo en el alto costo de operación, alto índice de accidentalidad (40% de las muertes en accidentes de tránsito corresponden a excesos de velocidad en condiciones de lluvia en Colombia), disminución de velocidades de operación y aumento en el tiempo de recorrido (Observatorio de Seguridad Vial, 2017).

Las mezclas asfálticas drenantes se caracterizan por tener porcentajes de vacíos entre un 20% y 25% y los microaglomerados >12% (Alvarez Lugo, Reyes Ortiz, & Miró, 2014) , lo cual hace que los pavimentos sean permeables, permitiendo que el agua lluvia no se mantenga sobre la superficie y se filtre rápidamente para ser evacuada con ayuda de las pendientes transversales o bombeo hacia sus partes laterales, donde son recogidas por los dispositivos de drenaje. Aunque se mejoran notoriamente los problemas que presentan las mezclas densas, se pueden presentar algunos inconvenientes en cuestión de durabilidad, ya que el asfalto puede ir desprendiéndose del material pétreo y su resistencia es menor, generándose la colmatación de la mezcla con partículas finas. (Miró, Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort (ruido) y la seguridad, 2007)

Sin embargo, estas desventajas no son impedimento para que las mezclas drenantes y microaglomerados puedan funcionar de forma adecuada y cumplan sus objetivos como capa permeable, ya que la adición de fibras sintéticas y nanomateriales puede mejorar el comportamiento dentro de las mezclas, al aumentar la adhesión y cohesión entre los materiales pétreos y el cemento asfáltico, lo cual influye directamente en la durabilidad de las mezclas y por consiguiente en la adecuada operación.

Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación fue el estudio de mezclas drenantes y microaglomerados modificados con fibras, con una relación de vacíos característica que puede corregir o disminuir las debilidades que se dan en las mezclas densas. De acuerdo con la experiencia que se tiene en la aplicación de estas mezclas en otros países, donde el diseño y aplicación de estas ha avanzado notoriamente, se realizaron diferentes ensayos evidenciando su funcionalidad drenante sin afectar su capacidad de soporte (Martin, Putman, & Neptune, 2014)

Para la evaluación del comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas drenantes y microaglomerados, se realizaron ensayos sobre ocho mezclas diferentes variando su granulometría, tipo de asfalto y adición de fibras. Los ensayos ejecutados evaluaron la permeabilidad mediante el uso de un permeámetro de cabeza constante, la resistencia por medio del módulo resiliente a diferentes frecuencias y temperaturas, ensayos SCB (viga semicircular simplemente apoyada) y Fénix para conocer el comportamiento del material desde su estado frágil hasta dúctil, daño a la susceptibilidad al agua mediante la resistencia a la tracción indirecta (RTI) evaluando el índice de resistencia conservada (IRC) y UCL (curva de estado) para evaluar la cohesión y adhesión indirecta, susceptibilidad térmica y durabilidad de la mezcla.

1.1 Planteamiento del problema

En Colombia, los traumatismos relacionados con el tránsito son un importante problema social y de salud pública que año tras año cobran miles de víctimas, constituyéndose como la segunda causa de muerte violenta en el país, después de los homicidios (Fondo Mundial para la Seguridad Vial, 2013). Según un estudio publicado por el Fondo de Prevención Vial, las carreteras en Colombia no están diseñadas para conducir a más de 80 kilómetros por hora, y aunque en Colombia el límite de velocidad en carretera es de 100 kilómetros por hora para particulares y 80 kilómetros por hora para los vehículos de servicio público y transporte escolar (TÍTULO III - Normas de comportamiento - Código de Tránsito de Colombia, 2011), muchos de ellos superan esta marca sin analizar las consecuencias que esto les pueda provocar. Si sumamos este factor con la presencia de agua sobre la vía, los resultados son mortales.

En nuestro país, la mayoría de las capas de rodadura son construidas con mezclas asfálticas cerradas, garantizando su durabilidad, pero dejando de lado factores como la seguridad y el confort. La construcción de pavimentos densos atenúa la vulnerabilidad de los usuarios a un accidente, puesto que el empozamiento de las aguas lluvias sobre sus capas de rodadura, aun teniendo dispositivos de drenaje y de subdrenaje anexos a las vías, es muy alto. Dichas estructuras usualmente son insuficientes para cubrir la demanda de agua de escorrentía que circula libremente sobre los pavimentos en zonas de alta pluviosidad como la ecuatorial.

La investigación se enfocó a buscar mezclas que garanticen, a la vez con las obras de drenaje, la evacuación del agua lluvia de forma rápida de las estructuras viales, sin olvidar la adición de fibras a los cementos asfálticos, con el propósito de mejorar el comportamiento de las mezclas.

Ante la aparición de nuevos materiales mejoradores y nuevas tecnologías en el mundo, nuestro país ha incursionado en el campo de la investigación de alternativas de construcción como solución a los problemas que se encuentran en nuestras mallas viales y específicamente en la estructura de los pavimentos flexibles. En el campo específico de los pavimentos drenantes y microaglomerados, su uso se ve limitado debido a la falta de información en cuanto a su comportamiento mecánico y dinámico con modificadores y su empleo.

Las ventajas de las mezclas drenantes y microaglomerados son numerosas, sin embargo, se plantean preguntas que se abordan a lo largo de este trabajo de grado, sobre su desempeño y uso,

tales como: ¿Es posible que la adición de fibras pueda obtener un mejor comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas drenantes y microaglomerados? ¿Existe alguna pérdida de permeabilidad en las mezclas drenantes y microaglomerados con la adición de fibras? ¿Qué ensayo es aconsejable para la evaluación de la resistencia en mezclas drenantes y microaglomerados? ¿El tipo de asfalto influye en el comportamiento mecánico y dinámico de mezclas drenantes y microaglomerados? ¿Cuál es el comportamiento de las mezclas drenantes y microaglomerados a diversos rangos de temperatura? ¿En qué rango de temperatura la adición de fibras es considerada de mayor beneficio para mejorar la resistencia de las mezclas drenantes y microaglomerados?

1.2 Justificación

Las mezclas cerradas generan una alta accidentalidad e hidroplaneo que ponen en riesgo la seguridad de los usuarios e incluso la pérdida de vidas. Usualmente las mezclas drenantes y microaglomerados tienen una mayor resistencia al deslizamiento bajo condiciones de precipitación, por su excelente respuesta ante el fenómeno de hidroplaneo, reducción del agua dispersada por el paso de vehículos, mejoramiento de la visibilidad, adecuado comportamiento mecánico y generación de ruidos de baja magnitud. Sociedades españolas y francesas, le han apostado a la utilización de pavimentos drenantes para vías de alta velocidad, siendo pioneros en el tema y recomendando su uso de acuerdo con los resultados que disminuyen las tasas de accidentalidad.

Países europeos han impulsado el uso de pavimentos drenantes desde los años 80's, teniendo en cuenta sus ventajas, sin embargo, en Colombia, su investigación se remonta a los últimos años y su construcción aún está siendo evaluada, al no contar con unas políticas de operación claras. Experiencias y estudios internacionales demuestran la conveniencia de utilizar mezclas drenantes y microaglomerados, pero el desconocimiento a nivel nacional acerca de su comportamiento y mejoramiento con fibras no ha permitido su utilización en vías colombianas.

En Colombia, las víctimas mortales por accidentes de tránsito se acercan a las 18 personas/día (Centro de Referencia Nacional sobre Violencia del Instituto Nacional de Medicina Legal, 2017) siendo un tema de esencial cuidado para el Estado. Las mezclas porosas tienen una alta permeabilidad que evita el almacenamiento de agua en la superficie, y por lo tanto una mayor adherencia entre el neumático y la capa de rodadura. Dado el alto contenido de vacíos de dichas mezclas, la adición de fibras es considerada en este trabajo de grado como una forma para contrarrestar las debilidades de resistencia, adhesión, cohesión y capacidad estructural de las mezclas, dando lugar a su uso para la disminución de tasas de accidentalidad en el país.

1.3 Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos de esta investigación, buscando impulsar el uso de mezclas drenantes y microaglomerados con adición de fibras y diferentes tipos de asfaltos para mejorar las desventajas de resistencia, seguridad y confort que poseen las mezclas cerradas.

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento mecánico y dinámico de mezclas drenantes y microaglomerados fabricados con diferentes asfaltos y adición de fibras sintéticas mediante el desarrollo de ensayos de laboratorio para establecer su respuesta estructural y funcional.

1.3.2 Objetivos específicos

Para poder llevar a cabo el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Realizar la caracterización de los agregados, asfaltos y fibras usados para la fabricación de las probetas objeto de estudio.
- Establecer la drenabilidad de las mezclas mediante el uso de un permeámetro de cabeza de constante, para cuantificar las condiciones de permeabilidad de la mezcla tras el uso de fibras y polímeros.
- Evaluar el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas drenantes y microaglomerados, mediante los ensayos: método universal de caracterización de ligantes (UCL), módulo resiliente a diferentes frecuencias y temperaturas, daño por susceptibilidad al agua (resistencia a la tracción indirecta seco y húmedo (RTI)), ensayo de viga semicircular simplemente apoyada (SCB) y ensayo Fénix.
- Cuantificar la incidencia de las fibras en el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas drenantes y microaglomerados a partir de los resultados obtenidos previamente, para lograr generalizar las ventajas estructurales de su uso respecto al comportamiento de otras mezclas.

1.4 Presentación del documento

Los lineamientos y metodologías de este proyecto son el resultado de una búsqueda de información, en la que se analizaron diversas experiencias en el campo de la investigación de mezclas drenantes y microaglomerados en España, Francia, Estados Unidos, Chile, Reino Unido, entre otros países. Cada experiencia proporcionó ideas que se verán reflejadas a través de cada directriz. Sin embargo, fueron las directrices españolas, las que más influyeron en la metodología a usar en este trabajo, particularmente en los ensayos para la evaluación de las propiedades drenantes de cohesión y adhesión indirecta.

Por otra parte, el presente documento está sustentado en una bibliografía y fuentes documentales de investigadores con amplia experiencia en el tema del empleo de las mezclas drenantes y microaglomerados, cuyas referencias exactas se encuentran al final de este documento en el capítulo de bibliografía y fueron el soporte de toda la investigación.

El actual documento se encuentra agrupado por capítulos relacionados con el proceso de desarrollo. En el primer capítulo de este documento se presenta una introducción a la temática, mencionando someramente las ventajas y desventajas de las mezclas drenantes y

microaglomerados, el planteamiento del problema, su justificación y los objetivos generales y específicos de la investigación.

El segundo capítulo hace referencia al marco teórico, con los conceptos y definiciones de las mezclas asfálticas drenantes y microaglomerados y los ensayos fundamentales objeto de la investigación, permeabilidad, método Cántabro, módulo resiliente, susceptibilidad al daño por humedad (resistencia a la tracción indirecta en estado seco y húmedo), ensayo fénix, ensayo de viga semicircular simplemente apoyada y método de caracterización de ligantes UCL.

El tercer capítulo corresponde a los antecedentes y estado del arte, encontrando investigaciones referidas a los asfaltos con adición de fibras, el impacto de las mezclas drenantes en las “islas de calor”, el desempeño de las mezclas porosas con fibras celulósicas, fibras híbridas y nano sílices y polímeros.

El cuarto capítulo recopila la metodología ejecutada, haciendo referencia al tipo de estudio, las herramientas, aparatos, materiales y ensayos, la caracterización de los materiales (agregados, asfaltos y fibras), las curvas granulométricas usadas para el proceso de fabricación de mezclas drenantes y microaglomerados.

El quinto capítulo muestra los resultados de los ensayos y su análisis, la determinación del porcentaje de vacíos, permeabilidad, módulos resilientes, establecimiento de curvas carga-desplazamiento para los ensayos de resistencia a la tracción indirecta, Fénix y SCB, y finalmente ensayos de adhesión y cohesión indirecta por el método UCL. Por último, mediante tablas y gráficas que permiten su adecuado estudio se presentan los resultados más relevantes. En dicho capítulo puede evaluarse cuantitativamente las ventajas que ofrece la adición de fibras y tipo de asfalto respecto a las mezclas drenantes y microaglomerados convencionales.

Por último, en el capítulo seis, se dan las conclusiones y recomendaciones sobre el trabajo realizado en la investigación.

Al final del documento se encuentran la bibliografía usadas como referencia en el desarrollo del trabajo de investigación y adicionalmente se presentan en los Anexos la información completa de los ensayos realizados.

Capítulo 2 Marco Teórico

A continuación, se mencionarán los tipos de mezcla, ensayos y procedimientos utilizados para el estudio del comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas objeto de este trabajo de grado.

2.1. Mezclas drenantes

Las mezclas asfálticas drenantes son aquellas que por su pequeña proporción de árido fino, tienen una gran cantidad de huecos interconectados, lo cual revierte en una mayor permeabilidad (Figura 1), que permite la filtración de agua lluvia con rapidez para ser evacuada hacia los dispositivos de drenaje que deben disponerse en sus partes laterales. Se trata de una mezcla especialmente diseñada para mejorar el contacto entre neumático y pavimento, minimizar hidroplaneo, reducir la proyección de agua entre vehículos, mejorar la visibilidad nocturna, y hasta aminorar el ruido del tráfico. (Torres Rodríguez, 2014)

Figura 1. Mezclas drenantes



Fuente (Optimasoil, 2018)

Generalmente es aceptado un contenido inicial de vacíos mínimo del 20% permitiendo una superficie de rodadura que impide la formación de una película de agua cuando ocurren precipitaciones, disminuyendo el ruido al producirse el contacto de los neumáticos con el asfalto (Fernández, 2015). Los espacios vacíos mayores o iguales al 20% presentes en estas mezclas son suficientes para dejar pasar a través de ella el agua que cae sobre la carpeta. Son mezclas que no se consideran estructurales por el espesor en que se colocan de aproximadamente 5 cm, y van situadas sobre una capa convencional que debe ser impermeable; aportando de esta forma comodidad en la circulación de los vehículos, al tener capas de rodadura sin agua sobre ellas.

(Arrieta, Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de la mezcla de cemento asfáltico 60-70 con licomont BS-100 para diferentes niveles de precipitación, 2013)

Uno de los inconvenientes más relevantes en las mezclas drenantes se relaciona con la durabilidad y la colmatación, ya que una disminución en el porcentaje de vacíos reduce con el paso del tiempo la drenabilidad y reduce el desempeño de esta (Tabla 1).

El comportamiento mecánico de las mezclas drenantes es considerado de menor capacidad estructural en algunos países, 50 a 75%; es decir, que 4 cm de mezcla porosa equivale aproximadamente 2 a 3 cm de mezcla densa; sin embargo de acuerdo a (Miró, Nuevas Mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort (ruido) y la seguridad., 2006) en España se consideran ambas capas equivalentes, conclusión a la que llegaron después de procedimientos experimentales en el campo con ambos tipos de capas, definiéndolas de igual capacidad de refuerzo y reducción de deflexión, con elevada resistencia a las deformaciones plásticas de las capas drenantes.

El alto contenido de vacíos conectados y el grosor de la capa (de 30 a 50 mm) garantiza la capacidad de reducción de ruido y alta permeabilidad de las mezclas drenantes.

Tabla 1. Principales ventajas y desventajas de las mezclas drenantes

Ventajas	Desventajas
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Reducción de los niveles de ruido	<input type="checkbox"/> Aumento del espesor de la película de asfalto inicial.
<input type="checkbox"/> Disminución de salpicaduras de agua e hidroplaneo	<input type="checkbox"/> Alto costo de construcción
<input type="checkbox"/> Mejora de la visibilidad de las marcas viales en tiempo húmedo	<input type="checkbox"/> Limitada capacidad estructural
<input type="checkbox"/> Actúa como eliminador de agua de escorrentía	<input type="checkbox"/> Pérdida de permeabilidad y capacidad de reducción de ruido debido a obstrucción de vacíos en el tiempo.
<input type="checkbox"/> Acumulación de hielo y tiempo de congelamiento menor.	

Fuente (Hernandez Saenz, Caro, Arámbula Mercado, & Epps Martin, 2016)

2.2. Microaglomerados

Según (Jil Reyes, 2009) no existe definición oficial de lo que es un microaglomerado en caliente. Algunos la relacionan con el tamaño máximo del árido empleado en su fabricación y consideran

que 10 o 12 mm son el tamaño que marca la diferencia entre los microaglomerados y los aglomerados tradicionales. Para otros, en cambio, es el espesor y las funciones propias de la capa los que marcan la diferencia. Considerando ambos conceptos, por otra parte, estrechamente relacionados entre sí, los microaglomerados en caliente pueden definirse como aquellas mezclas asfálticas con árido de tamaño máximo 12 mm que se fabrican y ponen en obra en caliente ($T > 120^{\circ}\text{C}$) en capa de espesor medio inferior o igual a los 3,5 cm (Avilés Lorenzo, 2002).

Se trata de mezclas empleadas en capas de rodadura que, aunque por su espesor no permiten resolver problemas estructurales de los pavimentos, proporcionan o restituyen sus características superficiales (resistencia al deslizamiento, drenabilidad superficial, sonoridad, etc.), contribuyendo a optimizar el funcionamiento de todo el paquete del pavimento y mejorando notablemente la comodidad y seguridad del usuario con un costo reducido como corresponde a su pequeño espesor. No obstante, la aplicación de una capa fina contribuye de alguna manera a mejorar la capacidad estructural del pavimento debido a que proporciona una impermeabilización al soporte que mejorará notablemente en muchos casos el comportamiento de la sección estructural (Vargas B., 2015).

2.3. Ensayo Cántabro de pérdida de desgaste en la caracterización de mezclas asfálticas de granulometría abierta

En el año 1979, en el Laboratorio de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Santander, los doctores Félix Pérez Jiménez y Carlos Kraemer iniciaron los estudios encaminados a la caracterización de las mezclas asfálticas de granulometría abierta para su empleo en capas de rodadura, especialmente para establecer una metodología de dosificación en laboratorio para mezclas drenantes. En un inicio, no se contaba con procedimientos que indicaran cada uno de los pasos a seguir en el diseño y evaluación de estas mezclas en laboratorio, lo que significó uno de los tantos problemas al que había de dar solución, otros problemas, fueron la falta de métodos de ensayos que propiciaran información del comportamiento mecánico de la mezcla. (Ayala Loza & Juárez Alarcón, 2010)

Era evidente la marcada diferencia de los materiales empleados en la fabricación de estas mezclas para la construcción de carreteras, en comparación con las mezclas tradicionales o densas, por ejemplo: normalmente, la propiedad más perseguida en mezclas tradicionales (densas) es su estabilidad y los ensayos han sido desarrollados con el fin de evaluar particularmente esta propiedad. Paralelamente es lo que ocurre con la mayoría de los métodos de dosificación y proyecto de mezclas, basados en la obtención de la estabilidad máxima. Finalmente se llegaron a desarrollar dos ensayos para la caracterización de las mezclas drenantes: 1. Ensayo cántabro, para diseñar la mezcla a partir de la pérdida por desgaste utilizando la máquina Los Ángeles. 2. Permeámetro de carga variable LCS, para poder verificar los porcentajes de vacíos de la mezcla, ya sea en laboratorio o en campo (Calzada Pérez, 1984).

El propósito del método Cántabro es determinar el contenido óptimo de asfalto para la granulometría seleccionada. El método parte del estudio de la cohesión indirecta en la mezcla, la cual se realiza con base en las exigencias de estudios a sus agregados y asfaltos disponibles. Se fabricaron numerosos especímenes para analizarlos en laboratorio, determinando la pérdida por

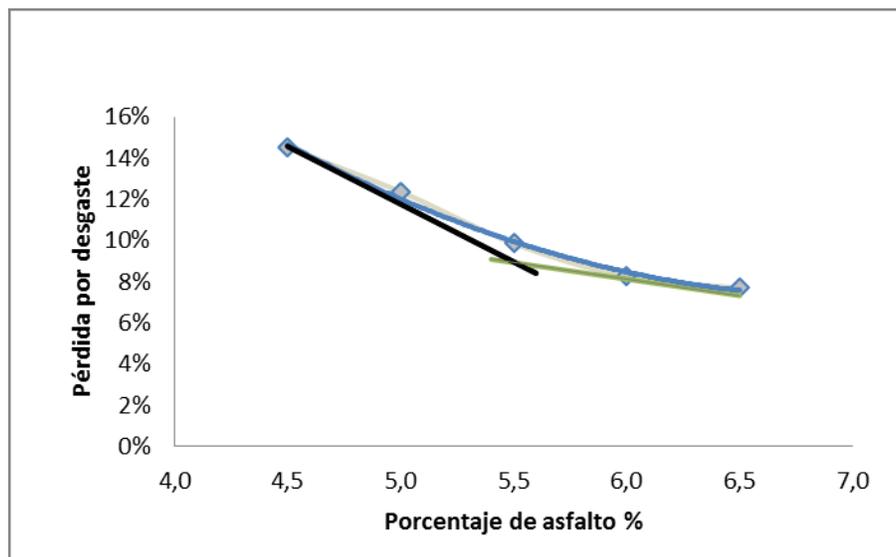
desgaste de una probeta a partir de la variación de la masa del espécimen antes y después del ensayo empleando la máquina de los Ángeles sin la carga de bolas de acero (Calzada Pérez, 1984).

Se evalúan de antemano las características fundamentales en la mezcla, como son la macro textura, las cantidades de vacíos y la fricción, parámetros iniciales de diseño. Este ensayo está recogido en la norma NLT-352 (España) y la norma I.N.V. E – 760 – 13 (Colombia), y se utiliza para la caracterización de las mezclas bituminosas abiertas mediante pérdida de material por desgaste. Se prepara un mínimo de 4 probetas para cada contenido de asfalto ensayado. Estas probetas son las utilizadas en el Ensayo Marshall y se disponen tal y como indica la norma NLT-159 para este ensayo. Se determina la masa de cada probeta con precisión de 0,1 g y se anota ese valor (P1). Cada probeta se introduce en el bombo de la máquina de Los Ángeles y, sin la carga abrasiva de las bolas, se hace girar en tambor tal y como indica la norma NLT-149 para el Ensayo de desgaste de Los Ángeles. Tras esta operación, se extrae la probeta y se pesa de nuevo (P2) con la misma precisión. Se calcula la pérdida por desgaste (P) de cada probeta mediante la expresión:

$$P = ((P1 - P2) / P1) 100$$

Finalmente, el valor medio de todas las probetas se grafica obteniendo una curva característica (Figura 2) que permite hallar el porcentaje óptimo de asfalto.

Figura 2 Curva Porcentaje óptimo de asfalto



Fuente: Elaboración propia

2.4. Módulo resiliente

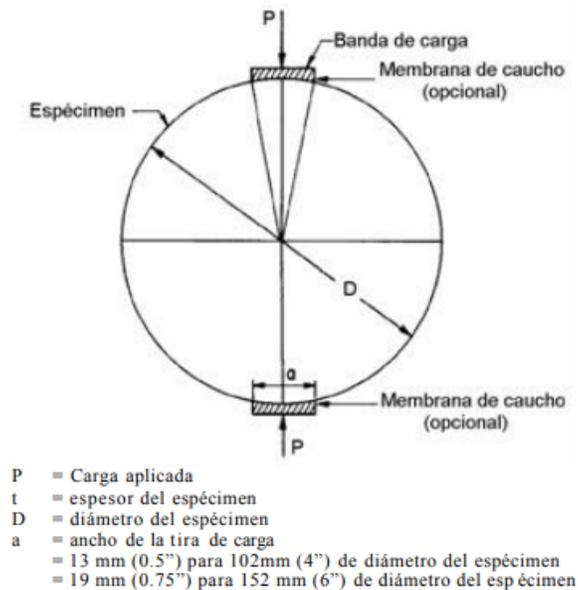
Los materiales que constituyen los pavimentos se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tráfico. Con el fin de tener en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales que conforman una estructura de pavimento, así como el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales, se han realizado en el mundo varios

trabajos experimentales, tanto en modelos a escala natural como en muestras de material probadas en el laboratorio, obteniéndose valiosa información sobre el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales. Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea y suele denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la carga. (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

Bajo carga móvil la deformación permanente se va acumulando y para ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales. La mezcla llega así a un estado tal en que toda la deformación es recuperable, en ese momento se tiene un comportamiento resiliente. De aquí se desprende el concepto de módulo resiliente, el cual está definido como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión diametral entre la deformación axial recuperable. Así pues, el concepto de módulo resiliente está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida. (Pardo Martínez & Romero Cantillo, 2014)

El ensayo de tensión indirecta con cargas repetidas para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas se lleva a cabo aplicando cargas de compresión con un dispositivo que le imprime forma de onda. La carga se aplica verticalmente en un plano diametral de un espécimen cilíndrico de concreto asfáltico (Figura 3). La deformación horizontal resultante del espécimen se mide, y esta medición, junto con una relación de Poisson determinada, se emplea para calcular un módulo resiliente. Una relación de Poisson resiliente se puede también calcular, empleando las deformaciones recuperables, verticales y horizontales, que se miden.

Figura 3 Ensayo de tensión indirecta



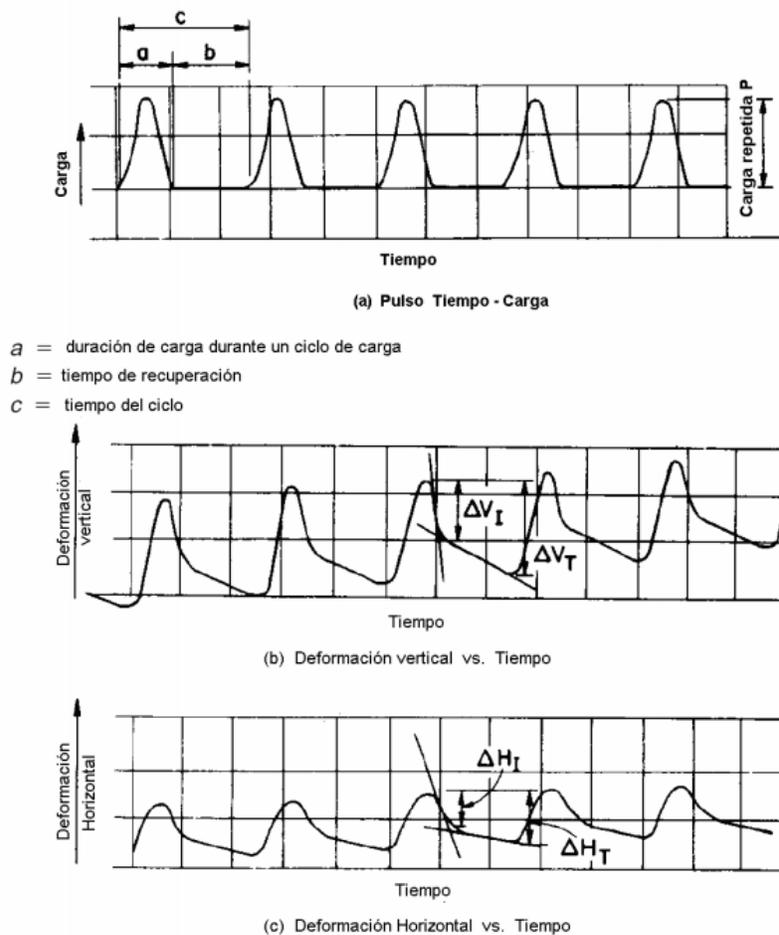
Fuente: (INVIAS, Instituto Nacional de Vías, 2013)

Como se ha observado en los estudios llevados a cabo sobre módulo resiliente, este parámetro no es una propiedad constante del material, sino que depende de muchos factores. Los principales son: número de aplicaciones del esfuerzo, tixotropía, magnitud del esfuerzo desviador, método de compactación y condiciones de compactación. La metodología actual para diseño de pavimentos utilizada por el método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation

Officials) considera que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales constitutivos de la sección de una carretera es el parámetro denominado módulo resiliente. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes , 2001)

De la interpretación de los datos de deformación resultan dos valores de módulos resilientes para ser usados: El módulo resiliente instantáneo, que se calcula empleando la deformación recuperable que ocurre instantáneamente durante la parte de descarga de un ciclo y el módulo resiliente total, que se calcula empleando la deformación recuperable total, que incluye tanto la recuperable instantánea, como la deformación recuperable dependiente del tiempo, que continúa durante la descarga y el resto del período de reposo de un ciclo, tal como se muestra en la Figura 4.

Figura 4 Carga típica y deformación vs. Relaciones de tiempo para ensayo de tensión indirecta con carga repetida



Fuente: (INVIAS, Instituto Nacional de Vías, 2013)

Los valores del módulo resiliente se pueden emplear para evaluar la calidad relativa de los materiales, así como para generar datos de entrada para el diseño, la evaluación y el análisis de pavimentos. El ensayo se puede emplear para estudiar efectos de temperatura, rata de carga, períodos de reposo, etc. Puesto que el procedimiento es no- destructivo, los ensayos se pueden repetir sobre un espécimen para evaluar su condición en lo que respecta a la temperatura o

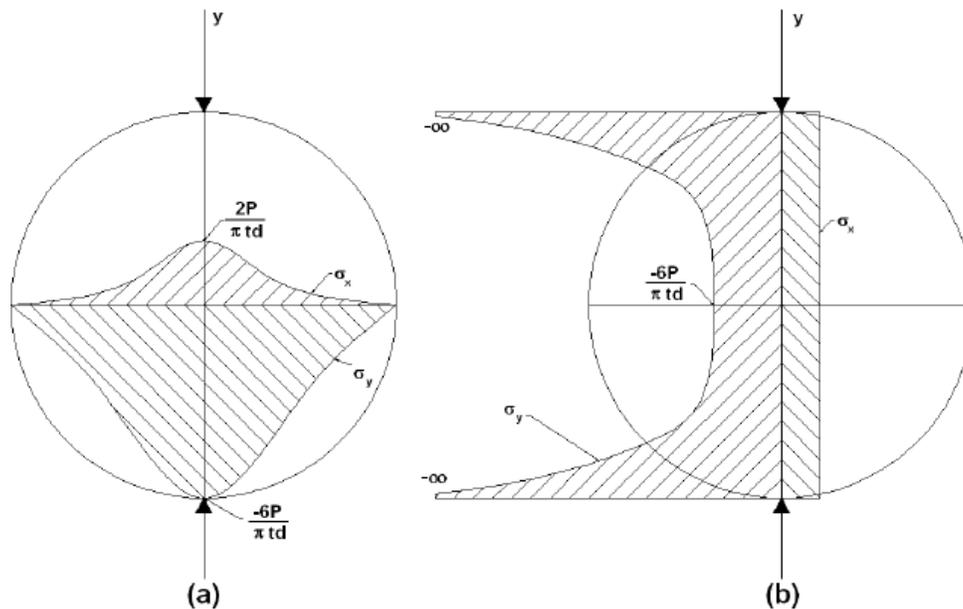
humedad. El método no está destinado para uso en especificaciones.

2.5. Resistencia a la tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible a tensión y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper. Estados Unidos destaca como pionero en el avance de su estudio en la década de los 90, donde se realizan un gran número de investigaciones, muchas de ellas quedan recogidas en el 4º Internacional Symposium de la RILEM. (Garrote Villar, 2006)

Actualmente es un ensayo ampliamente utilizado para medir la resistencia a tracción de las mezclas asfálticas, además es un procedimiento muy simple y está especificado en la norma NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas”. Este ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, igual a la definida en el ensayo Marshall, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura. Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral (Figura 5).

Figura 5 Distribución de esfuerzos teóricos sobre los planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta



Fuente: (E. J. Yoder, 1975)

El Departamento de carreteras del Estado de Texas impulsó unos estudios dirigidos por Tomas Kennedy de la Universidad de Austin en los cuales presentó las principales ventajas del ensayo:

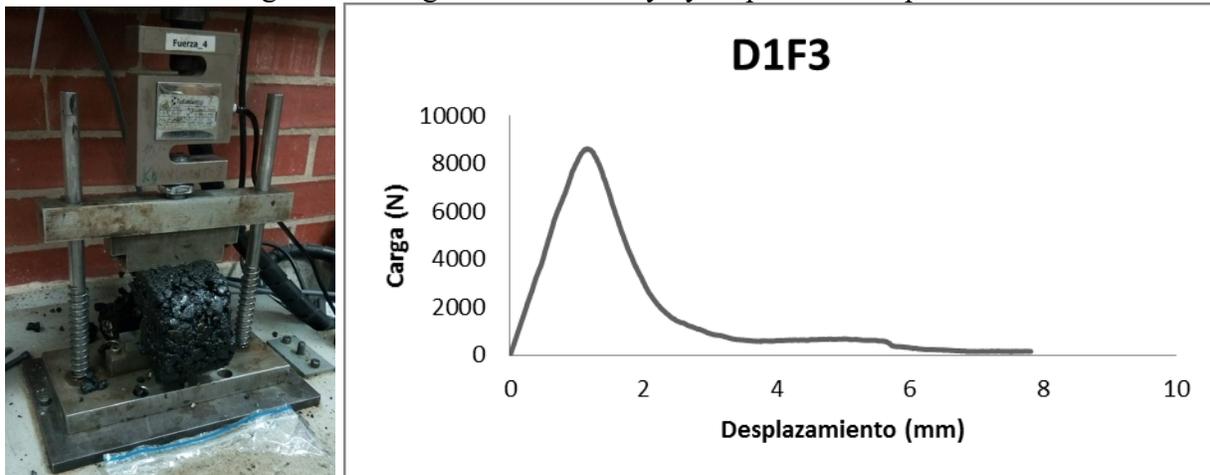
- Es un ensayo relativamente sencillo.

- Presenta similitud con otro tipo de ensayos como el Marshall.
- El tipo de muestra y el equipo son los mismos que los utilizados para otro tipo de ensayos.
- La rotura no se ve afectada por las condiciones de la superficie de la probeta.
- La rotura se inicia en una región relativamente uniforme de tensiones de tracción.
- El coeficiente de variación de los resultados del ensayo es relativamente bajo comparado con otros métodos. Tesoriere en sus estudios habla de dispersiones inferiores al 10% en comparación con el de Marshall que pueden ser del 15-20%. (Tesoriere, 1990)
- El ensayo puede utilizarse bajo carga estática o dinámica, modificando la prensa en función del tipo de estudio que se realice.
- El ensayo de tracción indirecta no sólo da información de la resistencia a tracción indirecta, sino que también nos informa sobre propiedades elásticas resilientes (módulo de elasticidad estático o dinámico en función del tipo de carga aplicada), fisuración térmica, fisuración por fatiga, deformación permanente y puede utilizarse para evaluar el efecto de la humedad en mezclas bituminosas.

La probeta es cargada a compresión según un plano diametral vertical de la misma. Para poder cargar la probeta a compresión en un plano diametral vertical, se requiere un dispositivo de sujeción de la probeta a través del cual se materialice dicho plano de carga.

Como parte de este dispositivo, y en contacto directo con dos generatrices diametralmente opuestas de la probeta, existen dos elementos encargados de evitar la rotura local de la probeta durante el ensayo. Se utilizan unas placas de apoyo curvo, con radio de curvatura igual al radio nominal de la probeta, de 12,7 o 25,4 mm de ancho, para que la distribución de tensiones no se altere significativamente y para que los cálculos del módulo de elasticidad y la relación de Poisson se faciliten manteniendo constante el ancho de carga, en lugar de un ancho de carga variable durante el ensayo, que ocurriría con una placa de carga plana. Por la norma la velocidad de desplazamiento del sistema durante la carga será uniforme e igual a 50,8 mm/min, igual a la empleada por la prensa en el ensayo Marshall (Figura 6).

Figura 6 Configuración del ensayo y respuesta de la probeta



Fuente: Elaboración propia

Como la respuesta del material es altamente dependiente de la temperatura, la temperatura será una variable más para el ensayo. El ensayo de tracción indirecta tiene validez para materiales de comportamiento fundamentalmente elástico y lineal. La norma indica el uso de una temperatura de 25 ± 1 °C, pero permite el uso de otras temperaturas para analizar la susceptibilidad térmica de la mezcla en estudio y sugiere que no se utilicen temperaturas superiores al punto de reblandecimiento del asfalto por ser predominante el carácter viscoso de las mezclas. Como se ha comentado anteriormente, la principal ventaja del método es la sencillez de su metodología. Este es un factor muy valorado por todas aquellas instituciones que necesitan caracterizar de una forma rápida, fiable y económica los pavimentos que gestionan.

2.6. Procedimiento Fénix

El Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña ha desarrollado y puesto a punto un nuevo ensayo experimental práctico, cuya finalidad es evaluar la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas a través del cálculo de la energía disipada. El ensayo Fénix permite obtener la energía disipada en el proceso de fisuración del material, la cual es una combinación de energías liberadas durante el proceso de deformación y fractura del material (Li et al., 2008). La evaluación de la energía disipada en ensayo se presenta como una forma efectiva de medir la resistencia a la fisuración en las mezclas asfálticas. Por otra parte, se ha definido el concepto de tenacidad en las mezclas asfálticas como la capacidad que tiene la mezcla de mantener unido sus materiales constituyentes una vez que se ha iniciado el fallo de fisuración, el cual puede ser determinado y evaluado por el índice de tenacidad, IT. (Váldez, Pérez Jiménez, & Botella, 2009). El índice de tenacidad se ha definido físicamente como la energía disipada en la fase de softening o relajación en la curva carga-desplazamiento del ensayo Fénix, ponderada por un factor de fragilidad de la mezcla dado por la diferencia entre desplazamiento requerido para que el valor de la carga máxima disminuya a la mitad de su valor y el desplazamiento a carga máxima.

El procedimiento del ensayo Fénix consiste en someter media probeta cilíndrica con una fisura inducida de 6 mm de longitud, fabricada mediante el procedimiento Marshall, o bien, mediante el compactador giratorio, a un esfuerzo de tracción con una velocidad de desplazamiento constante a una temperatura deseada. Una vez preparada la probeta con la fisura inducida, se fijan a las dos secciones de la cara plana, separadas por la entalladura, unas placas de acero. Estas, a su vez, son fijadas a los soportes de la prensa, permitiendo un movimiento de rotación respecto a las fijaciones. Durante la ejecución del ensayo se van registrando mediante un equipo de adquisición de datos las cargas generadas, en función del desplazamiento, para así luego calcular los parámetros vinculados al proceso de fisuración.

El ensayo Fénix ha probado ser un procedimiento efectivo para caracterizar el comportamiento a la fisuración en mezclas asfálticas a variables como: Velocidad de aplicación de carga, envejecimiento, tipo de asfalto, contenido de asfalto, temperatura de ensayo y temperatura de compactación.

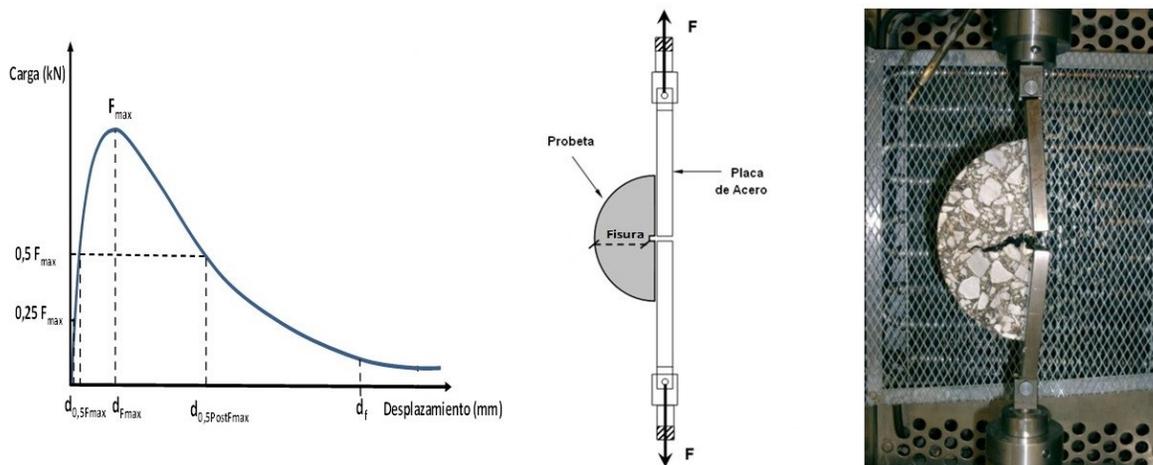
En el análisis estadístico, a través de los coeficientes de variación calculados, C_v , y los análisis de varianza (ANOVA) realizados a los resultados de las energías disipadas, GD, se ha establecido la repetitividad y sensibilidad del ensayo Fénix frente a las variables evaluadas. El ensayo Fénix

posee la ventaja que puede ser aplicado en un amplio rango de temperaturas. El índice de tenacidad, IT, se considera como un buen indicador que permite analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas una vez que ya se ha iniciado la fisura, después de alcanzada su carga máxima, en el área softening.

A partir de la curva carga-desplazamiento resultante del ensayo (Figura 7), se pueden definir distintos parámetros relacionados con las características mecánicas y resistentes de la mezcla:

- Índice de rigidez a tracción (IRT): pendiente de la curva carga-desplazamiento entre el 25 y el 50% de la carga máxima (F_{max}).
- Energía de fractura (GD): área bajo la curva de carga-desplazamiento, dividida por la superficie de fractura (S).
- Índice de tenacidad (IT): área de la curva post-pico multiplicada por el desplazamiento realizado por la prensa desde la carga máxima hasta que ésta se reduce al 50%.
- Desplazamiento (deformación): correspondiente al 50% de la carga máxima en la zona post-pico ($d_{0.5PM}$): permite valorar directamente la ductilidad de la mezcla.

Figura 7 Curva carga-desplazamiento del procedimiento Fénix y parámetros del ensayo



Fuente: (Váldez, Pérez Jiménez, & Botella, 2009)

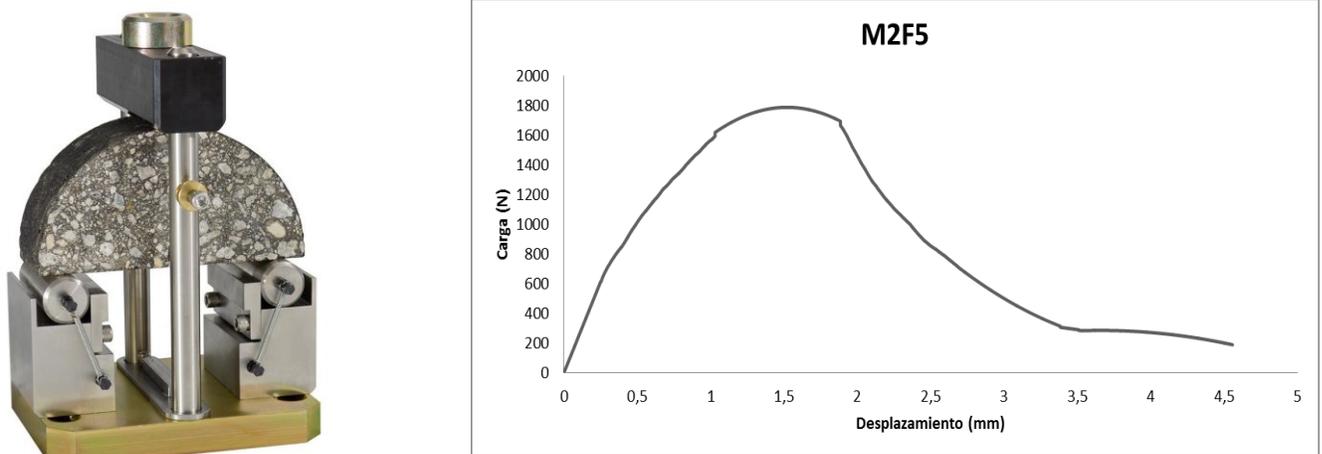
2.7. Ensayo de Viga Semicircular Simplemente Apoyada (SCB)

El Ensayo SCB llamado así por sus siglas en inglés Semicircular Bend Test, es un ensayo para determinar la energía de fractura (G_f) en materiales asfálticos, también permite calcular la resistencia de la fractura (KIC) y la rigidez (S). El espécimen para el ensayo SCB es un medio disco con una abertura o muesca en la mitad, las características del espécimen se especifican en el estándar de la AASHTO TP 105-2013. Estos indican que el espécimen a evaluar dentro del ensayo SCB tiene que tener un tamaño de agregado de 19 mm o menos, el diámetro del disco debe ser de 150 ± 9 mm y 24.7 ± 2 de espesor (Figura 8).

Las fracturas de la mezcla ocurren generalmente cuando el pavimento ha alcanzado su límite de fatiga debido al paso repetido de tráfico. El alcanzar este estado es un indicador de que la vida útil del pavimento está por terminar (Huang, Shu, & Zuo, 2013). Con ayuda del ensayo SCB se pueden observar las fracturas producidas por el paso de tráfico pues el ensayo simula una carga axial igual como sería el paso el paso de automotor por el pavimento. El ensayo SCB es uno de los más populares en cuanto a procedimientos de fractura, esto es debido a la simplicidad, fácil reproducción y flexibilidad dentro del ensayo y al evaluarlo (Saha & Prapoorna Biligiri, 2015). Debido a que el asfalto es un material flexible y el ensayo se hace con mezclas asfálticas en bajas temperaturas, la fractura que se da en estos ensayos es una fractura frágil. La carga que se aplica en el ensayo de SCB es una carga axial, aunque se le puede incluir un efecto de flexión o torsión modificando los soportes base, la regla general es que no. En los ensayos a analizar en este documento no se modifica ninguna distancia de los soportes.

El ensayo de viga semicircular a flexión, SCB, ha sido aplicado en varios estudios (Molenaar et al., 2002; Mull et al., 2002; Li et al., 2008), destacando entre las ventajas de este ensayo (SCB), su fácil aplicación a probetas y testigos, y que requiere un menor número de muestras por su geometría. Sin embargo, la forma de aplicación de la carga produce un complejo estado tensional que afecta en el proceso de propagación de la fisura, generando un efecto de arco con altos esfuerzos de compresión en la localidad cercana a la fisura (Wagoner, Buttlar, & Paulino, 2005)

Figura 8 Montaje del ensayo SCB y respuesta de la probeta



Fuente: (Hma Lab , 2018)

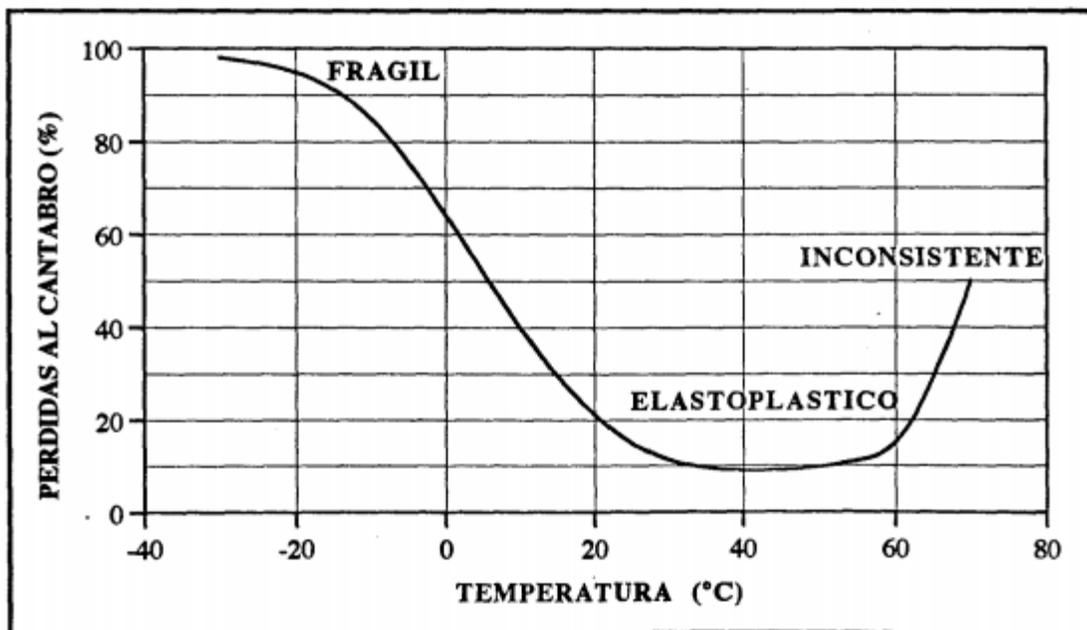
2.8. Método Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL)

La caracterización de los ligantes asfálticos se ha venido realizando mediante una serie de ensayos físicos: penetración, punto de reblandecimiento, punto de fragilidad, ductilidad, etc., que tienen por objeto identificar el producto y comprobar que satisface las especificaciones fijadas. Sin embargo, esta caracterización es incompleta: hay que acudir a un gran número de ensayos que sólo

evalúan parcialmente, y de forma indirecta, alguna de sus propiedades. Ha sido, precisamente, la poca idoneidad de estos ensayos para la caracterización de asfaltos, lo que ha llevado a desarrollar un nuevo procedimiento: Método Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL), basado en la aplicación del ensayo cántabro de pérdida por desgaste que, de manera fiable y sencilla, permite definir las propiedades fundamentales de los ligantes asfálticos de manera indirecta : cohesión, susceptibilidad térmica, adhesividad y envejecimiento, así como las características del mástico filler-betún. (Miró Recasens J. , Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo, 1994)

El Método Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL), desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña por los doctores Pérez Jiménez Y Miro Recasens, permite evaluar los cementos asfálticos a partir de las cualidades cohesivas que el asfalto proporciona a la mezcla, evaluando la susceptibilidad térmica, la adherencia árido-cemento asfáltico ante la acción de agua, la resistencia al envejecimiento y las características del filler. De esta manera, el método pretende evaluar las propiedades de distintos cementos asfálticos, facilitando una selección en función de su comportamiento y de las características mecánicas que aporta a una mezcla patrón, empleando en ello los áridos con los cuales se trabajan en las obras viales. El método de ensayo que sirve de fundamento es el Ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste. Al tratarse de un método de evaluación de asfaltos y no de diseño de mezcla, las características de las diferentes formas de condicionamiento de las probetas no tienen que ver con las de las mezclas colocadas en la vía, si no con aquellas que establecen de manera clara los diferentes comportamientos de los cementos asfálticos.

Figura 9 Influencia de la temperatura en el comportamiento de los ligantes bituminosos (curva de estado)



Fuente: (Miró Recasens & Perez Jimenez, 1994)

Por este método se caracteriza los cementos asfálticos, con el fin de establecer que la cohesión en la mezcla es debido al cemento asfáltico y no en lo que habitualmente se conoce como la unión entre el llenante mineral y el cemento asfáltico (mástico). (Miró Recasens J. , Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo, 1994)

La variación del estado del asfalto con la temperatura “curva de estado” (Figura 9) , puede evaluarse mediante la determinación de las pérdidas por desgaste a distintas temperaturas, poniendo de manifiesto su comportamiento frágil a bajas temperaturas (altas pérdidas al cántabro) y su inconciencia a altas temperaturas (fuerte incremento de las pérdidas), evaluando, por tanto, su susceptibilidad térmica : cuanto más tendida sea la curva de estado, menos susceptible será el ligante y cuanto más cóncava más susceptible.

Con el estudio de las mezclas abiertas a analizar (drenantes y microaglomerados), se establecieron los ensayos pertinentes para la investigación (Permeabilidad, Resistencia a la Tracción Indirecta, Módulo Resiliente, Ensayo SCB, Procedimiento Fénix y UCL) que permitirán evaluar el desempeño de las mezclas con alto contenido de vacíos.

Capítulo 3 Antecedentes

A continuación, se hará referencia a algunas investigaciones relacionadas con las mezclas drenantes y microaglomerados con adición de fibras, las cuales fueron el fundamento y referencia para el desarrollo de este proyecto de investigación.

3.1. Mezclas drenantes y microaglomerados

Las mezclas drenantes se han utilizado en los Estados Unidos desde 1950 aproximadamente y en Europa desde finales de la década de 1970, como tratamiento superficial para compensar el deslizamiento de los aviones en las pistas. El objetivo inicial era recobrar la textura de las capas de rodadura que se hallaban en estado muy liso, pero no como capas drenantes para evacuar de forma rápida el agua de la superficie de rodadura. Con el tiempo investigaciones adicionales descubrieron la capacidad del pavimento para absorber el ruido que se generaba por el paso de los vehículos y su capacidad de absorción de aguas lluvias, eliminándolas de la superficie de rodadura. Dichas investigaciones promovieron un aumento en su uso, convirtiéndolas en una de las mezclas de mayor desarrollo y empleo en Europa en los últimos 25 años (Fernández, 2015).

España fue uno de los primeros países en emplear mezclas drenantes para mejorar la calidad de la capa de rodadura (Rodríguez, 2008), progresando de forma significativa en el estudio de estas mezclas y realizando investigaciones por parte de la Dirección General de Carreteras, las universidades y empresas privadas. Los estudios buscaban una metodología para el diseño y el control de las mezclas drenantes, iniciándose en los años 80 en la Escuela Técnica de Ingenieros de Caminos de Santander y estructurándose un método denominado prueba Cántabro planteado por los doctores Félix Pérez Jiménez y Carlos Kraemer desde 1987. (Alvarez Lugo, Reyes Ortiz, & Miró, 2014).

Los pavimentos drenantes se caracterizaron de acuerdo con la metodología Cántabro la cual permite medir la resistencia de la mezcla a través de los impactos y los efectos abrasivos del tránsito por medio de la máquina de los Ángeles. El ensayo Cántabro está fundamentado sobre briquetas con asfaltos normales y asfaltos modificados, a temperatura ambiente y a temperaturas de 25°C; observando que los asfaltos normales son más frágiles, su resistencia a la abrasión es menor y las pérdidas al desgaste (Arrieta, Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de la mezcla de cemento asfáltico 60-70 con licomont BS-100 para diferentes niveles de precipitación, 2013). Posteriormente los doctores Pérez y Miró desarrollaron el ensayo UCL, el cual se enunciará más adelante.

Las mezclas drenantes se diseñaron inicialmente con contenido de vacíos entre el 15 y 18 % pero el fenómeno de colmatación se hizo muy evidente (Miró Recasens & Perez Jimenez, 1994). Actualmente se exige un porcentaje mínimo de 20 %, pero en algunos casos se han utilizado mezclas con porcentaje de vacíos cercanos al 28 % (Rouillet Mejías, 2009). Se realizó y normalizó la determinación de la pérdida por desgaste de mezclas asfálticas mediante el empleo de máquina

de Los Ángeles sin esferas agresivas (Ensayo Cántabro), como uno de los ensayos típicos para las mezclas drenantes tanto para el diseño de la mezcla, como para la evaluación al daño por humedad.

Posteriormente, con el paso de los años gracias a la experiencia y la investigación, el uso de estas mezclas se ha extendido por todo el mundo, adaptándose a todo tipo de condiciones climáticas y técnicas correspondiente. En países como Japón, Suiza, China y Malasia se ha utilizado no solo en la capa de rodadura de carreteras sino también como capas de rodadura en estacionamientos vehiculares e incluso en aeropuertos. Durante los dos últimos decenios numerosos avances en materiales y evaluación de mezclas asfálticas han conducido a mejoras en la combinación de diseño y construcción de las mezclas drenantes, que permitió aumentar la durabilidad y funcionalidad (Alvarez Lugo, Reyes Ortiz, & Miró, 2014).

-

Países como Chile, Argentina, Ecuador, Perú y Colombia han contemplado dentro de sus especificaciones técnicas el diseño de mezclas asfálticas drenantes y microaglomerados basados en las adaptaciones realizadas de los estudios españoles. Sin embargo, el uso de mezclas drenantes en Sudamérica es poco utilizado y es relativamente nuevo, teniendo en cuenta que las primeras pruebas se realizaron en la provincia de Buenos Aires en 1997 (Qiu, Wong, & Hu, 2009).

En Colombia se han encontrado algunos estudios al respecto, pero aún existe mucho campo por explorar con los diferentes materiales pétreos y cementos asfálticos que se producen en el país para las diversas regiones. (Arrieta, Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de la mezcla de cemento asfáltico AC 60-70 con Licomont BD-100 para diferentes niveles de precipitación., 2013) .Dichos estudios se basan en la normatividad acogida por el INVIAS para las mezclas drenantes asfálticas convencionales, modificadas y los materiales que lo componen; buscando el mejoramiento de las mezclas en su resistencia ante los agentes de intemperismo, cargas del tránsito, durabilidad, seguridad y tomando en cuenta el beneficio-coste que se pueda obtener (INVIAS, 2013).

Se han encontrado investigaciones que muestran las ventajas del uso de mezclas drenantes y microaglomerados, como el Programa de Investigación Cooperativa del Aeropuerto (ACRP), Proyecto 02-64, “La orientación para el uso del pavimento permeable en los aeropuertos” (Bruinsma, et al. 2017) cuyo objetivo fue desarrollar información de orientación que las agencias aeroportuarias necesitan para evaluar mejor el uso de pavimentos drenantes.

A través de la encuesta de la industria y la revisión de la literatura, se identificaron varios aeropuertos que han usado pavimentos drenantes:

- Aeropuerto Internacional Boston Logan - Estacionamiento.
- Aeropuerto Internacional de Burlington - Estacionamiento.
- Aeropuerto Municipal de Culpeper - Delantal de aviación general.
- Aeropuerto Internacional de Dulles - Bermas y estacionamiento de taxis
- Aeropuerto Internacional General Mitchell - Hilos de la pista.
- Aeropuerto Internacional de Los Ángeles - Estacionamiento.
- Aeropuerto Paine Field - plataforma industrial, carretera y estacionamiento.
- Aeropuerto Internacional de Filadelfia - Estacionamiento.
- Aeropuerto Internacional de Richmond – Bahías de taxis.

Aeropuerto Internacional de San Diego - Estacionamiento.
Aeropuerto Internacional de Seattle-Tacoma - Carretera de servicio.
Stewart International Airport - Estacionamiento.
Aeropuerto Internacional de Tampa Bay - Estacionamiento.
Wittman Field – Las bermas de la pista de rodaje y las bermas de la carretera.

Una de las grandes conclusiones del programa es el beneficio económico del uso de mezclas drenantes, puesto que algunos de los costos de materiales eran más altos que los materiales convencionales, pero el pavimento permeable era más económico en general cuando se consideraban extensos sistemas de drenaje de tormentas (o compra de terrenos) (Bruinsma, Smith, & Peshkin, 2017).

De otra parte, a medida que el desarrollo y la urbanización crecen, la permeabilidad natural de las superficies es reemplazada por superficies impermeables (edificaciones y vías con mezclas cerradas). Esta reducción en la cobertura terrestre permeable aumenta la cantidad de escorrentía de aguas pluviales, trayendo consigo impactos negativos como el transporte de sedimentos, la erosión, la contaminación, el deterioro acelerado de las capas de rodadura y el aumento de la accidentalidad (Bean, Hunt, & Bidelspach, 2007). La adición de fibras aumenta considerablemente la resistencia, adhesión, cohesión y capacidad estructural de las mezclas drenantes y microaglomerados, dando lugar a su uso para la solución de pavimentos viales en el país, disminuyendo las tasas de accidentalidad, que en promedio, se acerca a las 18 víctimas mortales por día en las calles y carreteras del país (Centro de Referencia Nacional sobre Violencia del Instituto Nacional de Medicina Legal, 2017).

En los últimos años el calentamiento global se ha convertido en una de las mayores preocupaciones de la humanidad. Las grandes aglomeraciones urbanas están hechas de materiales que absorben los rayos de sol. Las extensas superficies vegetales fueron reemplazadas por carreteras y construcciones. Estas razones hacen que las temperaturas en las ciudades sean más elevadas que en las áreas rurales. Este fenómeno es conocido como el efecto de las islas de calor, y pone en crisis las condiciones energéticas de las ciudades por el aumento en la demanda del uso de aires acondicionados. Las islas de calor contribuyen a los problemas ambientales y cambios climáticos actuales. Usualmente las superficies de vías en las ciudades cubren del 30 al 45 % del área. Una solución a este problema es la implementación de pavimentos frescos en áreas donde los requerimientos estructurales son bajos de acuerdo con los volúmenes de tráfico (parqueaderos). En la Tabla 2 puede visualizarse los tipos de tecnología en relación con su contribución a las islas de calor. Igualmente, a través de la superficie del pavimento poroso, se permite el paso del agua de lluvias y luego su encauce al suelo subyacente (Brattebo & Booth, 2003) (Sansalone & Buchberger, 1995).

Tabla 2. Tecnologías en pavimentos que modifican los problemas ambientales

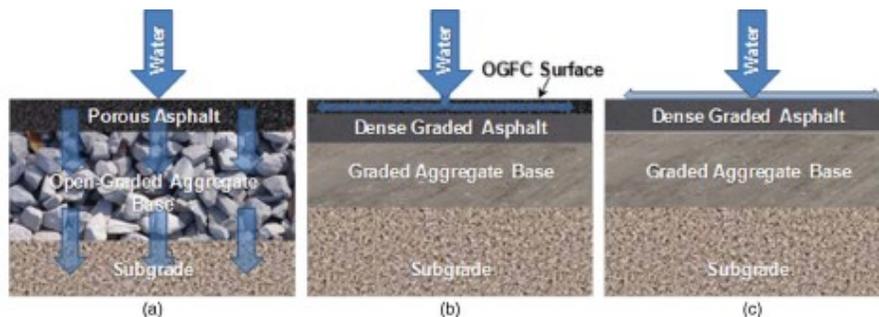
Technology	Heat Island Contribution	Approximate Cost [\$/square foot]	Life [Years]	Co-Benefits	Weaknesses
Conventional Asphalt	High	\$0.10 - \$1.50	7-20	Cost	Heat Island Effect
Conventional Concrete	Medium	\$0.30 - \$4.50	15-35	Cost	--
Modified Asphalt Pavements	Medium	\$0.10 - \$1.50	7-20	--	--
Modified Portland Cement Concrete	Medium	\$0.30 - \$4.50	15-36	Cost	White Cement Emission
Chip Seals	Low	\$0.10 - \$0.15	2-8	Resurfacing Ability	Service Life
Ultra Thin Whitetopping	Low	\$1.50 - \$6.50	10-15	Resurfacing Ability	Debris Covering Reflectivity
Resin Based Pavements	Low	\$2.50 - \$3.50	6-10	Improved Aesthetics	Solvents Used
Porous Asphalt	Medium	\$2.00 - \$2.50	7-10	Stormwater Control	Cost
Porous Concrete	Low	\$5.00 - \$6.25	15-20	Stormwater Control	Cost
Grass Paving	Low	\$1.50 - \$5.75	>10	Stormwater Control	Winter Conditions

Fuente: (Lee K. W., 2010)

La mezcla porosa se enfría teniendo en cuenta que su superficie de contacto con el aire es mayor. Si se diseñan adecuadamente este sistema permite la eliminación de contaminantes y la recarga de aguas subterráneas. Por debajo de la capa drenante se encuentra un reservorio para la infiltración de la escorrentía. Una pendiente mínima que se proporciona permite la infiltración de las aguas pluviales. Estos sistemas se diseñan típicamente con respecto a una serie histórica de lluvias, esto hace que las inundaciones y los contaminantes se disipen a través del perfil del suelo durante grandes eventos de aguas. Un buen drenaje ayuda a proteger a los pavimentos de los ciclos de congelación y descongelación durante los meses de invierno. Es posible que los poros del pavimento asfáltico tiendan a obstruirse con arena, sal y otros desechos. Por lo tanto, es importante que las medidas de mantenimiento anual se ejecuten para asegurar que los poros continúan drenando (Lee K. W., 2010).

Las mezclas de pavimento asfáltico poroso están diseñadas con una capa abierta para aumentar el número de huecos de aire permeables, que permite que el agua penetre a través de ellos, y haciendo que la eliminación de agua de la superficie sea mucho más rápida. La Figura 10-a muestra el movimiento del agua dentro de un pavimento poroso, la Figura 10-b muestra un pavimento con una capa de superposición de mezcla asfáltica porosa y la Figura 10-c un pavimento con asfalto denso convencional.

Figura 10. Movimiento del agua en función del tipo de mezcla



Fuente (Putman & Kline, 2012)

En un pavimento poroso, toda la estructura está diseñada para permitir que el agua se infiltre en la superficie y luego se almacene en la base antes de la filtración en la subrasante. Para un pavimento con una capa de superposición de mezcla asfáltica porosa, el agua puede infiltrarse en los vacíos de la capa superior y luego drenar lateralmente hasta el borde del pavimento sobre la capa de mezcla asfáltica densa.

Sin embargo, en pavimentos densos, la superficie está diseñada para ser impermeable, es decir que el agua se mueva al borde de la carretera mediante una pequeña pendiente transversal, que se construye (usualmente del 2%), generando una película entre la llanta y la estructura que impide una mayor tracción del neumático y por ende una mayor distancia de frenado, de acuerdo al estudio realizado por la organización no gubernamental Luchemos por la Vida de Argentina, cuyo propósito es prevenir los accidentes de tránsito, como se observa en la Figura 11.

Figura 11. Distancias de frenado en pavimentos secos y húmedos



Fuente: (Luchemos por la vida- Asociación Civil, 2018)

Hay algunas desventajas de las mezclas porosas: El alto contenido de aire conduce a un mayor potencial para acelerar el envejecimiento, ya que el oxígeno tiene acceso a una mayor área superficial de la mezcla (Kandhal & Mallick , Design, construction, and maintenance of opengraded asphalt friction courses, 2002). En invierno se requieren tratamientos especiales para que los pavimentos porosos mantengan las condiciones de seguridad. Los poros obstruidos también pueden ser problemáticos, especialmente debido a las actividades de mantenimiento de invierno, como el lijado (Yildirim , Dossey, & Trevino, 2006).

El diseño de las mezclas porosas debe ser modificado respecto al diseño de mezcla tradicional para poder ajustarlo al alto contenido de vacíos. El primero de estos diseños de mezcla se publicó en 1974 por la Administración Federal de Carreteras, modificándose en 1980 y nuevamente en 1990 basándose en la capacidad superficial y la absorción del agregado (Federal Highway Administration (FHWA), 1990). Una granulometría abierta y un alto contenido de vacíos produce un menor contacto de los agregados, lo que reduce la durabilidad. Por ello, la mayoría de los métodos contrarrestan este efecto, con un mayor contenido de aglutinante y aditivos que mejoran el rendimiento de la mezcla (Mallick, Kandhal, & Cooley, 2000).

Debido a todos los beneficios potenciales de los pavimentos porosos relacionados a la gestión de aguas lluvias, muchas ciudades han aceptado pavimentos porosos como una mejor práctica de gestión territorial. Muchos departamentos estatales de transporte también reconocen los beneficios de seguridad de la mezcla porosa. Sin embargo, es primordial que estos pavimentos funcionen según lo previsto, y esto requiere un diseño apropiado de la mezcla, entre otras variables. Actualmente se recomiendan varios métodos para diseñar mezclas asfálticas porosas, y algunos de estos procedimientos son más complejos que otros. Los procedimientos de diseño de mezcla utilizados en Estados Unidos se pueden dividir en tres categorías principales dependiendo de la forma en que se calcula el porcentaje óptimo de asfalto (Putman & Kline, 2012) :

1. Procedimientos sobre mezclas de asfalto compactadas
2. Procedimientos basados en la prueba de absorción de aceite
3. Procedimientos por observación visual de la mezcla porosa suelta.

Para el primer método, un cierto número de especímenes cilíndricos son compactados sobre un rango de contenido de aglutinante. Las pruebas se llevan a cabo en estos especímenes para determinar las propiedades volumétricas (vacíos con aire, vacíos con agregado y vacíos llenos de asfalto), resistencia a la abrasión (ensayo Cántabro) y permeabilidad.

Los métodos en la categoría de absorción de aceite determinan el porcentaje óptimo de asfalto de una mezcla porosa midiendo la capacidad de absorción del agregado con un aceite especificado. Los procedimientos son similares en concepto, puesto que el agregado de tamaño predominante se empapa en aceite en un período de tiempo específico, después del cual el agregado se drena bajo condiciones particulares. Algunos estados también miden la capacidad de absorción de la porción del agregado fino de la mezcla usando queroseno en lugar de aceite. Los valores de absorción del agregado fino y grueso luego se usan para calcular el porcentaje óptimo de asfalto. Los métodos de diseño de mezcla de esta categoría incluyeron los procedimientos creado por FWHA (Federal Highway Administration) (1990) y el Georgia DOT (2009). Vale la pena señalar que el Alabama DOT (1999) y Kentucky Transportation Cabinet (2008) también usan este procedimiento (Mallick, Kandhal, & Cooley, 2000).

El último grupo de diseño de mezcla porosa se basa en la determinación visual. En general, este procedimiento implica mezclar asfalto en un rango de contenido de aglutinante y la colocación de una cantidad específica de mezcla suelta en un recipiente de vidrio transparente que está acondicionado en un horno a una temperatura y por una duración establecida. Después del acondicionamiento, el porcentaje óptimo de asfalto se determina mirando en los contenedores

desde la parte inferior. El diseñador busca el contenido de asfalto en el que no hay demasiado aglutinante escurriendo del agregado, ni muy poco aglutinante en el fondo del contenedor (Florida Department of Transportation, 2011).

La porosidad es una medida de los huecos accesibles al agua, mientras que el porcentaje de vacíos es el total de huecos en la muestra. La porosidad disminuye al aumentar el contenido de aglutinante, puesto que mayor cantidad de asfalto estará en los espacios vacíos (Putman & Kline, 2012). La porosidad usualmente es inferior al porcentaje de vacíos. Para mezclas porosas, esto es importante, porque los huecos de aire inaccesibles no contribuyen a la funcionalidad de la mezcla porosa; solo los vacíos accesibles o interconectados permiten que el agua drene a través del pavimento (Alvarez, Martin, Epps, & Izzo, 2008).

La permeabilidad es quizás el parámetro más importante relacionado con la funcionalidad de una superficie de pavimento poroso. Sin la adecuada permeabilidad, el pavimento no permitirá que el agua se infiltre. Cuanto menor es el contenido de asfalto de la carpeta, mayor es la permeabilidad. Esta tendencia es atribuible a vacíos accesibles (porosidad) de la mezcla que se llena con aglutinante a medida que aumenta su contenido.

También se debe tener en cuenta que la permeabilidad requerida depende del sitio específico dónde será utilizada la mezcla. En algunas áreas, puede haber una necesidad de tener mayores tasas de infiltración del pavimento debido a áreas de escorrentía más grandes, o precipitaciones de alta frecuencia; mientras que, en otras áreas, menores tasas de permeabilidad pueden ser adecuado debido a la precipitación mínima. Este hecho incluso se puede observar en lugares como Mississippi, donde se requiere que la permeabilidad de una mezcla porosa sea al menos de 30 m/día y en Carolina del Norte donde se requiere una permeabilidad de al menos 100 m/día. (Putman & Kline, 2012)

La última propiedad de la mezcla que se evalúa es la pérdida de abrasión mediante la prueba Cántabro. Esta prueba tiene como objetivo medir la susceptibilidad de una mezcla a la pérdida por abrasión superficial, o deshilachado. La pérdida a la abrasión disminuye al aumentar el contenido de asfalto de la carpeta. Esto es atribuible al aumento de la cohesión dentro de la mezcla, dado que el espesor de la película aglutinante que recubre los agregados aumenta. La durabilidad de una mezcla porosa depende del espesor de la película aglutinante que rodea las partículas de agregado y promueve la cohesión dentro de la mezcla. Sin embargo, como el contenido de aglutinante de la mezcla aumenta, el aglutinante ocupa vacíos, reduciendo así la permeabilidad de la mezcla. El rango de contenido de aglutinante evaluado en los procedimientos se encuentra entre el 5-7%. Una ventaja del método Cántabro es que evalúa las propiedades de rendimiento (permeabilidad y durabilidad) de mezclas en los diferentes contenidos de aglutinante (Alvarez, Martin, Epps, & Izzo, 2008).

La vida útil de las mezclas drenantes oscila entre los 3 y 9 años teniendo en cuenta la pérdida de funcionalidad influenciada por la velocidad del vehículo, el entorno vial y la granulometría de la mezcla. Es por ello, que las investigaciones acerca del tema se han enfocado a aumentar su durabilidad y resistencia. (Alvarez, Epps Martin, & Estakhri, 2010). Una de las novedades que trae consigo este tipo de mezclas es la utilización de estabilizadores (fibras y polímeros), capaces de

transferir los esfuerzos desde el potente esqueleto mineral hacia el elevado contenido de asfalto (Torres Rodríguez, 2014).

Los asfaltos modificados con polímeros (PMA) han ganado importancia en la práctica de la pavimentación, y hoy en día, casi todas las autopistas y vías principales usan polímeros como aglutinantes por su diversidad de ventajas, entre ellas, la resistencia prolongada a los fallos habituales relacionados con las cargas del tráfico y las condiciones atmosféricas. La presencia del polímero en pavimentos de gradación abierta aumenta sus propiedades acústicas y antideslizantes (Arrieta, Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de la mezcla de cemento asfáltico 60-70 con licomont BS-100 para diferentes niveles de precipitación, 2013).

Todas estas ventajas, incluida la reducción de costos de operación por mantenimiento que contrarrestan fácilmente la inversión inicial, apoyan drásticamente el uso de pavimentos modificados. La dificultad principal en la industria de los asfaltos modificados con polímeros se relaciona con la mala compatibilidad entre el asfalto y el polímero, (tendencia a la separación durante el almacenamiento estático a alta temperatura o durante el transporte al sitio de pavimentación). (Polacco , Filippi, Merusi, & Stastna, 2015)

Para determinar si un determinado asfalto modificado con polímeros es estable en almacenamiento o no, se realiza una prueba que consiste en una simulación a pequeña escala del almacenamiento, durante la cual las dos fases incompatibles pueden separarse y segregarse; por lo tanto, una comparación de las propiedades de la parte superior e inferior permite la cuantificación de la estabilidad. Como la mayoría de las especificaciones de asfalto se han desarrollado en las primeras décadas del siglo XX, tal comparación se basa a menudo en las mediciones indirectas de cantidades clásicas, como el anillo y pruebas de bolas o de penetración, que todavía se utilizan actualmente, pero no proporcionan una cuantificación directa de la segregación de polímero dentro de la muestra.

Actualmente una de las metodologías utilizadas para medir la estabilidad corresponde a las especificaciones Themodern que se dedican al estudio de la estructura y la morfología de los asfaltos modificados con polímeros. (Cárdenas & Fonseca, 2009)

Análisis ópticos y electrónicos, así como el análisis de la fuerza atómicas microscópicas, rayos X, y evaluaciones térmicas y reológicas se han utilizado ampliamente, lo que resultó en una gran mejora en la comprensión de las mezclas modificadas, concluyendo que están constituidas por una red polimérica hinchada por las moléculas de asfalto. Sin embargo, dada la alta complejidad y la variabilidad de la composición de asfalto, una generalización de los parámetros que influyen en la estabilidad de almacenamiento de PMA es casi imposible. (Rondón Quintana, Fernández Gómez, & Castron López, 2010)

Como solución a una de las desventajas más sobresalientes de las mezclas modificadas una parte importante de la investigación se ha dedicado al desarrollo de agentes de compatibilización. Como el polímero más utilizado contiene dobles enlaces insaturados, un proceso de vulcanización leve crea enlaces químicos entre el polímero y moléculas de asfalto. (Polacco , Filippi, Merusi, & Stastna, 2015)

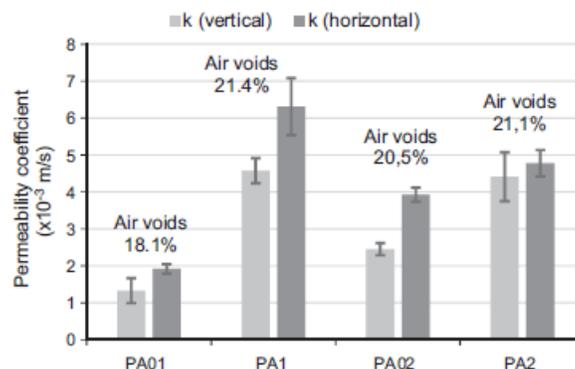
3.2. Desempeño de mezclas porosas con fibras celulósicas

El crecimiento de las ciudades, relacionado con el aumento de la población y la construcción de infraestructura, ha generado una impermeabilización progresiva del suelo, asociada a los cambios climáticos extremos, inundaciones y sequías, ya que se ha reducido considerablemente el área de infiltración de agua (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2015). El uso de mezclas porosas en los pavimentos se considera una de las posibles soluciones a dicha problemática, con una serie de ventajas adicionales ya mencionadas, como la disminución del efecto denominado “islas de calor”, reducción del ruido y mayor seguridad al disminuir el hidroplaneo. Una de sus grandes desventajas es la reducción de la capacidad de carga y su frecuente mantenimiento periódico por obstrucción de vacíos (Lopes Alfonso, Dinis-Almeida, & Sena Fael, 2017).

Las primeras generaciones de mezclas porosas fueron producidas con un alto contenido de asfalto, para generar una mejor conexión entre los agregados (Haffner, Bassuk, Grabosky, & Trowbridge, 2007), sin embargo, los asfaltos modificados pueden lograr mezclas más elásticas, resistencia al envejecimiento y deformaciones plásticas, buena adhesividad con los agregados y baja susceptibilidad térmica. La durabilidad de las mezclas, ha conducido a la incorporación de aditivos como la celulosa mineral, los polímeros sintéticos, las fibras de vidrios, fibras de alfombra, y neumático reciclado (Attarian, 2010) (Pérez Jiménez, 2014) (Mallick, Kandhal, & Cooley, 2000) (Poulikakos & Partl, 2010).

En la Figura 12 pueden observarse los resultados de permeabilidad para una mezcla porosa con agregados finos y sin fibras (PA01), una mezcla porosa con agregados gruesos y sin fibras (PA02), una mezcla porosa con agregados finos y con fibras (PA1) y una mezcla porosa con agregados gruesos y con fibras (PA2). Al utilizar fibras celulósicas, el porcentaje de asfalto utilizado en la mezcla aumenta, permitiendo mejorar el revestimiento de los agregados y consecuentemente su durabilidad. El uso de fibras celulósicas permitió obtener mayor adhesión en el ensayo UCL húmedo, aumentando entre 0.5×10^{-3} m/s y 1×10^{-3} m/s el coeficiente de permeabilidad, concluyendo de forma determinante que la adición de fibras mejora el desempeño de la mezcla respecto a sus principales inconvenientes, sin afectar sus grandes virtudes (Lopes Alfonso, Dinis-Almeida, & Sena Fael, 2017).

Figura 12. Resultados del coeficiente de permeabilidad mezclas con y sin fibras celulósicas



Fuente: (Lopes Alfonso, Dinis-Almeida, & Sena Fael, 2017).

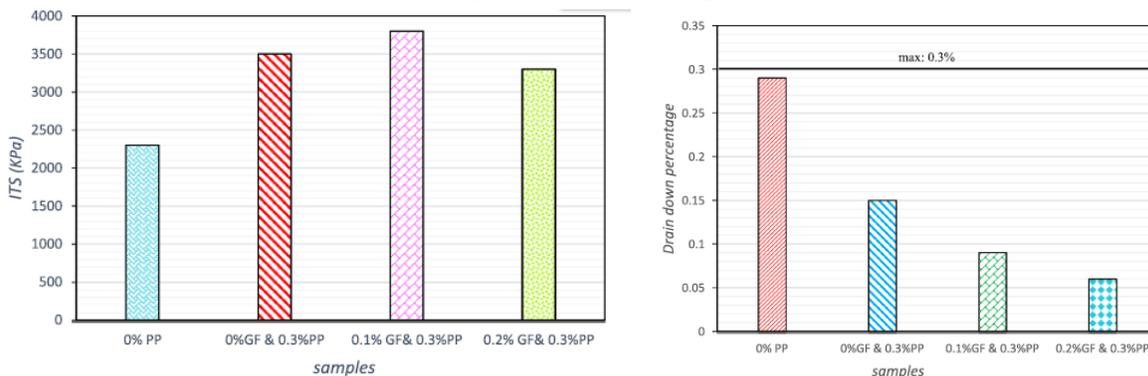
3.3. Desempeño de mezclas porosas con fibras híbridas y nano-sílices

El uso de fibras de vidrio, fibras de polipropileno, polvo de cal y nano-sílices sobre mezclas porosas mejora las características de los especímenes. Se han realizado ensayos de escurrimiento y resistencia a la tracción indirecta con asfaltos modificados con un 4,5% de estireno butadieno estireno (SBS), 2-4% de nano-sílices, 0.5-1% de polvo de cal y 0,4-0,5% de un híbrido sintético formado por la combinación de 0,1-0,2% de fibra de vidrio y 0,3% de fibras de polipropileno. (Tanzadeh & Shahrezagamasaei, Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures, 2017).

Investigaciones realizadas en China permiten presentar una comparación en el desempeño de tres tipos de mezclas asfálticas modificadas con polímeros. La misma granulometría fue aplicada a todas las mezclas y el asfalto utilizado tiene una penetración estándar 60/70. Los resultados indican que las propiedades de la mezcla han mejorado de forma significativa con el uso de dichos aditivos y tienen menor sensibilidad a las temperaturas elevadas, exhibiendo un mejor funcionamiento en cuanto a envejecimiento de la mezcla, rotura y fatiga que las mezclas convencionales 60/70 (Qiu, Wong, & Hu, 2009).

El ensayo de escurrimiento consiste en determinar cuantitativamente el escurrimiento de ligante de una mezcla asfáltica, cuando se somete a la acción del calor, evaluando el efecto de los aditivos modificadores al ligante. Se define al escurrimiento como la proporción del ligante que se desprende o escurre de los áridos, con los que se ha mezclado, una vez realizado el proceso de mezcla. Un excesivo escurrimiento del ligante durante el transporte o la puesta en obra resultara en áreas con contenidos escasos del mismo propicias a un deterioro prematuro por degradación y pérdida de áridos, y en áreas ricas en ligante, que no presentaran la estructura adecuada ni la capacidad drenante deseada en las mezclas porosa, mostrando deformaciones permanentes (Rebollo, González, & Botasso, 2006).

Figura 13. Ensayos de tracción indirecta y escurrimiento para evaluar el efecto del uso de fibra de vidrio y fibras de polipropileno

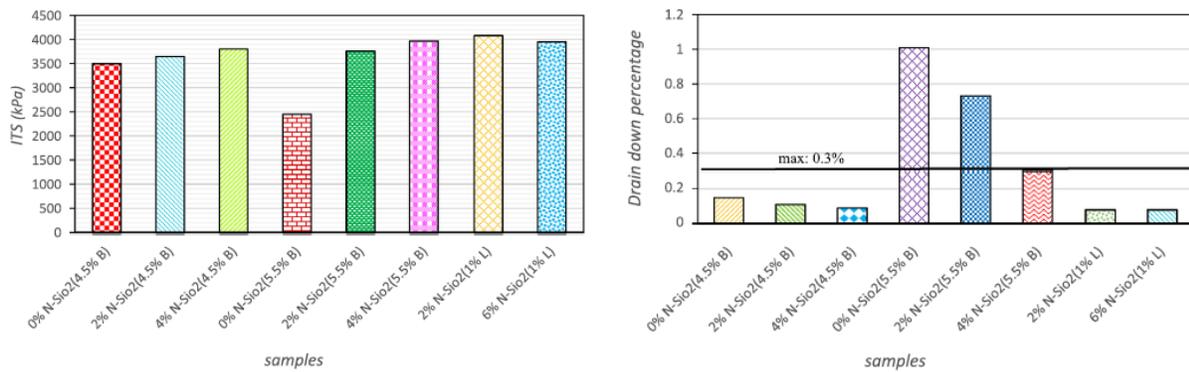


Fuente: (Tanzadeh & Shahrezagamasaei, Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures, 2017)

La resistencia a la tracción indirecta de las mezclas de asfalto aumenta alrededor del 65% al agregar 0,1% de fibras de vidrio y 0,3 % de fibras de polipropileno como se observa en la Figura 13. Igualmente, agregando fibras de polipropileno alrededor de 0.3 % en peso de la mezcla de asfalto, el escurrimiento del aglutinante tiene una reducción del 49% y del 80% con la adición de 0.2 % de fibra de vidrio y 0.3 % de fibra de polipropileno. (Tanzadeh & Shahrezagamasaei, Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures, 2017).

La adición de nano-sílices a la mezcla de asfalto aumenta su resistencia a la tracción indirecta como se observa en la Figura 14. De acuerdo con esto, agregando un 4% de nano-sílices a la mezcla de asfalto su resistencia a la tensión aumentará más del 62 por ciento. Sin embargo, el asfalto que contiene 2% de nano-sílices y un 1% de polvo de cal tiene la máxima resistencia a la tracción indirecta. El uso de Nano-sílices está influyendo notablemente en la reducción del escurrimiento del aglutinante. De modo que, el uso de 4% de Nano-sílices para las mezclas de asfalto con 5,5% de asfalto podría reducir su contenido más del 70%.

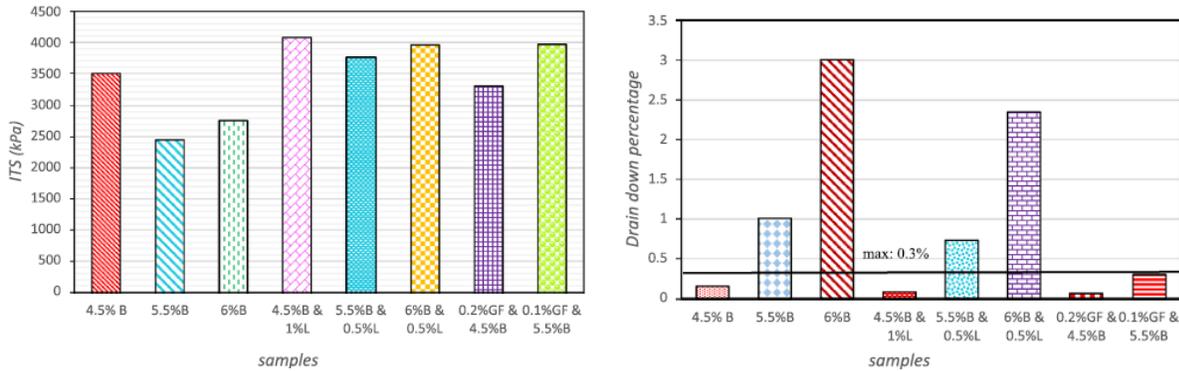
Figura 14. Ensayos de tracción indirecta y escurrimiento para evaluar el efecto del uso de nano-sílices



Fuente: (Tanzadeh & Shahrezagamasaei, Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures, 2017).

Aumentar el porcentaje de aglutinante de 4.5% a 6 % reduce la resistencia a la tracción indirecta de las muestras más del 21% como se muestra en la Figura 15 y aumenta su porcentaje de escurrimiento. Igualmente puede observarse que el uso de cal en polvo puede contrarrestar el escurrimiento de forma satisfactoria. (Tanzadeh & Shahrezagamasaei, Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures, 2017).

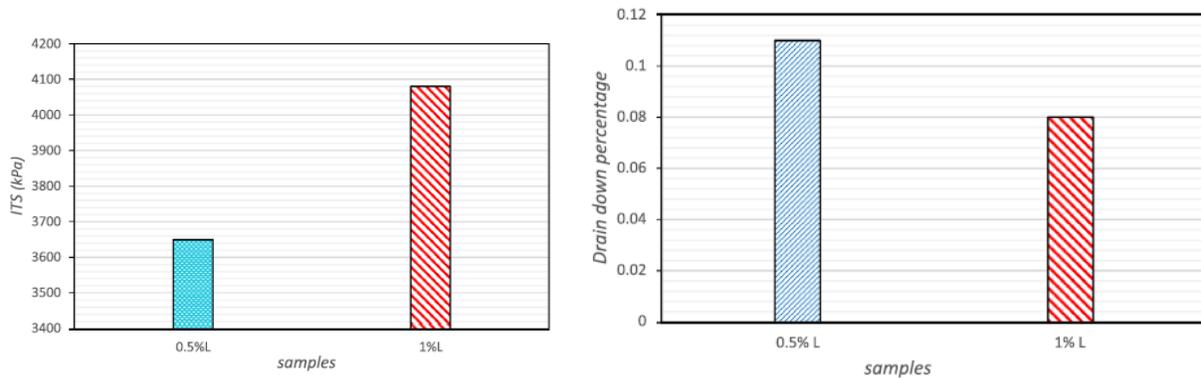
Figura 15. Ensayos de tracción indirecta y escurrimiento para evaluar el efecto del porcentaje óptimo de asfalto



Fuente: (Tanzadeh & Shahrezagamasaei, Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures, 2017).

Además, al variar el contenido de cal en polvo entre 0,5 % y 1%, la resistencia a la tracción indirecta podría aumentarse en un 16.5% para especímenes que contienen 4,5 % de asfalto como se observa en la Figura 16.

Figura 16. Ensayos de tracción indirecta y escurrimiento para evaluar el efecto de la cal en polvo



Fuente: (Tanzadeh & Shahrezagamasaei, Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures, 2017).

3.4. Evaluación de la durabilidad y el rendimiento funcional del poliuretano en un pavimento poroso

Los pavimentos porosos aportan beneficios significativos en la seguridad y la reducción del ruido. (Amundsen & Klæboe, 2005). Se ha investigado la durabilidad y el rendimiento funcional de la mezcla porosa de poliuretano (PPM) como alternativa a las mezclas porosas de superposición (OGFC). Se usó poliuretano de dos componentes (El componente A es un prepolímero de isocianato (PM-200) y el componente B es la mezcla de poliéter polioliol y pentaeritritol) para preparar mezclas porosas con diferentes cantidades de poliuretano y diferentes granulometrías. Los tipos de mezcla fabricados pueden observarse en la Tabla 3.

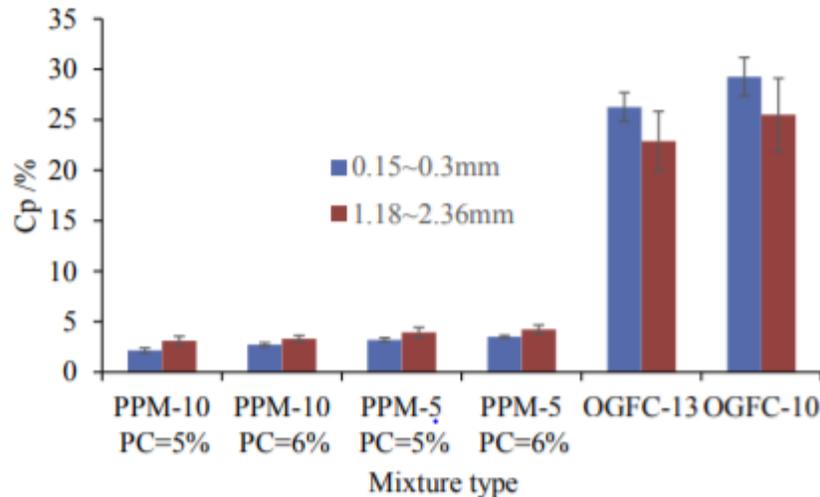
Tabla 3 Tamaño de partículas para mezclas porosas con poliuretano (PPM)

Type	Aggregate size (mm)	Polyurethane content (%)	Air void (%)
PPM-10	4.75–9.5	5	34.1
		6	32.4
PPM-5	2.36–4.75	5	32.7
		6	30.6

Fuente (Chen, Yin, Wang, & Ding, 2018)

El rendimiento anti-obstrucción de la mezcla porosa con poliuretano se evaluó a través de pruebas de obstrucción y permeabilidad. La prueba de obstrucción consiste en verter sobre la probeta de mezcla porosa, una suspensión de 200 gramos de material particulado seco con 1000 gramos de agua, y medir la variación de masa de la probeta antes del procedimiento y después de verter la suspensión y secar la probeta a 60°C durante dos horas. La Figura 17 muestra como las mezclas abiertas de superposición convencionales tienen una tasa de obstrucción entre el 20 y 30%, mientras que todas aquellas que usan poliuretano no superan el 5%. Por otro lado, las tasas de obstrucción son similares para partículas entre 0,15 y 2,36 mm para las mezclas con poliuretano, mientras que las tradicionales muestran una mayor obstrucción con partículas más pequeñas. En primer lugar, la alta porosidad de PPM contribuye a la reducción del atasco de partículas. En segundo lugar, el aglutinante de poliuretano es menos pegajoso que el aglutinante de asfalto y por lo tanto no es fácil para el sedimento ocupar los vacíos de aire (Chen, Yin, Wang, & Ding, 2018).

Figura 17. Tasa de obstrucción de las mezclas



Fuente (Chen, Yin, Wang, & Ding, 2018)

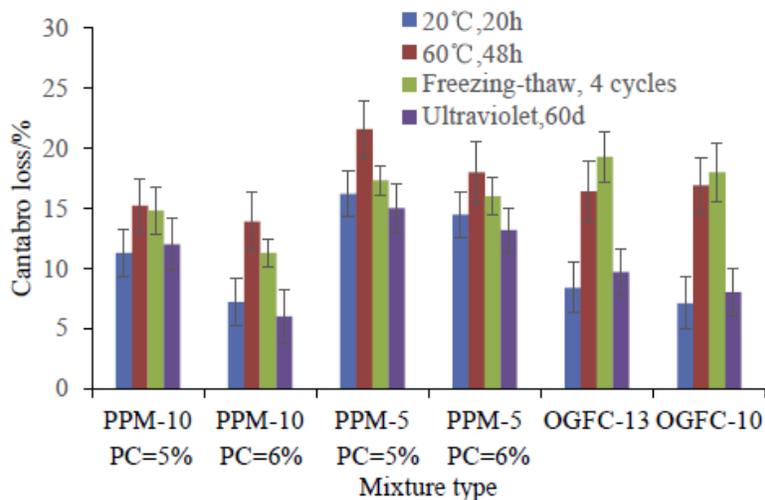
La Figura 18 muestra los resultados de diferentes mezclas después de evaluar la pérdida por desgaste Cántabro. La mezcla PPM-10 con contenido de poliuretano al 6% y el tamaño máximo agregado de 9.5 mm muestra la mayor resistencia al desgarrado en todas las condiciones de prueba. La mezcla PPM-10 con 5% de poliuretano muestra un desgaste mayor que la PPM-10 con 6% de

poliuretano. Sin embargo, la mezcla PPM-5, que se diferencia de las anteriores por su tamaño de agregado más pequeño, no muestra la mejora de la resistencia al desgarro en comparación con las mezclas porosas convencionales de superposición (OGFC), excepto por las condiciones de prueba con ciclos de congelación-descongelación. Por otro lado, los especímenes OGFC-10 y OGFC-13 con diferentes gradaciones muestran una resistencia al desgarro similar.

En cuanto al efecto de las condiciones de prueba, se puede ver que las pérdidas de peso medidas a 20 °C o bajo radiación ultravioleta, son más pequeñas que aquellas a alta temperatura o después de ciclos de congelación-descongelación, independientemente del tipo de mezcla porosa. Esto es esperado porque las altas temperaturas o los ciclos de congelación-descongelación crean más condiciones severas para las mezclas porosas. El deshilachado es causado principalmente por la eliminación del aglutinante del agregado, que ocurre más fácilmente a altas temperaturas o después de los ciclos congelación-descongelación. A medida que aumenta la temperatura, aglutinante de asfalto o poliuretano se vuelve suave y pierde adherencia con el agregado. Los ciclos congelamiento-descongelamiento pueden inducir a mayor daño por humedad y generar alta presión interna durante la formación de hielo. Se observa que la condición de prueba más crítica para el deshilachado son las altas temperaturas para mezclas con poliuretano (PPM), pero ciclos de congelación-descongelación para mezclas porosas convencionales (OGFC) (Chen, Yin, Wang, & Ding, 2018).

Por otro lado, el efecto del envejecimiento ultravioleta en el ensayo Cántabro no muestra una variación significativa y las tendencias resultan no consistentes entre las diferentes mezclas de OGFC y PPM. Esto se debe al envejecimiento del asfalto o aglutinante de poliuretano por la luz ultravioleta, pero su baja afectación a la adhesión entre el aglutinante y el agregado.

Figura 18. Pérdidas de desgaste Cántabro para mezclas porosas convencionales y mezclas porosas con poliuretano



Fuente (Chen, Yin, Wang, & Ding, 2018)

3.5. Optimización de la composición y el proceso de mezcla de un asfalto poroso autorreparable

La optimización de materiales para la primera carretera de ingeniería con fines de auto-reparación fue realizada con fibras de acero combinadas dentro de mezcla asfáltica porosa. La idea era tener partículas conductoras en la mezcla de asfalto, con el objetivo de calentarlo a través de energía de inducción. Estas aumentan las tasas de curación en el pavimento, cerrando todas las grietas posibles en él. Para definir el volumen de fibras en la mezcla, se hicieron núcleos de mezcla porosa en el laboratorio. La fibra de acero debería resistir durante un tiempo prolongado, sin corroer y sin perder resistencia mecánica, bajo exposición al agua y la sal. La mezcla debía ser calentable y que los materiales se mezclarán en menos de 3.5 min. Teniendo esto en cuenta, se concluyó que el 4% de las fibras, mezcladas durante 1,5 min, era el óptimo volumen para el pavimento, Además, se probaron dos formas diferentes de mezclar en una planta de asfalto. Para validar los resultados, se construyó una pista de prueba en una autopista y se extrajeron los núcleos de asfalto. Las diferentes pruebas incluyeron pruebas indirectas de tensión y CT-Scan o medición infrarroja del calentamiento por inducción (García Á. , Schlangen, van de Ven, & van Bochove, 2012).

En diciembre de 2010, la primera pista de prueba de auto-reparación diseñada fue construida en la vía A58, en los Países Bajos. Su objetivo era crear un sistema para reducir los agregados en la superficie que con el tiempo se convierten en micro fisuras en la carpeta. Para eso, se agregó a un asfalto poroso fibras metálicas, con la idea de calentarlo a través de energía de inducción, cada año después del invierno o cuando el daño en el camino es alto. (García A. , Schlangen , Van de Ven, & Van Vliet, 2011)

Es bien sabido que las propiedades reparadoras del asfalto son directamente relacionadas con la temperatura (Bonnaure, Huibers, & Boonders, 1982) y con la presencia y duración de los periodos de descanso en el camino (Song, Little, Masad, & Lytton, 2005) . Las grietas pueden desarrollarse en la mezcla de asfalto como resultado de diferentes factores, tales como cargas de tráfico, ciclos de congelación-descongelación o envejecimiento del aglutinante. Sin embargo, una vez la grieta está abierta en el pavimento, comienza a cicatrizar y, si tiene suficiente tiempo para completar el proceso, puede cerrarse por completo. Esto pasa incluso cuando las dos caras de la grieta no están en contacto. Por otra parte, es bien sabido que la reparación depende de la energía superficial del material (mojado, para poner las dos caras de la grieta en contacto completo) y en la capacidad de interdifusión y aleatorización de las moléculas de una cara a la otra (Little & Bhasin, 2007).

Además, se observó que las vigas de mezcla asfáltica, rotas en dos mitades, podrían repararse por completo calentando el material, incluso cuando la fisura era visible a simple vista. Esto sucedió porque arriba de una temperatura dada, el asfalto comienza a comportarse como un fluido newtoniano. Durante el proceso de reparación, la carpeta se mueve, llenando la grieta en un tipo de flujo capilar (García Á. , Schlangen, van de Ven, & van Bochove, 2012).

Un concreto asfáltico conductor puede ser definido como la mezcla de asfalto, agregados y conductores eléctricos (componentes para obtener alta conductividad eléctrica). En muchos estudios previos se ha demostrado que la conductividad es proporcional al volumen de fibras conductoras en la mezcla y que un exceso de partículas conductoras puede causar la degradación

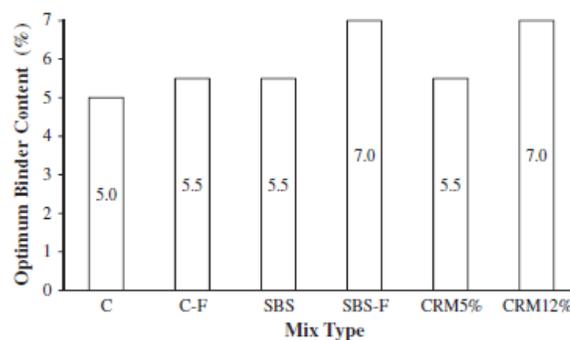
de las propiedades del pavimento, como la resistencia o la trabajabilidad de los materiales frescos (Wu, Mo, Shui, & Chen, 2005).

La mezcla asfáltica que contiene fibras de menor diámetro o más largas es más conductivo eléctricamente y alcanza temperaturas más altas que la mezcla asfáltica porosa que contiene el mismo volumen de fibras con mayor diámetro o fibras más cortas. Para definir la mezcla óptima para la pista de prueba, se obtuvieron tres núcleos de asfalto en tres situaciones diferentes: en el laboratorio, en la planta de asfalto y en la pista de prueba. El volumen de fibras se decidió primero en el laboratorio; entonces, la forma de mezclar se optimizó en la planta de asfalto y finalmente, núcleos de asfalto obtenidos de la pista de prueba se utilizaron para validar todo el proceso. En el futuro, el daño y las propiedades de autocuración y la repetibilidad de la eficiencia del proceso con el tiempo serán probados en la misma pista de prueba (García Á. , Schlangen, van de Ven, & van Bochove, 2012).

3.6. Efectos estabilizadores y reforzantes de diferentes fibras sobre el rendimiento de pavimentos

Se estudiaron las propiedades físicas de diferentes fibras (mineral, celulosa o fibra de carbono) y sus efectos estabilizadores y reforzadores sobre el rendimiento de la mezcla asfáltica. Para ello la investigación utilizó 6 tipos de mezclas (Figura 9): (Asfalto PG 64-22 sin fibras celulósicas), SBS (Asfalto con estireno-butadieno-estireno sin fibras celulósicas), C-F (Asfalto PG 64-22 con fibras celulósicas), SBS-F (Asfalto con estireno-butadieno-estireno con fibras celulósicas), CRM5% (Asfalto modificado con caucho al 5%) y CRM12% (Asfalto modificado con caucho al 12%)

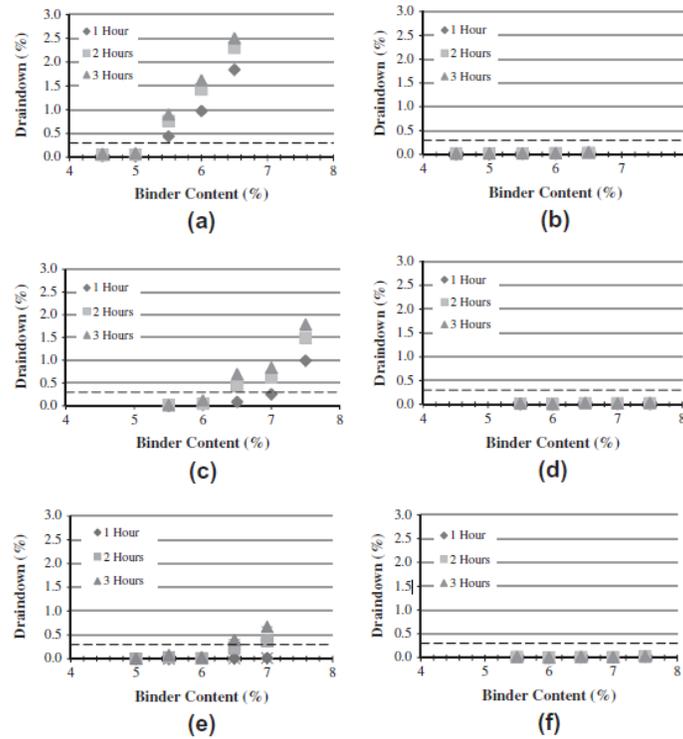
Figura 19. Contenido óptimo de asfalto para diferentes mezclas porosas modificadas



Fuente (Lyons & Putman, 2013)

Las curvas de escurrimiento se incluyen en la Figura 20. La línea punteada muestra el valor máximo del ensayo de 0.3%. Los resultados muestran que el uso de fibras de celulosa ayuda a reducir el desgarro del ligante. Mientras que las mezclas SBS y CRM5% fueron modificadas con polímeros (estireno – butadieno – estireno y polvo de caucho, respectivamente) el nivel de modificación por sí solo no era suficiente para evitar por completo el escurrimiento a contenidos de aglutinante más altos durante duraciones más largas. La adición de fibras de celulosa C-F y SBS-F y la mayor dosis de polvo de caucho (CRM12%) es más efectivo para eliminar escurrimiento en los contenidos de la carpeta, incluso después de tres horas a la temperatura de mezcla respectiva.

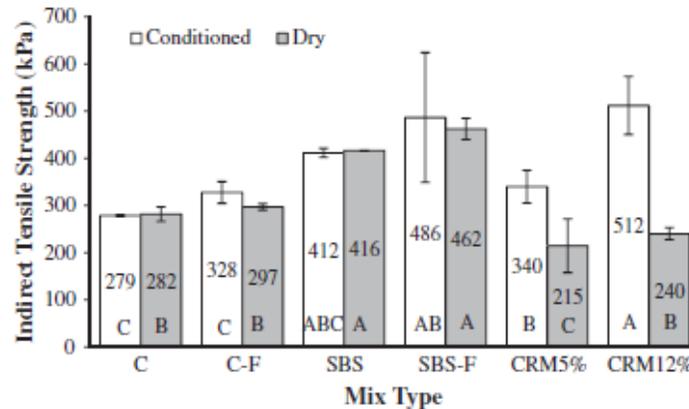
Figura 20. Resultados de escurrimiento para (a) Mezcla C, (b) Mezcla C-F, (c) Mezcla SBS, (d) Mezcla SBS-F, (e) Mezcla CRM5%, y (f) Mezcla CRM12%.



Fuente (Lyons & Putman, 2013)

La Figura 21 compara la resistencia a la tracción indirecta (ITS) en estado seco y húmedo (sumergido en agua a 60° durante 24 horas). Los resultados indican que los diferentes estabilizadores y aditivos tuvieron diferentes efectos en el ITS. Las fibras de celulosa no tuvieron ninguna influencia en la resistencia a tracción indirecta para el estado seco o húmedo. La adición de polvo de caucho sí tuvo un cambio significativo de acuerdo con el estado del ensayo.

Figura 21. Resultados del ensayo de tracción indirecta para especímenes secos y condicionados.

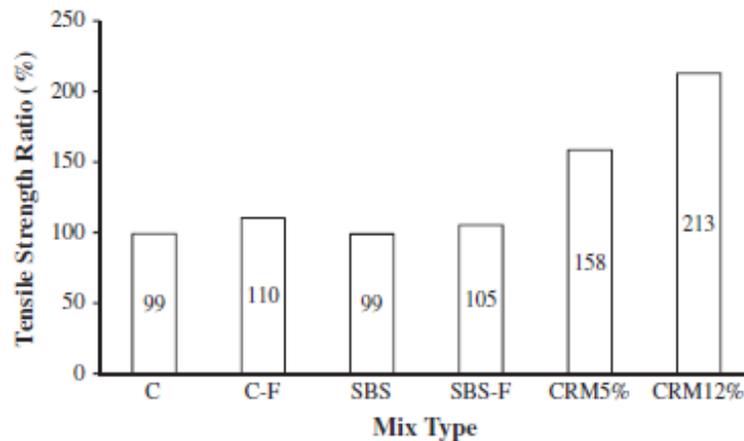


Fuente (Lyons & Putman, 2013)

La Figura 22 compara los índices de resistencia conservada (IRC) de los diferentes diseños de mezcla. Los resultados de este estudio muestran que los valores IRC de todas las mezclas están

muy por encima del valor mínimo típico del 80% (Kandhal P. , Design, construction, and maintenance of open-graded asphalt friction courses, 2002), lo que significa que se espera que estas mezclas sean resistentes a la humedad inducida. Los valores de IRC para las mezclas C, C-F, SBS y SBS-F estaban cerca al 100%, lo que indica que el régimen de acondicionamiento utilizado en este estudio no tuvo un efecto importante en la resistencia a la tracción indirecta. Los valores IRC de las mezclas con polvo de caucho están muy por encima del 100%, lo que indica que el condicionamiento en realidad mejoró la fuerza de las mezclas y el efecto fue más pronunciado a medida que el contenido del polvo de caucho aumenta desde 0% (mezcla C) a 5% (mezcla CRM5%) a 12% (mezcla CRM12%).

Figura 22. Índice de Resistencia Conservada para diferentes mezclas porosas modificadas



Fuente (Lyons & Putman, 2013)

3.7. El asfalto y su posible influencia en el daño por humedad en una mezcla asfáltica porosa

Uno de los principales mecanismos de daño de mezclas asfálticas en servicio es el daño por humedad. Este fenómeno ocurre principalmente cuando se separa el ligante asfáltico del agregado pétreo debido a la presencia de agua (stripping). Diversos estudios han sido ejecutados con el fin de intentar entender el fenómeno. A pesar del alto número de investigaciones realizadas, las causas que lo generan no han sido totalmente entendidas e identificadas. Un estudio experimental, ejecutado con el fin de evaluar la influencia que tiene el ligante asfáltico sobre el fenómeno, debido solo al efecto del agua se realizó sobre dos cementos asfálticos (CA 80-100 y CA 60-70), midiendo el cambio que experimentan algunas de sus propiedades físicas (punto de ablandamiento, viscosidad absoluta, viscosidad a 135 °C y penetración), químicas (ensayo SARA) y reológicas cuando fueron sumergidos en agua entre 12 y 17 meses. Ensayos de resistencia bajo carga monótonica y de desgaste por abrasión (Cántabro, NLT 352/86) fueron ejecutados sobre una mezcla asfáltica porosa sumergida en agua durante 17 meses, y sobre la misma mezcla, pero fabricada con los asfaltos sumergidos en agua. Como conclusión general se reporta que los asfaltos en presencia de agua experimentan dentro de la mezcla contracción del ligante asfáltico, lo que podría ser una de las causas que generen el fenómeno de daño por humedad (Rondón Quintana, Ruge Cárdenas, & Moreno Anselmi, 2016).

Existen varios datos importantes relacionados con el daño por humedad, uno de ellos está relacionado con el fenómeno de stripping, que es mayor, directamente debajo de las ruedas de los vehículos (Lu & Harvey, 2006). Igualmente, se ha demostrado que la edad del pavimento tiene una alta influencia en el daño por humedad (H.M. El Hussein, 1998) y que existe incompatibilidad térmica entre el agregado pétreo y el ligante, lo que genera contracción térmica diferencial de estos componentes, induciendo altos esfuerzos de tensión, grietas, deterioro localizado en la matriz de asfalto y deterioro de la interface ligante-agregado. El empleo de ligantes más viscosos genera mayor resistencia al daño por humedad (Mehrara & Khodaii, 2013).

Adicionalmente, las mezclas sometidas a ciclos de humedecimiento-secado o congelamiento deshielo, o agregados pétreos angulares pueden incrementar el potencial de stripping (este último debido a que las caras angulares son más difíciles de recubrir con asfalto). (A. Varveri, 2015)

Para incrementar la resistencia al agua de mezclas en servicio son de amplia utilización los aditivos antistripping o mejoradores de adherencia. Algunos aditivos son los tensos activos catiónicos, naftenato de hierro, cal hidratada, cemento Portland. (Huang, Shu, Dong, & Shen, 2010).

Actualmente, incluso se están generando productos con nanotecnología que ayudan a repeler el agua dentro de la mezcla. (Nejad, Azarhoosh, Hamedi, & Azarhoosh, 2012). El daño por humedad de mezclas en servicio ocurre algunas veces debido a que en ocasiones prevalece el criterio de disminuir el contenido de asfalto en la mezcla para contrarrestar el fenómeno de ahuellamiento. Estos autores concluyen que, entre mayor sea el espesor de la película de asfalto adherida al agregado pétreo, mayor será la resistencia al daño por humedad (Uppu, Hossain, Ingram, & Kreider, 2015)

Por otro lado, entre mayor sea la adherencia y el recubrimiento del agregado pétreo fino con el asfalto mayor será la durabilidad y resistencia al daño por humedad. Reporta que asfaltos más viscosos son menos propensos al daño por humedad y adicionalmente afirma, al igual que adiciones de cal mejoran la resistencia a este mecanismo de daño (Lee, Mun, & Kim, 2011).

Para intentar entender con mayor claridad el fenómeno, algunos investigadores proponen que el daño por humedad sea acoplado con un modelo de envejecimiento del asfalto o la mezcla, así como un modelo en donde se tenga en cuenta el paso de agua y aire por medio de las mezclas (permeabilidad) (Tarefder & Ahmad, 2015).

En síntesis, el daño por humedad debe ser acoplado a modelos en donde se tenga en cuenta la influencia del agua junto con otros elementos que conforman el medio ambiente como son el aire, la temperatura, los rayos ultravioletas, entre otros, para así poder evaluar la influencia de cada uno de ellos (desde el punto de vista mecánico y químico), de manera separada sobre el ligante y las mezclas. Existen diversos ensayos para acondicionar muestras y medir la resistencia al daño por humedad de mezclas asfálticas. Algunos de ellos son: ensayo de inmersión estática (AASHTO T182), ensayo de agua hirviendo (ASTM D3625), método de la botella de balanceo (BSEN 12697-11), ensayo de tracción indirecta (AASHTO T283). En conclusión, se reporta que estas metodologías de ensayo tienen como limitación principal que no son capaces aún de simular con exactitud el mecanismo de daño por humedad de mezclas asfálticas. (Diab & You, 2013)

Los resultados reportados sugieren que el CA en presencia solamente de agua cambia sus propiedades ya que genera un aumento en la resistencia mecánica de las mezclas. Lo anterior conduce a pensar que la conexión ligante-pétreos en una mezcla asfáltica se puede romper (fenómeno de stripping) debido a que el CA, por la sola presencia del agua se rigidiza, lo que conlleva a una contracción del ligante y, por lo tanto, separación con el agregado. A pesar, que el cemento asfáltico es un material relativamente impermeable y de muy baja reacción química con agentes externos, como conclusión general se reporta en este estudio, que este tipo de ligante en presencia única del agua cambia su consistencia (endurece) y aumenta su rigidez. Lo anterior podría ser debido, en parte, por la presencia de moléculas de oxígeno en el agua que reacciona con los cementos asfálticos (oxidación) (Rondón Quintana, Ruge Cárdenas, & Moreno Anselmi, 2016).

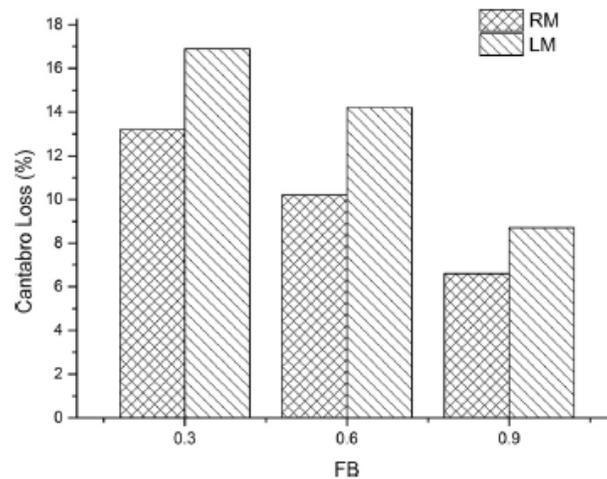
3.8. Mejora del rendimiento del pavimento de asfalto poroso usando barro rojo como filler

La porosidad es esencial para las funciones ecológicas del pavimento poroso, es decir, drenaje de agua y eliminación de ruido. Sin embargo, la estructura porosa del pavimento también ha causado algunos defectos como el desprendimiento de agregados en la capa superficial y la obstrucción de vacíos, dificultando su popularización para vías con cargas y velocidades altas (Kandhal & Mallick, 1999).

La principal causa del deshilachado y el ahuellamiento es la sensibilidad a la temperatura y la falta de adherencia del asfalto, especialmente bajo carga repetida de vehículos pesados. Se realizaron pruebas con diferentes tipos de mortero asfáltico que incluyen dos tipos de fillers (fracción que pasa por el tamiz de 0,063 mm): polvo de piedra caliza (LM) y barro rojo (RM) (residuo sólido que se genera en el proceso Bayer, el principal método industrial para producir alúmina a partir de bauxita) y diferentes relaciones filler /asfalto (0.3, 0.6, 0.9).

La Figura 23 muestra que no importa si es RM (mezcla porosa con barro rojo) o LM (mezcla porosa con polvo de piedra caliza), con el aumento de la relación filler/asfalto (F/B), el porcentaje de desgaste Cántabro disminuye gradualmente, lo que significa que una mayor relación F/B proporciona una mejor adhesión y una mejor resistencia al deshilachado de la mezcla porosa. La mezcla porosa con barro rojo como filler tiene mejor resistencia al descascarado que la del polvo de piedra caliza con la misma relación FB (Zhang, y otros, 2018).

Figura 23. Resultados del ensayo cántabro para muestras con diferente relación Filler/Asfalto (FB)



Fuente: (Zhang, y otros, 2018)

A partir de la investigación desarrollada en el marco teórico y los antecedentes, se puede evidenciar que las mezclas porosas pueden cambiar sus propiedades si se agregan fibras o modificadores. Basado en ello, se plantearon los objetivos mencionados previamente, donde se evaluará el comportamiento de las mezclas porosas (microaglomerados y drenantes) con adición de fibras sintéticas compuestas por aramida, poliolefina y otros polímeros. La metodología de ejecución del proyecto fue basada en los planteamientos de investigaciones similares y adecuadas al entorno local, bajo normativa colombiana con la ejecución de los ensayos de permeabilidad, susceptibilidad al daño por humedad, módulo resiliente, ensayo SCB y procedimiento Fénix y UCL.

Capítulo 4 Marco Metodológico

Para el desarrollo del presente trabajo de grado se desarrolló una metodología experimental, la cual aparece en la Figura 24, y cuyos ensayos de laboratorio fueron ejecutados según las especificaciones del Instituto Nacional de Vías y el Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá. (INVIAS, 2013) (IDU, 2011).

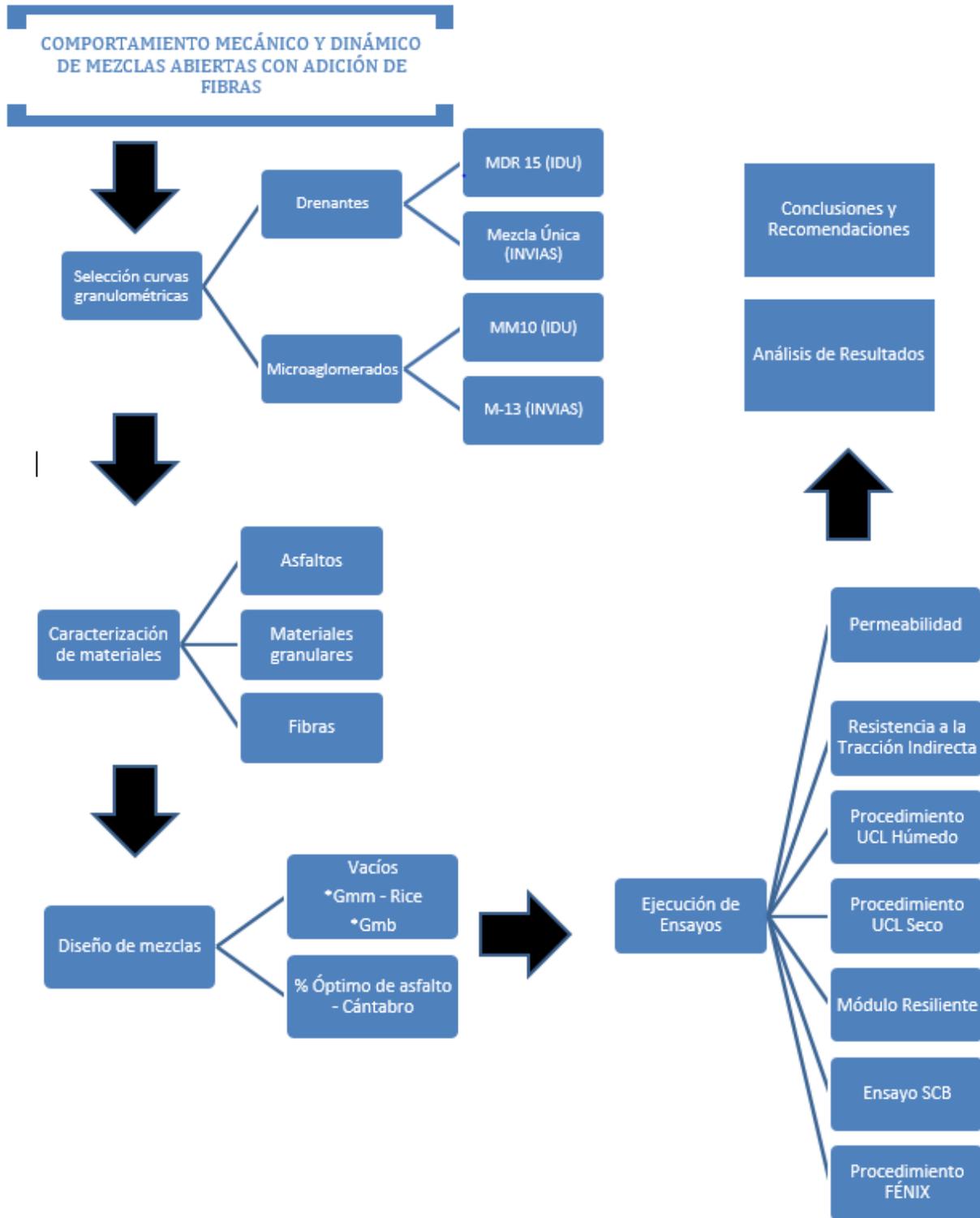
Inicialmente se recopiló información de proyectos e investigaciones relacionadas a los temas que se trataron en la investigación: mezclas asfálticas drenantes, microaglomerados y asfaltos modificados con fibras, de tal manera que se puedan extraer datos y experiencias con el uso de dichas mezclas y aditivos, sintetizando los resultados de forma positiva para la investigación.

Basándose en los objetivos generales y específicos propuestos, se procedió a realizar la caracterización de los materiales a utilizar en la elaboración de las mezclas asfálticas drenantes y microaglomerados (materiales pétreos, cemento asfáltico normalizado CA 60-70, cemento asfáltico CA 50/60 y fibras). Acto seguido se realizó el diseño de mezcla, según la metodología Cántabro, y se evaluaron los requerimientos de permeabilidad de la mezcla. Posterior a ello se procedió a la realización de la evaluación del comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas, mediante los ensayos de susceptibilidad al daño por humedad, módulo resiliente, ensayo de viga semicircular simplemente apoyada (SCB), ensayo Fénix y procedimiento UCL. Como parte final, se analizaron los resultados y se obtuvieron conclusiones y recomendaciones de la investigación.

4.1. Curvas Granulométricas

Este trabajo de grado plantea como hipótesis el aumento de resistencia sin pérdida de permeabilidad de las mezclas drenantes y microaglomerados (Normativa Colombiana IDU e INVIAS) al adicionar fibras sintéticas. Por ello se generan mezclas convencionales como punto de referencia y comparación, junto con mezclas adicionadas con fibras. Las fibras son agregadas en el momento de mezclado. El material pétreo a utilizar en las mezclas se lavó, secó al horno y tamizó previamente, tomando en cuenta la normatividad INVÍAS 452-13, INVÍAS 453-13, IDU 512-11 e IDU 520-11, para conformar la curva granulométrica establecida en Tabla 3, Figura 25 y Figura 26.

Figura 24. Metodología desarrollada



Fuente: Elaboración propia

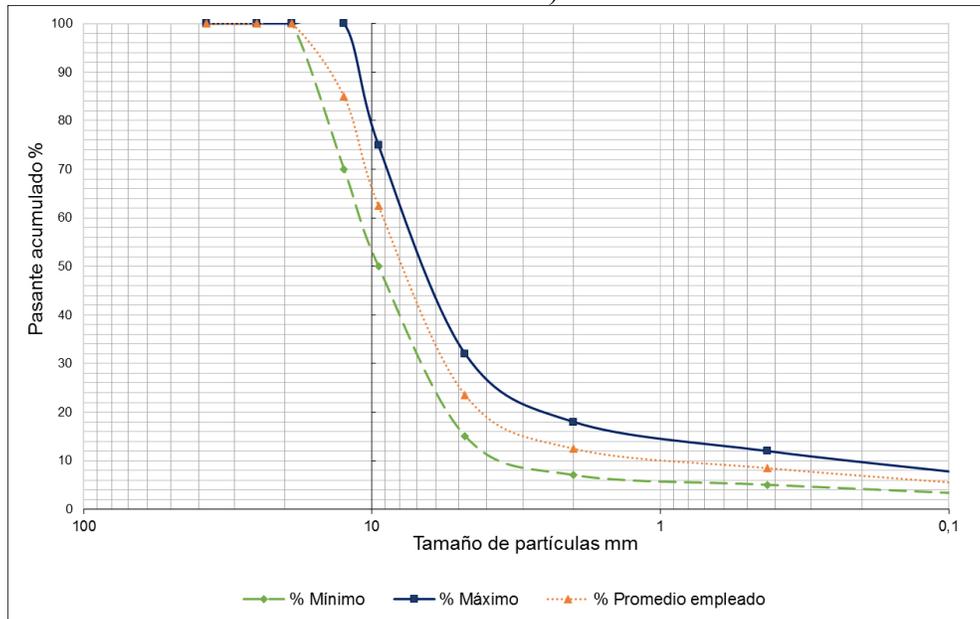
Tabla 4. Granulometría mezclas por normatividad

MEZCLA		TAMIZ (mm/US Standard)						
		19	12,5	9,5	4,75	2	0,425	0,075
		3/4"	1/2"	3/8"	No 4	No 10	No 40	No 200
		% Pasa						
Drenante IDU	Máx	100	100	75	32	20	12	7
	Mín	100	70	50	15	9	5	3
Microaglomerado IDU	Máx		100	97	28	22	16	8
	Mín		100	75	15	11	8	5
Drenante INVIAS	Máx	100	100	75	32	20	12	7
	Mín	100	70	50	15	9	5	3
Microaglomerado INVIAS	Máx		100	97	28	22	16	8
	Mín		100	75	15	11	8	5

Fuente: Elaboración propia

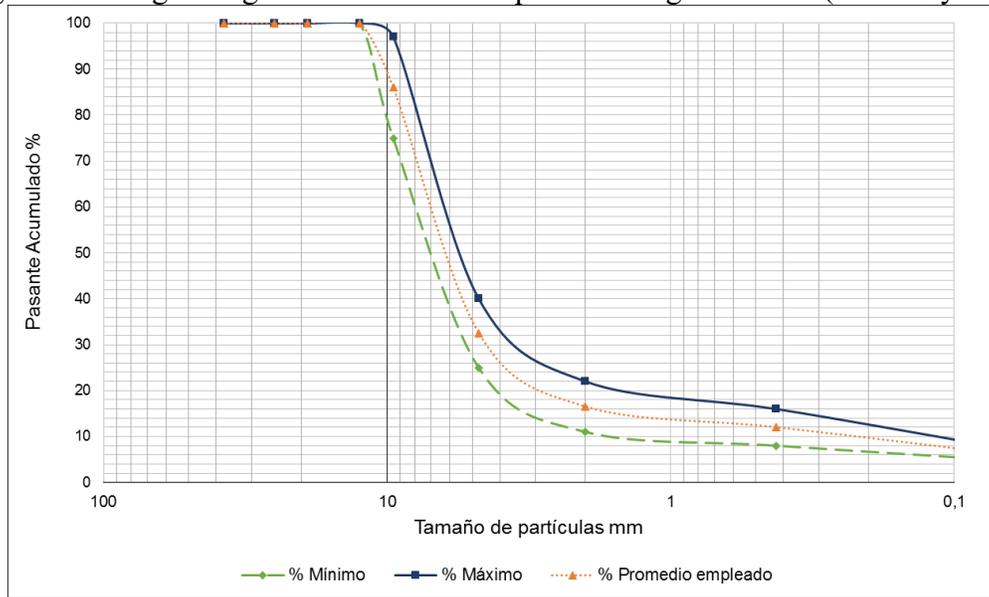
En la Figura 25 se muestra la granulometría media para mezclas drenantes MDR-15 (IDU) y Drenante única INVIAS y en la Figura 26 se observa la granulometría media para microaglomerados MM10 (IDU) y M-13(INVIAS). Para la fabricación de cada briqueta del proyecto se tomaron 1000 gr variando el contenido de cemento asfáltico en 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%

Figura 25. Rangos de granulometría media para mezclas drenantes (MDR-15 y Drenante única INVIAS)



Fuente: Elaboración propia

Figura 26. Rangos de granulometría media para microaglomerados (MM-10 y M-13)



Fuente: Elaboración propia

4.2. Materiales

Esta etapa del proyecto consistió en la ejecución de ensayos de laboratorio para evaluar las características mecánicas de los materiales adquiridos para la fabricación de las mezclas asfálticas drenantes y microaglomerados con base en las Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras (INVIAS, 2013).

4.2.1. Agregado pétreo para mezclas asfálticas

Las características del agregado utilizado para fabricar las mezclas asfálticas, cuya procedencia es el Río Coello, departamento del Tolima, aparecen en la Tabla 4.

Tabla 5 Características del agregado

Ensayo	Norma	Resultado	Requisito Norma
Equivalente de arena – agregado fino	I.N.V. E-133-13	59.4%	50% mínimo
Azul de metileno	I.N.V. E-235-13	0.29 g/1000g	5 máximo
Resistencia al desgaste Máquina de los Ángeles - Gradación B	I.N.V. E-218-13	24.12%	35% máximo
Gravedad específica Bulk del agregado	I.N.V. E-222-13	2.494	-
Gravedad específica Bulk SSS del agregado	I.N.V. E-222-13	2.549	-

Ensayo	Norma	Resultado	Requisito Norma
Gravedad específica aparente del agregado	I.N.V. E-222-13	2.64	-
Absorción del agregado	I.N.V.E-222-13	2.2	-
Porcentaje de caras fracturadas (1 cara / 2 caras)	I.N.V. E-227-13	92.2 / 92.6	Mínimo 75 / 50
Índice de Aplanamiento	I.N.V. E-230-13	14.5%	% máximo 25
Índice de Alargamiento	I.N.V. E-230-13	17.7%	% máximo 25
Ensayo 10% finos	I.N.V. E 224-13	93	% mínimo 60
Ensayo microdeval	I.N.V. E 238-13	6.34%	% máximo 30
Ensayo consistencia (LL, LP e IP)	-	N.P.	No plástico
Ensayo de solidez de sulfatos	I.N.V. E -220-13	9.0	% máximo 18

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Asfaltos

La caracterización de los asfaltos utilizados en el proyecto se realizó mediante las normas enunciadas en las especificaciones generales de construcción INVIAS-2013, artículo 410-13 y se encuentran en el Anexo A.

▪ Punto de Ablandamiento (Ensayo anillo y bola)

La norma utilizada para determinar el punto de ablandamiento del asfalto a utilizar en el proyecto fue la I.N.V. E -712-13. El procedimiento consiste en fabricar dos especímenes o discos de asfalto, los cuales se crean vertiendo asfalto dentro de dos anillos. Una vez enfriadas las muestras, se coloca una esfera metálica encima de ellos y se introducen a un recipiente con agua destilada para crear un ambiente de temperatura controlada. Dicho recipiente es calentado a una tasa de 5°C / minuto y en el instante en que las esferas penetran los aros de asfalto y tocan la lámina de control, se mide la temperatura del ambiente controlado. Dicha temperatura se define como el punto de ablandamiento (Figura 27). Los datos de los ensayos realizados aparecen en Tabla 5 y establecieron como temperatura del ensayo 51.2°C para el asfalto 1 y 51.2 °C para el asfalto 2.

Figura 27. Ensayo Punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6 Resultados ensayo punto de ablandamiento

Muestra	Temperatura °C			
	1A	1B	2A	2B
Asfalto 1	51.4	50.7	50.9	51.6
Asfalto 2	48.7	48.8	49.1	48.9

Fuente: Elaboración Propia.

▪ Penetración

La norma utilizada para determinar la penetración del asfalto a utilizar en el proyecto fue la I.N.V. E-706-13. El procedimiento ejecutado fue calentar aproximadamente 500 gramos de asfalto y verterlo en un recipiente cilíndrico, teniendo cuidado de no introducirle aire ni exceder en más de 90°C la temperatura establecida en el ensayo de anillo y bola. Acto seguido se dejó enfriar la muestra y se protegió para evitar su contaminación con partículas del medio ambiente. Posteriormente, con la ayuda de un baño termostático, se somete y mantiene el asfalto y el recipiente a una temperatura de 25°C, para ser penetrado durante 5 segundos con una aguja que genera una carga de 100 gramos (Figura 28). Los resultados obtenidos del ensayo son los que aparecen en la Tabla 7 y Tabla 8.

Figura 28. Equipo de penetración de asfaltos



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 7 Resultados ensayo de penetración Asfalto 1

Muestra	Penetración (mm)		
	1	2	3
Dato inicial	1220	1260	1310
Dato final	1800	1812	1891
Penetración	580	552	581

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 8 Resultados ensayo de penetración Asfalto 2

Muestra	Penetración (mm)		
	1	2	3
Dato inicial	1256	1348	1157
Dato final	1877	1978	1773
Penetración.	621	630	616

Fuente: Elaboración Propia.

La penetración promedio de los asfaltos a utilizar en el proyecto es 57.1 para el asfalto 1 (Asfalto 50/60 [1/10 mm]) y 62.2 para el Asfalto 2 (Asfalto 60/70 [1/10 mm]).

▪ Punto de llama e ignición

La norma utilizada para determinar la temperatura de ignición y llama mediante la copa abierta de Cleveland del asfalto a utilizar en el proyecto fue la I.N.V. E -709-13. El procedimiento realizado fue verter asfalto en la copa abierta de Cleveland y calentarla a una tasa constante de 15°C/minuto

al inicio del ensayo y de 5°C/minuto cercano a los puntos de medición (llama e ignición). Cuando los gases generados por la temperatura obtenida del asfalto produzcan la ignición de este, se mide la temperatura y se determina el punto de ignición. Acto seguido, se continúa calentando la muestra y se toma la temperatura cuando se cree llama en la muestra, la cual se definirá como punto de llama. Los resultados obtenidos del ensayo fueron 230°C para la ignición y 255°C para la llama para el Asfalto 1 y 236°C para la ignición y 255°C para la llama, para el asfalto 2. El ensayo se puede observar en la Figura 29.

Figura 29. Ensayo Punto de ignición y llama.



Fuente: Elaboración Propia.

▪ **Ductilidad**

La norma utilizada para determinar la ductilidad del asfalto a utilizar en el proyecto fue la I.N.V. E -702-13. El procedimiento consistió en fabricar una probeta en forma de corbatín e introducirlo en un recipiente lleno de agua a 25°C. Posteriormente, se estiro el espécimen a una velocidad constante de 50 mm/minuto y se estableció su longitud en 120 centímetros para el asfalto 1 y 129 cm para el asfalto 2, valor superior al mínimo establecido en la norma (100 centímetros).

▪ **Viscosidad del asfalto**

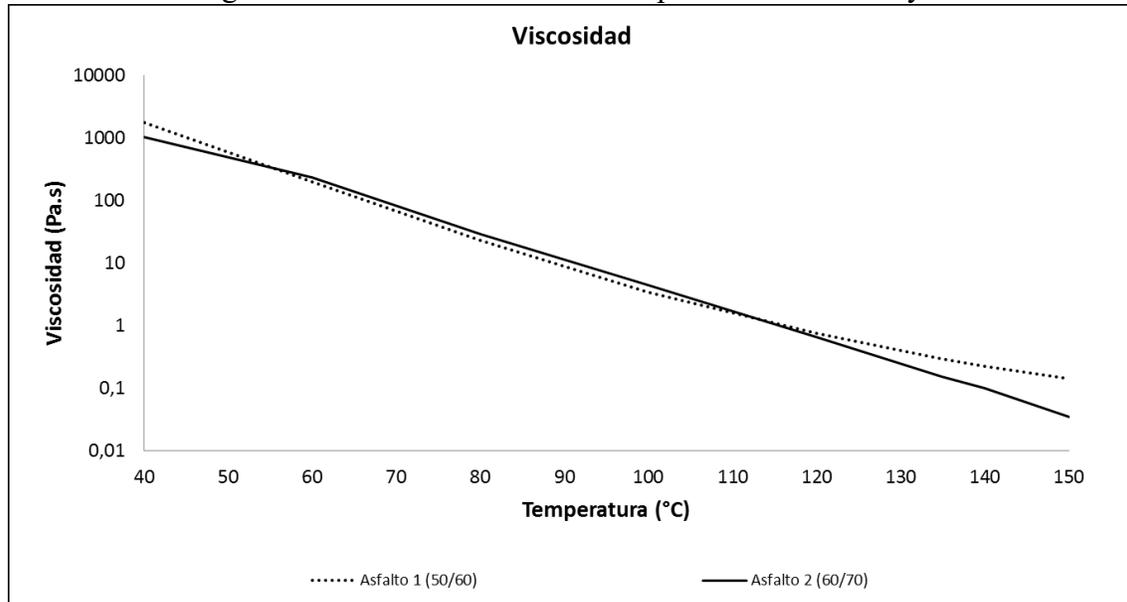
La norma utilizada para determinar la viscosidad del asfalto fue la ASTM D-4402. El ensayo se realizó entre 40 y 150 °C. Los resultados obtenidos aparecen en la Figura 30 y la Tabla 9.

Tabla 9. Viscosidad vs temperatura Asfaltos 1 y 2

Temperatura °C	Viscosidad (Pa*s)	
	Asfalto 1	Asfalto 2
40	1732,36	1020,464
60	195,35	234,631
80	23,07	28,732
100	3,44	4,341
120	0,74	0,656
135	0,29	0,151
140	0,22	0,099
150	0,14	0,035

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 30. Curva viscosidad vs Temperatura Asfaltos 1 y 2



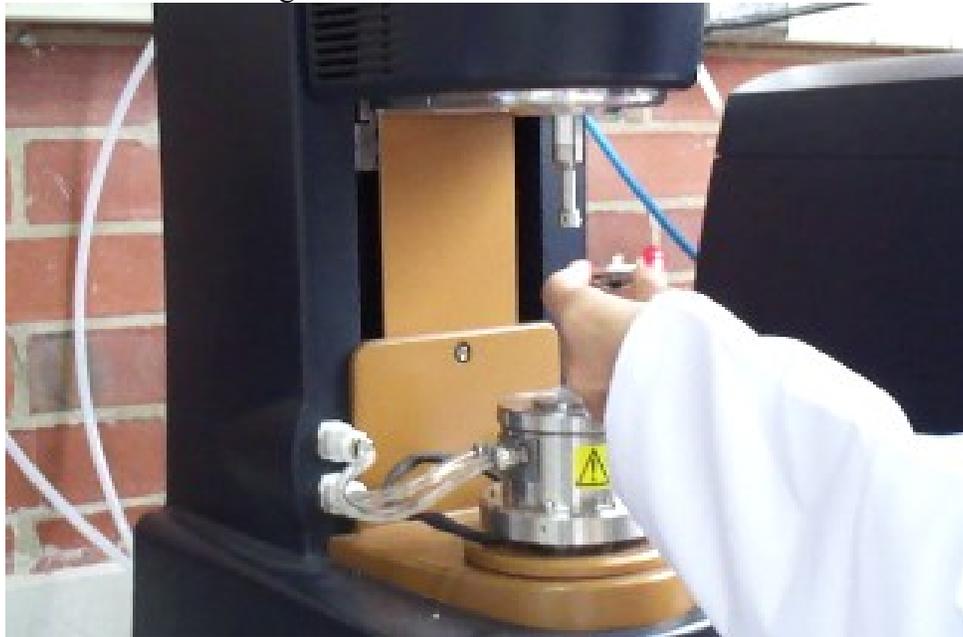
Fuente: Elaboración Propia.

Dada las características de la curva de viscosidad se obtuvo una temperatura de mezclado de 155°C, temperatura que será usada para los dos asfaltos en la fabricación de las probetas.

▪ Ensayos en el Reómetro de corte dinámico del Asfalto 1

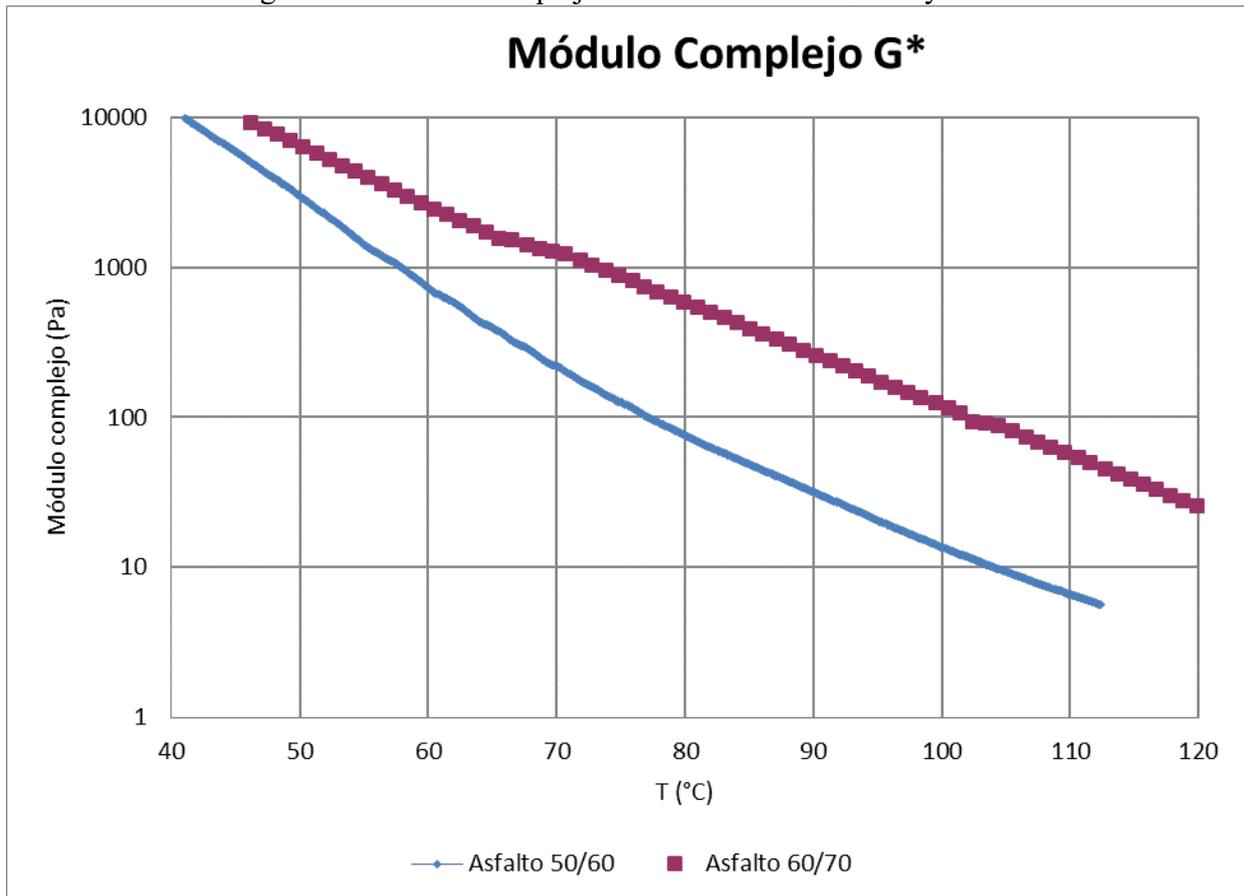
Las características dinámicas del asfalto utilizado en la investigación se realizaron en un reómetro de corte dinámico (Figura 31) y la respuesta de las mismas aparecen en la Figura 32, Figura 33 y Figura 34.

Figura 31. Reómetro de corte directo



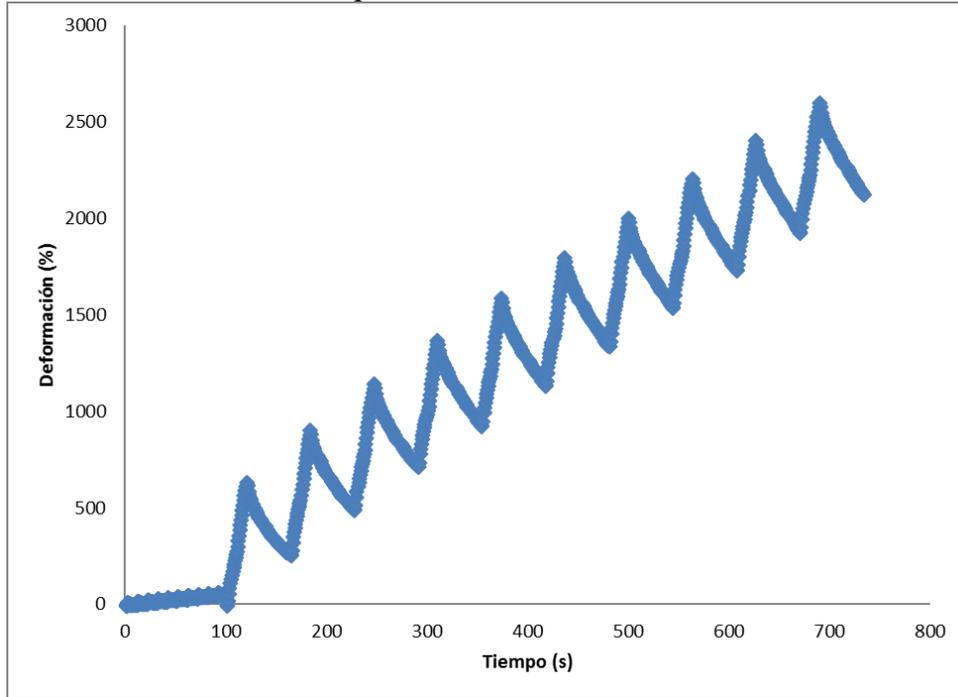
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 32. Módulo complejo G^* de los asfaltos 50/60 y 60/70



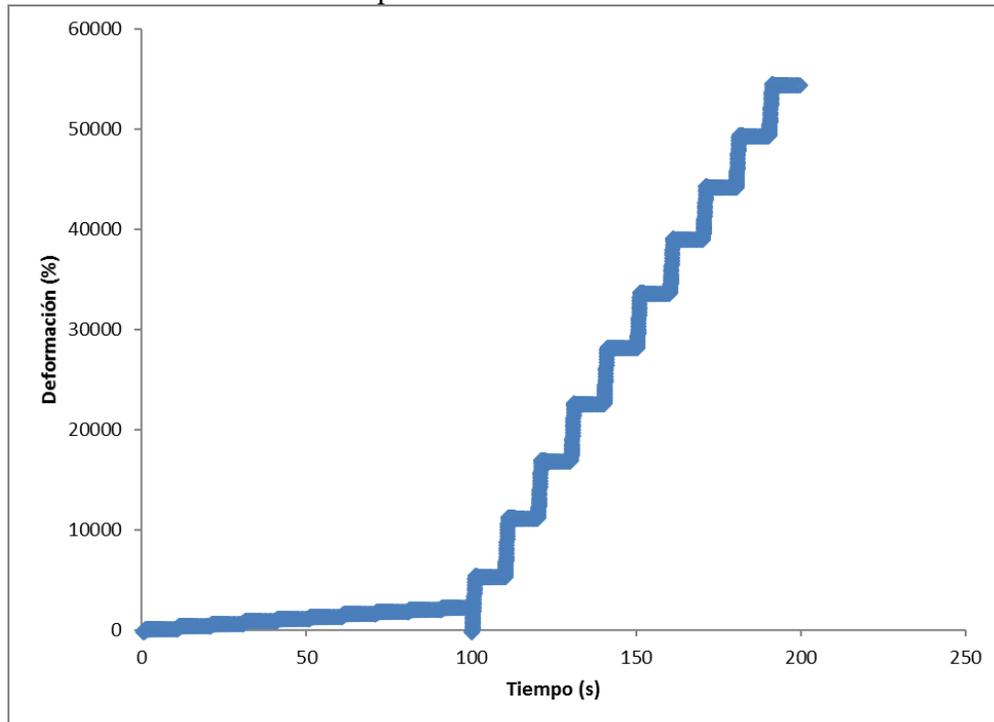
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 33. Curva de Creep del asfalto 50/60, con dos niveles de esfuerzo (100 y 3200 Pa) y 10 ciclos por cada nivel de esfuerzo.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 34. Curva de Creep del asfalto 60/70, con dos niveles de esfuerzo (100 y 3200 Pa) y 10 ciclos por cada nivel de esfuerzo.



Fuente: Elaboración Propia.

4.2.3. Fibras sintéticas

Las fibras sintéticas utilizadas en la investigación están compuestas por aramida, poliolefina y otros polímeros, cuyas proporciones, características geométricas y dimensiones, crean cohesión, tenacidad y durabilidad a la mezcla asfáltica. En la Figura 35 se observan las fibras utilizadas en la investigación y en la Tabla 10 se encuentran algunas de sus características.

Figura 35. Fibras de aramida, poliolefina y otros polímeros.



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 10 Características fibras sintéticas utilizadas en las mezclas

ESPECIFICACIONES	Unidades	FIBRA
Gravedad específica	-	0.95
Módulo elasticidad	GPa	5
Absorción	%	Nulo
Longitud	mm	50

Fuente: Elaboración Propia.

4.3. Determinación de la gravedad máxima teórica Gmm

Para la determinación de la gravedad máxima teórica se realizó el ensayo Rice contemplado en la I.N.V.E. 735-13. Estos valores son usados para calcular el porcentaje de vacíos con aire en una mezcla de pavimento asfáltico en caliente compactada, que permitirán la verificación correspondiente exigida por la normatividad (Tabla 11).

- A= Masa en el aire de la muestra seca en el horno, g.
- D= Masa del recipiente lleno con agua a 25^a C, g.
- E= Masa del recipiente lleno con agua y muestra a 25^a C, g.

Tabla 11. Gravedad Máxima Teórica

Muestra	A (g)	D (g)	E (g)	Gmm
Mezcla drenante Asfalto 1 (50/60)	1,477.80	6,264.30	7,137.00	2.44

Muestra	A (g)	D (g)	E (g)	Gmm
Mezcla drenante Asfalto 2 (60/70)	1,469.00		7,110.80	2.36
Microaglomerado Asfalto 1 (50/60)	1,485.50		7,091.30	2.26
Microaglomerado Asfalto 2 (60/70)	1,484.00		7,120.40	2.36

Fuente: Elaboración Propia.

4.4. Elaboración de mezclas drenantes y microaglomerados

Para la elaboración de cada una de las mezclas se utilizarán dos asfaltos diferentes. Es decir que se obtendrán 4% óptimos de asfalto (Drenante Asfalto 1, Drenante Asfalto 2, Microaglomerado Asfalto 1, Microaglomerado Asfalto 2). Para dicha determinación se mezclaron dos probetas con cada uno de los porcentajes mencionados anteriormente, es decir se fabricaron 40 probetas para el diseño de mezcla y se evaluó su desgaste a la abrasión (Ensayo Cántabro INV-E-760-13). Al obtenerse el porcentaje de asfalto óptimo, se fabricaron 64 probetas para evaluar su desempeño en el ensayo UCL y 32 probetas adicionales para realizar ensayos dinámicos. La dosificación de fibras se realizó de acuerdo con observaciones e investigaciones anteriores (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y Universidad Militar Nueva Granada (UMNG), 2014).

Es de vital importancia, verificar el cumplimiento de los establecido por la norma INVIAS para mezclas drenantes “Los vacíos con aire de la mezcla compactada, medidos como se indica en la norma de ensayo I.N.V. E-736-13, no deberán ser inferiores a veinte por ciento (20%), ni mayores de veinticinco por ciento (25 %)”. Igualmente, el Dr. Rodrigo Miró y Félix Pérez, desarrolladores del procedimiento UCL, señalan que los vacíos para microaglomerados deben ser mayores al 12%. (Miró & Pérez, Experiencia europea en predicción del desempeño a largo plazo de pavimentos).

4.4.1. Preparación de la mezcla asfáltica

Para la fabricación de las mezclas, se pesa en platones de aluminio (previamente tarados) la cantidad correspondiente al peso del tamaño del agregado según su curva granulométrica y posteriormente se lleva al horno a 160°C lo que equivale a unos 5°C por encima de la temperatura de mezclado obtenida con la curva de viscosidad. Se transfiere los agregados a la mezcladora y sin disminuir la temperatura, se combinan con el asfalto y las fibras hasta tener una mezcla homogénea (Figura 36).

Las probetas de 1.000 gramos fueron compactadas mediante el Compactador Giratorio a una presión constante de 600 kPa y un ángulo de giro de 1.25°.

Una vez identificada cada probeta se toman los datos bases de cada probeta como son:

- Altura promedio (cm)
- Diámetro promedio (cm)
- Peso en el aire en seco (g)
- Peso saturado (g)
- Peso superficialmente seco (g)

Los datos anteriores fueron utilizados para verificar la densidad volumétrica y relación de vacíos de las probetas fabricadas, las cuales son muy similares a las obtenidas en la información del compactador giratorio.

Figura 36. Probetas Mezclas Drenantes y Microaglomerados

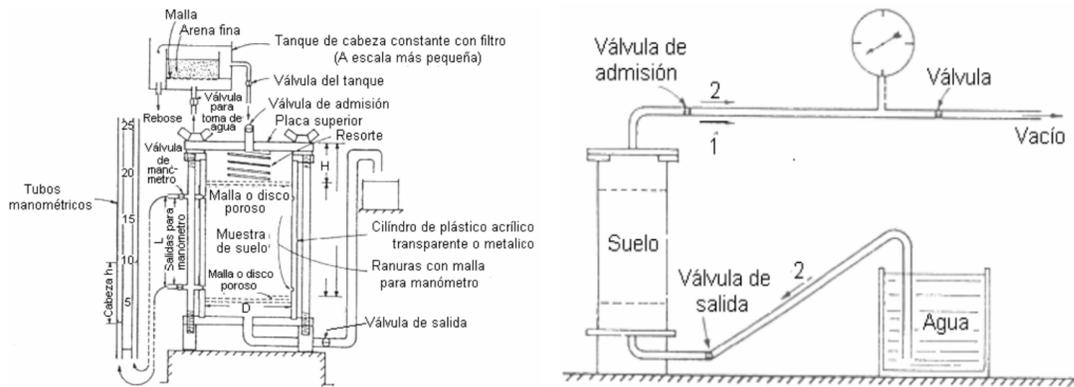


Fuente: Elaboración propia.

4.5. Permeabilidad de las mezclas

Para garantizar la conectividad de los vacíos con aire, se realiza una prueba de permeabilidad. Para ello se utiliza un permeámetro de cabeza constante (Figura 37). Este método de ensayo cubre un procedimiento para determinar el coeficiente de permeabilidad mediante un método de cabeza constante para el flujo laminar de agua a través de suelos granulares (I.N.V. E -130-13). El equipo fue modificado para someter la probeta con mezcla asfáltica a un flujo constante de agua. Usualmente, la capacidad de drenaje se mide colocando cien mililitros (100 ml) de agua en un molde conteniendo la probeta prehumedecida. El tiempo que tarde el agua en atravesar la muestra no deberá exceder de quince segundos (15 s). Debido a que la permeabilidad de las mezclas asfálticas es diferente a los suelos granulares (Figura 37), se determinó medir la permeabilidad mediante este procedimiento con algunas modificaciones.

Figura 37. Montaje Ensayo de Permeabilidad con el Permeámetro de Cabeza Constante



Fuente (INVIAS, 2013)

Todas las muestras fueron sometidas previamente a saturación. Posterior a ello se instaló una membrana de látex impermeable para evitar la filtración de agua en la interfaz muestra – cilindro metálico. Al sellar el cilindro herméticamente para evitar pérdidas de agua, se garantiza un flujo constante de agua con el tanque de cabeza constante y se abre la válvula de salida (Figura 38).

Finalmente se registra el volumen de agua evacuado en el tanque de salida en diferentes tiempos, registrando así el caudal promedio para cada una de las muestras.

Figura 38 Permeabilidad Mezclas Drenantes y Microaglomerados



Fuente: Elaboración propia.

4.6. Ensayos mecánicos y dinámicos

Para caracterizar las mezclas drenantes y microaglomerados se ejecutaron los ensayos de módulo resiliente, susceptibilidad al daño por humedad (resistencia a la tracción indirecta – RTI), procedimiento UCL, ensayo Fénix y SCB.

4.6.1. Susceptibilidad al daño por humedad

Aunque la normativa colombiana no contempla el ensayo de tracción indirecta para la evaluación de la respuesta de mezclas drenantes y microaglomerados, se decidió utilizar este ensayo para observar el daño o susceptibilidad al agua que se produce en la mezcla. Dado que estas mezclas tienen un alto contenido de vacíos y una interacción constante con el agua en su estructura interna, el ensayo resulta ser muy pertinente. Permitiendo analizar el efecto de las fibras, el tipo de mezcla y el tipo de asfalto respecto a la susceptibilidad al agua.

Previamente al ensayo, se clasificaron las probetas en dos grupos o dos condiciones, cada uno de ellos corresponde a un juego de briquetas de ocho unidades, una briqueta por cada una de las mezclas. La primera condición fue en estado seco al aire a una temperatura promedio de $15^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ (similar a la temperatura ambiente de la ciudad de Bogotá) y la segunda en estado de inmersión. Se dejaron las briquetas de la segunda condición en baño María por 24 horas a 60°C , evaluando de manera específica que cambios presentaban las probeta ante la presencia del agua a una temperatura mayor que la ambiente; en cuanto a hinchamiento (evidenciados en la geometría de la briqueta) y la reacción de la mezcla referido a la adherencia ligante – agregado (disgregación de la mezcla y pérdida de la compacidad de la mezcla) (Figura 39).

Figura 39 Ensayo Resistencia a la Tracción Indirecta Mezcla Drenante



Fuente: Elaboración propia.

4.6.2. Método de caracterización de ligantes - UCL

El procedimiento fue realizado acondicionando las muestras a diferentes temperaturas en estado seco y tras inmersión. Las temperaturas de ensayo previstas fueron 0°, 10°, 20° y 30° que corresponden al rango de temperaturas propios del país, diferentes a las planteadas por el doctor Rodrigo Miró. Previo a cada ensayo se determina la temperatura del medio (tambor de la máquina de Los Ángeles), midiendo la temperatura antes y después del ensayo, manteniendo la temperatura entre $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Evitando un incremento adicional en el desgaste de la probeta (Anexo F).

Puesto que uno de los objetivos fundamental del ensayo es determinar la adhesión y cohesión indirecta de la interface agregado – asfalto, se dividió en dos grupos las probetas fabricadas para este ensayo, la mitad en estado seco (temperatura constante durante 6 horas previas al ensayo) y la otra, en estado húmedo (inmersas en agua a una temperatura constante durante 24 horas previas al ensayo)

Siguiendo el procedimiento, las probetas fueron llevadas a la máquina de los Ángeles para evaluar la interacción agregado-asfalto, como la perdida de material tras 300 revoluciones (Figura 40).

Figura 40 Procedimiento UCL



Fuente: Elaboración propia.

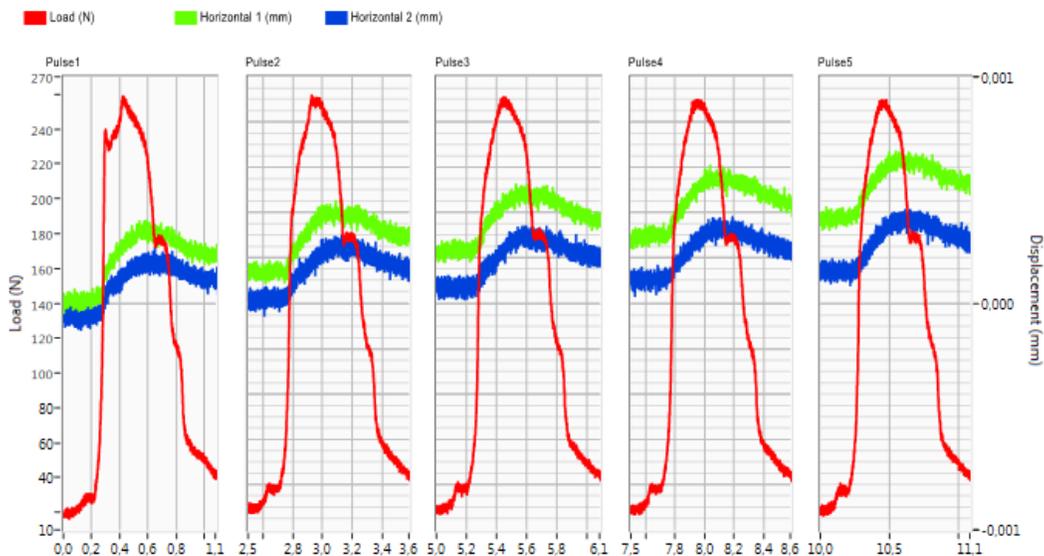
4.6.3. Módulo resiliente

Este ensayo cubre procedimientos para preparar y ensayar mezclas asfálticas de pavimentos para determinar los valores del módulo resiliente. El procedimiento descrito cubre un amplio intervalo tanto de temperatura como de frecuencia de carga. La serie de ensayos que se realizó en esta investigación comprendió las temperaturas de 10°, 15° y 20° a diferentes frecuencias de carga (0.33, 1, 2.5, 5 y 10 Hz). Para ejecutar este ensayo, se fabricaron 32 briquetas (16 con adición de fibras y 16 sin fibras para su posterior análisis comparativo) con el objeto de establecer la respuesta del material y obtener las curvas maestras respecto a la carga y la temperatura, que simulan el paso de los vehículos sobre la estructura de pavimento.

Previo a la realización del ensayo se debe medir la altura de cada briketa, tomando datos en tres puntos diferentes, con la finalidad de obtener una altura promedio. Dicha altura es usada como dato de entrada para calcular el módulo en el equipo que lo ejecuta.

Teniendo en cuenta que las probetas poseían un alto contenido de vacíos, se ejecutó el ensayo con una ligera variación, colocando una placa deformable en la punta del transductor para evitar que esta entrara en los vacíos superficiales de la probeta. En este caso, la carga dinámica es aplicada a través de una célula de carga a lo largo del diámetro de la probeta (curva roja). La muestra es asegurada en un collar y ubicada debajo de la célula de carga. Hay sensores para medir deformaciones horizontales (curva verde y azul) asegurados contra el collar y haciendo contacto con la muestra (Figura 41).

Figura 41 Módulo Resiliente



Fuente: Elaboración propia.

4.6.4. Ensayo Fénix y SCB

Existen procedimientos realizados tanto en Estados Unidos como en Europa. El ensayo de viga semicircular simplemente apoyada (SCB, acrónimo en inglés de Semi-Circular Bending) fue desarrollado en Australia por Lim, I. L., Johnston, I. W. y Choi, S. K. para estudiar las fracturas en la mecánica de rocas (1993). Posteriormente, las técnicas del SCB se emplearon para estudiar la resistencia al agrietamiento y la fractura de mezclas asfálticas en Estados Unidos por Molenaar, J., Lui, X. y Molenaar, A. (2003). Con base en los resultados obtenidos y la simplicidad de la metodología del ensayo, se ha generado y proporcionado una plataforma adecuada para que múltiples investigadores caractericen las propiedades de fractura y fatiga de mezclas asfálticas con diferentes condiciones.

El procedimiento europeo o ensayo Fénix fue desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña, y consiste en someter media probeta cilíndrica con una fisura inducida de 3 mm de longitud, a un esfuerzo de tracción con una velocidad de desplazamiento constante a una temperatura deseada. Una vez preparada la probeta con la fisura inducida, se fijan a las dos secciones de la cara plana (separadas por la entalladura) unas placas de acero mediante Sikadur 32 Primer.

Estas, a su vez, son fijadas a los soportes de la prensa, permitiendo un movimiento de rotación respecto a las fijaciones. Durante la ejecución del ensayo se van registrando mediante un equipo de adquisición de datos las cargas generadas, en función del desplazamiento, para así luego calcular los parámetros vinculados al proceso de fisuración, como la energía disipada en todo el proceso de fisuración del material, el parámetro índice de tenacidad IT, el índice de rigidez a tracción IRT, carga máxima a tracción $F_{m\acute{a}x}$, desplazamiento a carga máxima $\Delta F_{m\acute{a}x}$, y desplazamiento de rotura ΔR . (Figura 42).

Figura 42 Ensayo Fénix



Fuente: Elaboración propia.

Los ensayos fénix y SCB son procedimientos rápidos, precisos y confiables, el cual permite dar a conocer la carga máxima ($F_{m\acute{a}x}$) y el desplazamiento a la carga máxima $\Delta F_{m\acute{a}x}$, que podrá ser capaz de resistir una mezcla asfáltica en la capa de pavimento antes de llegar a la falla (Figura 43).

El resultado final del ensayo consiste en establecer la curva carga-desplazamiento, de la cual se obtiene la carga máxima y el desplazamiento a carga máxima, variables para estudiar el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas asfálticas ensayadas. Para el desarrollo de

dicho ensayo se usaron 16 probetas partidas a la mitad, usando 16 mitades para el ensayo SCB y las mitades restantes para el ensayo Fénix.

Figura 43 Ensayo SCB Microaglomerado con Fibras



Imagen previa al ensayo

Imagen posterior al ensayo

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 5 Análisis de Resultados

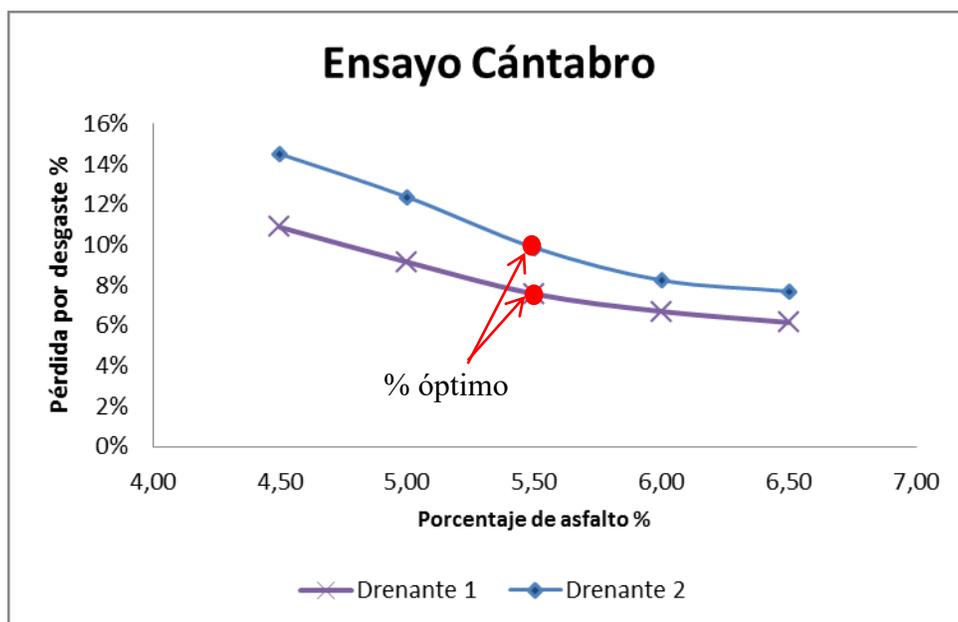
En este capítulo se presentan los diseños de las mezclas drenantes y microaglomerados, junto con los resultados y análisis de los ensayos de permeabilidad, módulo resiliente, daño a la susceptibilidad a la humedad mediante la resistencia conservada (RTI húmedo/ RTI seco), ensayo SCB, procedimiento Fénix y UCL.

5.1. Determinación % óptimo de asfalto de las mezclas drenantes y microaglomerados

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos del procedimiento de diseño de las mezclas drenantes y microaglomerados con los diferentes tipos de asfalto caracterizados previamente. El procedimiento del ensayo Cántabro establece que el cambio de pendiente representa el porcentaje óptimo de asfalto para cada una de las muestras. El porcentaje óptimo hallado para cada tipo de mezcla fue realizado sobre la curva promedio de las probetas ensayadas.

De acuerdo con los resultados del ensayo Cántabro, donde se varió el porcentaje de asfalto entre 4.5 % y 6.5%, se obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto del 5.5% para las mezclas drenantes con asfalto 1 y asfalto 2. (Figura 44).

Figura 44 Porcentaje óptimo de asfalto para mezclas drenantes



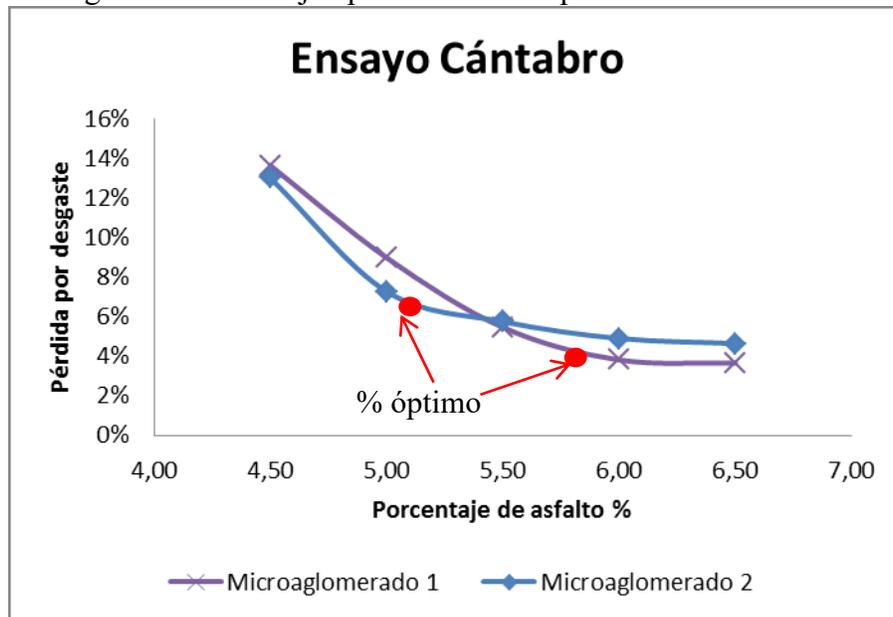
Fuente: Elaboración propia.

Para el ensayo Cántabro en microaglomerados, se varió el porcentaje de asfalto entre 4.5 % y 6.5%, y se obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto del 5.9% para el Microaglomerado 1 y del 5.2% para el Microaglomerado 2 (Figura 45).

En el Anexo B. Diseño de Mezcla, puede verse el procedimiento de cambio de pendiente que permitió obtener el % óptimo de asfalto para las mezclas drenantes y microaglomerados.

El desgaste es mayor y la cohesión menor para aquellas mezclas fabricadas con el asfalto 2, tanto para las mezclas drenantes como para los microaglomerados. Es importante resaltar que para mezclas más cerradas (microaglomerados), el tipo de asfalto juega un papel fundamental. Las mezclas con asfalto 60/70 requieren un porcentaje menor de asfalto que las fabricadas con asfalto 50/60, debido a que el asfalto 60/70 es más blando y genera una mayor cohesión dentro del ensayo Cántabro.

Figura 45 Porcentaje óptimo de asfalto para mezclas drenantes



Fuente: Elaboración propia

5.2. Determinación del porcentaje de vacíos

La fabricación de probetas se realizó con los porcentajes de asfalto obtenidos bajo los parámetros de diseño del Capítulo 5.1, producto del ensayo Cántabro. Se fabricaron en total 8 tipos de mezclas, que serán objeto de estudio de acuerdo con lo establecido en los objetivos de esta investigación

MEZCLA DRENANTE

- Mezcla drenante con fibras y asfalto 1 (D1F)
- Mezcla drenante sin fibras y asfalto 1 (D1NF)
- Mezcla drenante con fibras y asfalto 2 (D2F)
- Mezcla drenante sin fibras y asfalto 2 (D2NF)

MICROAGLOMERADO

- Microaglomerado con fibras y asfalto 1 (M1F)
- Microaglomerado sin fibras y asfalto 1 (M1NF)
- Microaglomerado con fibras y asfalto 2 (M2F)
- Microaglomerado sin fibras y asfalto 2 (M2NF)

Para la determinación del porcentaje de vacíos se tomó el peso en el aire (A), el peso sumergido (C) y el peso saturado superficialmente seco (B), permitiendo el cálculo de la gravedad específica Bulk (Gmb), la gravedad específica máxima teórica (Gmm) y el porcentaje de vacíos (AV). En la Tabla 12, Figura 46, Figura 47 y Figura 48 pueden visualizarse los resultados promedio de los diversos especímenes en cuanto al porcentaje de vacíos

Figura 46 Mezcla drenante en las tres condiciones.



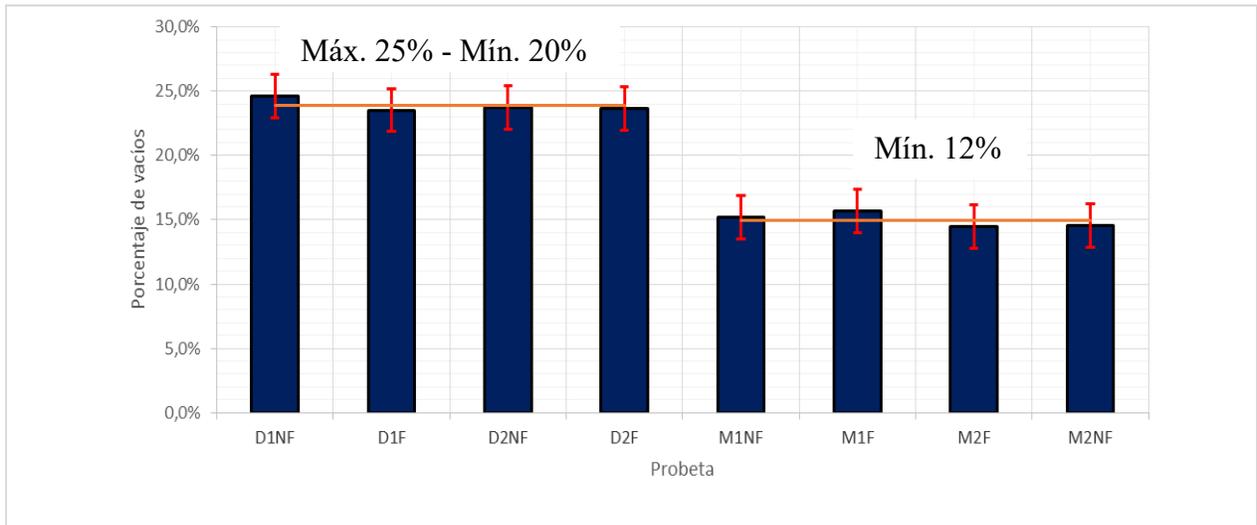
Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Porcentaje de vacíos por tipo de mezcla

Probetas	A Peso aire (g)	C Peso sumergido (g)	B Peso SSS (g)	Gmb = (A/B-C)	Gmm = (A/A-C)	AV =(Gmm- Gmb/Gmm)
D1NF	1002,30	575,10	1141,79	1,77	2,35	24,6%
D1F	999,07	561,84	1133,62	1,75	2,28	23,5%
D2NF	1001,74	568,07	1136,64	1,76	2,31	23,7%
D2F	1000,96	563,24	1136,29	1,75	2,29	23,6%
M1NF	1003,42	541,69	1086,31	1,84	2,17	15,2%
M1F	1007,61	555,15	1091,53	1,88	2,23	15,6%
M2F	1002,15	545,71	1079,66	1,88	2,20	14,5%
M2NF	1002,53	546,86	1080,50	1,88	2,20	14,6%

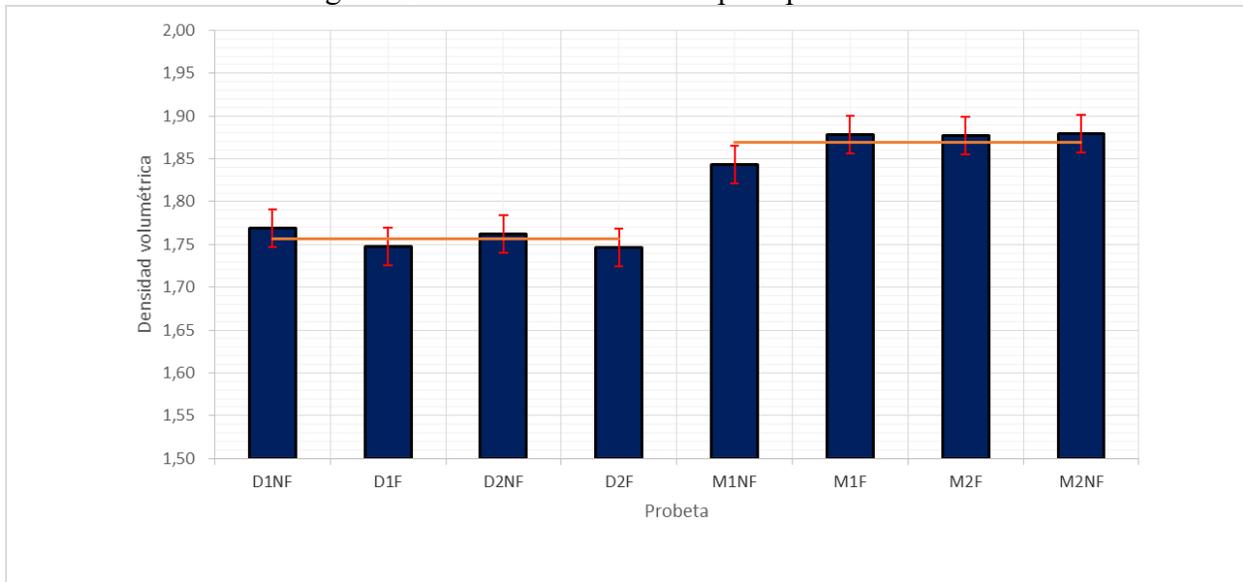
Fuente: Elaboración propia

Figura 47 Porcentaje de vacíos por tipo de mezcla



Fuente: Elaboración propia

Figura 48 Densidad volumétrica por tipo de mezcla



Fuente: Elaboración propia

Es importante resaltar que el uso de fibras no varía el porcentaje de vacíos de las mezclas y su densidad, manteniendo su capacidad drenante a pesar de crear una red tridimensional de refuerzo (Figura 49). La totalidad las mezclas cumplen lo establecido por norma, los vacíos con aire de la mezcla compactada no deberán ser inferiores a veinte por ciento (20%), ni mayores de veinticinco por ciento (25 %) para mezclas drenantes (INVIAS, 2013), y deberán ser mayores al 12% para considerarse microaglomerados (Miró & Pérez, Experiencia europea en predicción del desempeño a largo plazo de pavimentos) (Anexo C. Cálculo del Porcentaje de vacíos).

Figura 49 Red Tridimensional Asfalto-Fibra-Agregado pétreo



Fuente: (Reyes Ortiz, 2018)

5.3. Permeabilidad

Para la determinación de la permeabilidad se realizó el ensayo de cabeza constante utilizado usualmente para suelos granulares (Figura 50). Al garantizar una carga constante y una saturación del material se tomaron caudales para diferentes tiempos y se parametrizaron las variables para obtener un coeficiente de permeabilidad promedio para cada muestra. En el Anexo D. Permeabilidad, se registran los formatos utilizados para la determinación del coeficiente de permeabilidad. En la Tabla 13 se registra un cuadro resumen de los resultados obtenidos de la permeabilidad por el método de cabeza constante. Al obtener un porcentaje de vacíos similar entre las mezclas de referencia convencionales y las mezclas con adición de fibras, se espera un efecto similar en la permeabilidad de la mezcla, es decir la cantidad de vacíos interconectados que permiten la evacuación rápida y segura del agua de la capa superficial.

Tabla 13. Coeficientes de permeabilidad promedio

MEZCLA	VALORES PROMEDIO			
	%Vacíos	k (m/s)	k(m/día)	k (cm/s)
D1NF	24,6%	1,573E-03	135,92	0,157
D1F	23,5%	1,557E-03	134,49	0,156
D2NF	23,7%	1,562E-03	134,98	0,156
D2F	23,6%	1,570E-03	135,66	0,157
M1NF	15,2%	1,557E-03	134,56	0,156
M1F	15,6%	1,539E-03	132,93	0,154
M2NF	14,6%	1,551E-03	134,00	0,155
M2F	14,5%	1,550E-03	133,88	0,155

Fuente: Elaboración propia

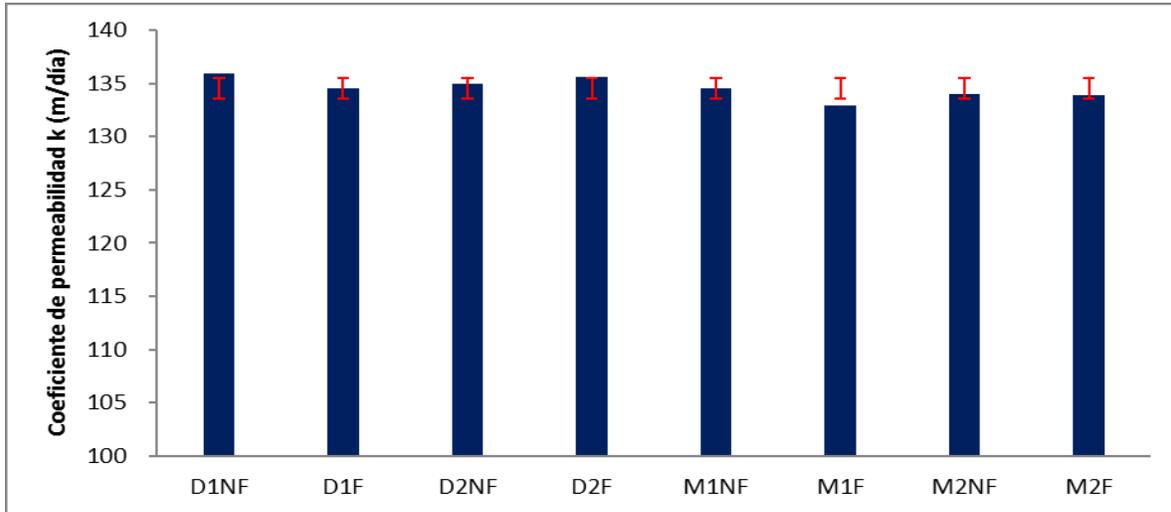
Figura 50 Ensayo de permeabilidad de cabeza constante



Fuente: Elaboración propia

Los valores de permeabilidad obtenidos para las diferentes mezclas corresponden en todos los casos a permeabilidades altas, clasificando el comportamiento del medio como una arena gruesa limpia a grava fina, la cual, tiene permeabilidades comprendidas entre 0.1 y $1.0 \cdot 10^4$ cm/s. En la Figura 51 se presentan los resultados obtenidos de las permeabilidades promedio por mezcla analizada. Independientemente del tipo de mezcla, asfalto o uso de fibra, la permeabilidad es similar, lo cual evidencia que las fibras y el tipo de asfalto no modifican la permeabilidad. El parámetro que se encuentra directamente relacionado con la permeabilidad es el porcentaje de vacíos.

Figura 51 Coeficiente de permeabilidad por tipo de mezcla



Fuente: Elaboración propia

5.4. Susceptibilidad al daño por humedad

La susceptibilidad al daño por humedad es un parametro caracteristico en mezclas cerradas. Sin embargo, dado que las mezclas drenantes y microaglomerados son mezclas altamente susceptibles al agua, se realizó el ensayo para evaluar el potencial de susceptibilidad (a pesar de no estar establecido el procedimiento para mezclas abiertas). De acuerdo a lo estipulado por la norma I.N.V.E 725-13 se garantizó una temperatura de 25°C para el grupo seco durante 20 minutos, y las probetas en condición de inmersión, se colocaron en baño de agua destilada a 60°C durante 24 horas. Se ejecutaron los respectivos ensayos de resistencia a la tracción indirecta en estado seco y húmedo y se estableció el índice de resistencia conservada IRC (RTI Húmedo/ RTI Seco) (Tabla 14).

Tabla 14. Resultados IRC

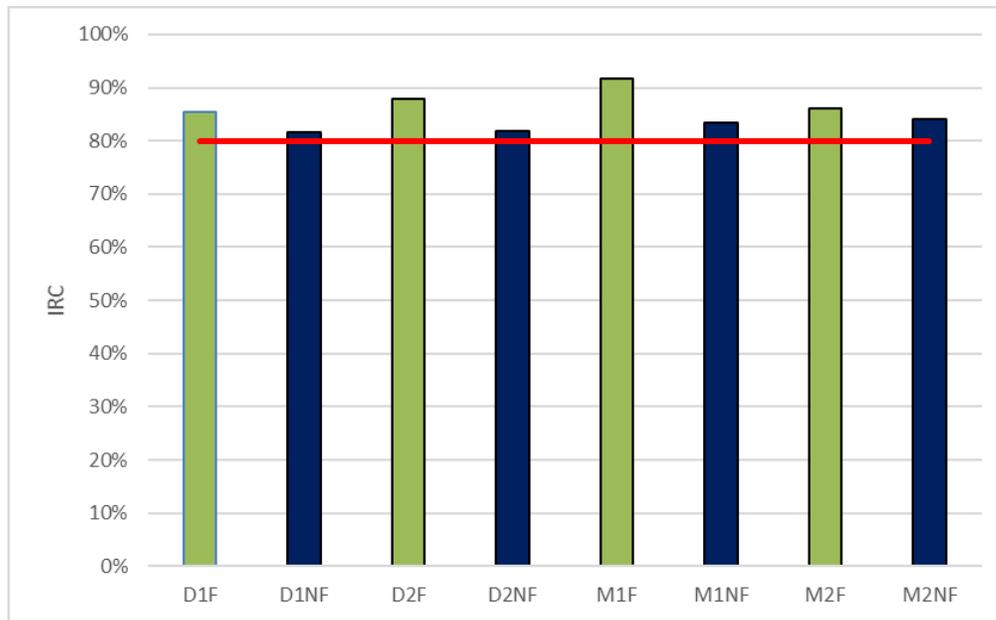
MUESTRA	HÚMEDO (N)	SECO (N)	IRC
D1F	8.627	10.101	85%
D1NF	5.773	7.074	82%
D2F	6.763	7.701	88%
D2NF	4.604	5.622	82%
M1F	9.026	9.848	92%
M1NF	7.788	9.328	83%
M2F	7.347	8.538	86%
M2NF	5.416	6.447	84%

Fuente: Elaboración propia

La resistencia conservada para la totalidad de las mezclas estudiadas cumple con el 80% del IRC (Figura 52). Se resalta que las mezclas con fibras presentan mayores valores de resistencia

conservada independientemente del tipo de mezcla (drenantes o microaglomerados), dada la creación de una red tridimensional entre el ligante, el agregado y la fibra (Figura 49).

Figura 52 Resistencia conservada



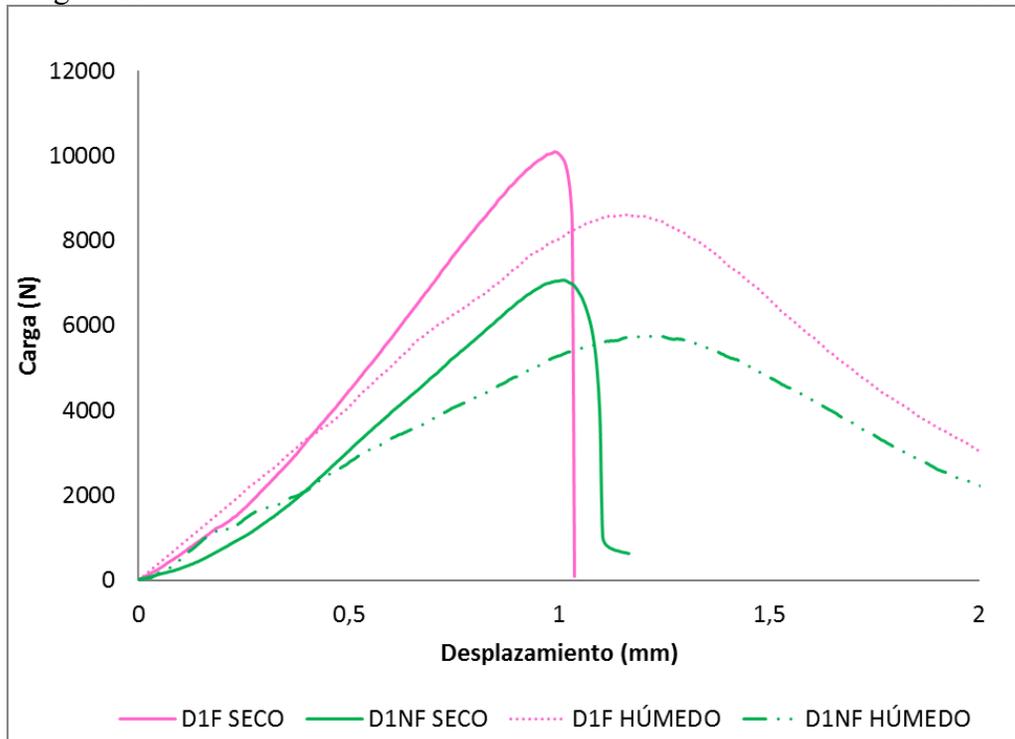
Fuente: Elaboración propia

De otra parte, a continuación se presentan de manera gráfica los resultados obtenidos a tracción indirecta en estado seco y húmedo (Figura 53, Figura 54, Figura 55 y Figura 56).

En la Figura 53 se observan los picos de carga para las mezclas drenantes con asfalto 50/60 en estado seco y húmedo. Para el caso de la mezcla drenante con fibras en estado seco, la carga máxima corresponde a 10.101 N, siendo un 30% superior respecto a la carga máxima registrada para la mezcla sin fibras (7.074 N). Tras inmersión los resultados son muy similares, ya que la relación se encuentra alrededor del 33%, dado que el uso de fibras incrementa dicha resistencia de 5.773 N a 8.627 N, evidenciando un ligero incremento del rendimiento de la mezcla al incrementar fibras en estado húmedo. El proceso de inmersión de las probetas genera un cambio de estado de la mezcla de rígido a dúctil, sin embargo, dicho comportamiento será evaluado de forma más detallada mediante el procedimiento Fénix y el ensayo SCB, que evalúa de forma adicional la energía elástica y la energía de fluencia.

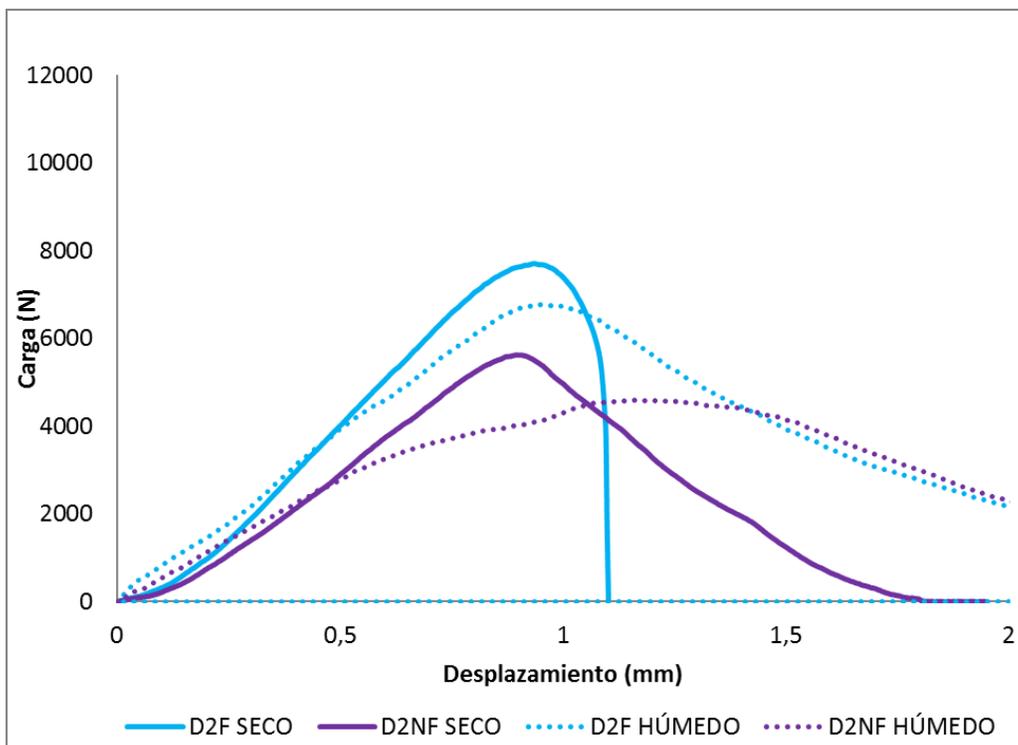
En la Figura 54 se observan los picos de carga para las mezclas drenantes con asfalto 60/70 en estado seco y húmedo. El cambio de asfalto por uno de mayor penetración genera una reducción de la resistencia del 22% en estado húmedo y del 20% en estado seco. Haciendo un análisis similar al realizado con el asfalto 50/60, para el caso de la mezcla drenante con fibras en estado seco, la carga máxima corresponde a 7.074 N, siendo un 27% superior respecto a la carga máxima registrada para la mezcla sin fibras (5.622 N). Tras inmersión los resultados son muy similares, ya que la relación se encuentra alrededor del 32%, dado que el uso de fibras incrementa dicha resistencia de 4.604 N a 6.763 N, evidenciando un incremento considerable del rendimiento de la mezcla al incrementar fibras en estado húmedo.

Figura 53 Resistencia a la Tracción Indirecta Mezcla Drenante Asfalto 50/60



Fuente: Elaboración propia

Figura 54 Resistencia a la Tracción Indirecta Mezcla Drenante Asfalto 60/70



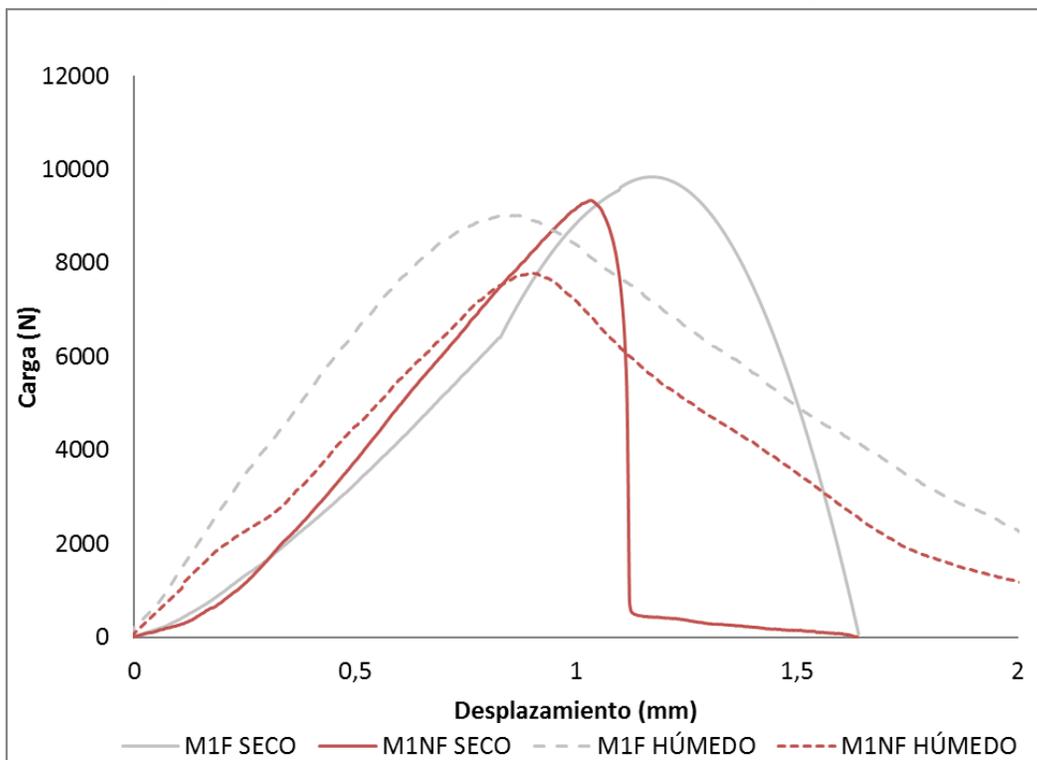
Fuente: Elaboración propia

De forma general para las mezclas drenantes, puede deducirse que el uso de fibras aporta un 30% de resistencia adicional, independientemente del tipo de asfalto.

Para el caso de los microaglomerados, en la Figura 55 se observan los picos de carga con asfalto 50/60 en estado seco y húmedo. El cambio de granulometría (drenante – microaglomerado) debido a un menor porcentaje de vacíos, tan solo genera un 4% más de resistencia para el caso del asfalto 50/60. Para el caso del microaglomerado con fibras en estado seco, la carga máxima corresponde a 8.538 N, siendo un 5% superior respecto a la carga máxima registrada para la mezcla sin fibras (9.328 N). Tras inmersión los resultados varían, ya que la relación se encuentra alrededor del 14%, dado que el uso de fibras incrementa dicha resistencia de 7.788 N a 9.026 N, evidenciando un incremento considerable del rendimiento de la mezcla al usar fibras en estado húmedo.

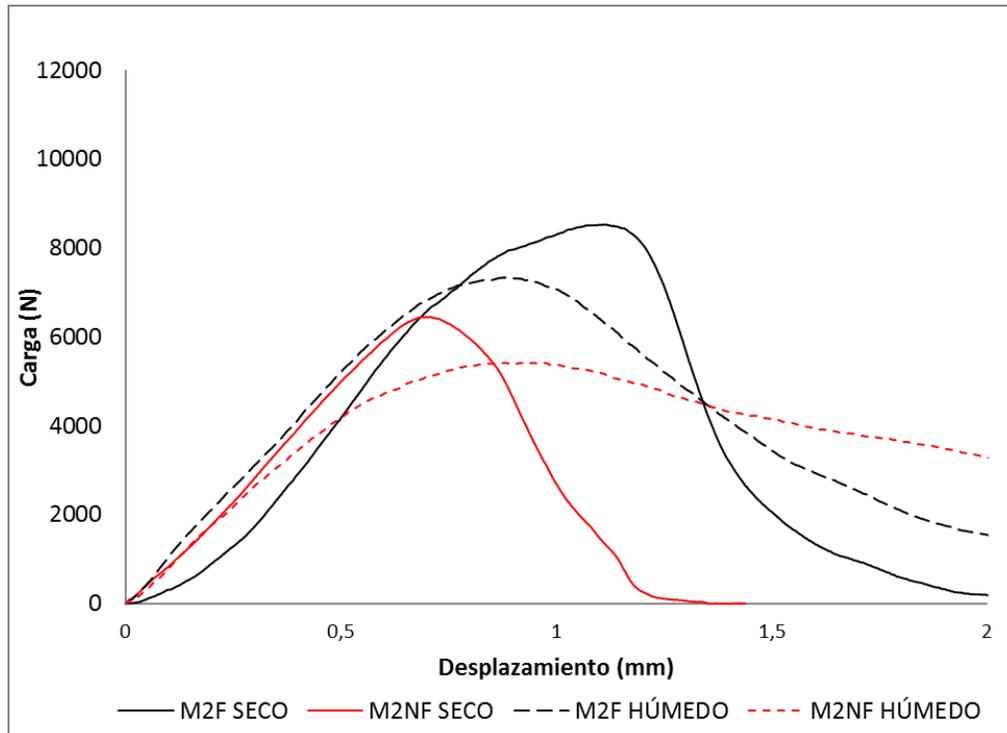
En la Figura 56 se observan los resultados del ensayo RTI para dos microaglomerados con asfalto 60/70. Las muestras se diferencian en el uso de fibras sintéticas. El cambio de granulometría (drenante – microaglomerado), tan solo genera un 8% más de resistencia para el caso del asfalto 60/70. Para el caso del microaglomerado con fibras en estado seco, la carga máxima corresponde a 9.848 N, siendo un 24% superior respecto a la carga máxima registrada para la mezcla sin fibras (6.447 N). Tras inmersión los resultados son muy similares, ya que la relación se encuentra alrededor del 26%, dado que el uso de fibras incrementa dicha resistencia de 5.416 N a 7.347 N.

Figura 55 Resistencia a la Tracción Indirecta Microaglomerado 50/60



Fuente: Elaboración propia

Figura 56 Resistencia a la Tracción Indirecta Microaglomerado Asfalto 60/70



Fuente: Elaboración propia

Igualmente, puede observarse que el efecto de las fibras genera una mayor interacción entre los agregados y el asfalto en las mezclas drenantes, puesto que generan un aporte estructural del 30% respecto al 17% que genera el uso de fibras en los microaglomerados.

Finalmente, puede concluirse que las mezclas en general presentan un mejor comportamiento cuando poseen una adición de fibras (alrededor del 24%). Sin embargo, los resultados obtenidos para los microaglomerados con asfalto 50/60, muestran una gran dispersión, pues el efecto de las fibras sólo muestra una resistencia adicional entre el 5% y el 14%, mientras que para el resto de las mezclas fue superior al 20%. Igualmente, la inmersión de las mezclas muestra un cambio de comportamiento, pues resultan ser menos frágiles tras este proceso y su resistencia es mayor.

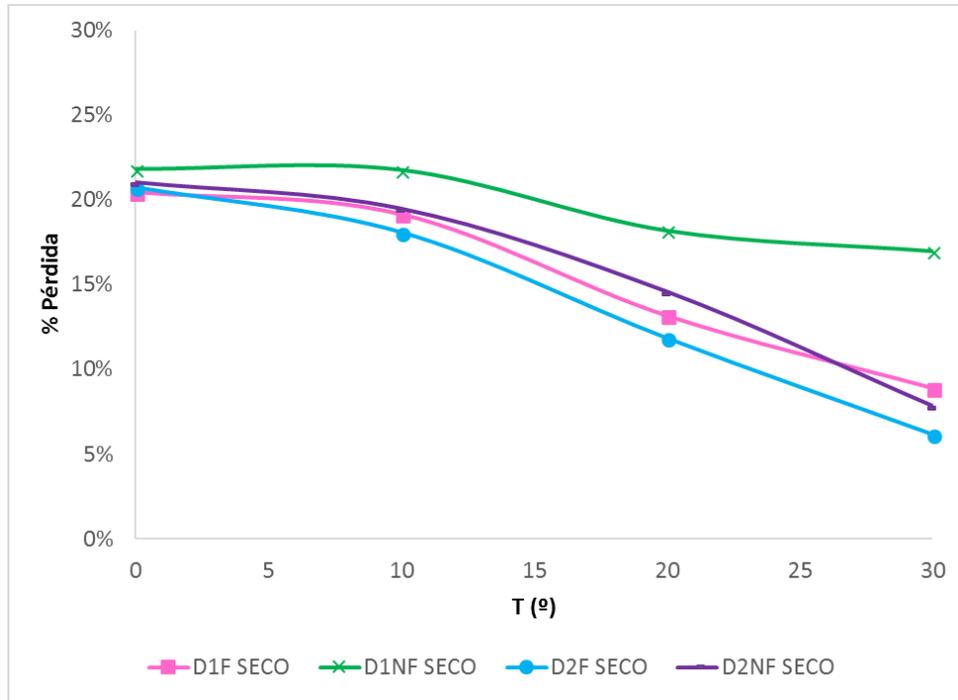
Finalmente, se evidenció que las fibras crean una red tridimensional entre el agregado y el cemento asfáltico, generando una resistencia mayor, tal y como se observa en la Figura 49.

5.5. Procedimiento UCL

El procedimiento UCL establecido por la Universidad Politécnica de Cataluña, para muestras en estado seco y húmedo se realizó para evaluar la cohesión y la adhesión indirecta de las mezclas estudiadas. El procedimiento se realizó para temperaturas propias de la región 0°, 10°, 20° y 30°, haciendo una ligera modificación a lo señalado por los autores (Temperaturas entre -40° y 80°C). De acuerdo a los resultados obtenidos (Figura 57, Figura 58, Figura 59 y Figura 60), puede

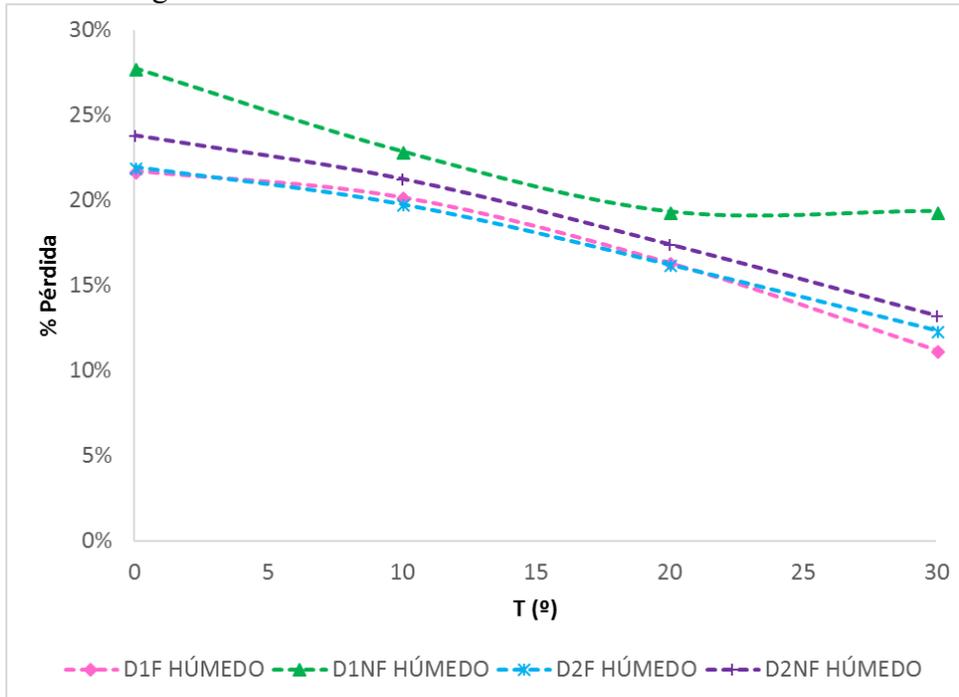
deducirse que el porcentaje de desgaste aumenta con la temperatura de ejecución del ensayo, presentando mayor desgaste en estado húmedo y en las probetas sin adición de fibras.

Figura 57 Procedimiento UCL Drenantes estado seco



Fuente: Elaboración propia

Figura 58 Procedimiento UCL Drenantes estado húmedo

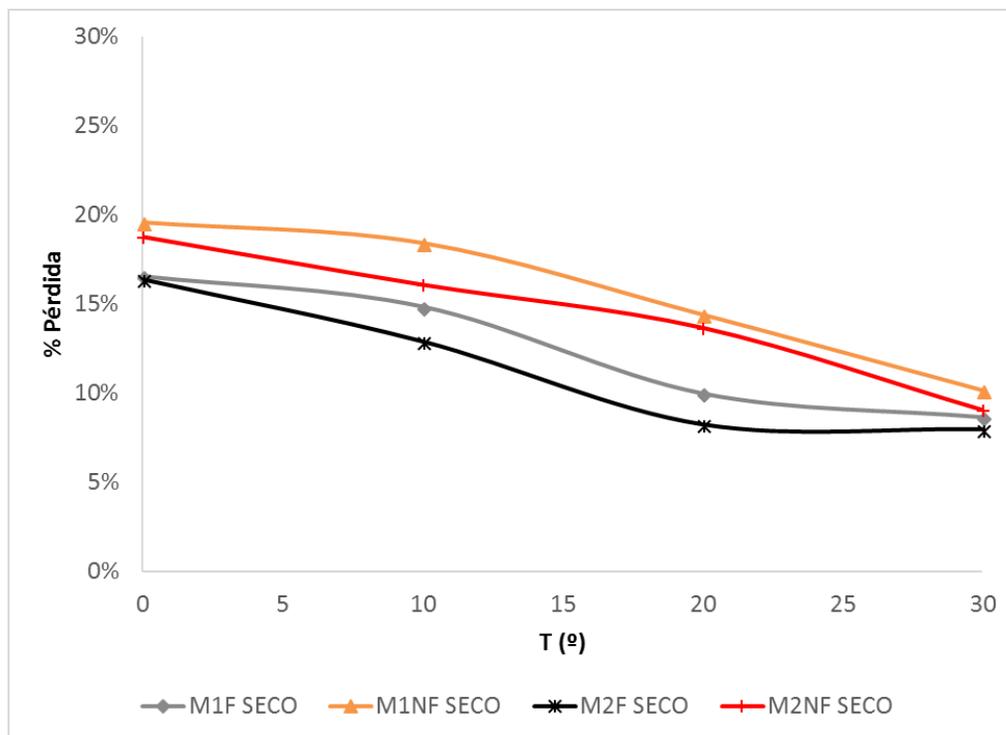


Fuente: Elaboración propia

En concordancia con los otros ensayos, se muestra un mayor desgaste para las mezclas drenantes respecto a los microaglomerados y un mayor desgaste para las mezclas fabricadas con el asfalto 2 (60/70) respecto al asfalto 1 (50/60)

No se recomienda el uso de la mezcla drenante con asfalto 50/60 sin fibras a una temperatura de 30° puesto que su desgaste aumenta de forma considerable respecto a las otras mezclas.

Figura 59 Procedimiento UCL Microaglomerados estado seco



Fuente: Elaboración propia

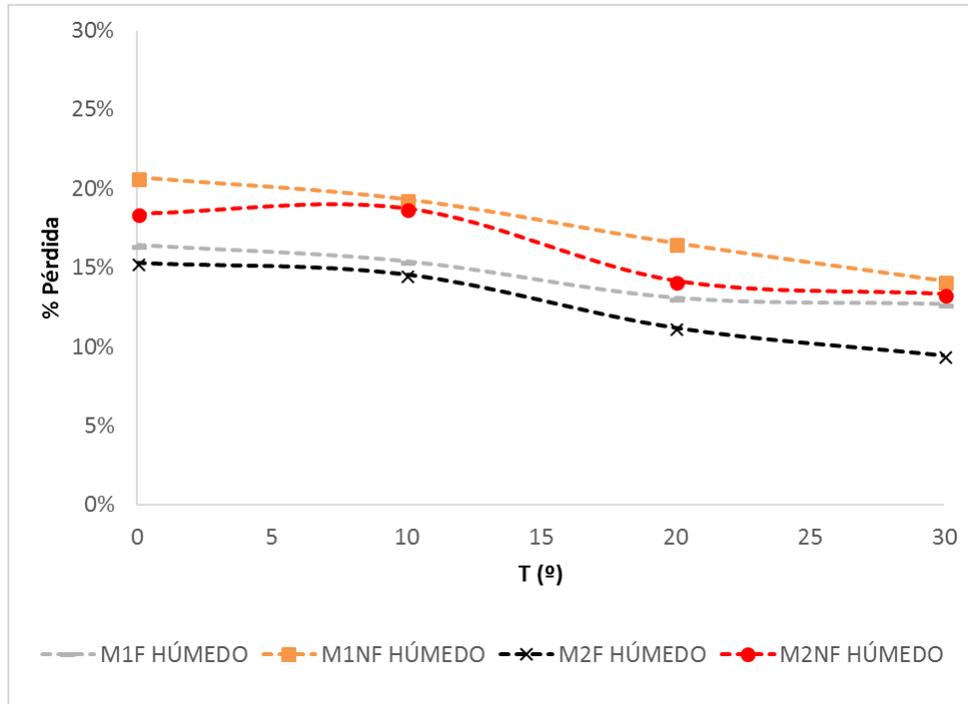
Para la condición seca se obtuvieron valores de desgaste entre 6 % y 22%, observando que el mayor valor (21.82 %) de desgaste a la mezcla drenante con asfalto 1 sin fibras a 0° C, indicando que la mezcla asfáltica tiene una adherencia muy baja y por lo tanto es más sensible al proceso de abrasión. El menor valor de desgaste 6.18 % está asociado a la mezcla drenante con asfalto 2 con fibras a 30 °C.

Para la condición húmeda se obtuvieron valores de desgaste entre 9 % y 28%, observando que el mayor valor (27.78 %) de desgaste a la mezcla drenante con asfalto 1 sin fibras a 0° C. El menor valor de desgaste 9.44 % está asociado al microaglomerado con asfalto 2 con fibras a 30 °C.

Es importante resaltar que se presenta un mayor desgaste con el asfalto 1 de penetración 50/60 dada su rigidez, sin embargo, el efecto de las fibras puede contrarrestar el efecto del asfalto.

Las fibras dan mayor cohesión y adhesión a cualquiera de los materiales, evidenciándose que al adicionar fibras se genera una microestructura que presenta un desgaste menor en la mezcla. Aproximadamente el uso de fibras reduce el porcentaje de desgaste en un 3%, siendo más constante para los microaglomerados independientemente del asfalto. En el caso de las mezclas drenantes el tipo de asfalto tiene una mayor incidencia, teniendo en cuenta que un asfalto 50/60 tiene mayor porcentaje de desgaste, pero reacciona mejor al uso de fibras. (Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18 , Figura 61, Figura 62, Figura 63 y Figura 64).

Figura 60 Procedimiento UCL Microaglomerados estado húmedo



Fuente: Elaboración propia

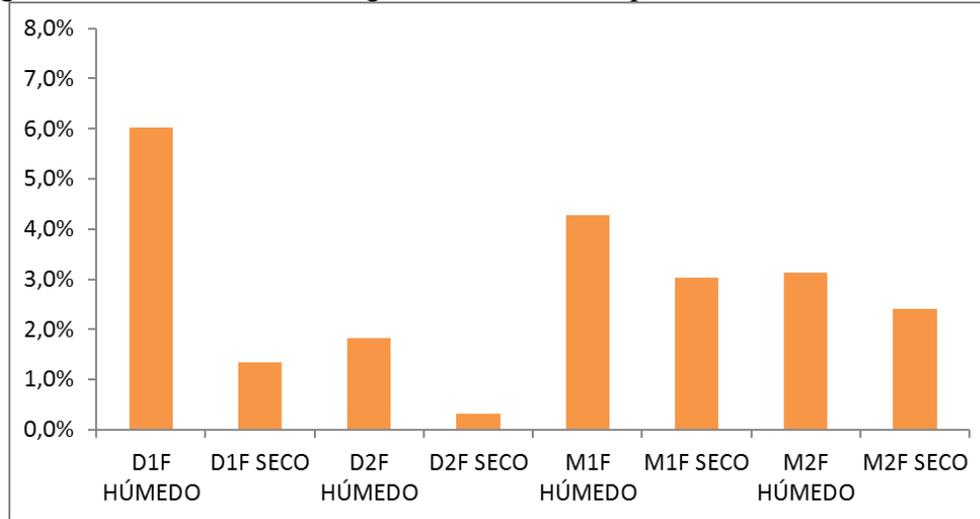
Finalmente, se evidencia un mayor porcentaje de pérdida por desgaste en las mezclas drenantes, evidenciándose el efecto de la granulometría en la resistencia de la mezcla.

Tabla 15. Efecto de las fibras en el desgaste de las mezclas a 0°C

	% PÉRDIDA	FIBRAS	NO FIBRAS	Δ
	0°	D1 HÚMEDO	22%	28%
D1 SECO		20%	22%	1,3%
D2 HÚMEDO		22%	24%	1,8%
D2 SECO		21%	21%	0,3%
M1 HÚMEDO		16%	21%	4,3%
M1 SECO		17%	20%	3,0%
M2 HÚMEDO		15%	18%	3,1%
M2 SECO		16%	19%	2,4%

Fuente: Elaboración propia

Figura 61 Variación en el desgaste de las mezclas por el efecto de las fibras a 0°C



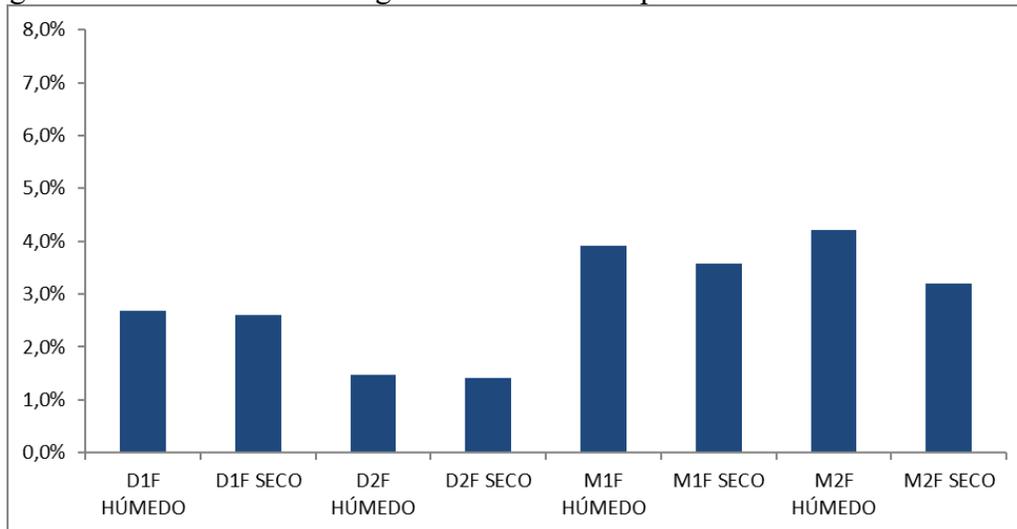
Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Efecto de las fibras en el desgaste de las mezclas a 10°C

	% PÉRDIDA		Δ	
	FIBRAS	NO FIBRAS		
10°	D1 HÚMEDO	20%	23%	2,7%
	D1 SECO	19%	22%	2,6%
	D2 HÚMEDO	20%	21%	1,5%
	D2 SECO	18%	20%	1,4%
	M1 HÚMEDO	15%	19%	3,9%
	M1 SECO	15%	18%	3,6%
	M2 HÚMEDO	15%	19%	4,2%
	M2 SECO	13%	16%	3,2%

Fuente: Elaboración propia

Figura 62 Variación en el desgaste de las mezclas por el efecto de las fibras a 10°C



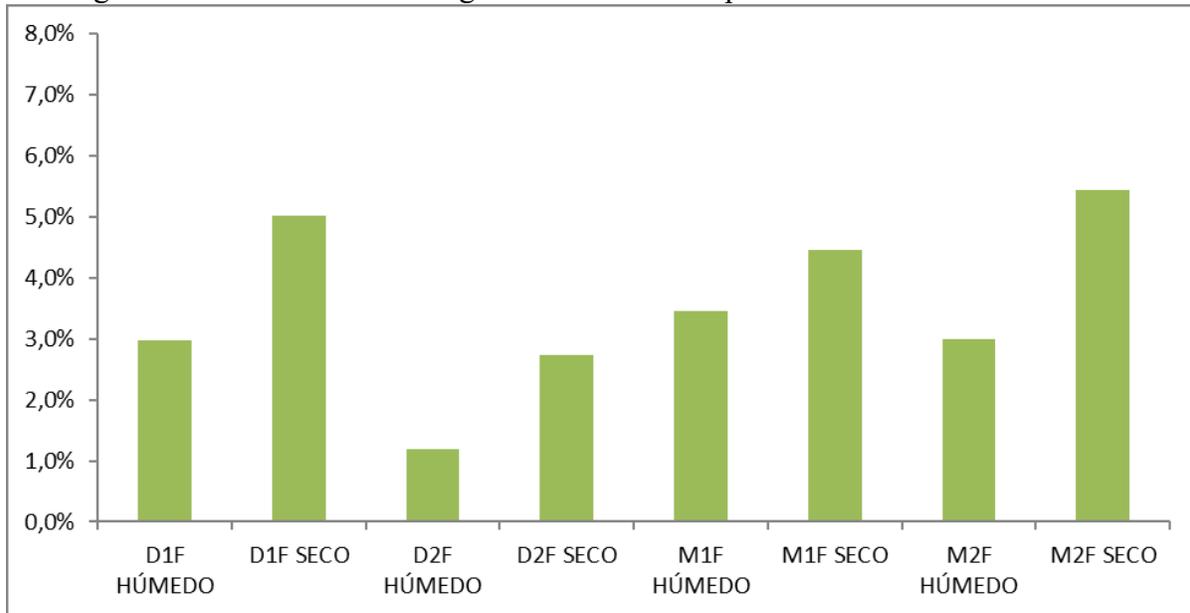
Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Efecto de las fibras en el desgaste de las mezclas a 20°C

20°	% PÉRDIDA	FIBRAS	NO FIBRAS	Δ
	D1 HÚMEDO	16%	19%	3,0%
	D1 SECO	13%	18%	5,0%
	D2 HÚMEDO	16%	17%	1,2%
	D2 SECO	12%	15%	2,7%
	M1 HÚMEDO	13%	17%	3,5%
	M1 SECO	10%	14%	4,5%
	M2 HÚMEDO	11%	14%	3,0%
	M2 SECO	8%	14%	5,4%

Fuente: Elaboración propia

Figura 63 Variación en el desgaste de las mezclas por el efecto de las fibras a 20°C



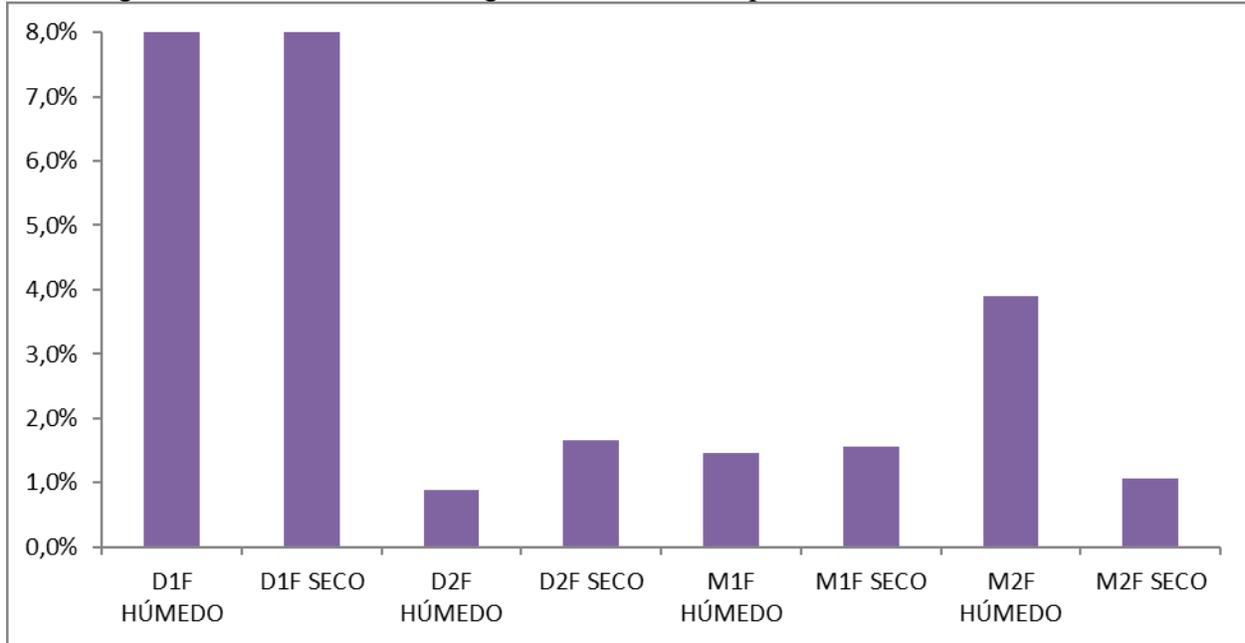
Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Efecto de las fibras en el desgaste de las mezclas a 30°C

30°	% PÉRDIDA	FIBRAS	NO FIBRAS	Δ
	D1 HÚMEDO	11%	19%	8,1%
	D1 SECO	9%	17%	8,1%
	D2 HÚMEDO	12%	13%	0,9%
	D2 SECO	6%	8%	1,7%
	M1 HÚMEDO	13%	14%	1,5%
	M1 SECO	9%	10%	1,6%
	M2 HÚMEDO	9%	13%	3,9%
	M2 SECO	8%	9%	1,1%

Fuente: Elaboración propia

Figura 64 Variación en el desgaste de las mezclas por el efecto de las fibras a 30°C



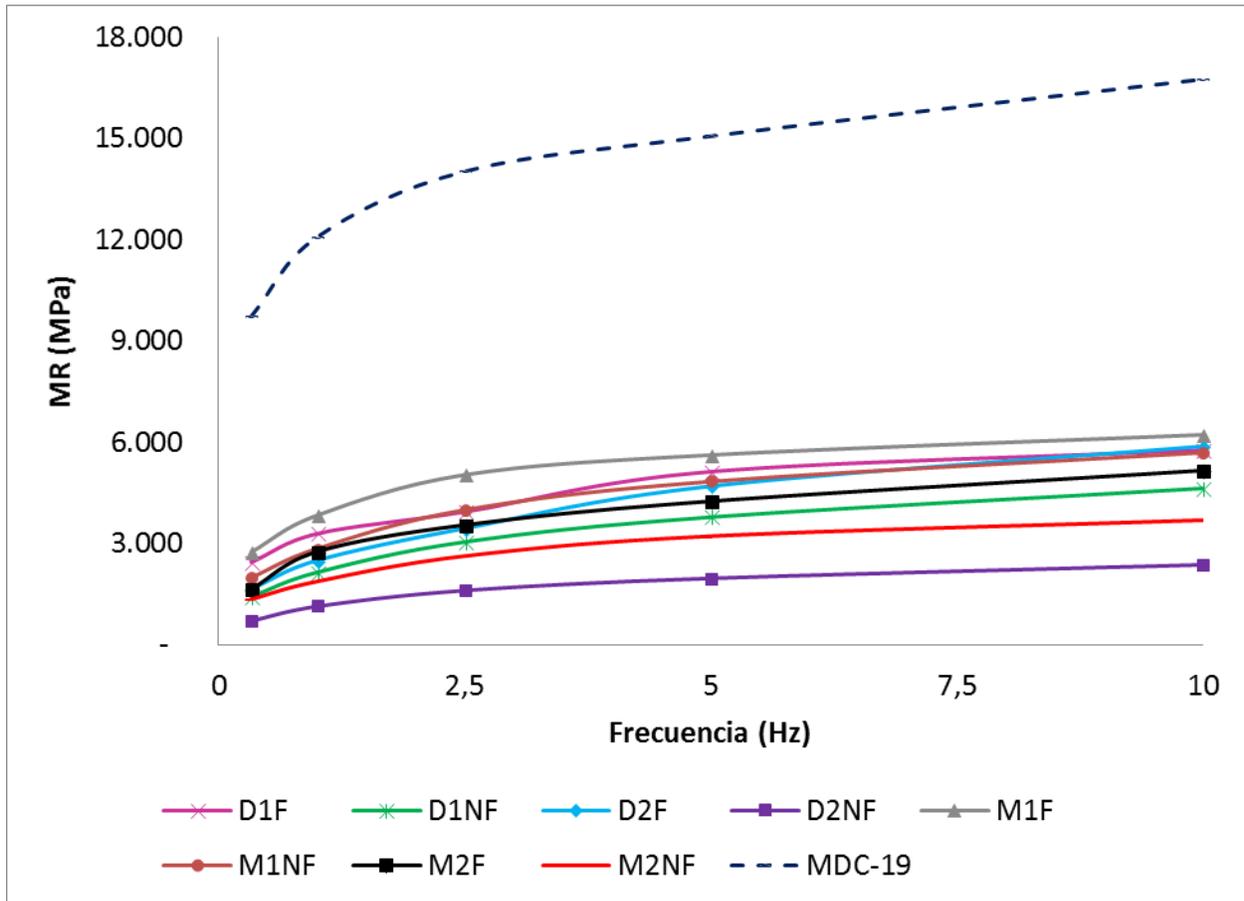
Fuente: Elaboración propia

El efecto de las fibras es más beneficioso en temperaturas entre los 20° y los 30° de acuerdo con lo observado en las anteriores figuras, dado que las fibras han aumentado la adhesión y la cohesión de la mezcla, generando una interacción más profunda entre el ligante y el material pétreo. Finalmente, puede observarse que el efecto de las fibras en mezclas drenantes reduce en un 3% el desgaste, mientras que en los microaglomerados el promedio de reducción es 3.3%, concluyendo un mejor desempeño en estas mezclas.

5.6. Módulo resiliente

Las mezclas drenantes en muchos casos no son consideradas como una mezcla estructural dado su bajo aporte a la resistencia, sin embargo, en esta investigación se consideró oportuno evaluar este parámetro y analizar el efecto que producen las fibras respecto a las mezclas patrones drenantes y microaglomerados. Para la determinación del módulo resiliente se tomaron cuatro especímenes por cada tipo de mezcla, es decir un total de 32 muestras, sometidas a 5 frecuencias (0.33 Hz, 1 Hz, 2.5 Hz, 5 Hz y 10 Hz) y 3 temperaturas diferentes (20°, 15° y 10°). En la Figura 65 puede observarse la respuesta de las muestras drenantes y microaglomerados con y sin fibras, a una temperatura de 10°C. La mezcla cerrada de referencia MDC-19, permite tener un orden de magnitud para las mezclas drenantes y microaglomerados.

Figura 65 Módulo Resiliente a 10° C



Fuente: Elaboración propia

De los resultados obtenidos se observa que los máximos valores de módulo resiliente se presentaron para el microaglomerado asfalto 1 (50/60) con fibras en la totalidad de las frecuencias. La tendencia es generalizada para las mezclas a cualquier temperatura.

En cuanto al tipo de asfalto, las mezclas del asfalto 1 tuvieron un mejor desempeño respecto a las mezclas fabricadas con el asfalto 2, justificado en su dureza. El asfalto 1 (50/60) es más duro que el asfalto 2 (60/70), según el ensayo de penetración. Se evidencia igualmente que los microaglomerados se desempeñan mejor que las mezclas drenantes, puesto que, al poseer un contenido de vacíos inferior, mayor cantidad de material aporta estructuralmente a la mezcla. Por último, se concluye que las fibras aumentan considerablemente el módulo resiliente. La Tabla 19 muestra el aporte estructural de las mezclas drenantes y microaglomerados respecto a una mezcla MDC-19. Igualmente se puede visualizar que las fibras generan un mayor efecto positivo en las mezclas drenantes respecto a los microaglomerados y que su uso puede aumentar la capacidad estructural de la mezcla en un 10% aproximadamente.

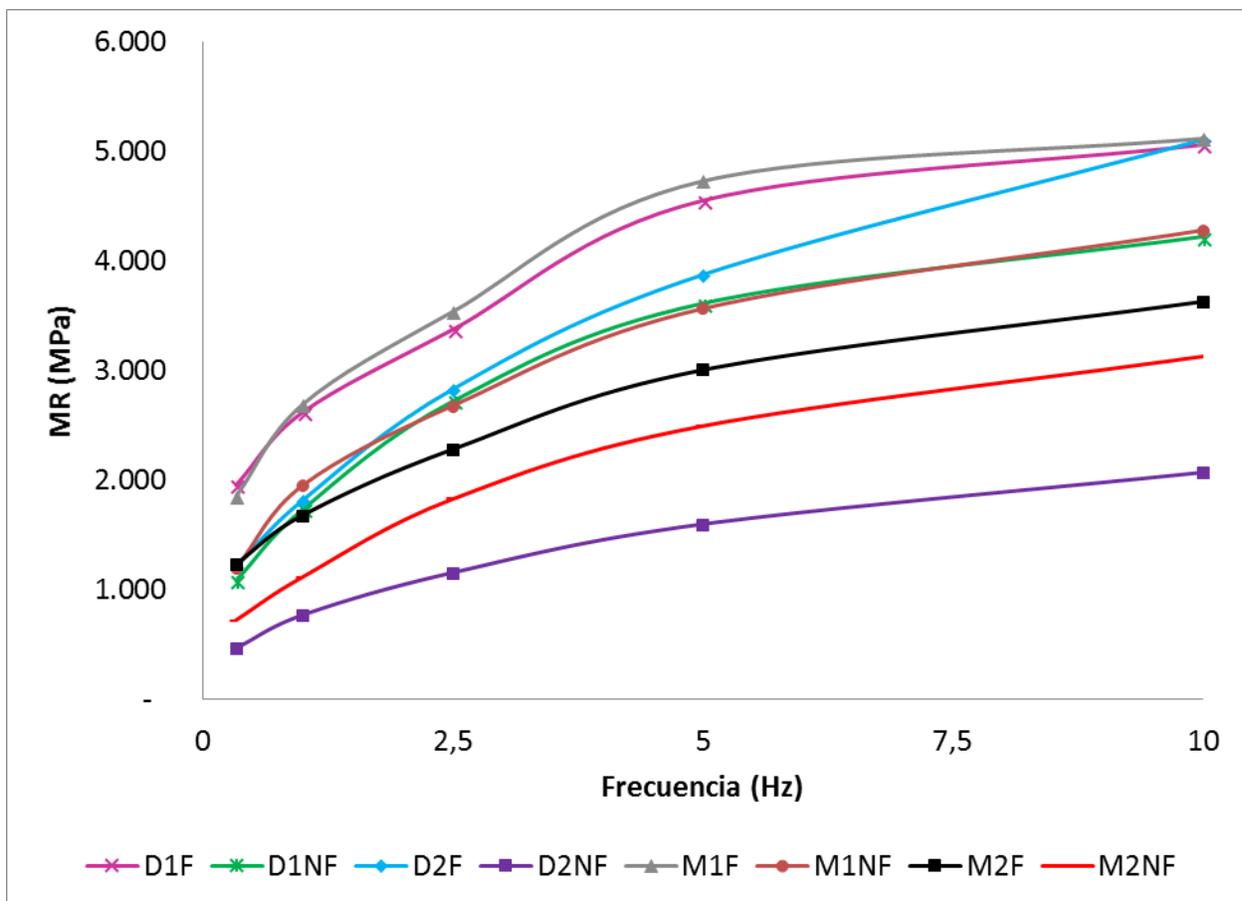
Tabla 19. Resistencia de las mezclas respecto a una MDC-19

MEZCLA	M1	D1	M2	D2
FIBRAS	33%	31%	23%	22%
NO FIBRAS	25%	20%	15%	10%
Δ	8%	11%	9%	12%

Fuente: Elaboración propia

Aunque las fibras generan un mayor incremento en la resistencia de las mezclas drenantes, es importante señalar que el aporte estructural es mayor con el uso de una capa de superposición con asfaltos más rígidos 50/60. Pues su construcción, además de aportar a la reducción de accidentes con la evacuación de aguas superficiales, aportara una tercera parte de resistencia a la capa de rodadura cerrada convencional. Cuando el asfalto usado tiene una menor rigidez (60/70) dicho aporte será solo de una cuarta parte.

Figura 66 Módulo Resiliente a 15° C

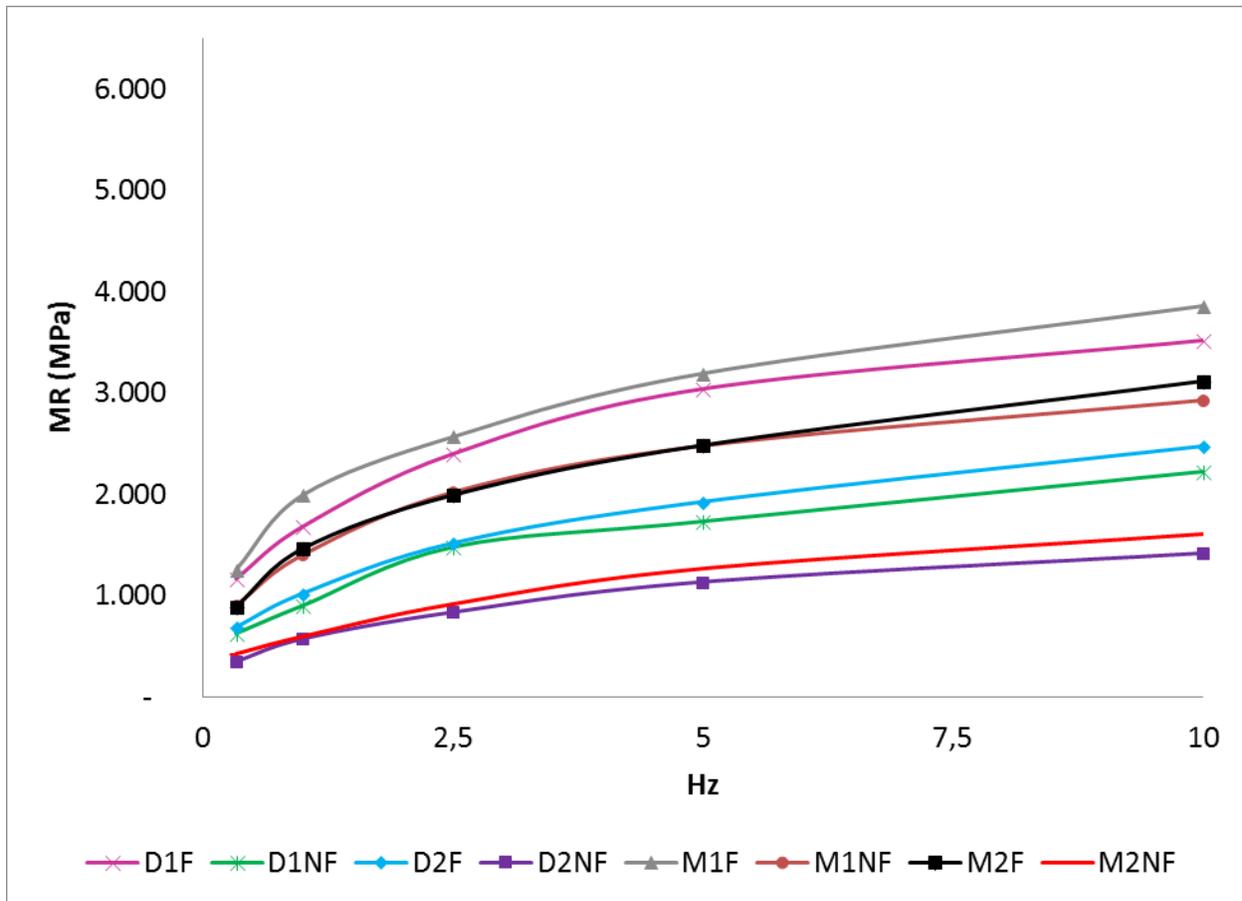


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 66 y Figura 67 se observa la variación del comportamiento de las mezclas asfálticas al ser sometida a diferentes temperaturas (15° y 20° C) y frecuencias, encontrándose un mejor comportamiento en las mezclas en el siguiente orden:

1. Microaglomerado Asfalto 50/60 Con Fibras
2. Drenante Asfalto 50/60 Con Fibras
3. Microaglomerado Asfalto 60/70 Con Fibras
4. Microaglomerado Asfalto 50/60 Sin Fibras
5. Drenante Asfalto 60/70 Con Fibras
6. Drenante Asfalto 50/60 Sin Fibras
7. Microaglomerado Asfalto 60/70 Sin Fibras
8. Drenante Asfalto 60/70 Sin Fibras

Figura 67 Módulo Resiliente a 20° C



Fuente: Elaboración propia

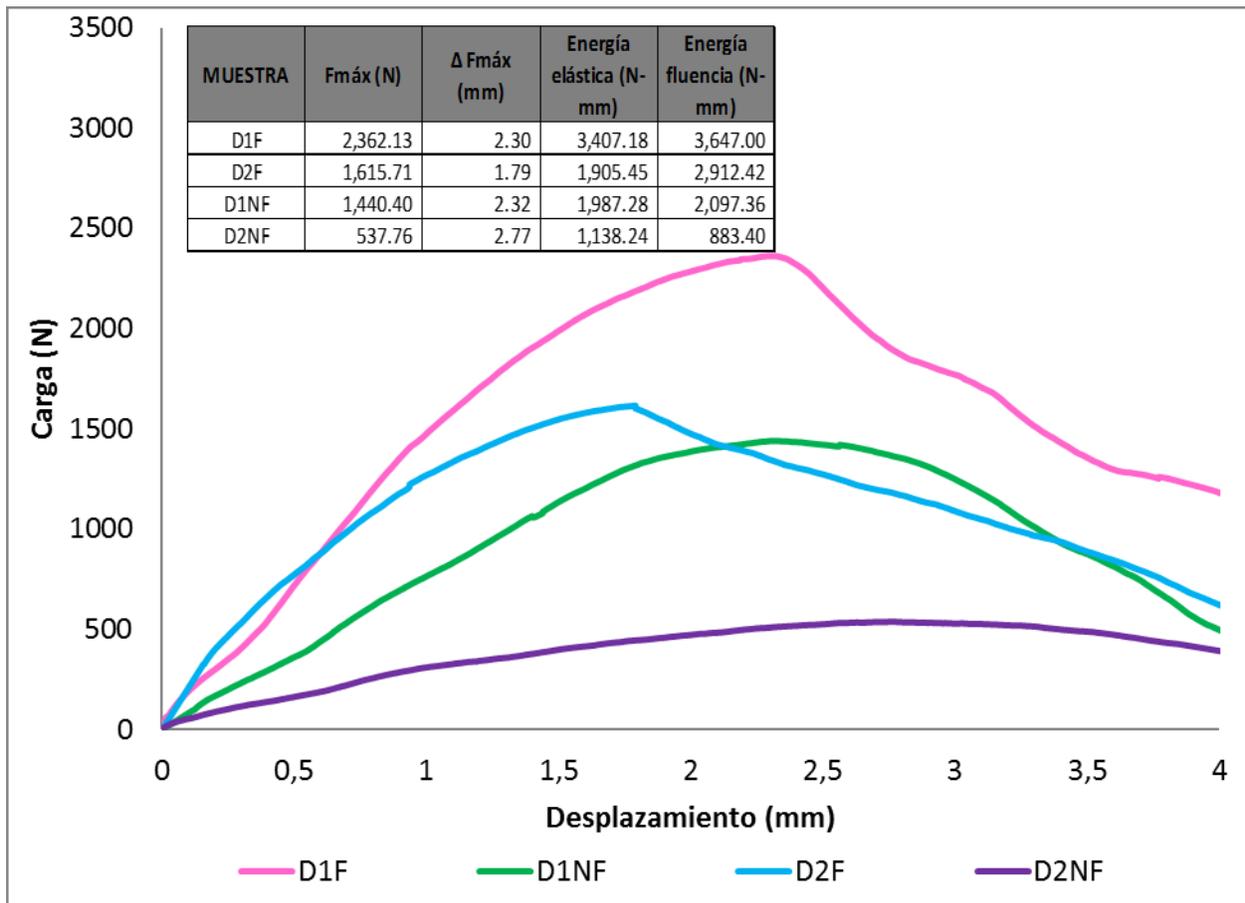
Por último, el microaglomerado y la mezcla drenante con asfalto 50/60 y adición de fibras son las mezclas con el mejor desempeño, sin embargo, en relación con una mezcla convencional MDC-19, tienen un aporte estructural aproximado de la tercera parte. Al realizar un cambio de asfalto (60/70), dicho aporte estructural para ambos casos se aproxima a la cuarta parte, evidenciando un

mejor desempeño de las mezclas con asfaltos más duros. Igualmente puede evidenciarse un incremento mayor de la resistencia de las mezclas drenantes al usar fibras (3% respecto al aumento generado en microaglomerados).

5.7. Ensayo SCB

Para el ensayo SCB se utilizaron 16 especímenes diferentes, es decir 2 probetas por cada tipo de mezcla. Los resultados del ensayo pueden visualizarse a continuación

Figura 68 Ensayo SCB Mezclas Drenantes



Fuente: Elaboración propia

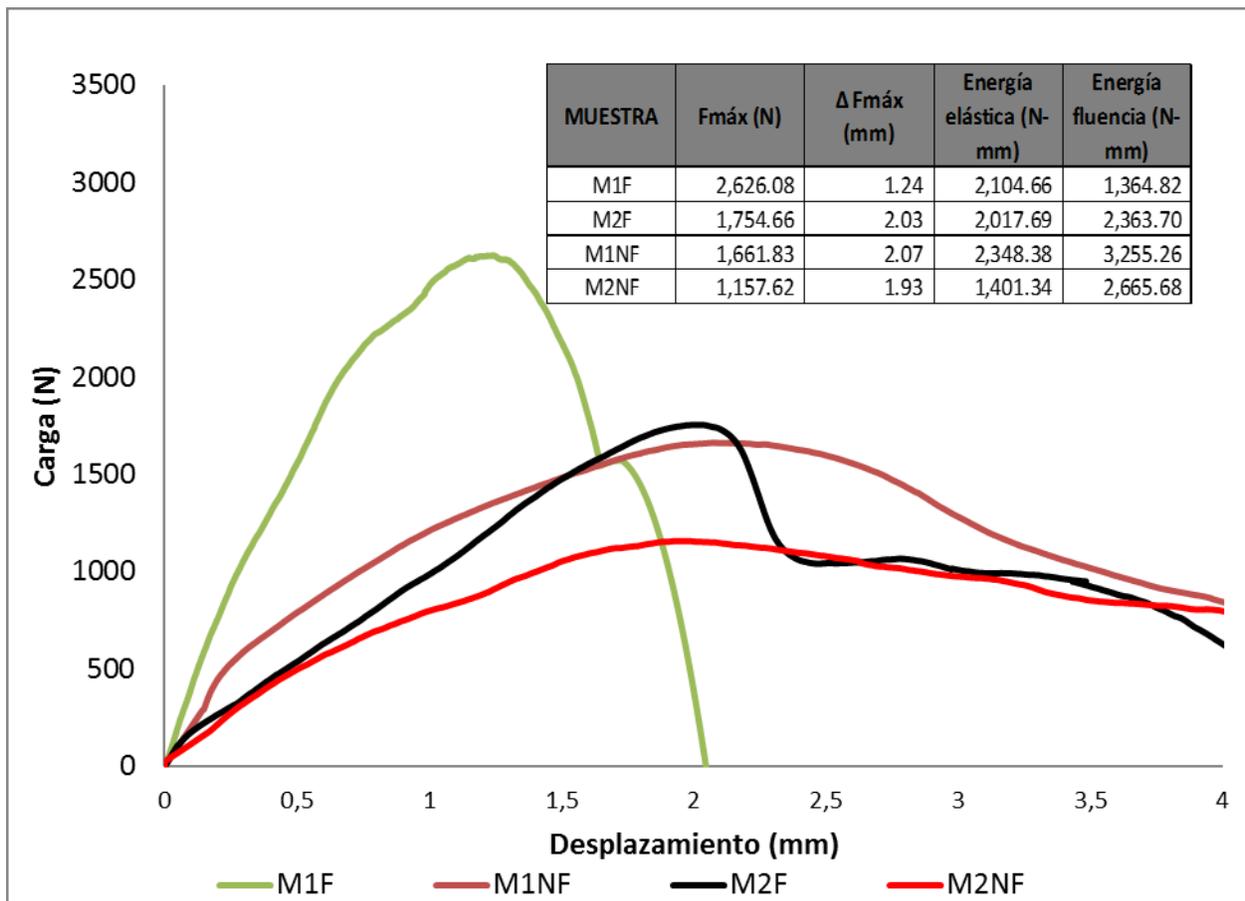
En la Figura 68 y Figura 69 se pueden observar los resultados del ensayo SCB para 4 mezclas asfálticas fabricadas con adición de fibras respecto a sus pares convencionales de referencia. En el análisis de las curvas de carga-desplazamiento se evidencia claramente el comportamiento de fragilidad del microaglomerado con asfalto 1 (50/60) y adición de fibras, el cual soporta cargas elevadas, pero desplazamientos pequeños. Sin embargo, para este resultado en específico, pudo observarse (Figura 70 y Figura 71) la posibilidad que las muestras hayan fallado por los vacíos interconectados y no por la fisura inducida. Adicionalmente, se aprecia que al alcanzar su

resistencia máxima falla en forma súbita, comportamiento característico de materiales rígidos o frágiles. Igualmente, se destaca la baja resistencia obtenida para la mezcla drenante 2 (60/70) sin fibras, fallando de forma similar al microaglomerado 50/60 con fibras.

Por otra parte, las curvas de las mezclas drenantes presentan un comportamiento totalmente contrario (dúctil), el cual muestra poca carga, pero niveles de deformación altos. Para el caso de la mezcla fabricada con asfalto convencional 60/70 se observa una curva con resistencias y desplazamientos más bajos que aquellas mezclas fabricadas con asfalto 50/60.

En general, al hacer una evaluación del efecto de las fibras tanto en mezclas drenantes como en microaglomerados, puede concluirse que la interacción entre el agregado, el ligante y las fibras mejora el rendimiento de la mezcla en un 35% respecto a aquellas sin adición de fibras. El uso de un asfalto más duro 50/60, sobre un asfalto 60/70, genera un aumento de la resistencia del 32% y el cambio de granulometría de drenante a microaglomerado aumenta la resistencia en un 10%.

Figura 69 Ensayo SCB Microaglomerados



Fuente: Elaboración propia

Figura 70 Falla Microaglomerado 1 con fibras Ensayo SCB



Fuente: Elaboración propia

Figura 71 Falla Microaglomerado 2 con fibras Ensayo SCB



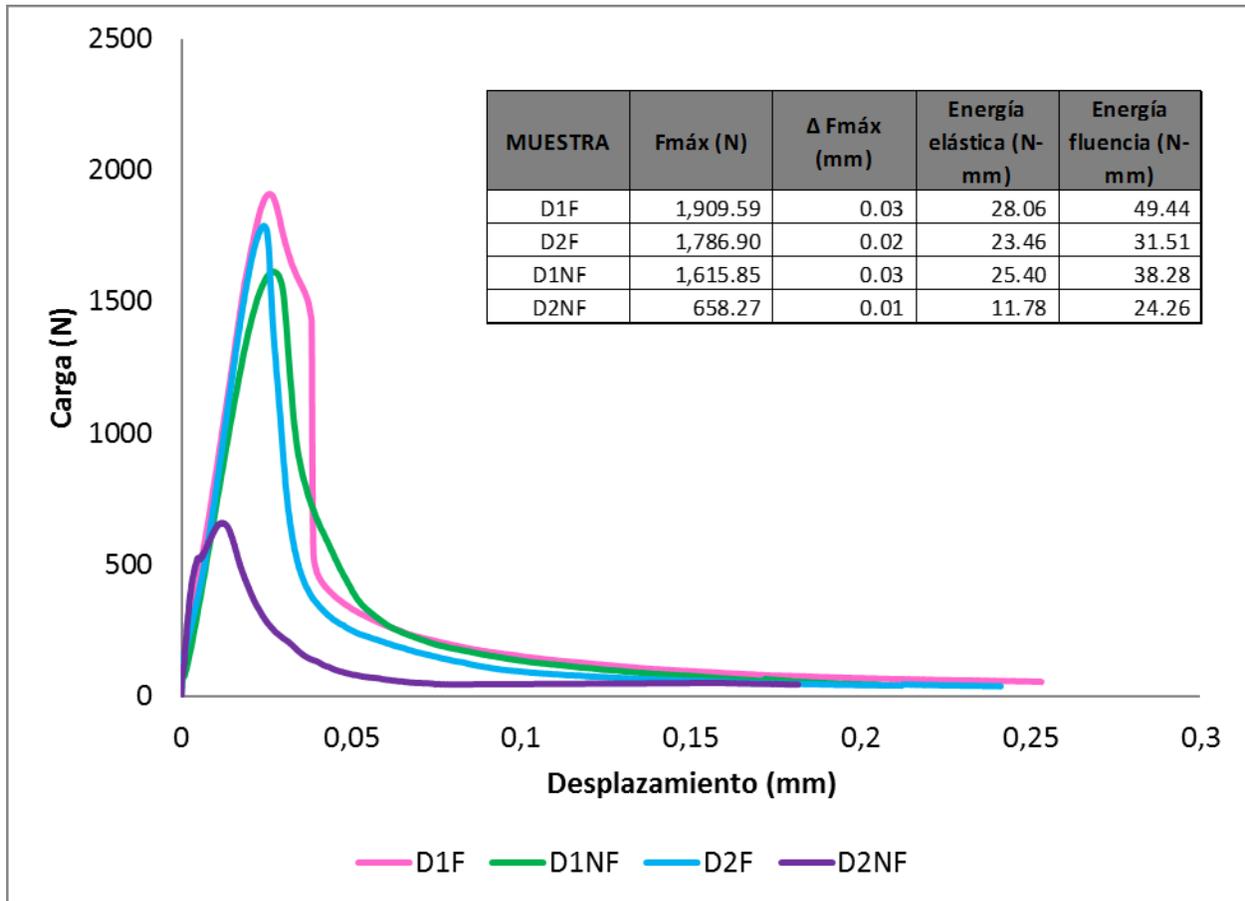
Fuente: Elaboración propia

5.8. Procedimiento Fénix

En la y, se muestran los resultados obtenidos en el procedimiento Fénix, donde se observa que las probetas fabricadas con el asfalto 1 (50/60) presentan la mayor resistencia.

En la Figura 72 se observan los picos de carga para las mezclas drenantes. Para el caso de la mezcla drenante con asfalto 50/60 y adición de fibras, la carga máxima corresponde a 1.909 N, siendo un 15% superior respecto a la carga máxima registrada para la mezcla sin adición de fibras (1.615N). Para las mezclas drenantes con asfalto 60/70, la relación se encuentra alrededor del 63%, dado que el uso de fibras incrementa dicha resistencia de 1.786 N a 658 N, evidenciando un mayor incremento, sin embargo, dicho comportamiento no esperado puede deberse a la falla de la muestra por los vacíos interconectados.

Figura 72 Ensayo Fénix Mezclas Drenantes



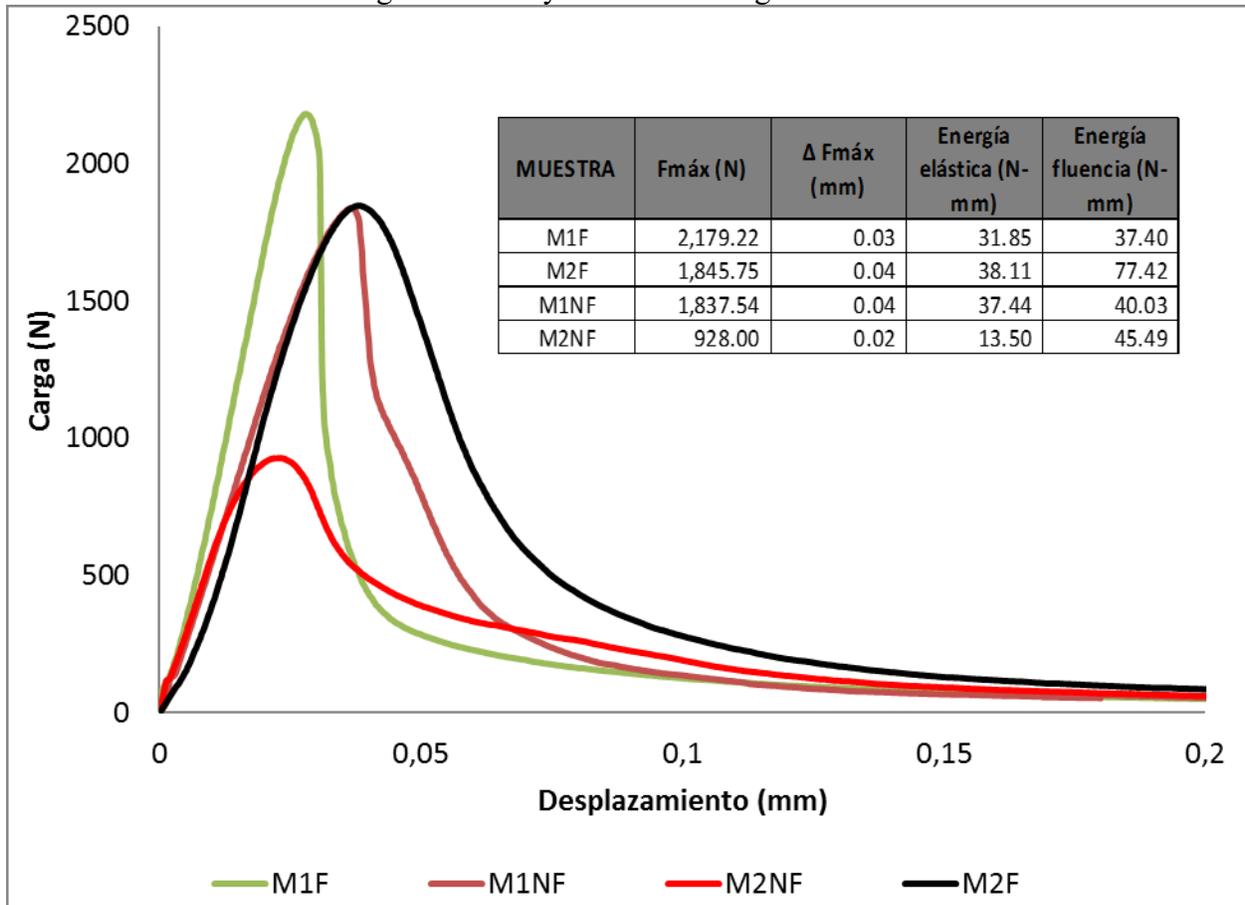
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 73 se observan los picos de carga para los microaglomerados. Para el caso del microaglomerado con asfalto 50/60 y adición de fibras, la carga máxima corresponde a 2.179 N, siendo un 16% superior respecto a la carga máxima registrada para la mezcla sin adición de fibras (1.837 N). Para las mezclas drenantes con asfalto 60/70, la relación se encuentra alrededor del 50%, dado que el uso de fibras incrementa dicha resistencia de 1.845 N a 928 N, evidenciando un mayor incremento.

A pesar de mantener la tendencia de los resultados, es decir microaglomerados con fibras y asfaltos duros con resistencias mayores, la dispersión de los resultados en cuanto al aporte de las fibras es muy alto, pues se encuentra en un rango de 15% - 63%, con un promedio del 36%, similar a lo obtenido en los ensayos SCB y Modulo Resiliente.

El uso de asfaltos 50/60 genera un aporte del 33% respecto a las mezclas con asfaltos 60/70. Finalmente, la disminución de vacíos entre la mezcla drenante y microaglomerado, genera una resistencia mayor del 14%.

Figura 73 Ensayo Fénix Microaglomerados



Fuente: Elaboración propia

Es importante señalar que se encuentran desplazamientos muy bajos en relación con el ensayo SCB, puesto que para la totalidad de las mezclas se obtienen desplazamientos menores a 0.05 m. Por ello y por la dispersión alta, se considera más acertado el uso del ensayo SCB para mezclas drenantes y microaglomerados.

Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones

Las conclusiones y recomendaciones de este proyecto de grado están fundamentadas en los ensayos de laboratorio: Permeabilidad, susceptibilidad al daño por humedad (RTI), módulo resiliente, ensayo SCB, procedimiento Fénix y UCL; permitiendo determinar el desempeño de las mezclas abiertas (microaglomerados y mezclas drenantes) con y sin adición de fibras, estableciendo sus beneficios respecto a las mezclas convencionales. A continuación se presentan las conclusiones derivadas de esta investigación:

- Siendo la permeabilidad la característica más significativa en las mezclas abiertas estudiadas, pudo establecerse mediante el ensayo de permeabilidad de cabeza constante que la adición de fibras o el uso de diferentes tipos de asfaltos, no afecta la drenabilidad de la mezcla. Por lo tanto, el porcentaje de vacíos es el parámetro que incide directamente en la permeabilidad, irrelevantemente de la granulometría o tipo de asfalto. Así mismo, al conservar una permeabilidad alta en las mezclas, se deduce que existirá una rápida evacuación del agua superficial de la capa de rodadura, manteniendo así, distancias de frenado mayores que permitirán al usuario tener una mejor maniobra de los vehículos y disminuyendo el potencial de accidentalidad ante lluvias intensas.
- Las mezclas drenantes y microaglomerados no son incluidas como parte del diseño estructural, sin embargo, este estudio demuestra que su uso es equivalente al 32% de resistencia para el caso de los microaglomerados con fibras y al 23% en el caso de las mezclas drenantes con fibras (tomando como referencia el aporte de una mezcla convencional cerrada MDC-19 en el ensayo de módulo resiliente). El uso de mezclas porosas con fibras es recomendable para frecuencias bajas (típicas de vías urbanas y con bajos volúmenes de tránsito), puesto que su respuesta estructural es mayor en este rango de frecuencias. El ensayo de módulo resiliente, muestra que la relación fibras/ no fibras es superior en un 23% a bajas frecuencias.
- A pesar del alto contenido de vacíos de las mezclas drenantes y microaglomerados, las mezclas no son susceptibles al daño por humedad (Ensayo RTI seco y húmedo), dado que su resistencia conservada (IRC) es superior al 80%. Adicionalmente, se observó a partir de los ensayos de RTI en estado seco, que las mezclas presentan alta rigidez al llegar a la carga máxima y caer súbitamente, mientras que las muestras tras inmersión son dúctiles.
- El uso de fibras aumenta la cohesión y adhesión de las mezclas (valorados de forma indirecta mediante el ensayo UCL), evidenciándose la generación de una microestructura entre el agregado pétreo, la fibra y el ligante. Igualmente, existe mayor pérdida por desgaste en las mezclas con porcentajes de vacíos más altos (mezclas drenantes) y con uso de asfaltos menos duros (60/70). Paralelamente, se encontró un mejor desempeño de las fibras

entre 20° y 30°C, temperaturas típicas de las zonas con mayor pluviosidad del territorio colombiano según datos históricos.

- Se confirmó la aplicabilidad para mezclas abiertas de los ensayos Fénix y SCB, puesto que sus resultados ratificaron los obtenidos con la evaluación del módulo resiliente, sin embargo, es importante el análisis de las fallas de cada una de las muestras de forma puntual, porque el alto contenido de vacíos puede generar resultados no esperados, haciendo que la muestra no falle de forma perpendicular a la fisura inducida.
- Se puede concluir que el desempeño del asfalto 1 (50/60), es mejor que el obtenido con el asfalto 2 (60/70). La rigidez del asfalto 50/60 genera mejoras estructurales con el uso de fibras, evidenciándose en la totalidad de los ensayos mecánicos y dinámicos. El ensayo de módulo resiliente muestra que el uso del asfalto 50/60 tiene resultados superiores al 46% respecto al asfalto 60/70. Para el caso de SCB y Fénix, dichos resultados se encuentran del orden del 60% y 45%.

Finalmente, se puede evidenciar que es viable el uso de fibras para mezclas drenantes y microaglomerados, puesto que su capacidad estructural aumenta considerablemente sin afectar su permeabilidad, y se resalta que la mezcla con el mejor desempeño corresponde al microaglomerado con asfalto 50/60 y adición de fibras, puesto que su drenabilidad es óptima para los niveles de pluviosidad colombianos y su aporte estructural considerable para una capa de superposición.

RECOMENDACIONES

Una vez analizados los datos, se generaron una serie de inquietudes para investigaciones futuras que promuevan el uso de mezclas drenantes y microaglomerados como soluciones a la problemática de accidentalidad nacional y los constantes cambios climatológicos. A continuación, se presentan las recomendaciones:

- Este trabajo debe ser complementado con investigaciones adicionales sobre deformaciones plásticas en mezclas abiertas, para contrarrestar el potencial de ahuellamiento que es proporcional a la cantidad de vacíos de las mezclas.
- Las capas de superposición abiertas se van colmatando con una relativa rapidez, particularmente en zonas con poco tráfico. El tiempo de colmatación varía según las condiciones entre 3 y 7 años. Cuando están colmatadas mantienen, no obstante, una cierta drenabilidad de la superficie que favorece la adherencia neumático-pavimento a velocidad elevada y la reducción de proyecciones de agua, a la vez que se mantiene su microestructura. Sin embargo, se recomienda ahondar más en dicha problemática, y evaluar la incidencia de las fibras en el fenómeno de colmatación, así como iniciar la evaluación de las diversas prácticas de mantenimiento posibles, para evitar dicho fenómeno.

- Igualmente, se recomienda la evaluación de diferentes tipos de fibras y diferentes tipos de asfaltos (modificados) puesto que el mercado ha aumentado su oferta y se requiere más información acerca de su desempeño. Países europeos y asiáticos, han desarrollado múltiples investigaciones con el uso de fibras celulósicas, híbridas con nano sílices, fibras a base de poliuretano y fibras metálicas, por lo tanto, ampliar el escenario nacional permitirá mejorar el rendimiento de las vías locales y de bajo volumen de tráfico.
- Otra de las ventajas de las mezclas abiertas, se relaciona con la disminución de los niveles de ruido, se recomienda evaluar esta propiedad mediante el método de proximidad o el procedimiento estadístico de paso.

Finalmente, para poder evaluar las condiciones reales de drenabilidad, resistencia, ahuellamiento, ruido y colmatación, se recomienda la evaluación de las mezclas con un tramo de prueba, mediante un proyecto de cooperación con entidades, que permita comprobar en obra el funcionamiento y la mejora en las propiedades de las mezclas porosas.

Bibliografía

- IDU Instituto de Desarrollo Urbano. (2017). Concurso de Mérito IDU-CMA-SGDU-034-2017. Bogotá: IDU.
- A. Varveri, J. Z. (2015). Moisture damage in asphaltic mixtures. *Advances in Asphalt Materials - Road and Pavement Construction.*, 303-344.
- Alvarez Lugo, A., Reyes Ortiz, O. J., & Miró, R. (2014). A review of the characterization and evaluation. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 469-482.
- Alvarez, A. E., Epps Martin, A., & Estakhri, C. (2010). A review of mix design and evaluation research for permeable friction course mixtures. *Elsevier*, 8.
- Alvarez, A., Martin, A., Epps, E., & Izzo, R. (2008). Determination of volumetric properties for permeable friction course mixtures.
- Alves Gama, D., Rosa Júnior, J., Alves de Melo, T., & Guedes Rodrigues, J. (2016). Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer. *Construction and Building Materials* 106, 290-295.
- Amundsen, A., & Klaeboe, R. (2005). A Nordic Perspective on Noise Reduction at the Source. *Institute of Transport Economics*.
- Andrade, L. F. (2015). *Cuarta Generación (4G) de Concesiones Viales en Colombia*. Bogotá: ANI.
- Arrieta, V. S. (2013). Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de la mezcla de cemento asfáltico 60-70 con licomont BS-100 para diferentes niveles de precipitación. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Arrieta, V. S. (2013). *Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de la mezcla de cemento asfáltico AC 60-70 con Licomont BD-100 para diferentes niveles de precipitación*. Medellín : Universidad Nacional de Colombia.
- Attarian, J. L. (2010). Greener Alleys. *Public Roads. US Department of Transportation Federal Highway Administration*, 73-6(FHWA-HRT-10-004).
- Avilés Lorenzo, J. (03 de Mayo de 2002). *Estudio de la tenacidad de los microaglomerados reciclados en caliente mediante el ensayo BTB. Efecto del tipo y contenido de betún*. Universitat Politècnica de Catalunya . Recuperado el 2017, de Microaglomerados en caliente - UPCommons: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6270/07.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- Ayala Loza, M. E., & Juárez Alarcón, I. E. (2010). *Diseño de mezcla drenante con asfalto modificado disponible en El Salvador*. San Salvador.
- Bean, E., Hunt, W. F., & Bidelsbach, D. A. (2007). Field survey of permeable pavement surface infiltration rates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering Vol 133 Issue 3*, 249-255.
- Blog Pavimentos*. (16 de Abril de 2018). Obtenido de <http://libro-pavimentos.blogspot.com.co/2012/03/modulo-resiliente-diametral.html>
- Bonnaure FP, H. A. (s.f.).
- Bonnaure, F., Huibers, A., & Boonders, A. (1982). A laboratory investigation of the influence of rest periods on the fatigue characteristics of bituminous mixes. *Assoc Asphalt Pav*, 51-104.
- Brattebo, B., & Booth, D. (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water Resour*, 37, 4369-4376.

- Bruinsma, J., Smith, K., & Peshkin, D. (2017). Use of Permeable Pavements at Airports. *Airfield and Highway Pavements*, 112-124.
- Calzada Pérez, M. (1984). *Desarrollo y normalización del ensayo de pérdida por desgaste aplicado a la caracterización, dosificación y control de mezclas bituminosas de granulometría abierta: ensayo cántabro*. Universidad de Cantabria. Departamento de Transportes y Tecnología De Proyectos y Procesos.
- Cárdenas, J., & Fonseca, E. (2009). Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. *Revista EIA*, 12(ISSN 1794-1237 N), 125-137.
- Centro de Referencia Nacional sobre Violencia del Instituto Nacional de Medicina Legal. (2017). *Cifras de accidentalidad en Colombia*.
- Chen, J., Yin, X., Wang, H., & Ding, Y. (2018). Evaluation of durability and functional performance of porous polyurethane mixture in porous pavement. *Journal of Cleaner Production*, 12-19.
- Chu, L., Fwa, T., & Tan, K. (2017). Evaluation of wearing course mix designs on sound absorption improvement of porous asphalt pavement. (141).
- Clavijo García, H. A., Álzate Ospina, M. A., & Mantilla Meza, L. (2015). Análisis del sector de infraestructura en Colombia. *PMI. Bogotá, Colombia Chapter*.
- Diab, A., & You, Z. (2013). Development of a realistic conditioning and evaluation system to study moisture damage of asphalt materials. *Airfield and Highway Pavement*, 1008-1017.
- E. J. Yoder, M. W. (1975). *Principles of pavement design*. John Wiley & Sons.
- Federal Highway Administration (FHWA). (1990). *Open graded friction courses*. Washington, DC.
- Fernández, I. R. (Septiembre de 2015). Diseño de una mezcla bituminosa drenante con altas tasas de material reciclado. España: Universidad de Cantabria .
- Florida Department of Transportation. (2011). *Pervious Pavements - Installation, Operations and Strength Part 2 : Porous Asphalt Systems. FDOT Project Number: BDK78, Work Order #977-01*. Orlando: FDOT.
- Fondo Mundial para la Seguridad Vial. (2013). *Análisis de la Capacidad de Gestión de la Seguridad Vial*. Colombia: Banco Mundial.
- Foro Económico Mundial (WEF). (2015). se basa en el análisis de 12 pilares de competitividad que incluyen instituciones, infraestructura, salud y educación, eficiencia del mercado laboral, preparación tecnológica, innovación y sofisticación de negocios.
- García , A., Schlangen , E., Van de Ven, M., & Van Vliet, M. (2011). Induction heating of mastic containing conductive fibers and fillers. *Mater Struct* , 499-508.
- García , Á., Schlangen, E., van de Ven, M., & van Bochove, G. (2012). Optimization of composition and mixing process of a self-healing porous asphalt. *Construction and Building Materials*, 59-65.
- Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Sesma Martínez, J. A. (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos*. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Queretaro: Secretaria de Comunicaciones y Transportes.
- Garrote Villar, E. (2006). *El ensayo de tracción indirecta*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- González, D., & García, J. (2004). Artículo Influencia de las Fibras Acrílicas en las mezclas porosas y en las mezclas convencionales.
- H.M. El Hussein, K. K. (1998). Asphalt concrete damage associated with extreme low temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering Vol 10*, 269-274.

- Haffner, T., Bassuk, N., Grabosky, J., & Trowbridge, P. (2007). *Using porous asphalt and CU-Structural Soil*. Ithaca: Cornell University.
- Hernandez Saenz, M. A., Caro, S., Arámbula Mercado, E., & Epps Martin, A. (2016). Mix design, performance and maintenance of Permeable Friction Courses. *Elsevier*, 10.
- Hma Lab . (15 de Abril de 2018). Obtenido de <https://www.hmalabsupply.com/products/auto-scb-semi-circular-bending-test>
- Huang, B., Shu, X., Dong, Q., & Shen, J. (2010). Laboratory Evaluation of Moisture Susceptibility of Hot-Mix Asphalt Containing Cementitious Fillers. *J. Mater. Civ. Eng Vol 22*, 667-673.
- IDU. (2011). *Especificaciones Técnicas Generales De Materiales Y Construcción, Para Proyectos De Infraestructura Vial Y De Espacio Público Para Bogotá D.C.* Obtenido de Instituto de Desarrollo Urbano IDU: <https://www.idu.gov.co/page/siipviales/portafolio-especificaciones-tecnicas-2011>
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y Universidad Militar Nueva Granada (UMNG). (2014). *Estudio del comportamiento mecánico y de desempeño de materiales de infraestructura vial a través de ensayos de laboratorio*. Bogotá D.C.: Convenio No 1819 de 2014.
- Instituto Nacional de Vías. (2007). Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente. *INV 799* . INVIAS.
- Instituto Nacional de Vías, INVIAS. (2017). *INVIAS* . Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
- INVIAS. (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.
- INVIAS. (2013). *Normas de ensayo para materiales de carreteras*. Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos>
- INVIAS, Instituto Nacional de Vías. (2013). ENSAYO DE TENSIÓN INDIRECTA PARA DETERMINAR EL MÓDULO RESILIENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS. Colombia: INVIAS.
- Jil Reyes, L. (2009). *Estudio del comportamiento de los microaglomerados asfálticos discontinuos en caliente aplicados en Chile y revisión de su normativa actual*. Santiago de Chile.
- Kalantar, Z. N., KarimMahre, A., & Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Constr. Build. Mater.* 33, 55-62.
- Kandhal, P. (2002). *Design, construction, and maintenance of open-graded asphalt friction courses*. Lanham: National Asphalt Pavement Association,.
- Kandhal, P., & Mallick , R. (2002). Design, construction, and maintenance of opengraded asphalt friction courses. *National Asphalt Pavement Association*.
- Kandhal, P., & Mallick, R. (1999). Design of New-Generation Open-Graded Friction Course. *NCAT Rep*, 99-103.
- Lee, K. W. (2010). Cool pavements as a sustainable approach to green streets and highways. *Green Streets and Highways 2010 : An interactive Conference on the State of the Art and How to Achieve Sustainable Outcomes*. ProQuest ebrary.
- Lee, S., Mun, S., & Kim, Y. (2011). Fatigue and rutting performance of lime-modified hot mix asphalt mixtures. *Construction and Building Materials Vol 25*, 4202-4209.
- Little, D., & Bhasin, A. (2007). Exploring mechanisms of healing in asphalt mixtures and quantifying its impact. Self-healing materials an alternative approach to 20 centuries of materials science. *Springer Ser Mater Sci*, 100-205.

- Lopes Alfonso, M., Dinis-Almeida, M., & Sena Fael, C. (2017). Study of the porous asphalt performance with cellulosic fibre. *Construction and building materials*, 135, 104-111.
- Lu, Q., & Harvey, T. (2006). Field investigation of factors associated with moisture damage in asphalt pavements. *10th International conference on asphalt pavements ISAP*, 691-700.
- Luchemos por la vida- Asociación Civil. (24 de Mayo de 2018). Obtenido de <http://www.luchemos.org.ar/es/>
- Lyons, K., & Putman, B. (2013). Laboratory evaluation of stabilizing methods for porous asphalt mixtures. *Construction and building materials*, 772-780.
- Mallick, R. B., Kandhal, P. S., & Cooley, L. A. (2000). *Design, construction, and performance of new-generation open-graded friction courses*.
- Martin, W. D., Putman, B. J., & Neptune, A. I. (2014). Influence of Aggregate Gradation on Clogging Characteristics of Porous Asphalt Mixture. *Materials in Civil Engineering*, 26.
- Mehrara, A., & Khodaii, A. (2013). A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 423-442.
- Miró Recasens, J. (1994). Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo.
- Miró Recasens, J. (1994). Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo.
- Miró Recasens, J. R., & Perez Jimenez, F. E. (1994). Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo Cantabro.
- Miró, R. (s.f.). Experiencia europea en predicción del desempeño a largo plazo de pavimentos. *Universidad Politécnica de Cataluña*.
- Miró, R. (2006). Nuevas Mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort (ruido) y la seguridad.
- Miró, R. (2007). Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort (ruido) y la seguridad.
- Miró, R., & Pérez, F. (s.f.). *Experiencia europea en predicción del desempeño a largo plazo de pavimentos*.
- Morales, M. (2008). Vía libre a diseño de carreteras económicamente óptimas . *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*.
- Nejad, F., Azarhoosh, A., Hamed, G., & Azarhoosh, M. (2012). Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*. Vol. 31, 384-388.
- Nielsen, C. B. (2006). Durability of Porous Asphalt-International Experience. Copenhagen, Denmark: Danish Road Institute (DRI).
- Observatorio de Seguridad Vial. (7 de Enero de 2017). Cada día mueren 18 personas en accidentes vehiculares en el país.
- Optimasoil*. (15 de Abril de 2018). Obtenido de <http://www.optimasoil.com/>
- Pardo Martinez, K. M., & Romero Cantillo, O. J. (2014). *Análisis de sensibilidad en lo que respecta al número de ejes y módulo resiliente para el diseño de estructuras de pavimentos flexibles a través de la teoría racional aplicando leyes de fatiga*. Barranquilla: Universidad de la Costa.
- Pérez Jiménez, F. E. (2014). *CEPSA*. Obtenido de https://www.cepsa.com/stfls/CepsaPt/O%20Que%20Oferecemos/Produtos%20Asf%C3%A1lticos/Ficheros_Produtos%20Asf%C3%A1lticos/Manual_Pavimentacao_Web.pdf

- Pérez V., G. J. (Octubre de 2005). La infraestructura del transporte vial y la movilización de carga en Colombia. *Documentos de Trabajo sobre Economía Regional-Banco de la República*(64), 73.
- Pérez, F. E. (1985). Permeámetro LCS". Santander, España: Universidad de Cantabria.
- Pérez, F., Miró, R., & Martínez, A. (2006). *Ensayos de mezclas bituminosas : nuevos criterios. XVII Seminario de Ingeniería de Carreteras*. Zaragoza.
- Polacco , G., Filippi, S., Merusi, F., & Stastna, G. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Elsevier*, 72-112.
- Poulikakos, L., & Partl, M. (2010). Investigation of porous asphalt microstructure using optical and electron microscopy. *Journal of microscopy*.
- Putman, B., & Kline, L. (2012). Comparison of mix design methods for porous asphalt mixtures. *Journal of materials in civil engineering ASCE*, 1359-1367.
- Qiu, X., Wong, W., & Hu, C. (3-6 de Agosto de 2009). Laboratory Performance Evaluation on Polymer Modified Porous Asphalt Concrete. Proquest Ebrary.
- Ranieri, V., Kowalski, K., Berloco, N., Colonna, P., & Perrone, P. (2017). Influence of wax additives on the properties of porous asphalts. *Construction and Building Materials*, 261-271.
- Rebollo, O., González, R., & Botasso, G. (2006). Determinación del porcentaje de ligante óptimo, en mezclas asfálticas abiertas. *Instituto de investigación en Berisso, Argentina*, 17.
- Reyes Ortiz, O. (09 de Junio de 2018). Red Tridimensional Asfalto-Fibra-Agregado Pétreo. Bogotá.
- Rodríguez, J. (2008). Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero.
- Rondón Quintana, H., Fernández Gómez, W., & Castron López, W. (2010). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). *Revista Ingeniería de Cosntrucción* .
- Rondón Quintana, H., Ruge Cárdenas, J., & Moreno Anselmi, L. (2016). Efecto del agua sobre el asfalto y su posible influencia en el daño por humedad en una mezcla asfáltica porosa. *Revista chilena de ingeniería, vol. 24*, 558-569.
- Rondón, A., Reyes , F., Rodriguez, E., & Montealegre, T. (2007). Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia.
- Roulet Mejías, G. A. (2009). *Seguimiento y comparación de caminos de pavimento asfáltico con mezcla drenante*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Sabino, C. A. (1986). El proceso de investigación. Caracas: Panapo.
- Sanchez Sanchez, R. G. (2014). *Estudio del efecto de las condiciones de compactación en la deformación de un suelo sometido a carga cíclica en condiciones edométricas*. Universidad Politecnica de Cataluña.
- Sansalone, J., & Buchberger, S. (1995). An infiltration device for a bestmanagement practices for immobilizing heavy metals in urban highway runoff. *Water SCI. Tech*, 119-125.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes . (2001). *Modulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*. Sanfandila, Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Shadman, M., & Ziari, H. (2017). Laboratory evaluation of fatigue life characteristics of polymer modified porous asphalt: A dissipated energy approach. *Construction and Building Materials*, 138, 434-440.

- Song, I., Little, D., Masad, E., & Lytton, R. (2005). Comprehensive evaluation of damage in asphalt mastics using X-ray CT continuum mechanics, and micromechanics. *Assoc Asphalt Pav*, 885-920.
- Tanzadeh, J., & Shahrezagamasaei, R. (2017). Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nanosilica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures. (144). Recuperado el 15 de Abril de 2017
- Tanzadeh, J., & Shahrezagamasaei, R. (2017). Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nanosilica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 144, 260-270.
- Tarefder, R., & Ahmad, M. (2015). Evaluating the relationship between permeability and moisture damage of asphalt concrete pavements. *J. Mater. Civ. Eng. Vol. 27*.
- Tesoriere, K. (1990). Thermic Effects for Rupture Tests at Indirect Tensile test on Asphalt Concrete. *Proceedings of the Fourth International Symposium Held by RILEM.*, 320-328.
- The McGraw-Hill Companies, Inc. (2011). *Mechanics of Asphalt: Microstructure and Micromechanics*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- TÍTULO III - Normas de comportamiento - Código de Tránsito de Colombia, ARTÍCULO 107. LÍMITES DE VELOCIDAD EN ZONAS RURALES. (2011).
- Torres Rodríguez, J. (2014). *Caracterización de mezclas bituminosas abiertas empleando como aditivo fibras procedentes de residuos de envases brik*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2015). *World Population Prospects. The 2015 Revision*. New York.
- Universidad Politécnica de Cataluña. (15 de Abril de 2018). *Nuevo método de diseño y caracterización de mezclas bituminosas*. Obtenido de http://www.proyectorepara.com/blog/blog_caracterizacion_mezclas.php
- Uppu, K., Hossain, M., Ingram, L., & Kreider, R. (2015). Moisture susceptibility of superpave mixtures with varying binder contents. *Airfield and Highway Pavements*, 86-96.
- Váldez, G., Pérez Jiménez, F., & Botella, R. (2009). Ensayo Fénix, una nueva metodología para medir la resistencia a la fisuración en mezclas asfálticas. *Revista de la construcción*, 8(1), 114-125.
- Vargas B., S. (2015). *Introducción de la tecnología de los microaglomerados asfálticos discontinuos en caliente*.
- Wagoner, M., Buttlar, W., & Paulino, G. (2005). Disk-shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture, *Experimental Mechanics*. Kluwer Academic Publishers.
- Wu, S., Mo, L., Shui, Z., & Chen, Z. (2005). Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers. *Carbon*, 63.
- Yildirim, Y., Dossey, T., & Trevino, M. (2006). Winter maintenance issues associated with new generation open-graded friction courses. *Center for Transportation Research, Austin, TX*.
- Zhang, H., Li, H., Zhang, Y., Wang, D., Harvey, J., & Wang, H. (2018). Performance enhancement of porous asphalt pavement using red mud as alternative filler. *Construction and Building Materials*, 707-713.

- Anexo A. Caracterización de materiales
- Anexo B. Diseño de Mezclas
- Anexo C. Cálculo del Porcentaje de vacíos
- Anexo D. Permeabilidad
- Anexo E. Susceptibilidad al daño por humedad
- Anexo F. Procedimiento UCL
- Anexo G. Módulo Resiliente
- Anexo H. Ensayo SCB - Viga Semicircular Simplemente Apoyada
- Anexo I. Ensayo Fénix