

PROPIEDADES FÍSICAS, REOLÓGICAS Y MECÁNICAS DE UN CEMENTO
ASFÁLTICO 80/100 MODIFICADO POR VÍA HÚMEDA CON ADICIÓN DE
CORCHO

JESSICA ANDREA FORERO BERNAL
JHOYS PIEDAD GARCÍA MEDINA
MARÍA JOSÉ MARTÍNEZ TORRES



UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2015

PROPIEDADES FÍSICAS, REOLÓGICAS Y MECÁNICAS DE UN CEMENTO
ASFÁLTICO 80/100 MODIFICADO POR VÍA HÚMEDA CON ADICIÓN DE
CORCHO

JESSICA ANDREA FORERO BERNAL
JHOYS PIEDAD GARCÍA MEDINA
MARÍA JOSÉ MARTÍNEZ TORRES

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ASESOR DISCIPLINAR
ING. DANIELLA RODRÍGUEZ URREGO
ASESOR METODOLÓGICO
LIC. ROY WALDHIERSEN MORALES PÉREZ



UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA D.C.
2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darnos la constancia y perseverancia para culminar con éxito nuestra carrera, por darnos la paciencia y sabiduría para iniciar, continuar y enfrentar cada obstáculo que se nos presentó a través los años hasta finalizar victoriosas.

A nuestros padres y familiares por que fueron nuestros compañeros de viaje, por ayudarnos a reencontrar el norte cuando todo estaba nublado, por su apoyo incondicional, su paciencia y su amor.

A la ingeniera Daniella Rodriguez, al licenciado Roy Morales y a los laboratorista de la Universidad La Gran Colombia por guiarnos y ayudarnos a desarrollar un proyecto investigativo que permitiera aportar al campo de la ingería civil y a nosotras como profesionales.

A las empresas INCOASFALTOS S.A., MESA HERMANOS Y CIA. y CONCRESCOL S.A. por habernos cedido de su tiempo y materia prima para culminar satisfactoriamente el proyecto investigativo.

A todas aquellas personas que nos brindaron su ayuda y consejos, no solo en el transcurso de esta investigación, sino a lo largo de nuestra carrera.

CONTENIDO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
2.	ANTECEDENTES.....	3
3.	OBJETIVOS.....	8
3.1.	OBJETIVO GENERAL.....	8
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
4.	JUSTIFICACIÓN.....	9
5.	MARCO REFERENCIAL	11
5.1.	MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL	11
5.1.1.	Pavimento	11
5.1.2.	Asfalto	11
5.1.2.1.	Asfaltos modificados	12
5.1.2.2.	Reología del asfalto	12
5.1.3.	Mezclas asfálticas.....	13
5.1.4.	Tipos de mezclas asfálticas	13
5.1.5.	Corcho	14
5.1.6.	Estabilidad	15
5.1.7.	Flujo.....	15
5.1.8.	Ensayo de las briquetas compactadas	16
5.1.8.1.	Determinación del peso específico “bulk” de las briquetas compactadas	16
5.1.8.2.	Análisis de densidad y vacíos.....	17
5.2.	MARCO LEGAL	20
6.	METODOLOGÍA	26
6.1.	ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN.....	26
6.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	26
6.3.	DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	28
6.4.	FASES DE INVESTIGACIÓN	30
6.5.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	32
6.6.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	32

7. MATERIALES	33
7.1. CEMENTO ASFÁLTICO	33
7.2. CORCHO	33
7.3. AGREGADO PÉTREOS.....	33
8. RESULTADOS Y ANÁLISIS	34
8.1. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 80/100	34
8.2. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO	31
8.2.1. Ensayo de penetración (INV E – 706 – 13)	31
8.2.1.1. Índice de penetración (INV E - 724–13)	34
8.2.2. Ensayo de punto de ablandamiento (INV E – 712 - 13)	36
8.2.3. Ensayo de ductilidad (INV E – 702 -13)	37
8.2.4. Ensayo de viscosidad rotacional (INV E- 717–13)	39
8.2.5. Ensayo RTFO (INV E – 720 – 13)	40
8.3. ANALISIS DE RESULTADOS MECÁNICOS	42
8.3.1. Diseño Marshall convencional	42
8.3.2. Diseño Marshall mezcla asfáltica modificada	48
9. CONCLUSIONES	55
10. RECOMENDACIONES	57
11. GLOSARIO	58
12. BIBLIOGRAFIA	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Metodología de los ensayos de laboratorio	27
Tabla 2. Resultados ensayos asfalto convencional	34
Tabla 3. Resultados ensayos mezcla asfáltica modificada con corcho	41
Tabla 4. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica convencional MDC-19	48
Tabla 5. Resumen del Ensayo Marshall para la mezcla asfáltica modificada con corcho	53
Tabla 6. Comparación de los resultados obtenidos con la norma INVIAS	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (a) Quercus Suber. (b) Corcho molido pasa tamiz 80	15
Figura 2. Viscosímetro rotacional	20
Figura 3. Ductíímetro	21
Figura 4. Penetrómetro Humboldt.....	22
Figura 5. Aparato de anillo y bola	23
Figura 6. Horno de pared doble	24
Figura 7. (a) Máquina de ensayo de compresión (b) Compactador Marshall	25
Figura 8. Variables dependientes.....	28
Figura 9. Variables independientes.....	29
Figura 10. Diseño de investigación.	31
Figura 11. Prueba RTFO derrame del material	41

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Penetración Vs Contenido de Corcho.....	34
Gráfica 2. Punto de ablandamiento	36
Gráfica 3. Ductilidad.....	37
Gráfica 4. Viscosidad en función de la temperatura.....	39
Gráfica 5. Densidad Bulk Vs Contenido de asfalto.....	42
Gráfica 6. Vacíos Vs Contenido de asfalto	43
Gráfica 7. Estabilidad Vs Contenido de asfalto	45
Gráfica 8. Flujo Vs Contenido de asfalto	46
Gráfica 9. Rigidez Vs Contenido de asfalto	47
Gráfica 10. Densidad Bulk Vs Contenido de corcho.....	49
Gráfica 11. Vacíos Vs Contenido de corcho	50
Gráfica 12. Estabilidad Vs Contenido de corcho	51
Gráfica 13. Flujo Vs Contenido de corcho.....	52
Gráfica 14. Rigidez Vs Contenido de corcho	53

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En un principio el cemento asfáltico convencional resistía a las condiciones del tránsito y del clima, pero hoy en día la vida útil de una estructura de pavimento no solo dependen de esas condiciones, según Montejó (2006)¹, depende de variables como: la calidad de los materiales, las cargas de los ejes, los procesos constructivos, el diseño de las capas, a la mayor presión de inflado, a las mayores velocidades y especialmente la respuesta de los materiales ante estas variables. Hace que se requieran para la elaboración de mezclas asfálticas, un ligante con mejores propiedades reológicas y mecánicas. Por consiguiente, el campo de la ingeniería civil se encuentra en la exploración de nuevas tecnologías encaminadas a minimizar el deterioro del medio ambiente y mejorar el desempeño de los materiales utilizados.

La modificación del asfalto permite mejorar las características reológicas y mecánicas, especialmente a elevadas temperaturas de servicio, ejemplo de esto es la implementación de un asfalto modificado con diversos materiales reutilizables que permiten mejorar sus propiedades mecánicas con el fin de brindarle al pavimento una larga vida útil.

El fin de modificar el asfalto es el de obtener beneficios tales como: “aumentar la resistencia a la fatiga de las mezclas, aumentar la rigidez a altas temperaturas de servicio mejorando la resistencia de las mezclas a la deformación permanente, mejorar la adición con los agregados pétreos, disminuir la susceptibilidad térmica en el rango de temperatura de servicio, reducir la rigidez a bajas temperaturas previniendo la fisuración térmica”².

¹ MONTEJO FONSECO, Alfonso. Ingeniería de los pavimentos. Evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías. 3 ed. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2006. p. 301

² Ibíd., p. 303

El presente trabajo de investigación comprende la utilización del corcho como material alternativo para modificar el ligante asfáltico 80/100 por vía húmeda con el fin de aprovechar las propiedades que este residuo tiene, tales como: elasticidad, impermeabilidad a líquidos y gases, aislante térmico y acústico, alto poder de fricción, resistencia al desgaste mecánico, compresibilidad, durabilidad, entre otros. Es una investigación en curso, donde inicialmente se identificarán propiedades a partir de los ensayos reológicos y mecánicos, para posteriormente con estos resultados se propongan nuevas investigaciones futuras al respecto.

Por consiguiente, tomando las características que ofrece el corcho y en la carencia de investigaciones relacionadas con la utilización de este en Colombia, el objetivo de incluir el corcho en el pavimento para el análisis del comportamiento de la mezcla asfalto-corcho, es ampliar el rango de materiales reciclables que se pueden utilizar para generar mejores mezclas asfálticas.

Mediante esta investigación se busca conocer ¿Cuál es el comportamiento de las propiedades físicas, reológicas y mecánicas al modificar una mezcla asfáltica MDC-19 con la adición de corcho por vía húmeda?

2. ANTECEDENTES

En el mundo, la tecnología de los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada con el propósito de mejorar las propiedades y características de los pavimentos convencionales, desarrollando modificaciones con una diversidad de materiales que permiten aumentar propiedades como la cohesión y la adhesividad, aumentar el tiempo de vida útil del pavimento y disminuir los costos por operación de mantenimiento, demostrando que “el uso de cemento asfáltico modificado es una técnica de solución viable al problema de baja calidad vial que posee el país”³. En Colombia el Instituto Nacional De Vías (INVIAS) desde el año de 1996 transformó las normas de los ensayos de materiales para carreteras destinadas al control de los métodos constructivos y a la modificación de los diseños de mezclas para el aprovechamiento de sus “características mecánicas; es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular); incrementando su adherencia a la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aún en presencia del agua”⁴.

Según el documento: Estado del conocimiento de asfaltos modificados en Colombia y su influencia en la pavimentación⁵, los aditivos que más se usan en las mezclas de asfalto son los residuos de llanta (26%) ya que proporciona un mejoramiento en la recuperación elástica por torsión y garantizando una mayor resistencia a la deformación, el poliestireno (15%) cuando es trabajado en una mezcla asfáltica MDC-1 según la INV E 2007, pues da un aumento a la vida útil del asfalto modificado, así como un alto coeficiente costo-beneficio, el PVC(15%) aumentando

³ PÉREZ, María A. et al. Estado del conocimiento de asfaltos modificados en Colombia y su influencia en la pavimentación. En: Revista virtual de los programas de ingeniería. Universidad de San Buenaventura. [En línea]. 2012. vol. 14 No.6, p. 89-105 [citado 11 septiembre, 2015]. Disponible en: <http://letravirtual.usbctg.edu.co/index.php/ingeniator/article/viewFile/290/273>

⁴ GAMBOA, Jhon. Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas modificadas vs mezcla tradicional, Bucaramanga Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana. [En línea]. 2012. vol. 4, [citado 28 mayo, 2015]. Disponible en: <http://apuntesdeinvestigacion.upbbga.edu.co/>

⁵ PÉREZ, María A. Op. Cit., p. 90

su dureza y un mejoramiento significativo de las propiedades a largo plazo y el polietileno (11%) cuando se usa por vía húmeda experimenta una mayor rigidez; pero dentro de estos aditivos no se encuentra el corcho como material en las mezclas modificadas de asfalto, se encuentran trabajos de investigación con materiales diferentes a los anteriormente mencionados, materiales como fibras, cenizas volantes, látex natural, fique, ceras naturales, cal, relleno mineral, entre otros, por tal motivo se pretende desarrollar este proyecto de investigación con el corcho como material dentro de las mezclas de asfalto modificado.

Con el aumento de la población y su crecimiento demográfico representan factores importantes que provocan diferentes problemas al medio ambiente, en Bogotá se han creado resoluciones que apoyan un ecosistema sostenible, de tal manera que haya una normalización e implementación en el diseño de mezclas asfálticas el uso del caucho de llanta reciclada, el cual se puede realizar tanto por vía húmeda modificando el asfalto, o por vía seca usándola como agregado con el fin de aumentar la vida útil del pavimento. Los experimentos con caucho reciclado se vienen realizando por ingenieros desde la década de los años cincuenta donde se ha incorporado lentamente el caucho en el diseño de las mezclas asfálticas, dando excelentes resultados y haciendo que su uso se incremente con el pasar del tiempo.

El pavimento al disminuir su vida útil como consecuencia de su exposición a factores como las altas temperaturas, humedad y elevados niveles de tránsito, presentan diferentes problemas de deformación, fatiga, piel de cocodrilo, desprendimiento de agregados, agrietamiento en bloque, abultamiento, hundimientos, huecos, entre otros, por lo que se busca mejorar las propiedades mecánicas del pavimento e incrementar su vida útil, utilizando materiales alternativos que sean amigables con el medio ambiente, los materiales más empleados en la modificación del asfalto son los productos de desechos industriales (polímeros), elastómeros (látex), plastómeros (policloruro de vinilo), residuos electrónicos, poliestireno, polietileno,

caucho de neumático⁶, entre otros, debido a que las investigaciones en el área de los pavimentos están relacionadas con la necesidad de producir económica y ambientalmente mezclas asfálticas, desarrollando nuevos diseños de mezclas que brinden buenos resultados en las propiedades mecánicas de los pavimentos.

El corcho es un material que se ha utilizado estratégicamente durante los últimos 5.000 años, con múltiples aplicaciones, desde botellas de vino hasta en procesos de aeronáutica⁷, aunque también es manejado como un material aislante utilizado en tuberías, plantas de refrigeración, refinerías de petróleo, estudios de sonido, inclusive se fabrican objetos de uso cotidiano con corcho, debido a las excelentes propiedades que tiene este material, es por eso que “No existe un material natural o artificial que una a la vez las siguientes características: ligereza, elasticidad, compresibilidad, impermeabilidad, aislamiento, absorción acústica, alto coeficiente de rozamiento y durabilidad”⁸.

Varios estudios se han llevado a cabo en el pasado con respecto al uso de caucho y corcho granulado en la industria de la construcción, resaltando que es un material elástico, el cual tiene una gran capacidad de recuperar las deformaciones que sufren después de aplicarles una carga. A finales del siglo XIX un fabricante de chalecos salvavidas⁹ encontró accidentalmente que era posible producir corcho auto-aglomerado, llamado hoy en día como panel de corcho aislante, este fue el inicio de un nuevo mundo de oportunidades en las que el valor comercial del corcho aumentó. Sin embargo, en la industria de la pavimentación de asfalto, sólo los

⁶ RONDÓN, Hugo et al. Experiencias sobre el estudio de materiales alternativos para modificar asfaltos. En: Revista Ingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas. [En línea]. 2009. vol. 14 no.2, [citado 17 abr., 2015]. ISSN 0124-8170. Disponible en: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/2376/3256>

⁷ GIL, Luis. Cork composites: a review. En: Materials 2009. [En línea]. 2009, p.776. [citado 11 septiembre, 2015]. Disponible en: http://www.researchgate.net/publication/26635525_Cork_Composites_A_Review

⁸ FERNANDEZ, Laureano. El corcho en la construcción. [pdf] [citado 1 abr., 2015]. Disponible en: <http://goo.gl/fm1mlk>

⁹ GIL, Luis. Op. cit., p. 777

granulados de caucho se utilizan ampliamente, siguiendo dos métodos diferentes para la incorporación de caucho en mezclas asfálticas, estos son conocidos como vía seca y vía húmeda, creando así mezclas más resistentes a fenómenos de falla del pavimento como la fatiga, ahuellamiento, fisuras y grietas, piel de cocodrilo, envejecimiento etc. Además de mejorar las propiedades reológicas del asfalto aumentando su elasticidad ligante, su resistencia al deslizamiento entre otros, contribuyendo así a la disminución de la producción de ruido de los neumáticos en el pavimento¹⁰.

En el 2009, la Universidad de Beira Interior en Portugal, junto con el Instituto superior técnico de Lisboa (ICEMS) y la Unidad de tecnología del corcho del Instituto Nacional de ingeniería, Tecnología e investigación (INETI), desarrollaron un proyecto de *Aglomerados de corcho como material central ideal estructuras ligeras*¹¹ donde se pretendía optimizar las propiedades de aglomerados a base de corcho como material ideal de componentes sándwich de estructuras ligeras, como en las aplicadas a nivel aeroespacial; llegaron a la conclusión de que el rendimiento de los aglomerados de corcho dependen especialmente del tamaño del corcho y su densidad; estos resultados también permiten inferir que los aglomerados de corcho tienen un mejor comportamiento mecánico al tener una mejor resistencia a la compresión específica respecto a algunas espumas hechas a base de polímeros rígidos, el corcho por su estructura alveolar similar a la de un panal, tiene una fuerte influencia sobre las propiedades mecánicas de los materiales a base de corcho. Así mismo al comparar el corcho con otros materiales, el corcho presenta un mejor límite de tensión de corte al núcleo, lo que reduce la propagación de grietas. Material eficiente por su capacidad de absorción de energía con un daño mínimo de su

¹⁰ PEREIRA, Simão M.S. et al. Mechanical performance of asphalt mixtures produced with cork or rubber granulates as aggregate partial substitutes. En: Construction and Building Materials. [En línea]. Abril, 2013 vol. 41. p. 209–215. [citado 8 mayo, 2015]. Disponible en: <http://goo.gl/wij4jj>

¹¹ OSVALDO, José M Silva. et al. Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. En: Materials and Design. [En línea]. 2009, p.1-7. [citado 11 septiembre, 2015]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909002738>

estructura, lo que resulta en mejores propiedades de resistencia al impacto cuando se espera que la carga de impacto durante su servicio sea alta.

En la Universidad del Miño en Portugal, se hizo una investigación sobre el *rendimiento mecánico de mezclas de asfalto producido con el corcho y granulados de caucho como sustitutos parciales del agregado*¹², en las que una de las conclusiones a las que llegaron fue que la mezcla del asfalto con corcho muestra excelentes resultados de resistencia a la rotura respecto a los otros materiales analizados en este trabajo investigativo; así mismo, en los resultados del test de pérdida de masa, la mezcla con corcho muestra un mejor comportamiento puesto que los especímenes utilizados tenían un menor contenido de vacíos de aire en comparación con las otras mezclas analizadas, por otro lado el corcho y el asfalto tenían una mejor adherencia entre sus partículas debido a la estructura alveolar de las partículas del corcho, conclusiones a las que llegaron mediante laboratorios que determinaran las propiedades físicas y reológicas de las mezclas, y a nivel de su morfología mediante las imágenes del microscopio SEM y coinciden con las del anterior proyecto investigativo mencionado, donde relacionaban el buen comportamiento mecánico del corcho por su estructura celular y morfológica.

¹² PEREIRA, Simão M.S. et al. Op. cit., p. 209-215

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento de las propiedades físicas, reológicas y mecánicas de un cemento asfáltico 80/100 modificado por vía húmeda con corcho.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las propiedades físicas y reológicas del cemento asfáltico modificado con corcho junto con el cemento asfáltico convencional.
- Identificar las propiedades mecánicas de una MDC-19 convencional y modificada con corcho a partir del ensayo Marshall.
- Comparar el comportamiento de las propiedades físicas, reológicas y mecánicas que presenta la mezcla asfáltica modificada con corcho frente a la mezcla asfáltica convencional.

4. JUSTIFICACIÓN

Debido al gran auge que tiene hoy en día la utilización de materiales alternativos en los proyectos de ingeniería basados en la innovación ambiental, se hace necesario estar en la búsqueda constante de nuevos materiales que contribuyan al medio ambiente. Las obras ingenieriles requieren de la utilización de materiales y recursos naturales para llevar al cabo la construcción de algún proyecto, esto genera impactos negativos al medio ambiente; debido a esto “los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales cuando experimentan niveles elevados de tránsito y gradientes de temperatura.”¹³ Lo que se busca es mejorar algunas propiedades mecánicas y reológicas del asfalto tales como la susceptibilidad térmica, la rigidez y la resistencia al envejecimiento, a las deformaciones plásticas y a la fatiga ya sea por factores climatológicos y del tránsito.

El objetivo de esta investigación es indagar sobre el uso que tiene el corcho cuando se incorpora a un asfalto 80/100 con el fin de analizar su comportamiento frente a las propiedades mecánicas y reológicas de una mezcla asfáltica convencional, resaltando los usos y las ventajas que el corcho ofrece al área de la ingeniería, ya que este es un material aislante de ruido y térmico que se utiliza en la terminación de interiores, en aislamiento de pisos, en aislamiento en fundaciones, en aislamiento de cubiertas y techos, en aislamiento de paredes interiores y exteriores, resistencia natural para la humedad; además es un material que actualmente se está empleando en la dilatación del concreto en estructuras como túneles, sistemas de almacenamiento y distribución de agua, acueductos, presas y aeropuertos.

Las ventajas más significativas del uso del corcho en el asfalto 80/100 corresponden a los beneficios que brinda como material alternativo para el

¹³ RONDÓN, Hugo. Op. Cit., p. 20

desarrollo sostenible de carreteras en el país, es decir que esta investigación también busca disminuir la utilización de los recursos naturales y de materiales pétreos utilizados en la construcción de carreteras, y sustituirlos por el corcho buscando vías más sostenibles que permitan mejorar características del pavimento, es por esto que juega un rol importante tanto el asfalto como el material alternativo que se desea implementar, en este caso el corcho ya que los porcentajes de los mismos pueden variar los factores que buscan mejorar las propiedades reológicas o mecánicas de la muestra. Todo lo anterior se basa en mejorar las condiciones de transitabilidad por las carreteras generando que la mezcla asfáltica modificada con corcho cuando ya se encuentre en su estado de serviciabilidad mejore la vida útil, la seguridad, la comodidad y la resistencia del pavimento, siendo resistente tanto a los agentes climatológicos como a los esfuerzos transmitidos por las cargas del tránsito.

El fin de esta investigación es generar nuevas exploraciones en el ámbito de los materiales alternativos, para que estos además de aumentar las propiedades mecánicas y reológicas de la mezcla asfáltica, aporte beneficios en la disminución de costos en la construcción de una vía desde que se realiza el diseño de la misma hasta que se pone en servicio dicha vía.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL

5.1.1. Pavimento

El pavimento es una estructura construida por un conjunto de capas de diversos materiales seleccionados, superpuestos y compactados sobre la superficie del terreno. Su principal función es proporcionar una superficie de rodamiento uniforme que permita el tráfico seguro de los vehículos, bajo cualquier condición climática y a muy bajo costo. Hay diferentes tipos de pavimento según el volumen de tráfico y el tipo de vehículos que transitan. Se puede clasificar como: rígido, semirrígido, flexible, semiflexible y articulado¹⁴.

5.1.2. Asfalto

El asfalto es un material derivado del petróleo, el cual se puede encontrar en la naturaleza en yacimientos naturales o puede ser obtenido como subproducto de la destilación de determinados crudos de petróleo. Es viscoso y de color negro, mezclado con arena o gravilla se utiliza para pavimentar carreteras, es un material con muchas aplicaciones, se emplea en la construcción de carpetas, superficie de rodamiento, impermeabilización de estructuras, relleno de juntas de los pavimentos de concreto hidráulico, etc.

Tiene una consistencia sólida¹⁵, al calentarlo se ablanda y se vuelve líquido, lo que permite recubrir o agregarlos durante el proceso de fabricación de mezcla asfáltica en caliente.

¹⁴ Asociación de productores y pavimentadores asfálticos de Colombia. Cartilla del pavimento asfáltico: Generalidades del pavimento. 2004. p. 6. ISBN 958-33-6312-X.

¹⁵ Ibíd., p. 10

Según Marín (2004)¹⁶, el asfalto es considerado un material de gran interés debido a sus propiedades viscoelásticas, haciéndolo muy resistente, adhesivo, impermeable, duradero, entre otras características. Ofrece una flexibilidad controlable a las mezclas de agregados con las que son combinados.

En Colombia solo se obtienen en el proceso de refinación de petróleo dos tipos de asfaltos, identificados por el INVIAS a partir de diferentes ensayos según su nivel de penetración, estos pueden ser 60/70 o llamados también como “Apiay” y el “Barrancabermeja” con penetración 80/100.

5.1.2.1. Asfaltos modificados

Es un asfalto con propiedades mejoradas, al que se le adicionan diferentes materiales alternativos como polímeros termoestables, termoplásticos, residuos electrónicos, etc., pueden ser incorporados por vía húmeda (modificando el cemento asfáltico) o por vía seca (sustituyendo parte de los agregados). Esta modificación puede mejorar las propiedades mecánicas y reológicas de las mezclas asfálticas convencionales.

5.1.2.2. Reología del asfalto

La reología es una de las propiedades más importantes del asfalto “Hace referencia a la variación de las propiedades de flujo a través del tiempo de aplicación de una carga, e incluye una propiedad muy importante como lo es la viscosidad”¹⁷. Cuando el asfalto se encuentra sometido a altas temperaturas se comporta como un fluido

¹⁶ MARÍN HERNÁNDEZ, Alberto. Asfaltos modificados y pruebas de laboratorio para caracterizarlos. Trabajo de grado Ingeniero Civil. México, D.F. Instituto Politécnico Nacional. Facultad de Ingeniería Civil, 2004. 135 p.

¹⁷ ESTRADA, Juan. GONZALEZ, Alejandro. Mejoramiento de mezclas asfálticas drenantes utilizando como ligante el asfalto – caucho. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería Civil, 2002. P. 139.

viscoso, mientras que a bajas temperaturas se comporta como un sólido con propiedades elásticas. Por ello, se requiere estudiar la viscosidad, ya que en todas las aplicaciones del asfalto es necesario modificarla por medio del calentamiento.

5.1.3. Mezclas asfálticas

Una mezcla asfáltica¹⁸ es una combinación de asfalto y agregados pétreos en proporciones exactas previamente especificadas, estas proporciones determinan las propiedades y características de una mezcla. Dentro de las principales características para una mezcla asfáltica se encuentran: estabilidad, durabilidad, impermeabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia al deslizamiento.

5.1.4. Tipos de mezclas asfálticas

Existen distintos tipos de mezcla asfáltica¹⁹, dependiendo del tipo de asfalto, la proporción de agregados en la mezcla, la granulometría del agregado y el proceso de fabricación.

En las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías – INVIAS, se encuentra, entre otras, las siguientes posibilidades: Mezcla densa en frío, mezcla abierta en frío, mezcla densa en caliente, mezcla abierta en caliente, mezcla discontinua en caliente para capa de rodadura y mezcla drenante o discontinuas. Se puede hacer la modificación de las mezclas por vía seca o por vía húmeda.

¹⁸ Asociación de productores y pavimentadores asfálticos de Colombia. Op. Cit., p. 22.

¹⁹ *Ibíd.*, p.22

5.1.5. Corcho

El corcho es un material natural que se obtiene de la corteza del alcornoque (*Quercus Suber*), se encuentra principalmente en el mediterráneo, cuenta con inigualables características naturales que lo hacen único en las que se pueden resaltar su capacidad para regenerarse después de ser extraído de su corteza, su elasticidad, levedad, compresibilidad, adherencia, resistencia a la fricción, durabilidad, etc., además es un material que no contamina, se puede reciclar y reutilizar.

El corcho es el único cuerpo sólido que tiene la propiedad de comprimirse sin dilatación lateral. Además, recupera hasta el 85% de su volumen inicial 24 horas después de haber sido sometido a una presión.

Está compuesto de un 45% Suberina que es la que protege al corcho de patógenos externos, 27% Lignina que proporciona rigidez e impermeabilidad a la membrana celular, 12% Celulosa y polisacáridos permiten que el corcho obtenga resistencia al estiramiento, 6% Taninos hacen que el corcho no se pudra, 5% Ceroides hacen que el corcho sea impermeable y un 6% de materias minerales como (sodio, potasio, magnesio, aluminio, etc.), agua y glicerina²⁰.

La producción mundial de corcho es de 340.000 toneladas, esta producción no produce contaminación al ecosistema del que es extraído, ya que se realiza sin tener que talar ningún árbol, y su ciclo natural vuelve a iniciar pocas horas después de su extracción regenerando su corteza nuevamente.

²⁰ ASECOR. Corcho, un producto natural. Propiedades del corcho. [En línea]. Disponible en: <http://www.asecor.com/corcho.php?lang=es&sec=2> [citado 1 abr., 2015].

Figura 1. (a) *Quercus Suber*. (b) Corcho molido pasa tamiz 80



Fuente: (a) <http://www.barnacork.com/el-corcho/ique-es-el-corcho.html>

(b) Autoras

5.1.6. Estabilidad

La estabilidad²¹ de una mezcla asfáltica es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

5.1.7. Flujo

Según el documento de La Universidad de Piura: “Diseño de mezclas asfálticas”²², el flujo, medido en centésimas de pulgada representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en

²¹ Diseño de mezclas asfálticas. Biblioteca Universidad de Piura. [en línea]. [citado 07 octubre, 2015]. Disponible en: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf

²² *Ibíd.*, p. 73

servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

5.1.8. Ensayo de las briquetas compactadas

En el método de ensayo Marshall, cada muestra compactada se somete a los siguientes ensayos y en el orden indicado:

- I. Determinación del peso específico “bulk”.
- II. Ensayo de estabilidad y flujo.
- III. Análisis de densidad y vacíos.

5.1.8.1. Determinación del peso específico “bulk” de las briquetas compactadas

El peso específico de una briketa compactada se determina mediante la siguiente expresión:

$$Gb = \frac{Wa}{W_{ss} - W_w}$$

Siendo

G_b = peso específico “bulk”.

W_a = peso de la briketa seca en el aire.

W_w = peso de la briketa en el agua.

W_{ss} = peso en el aire de la briketa saturada y superficialmente seca.

5.1.8.2. Análisis de densidad y vacíos

Debe realizarse el análisis de densidad y vacíos para cada muestra de la siguiente forma:

- a. Se promedian los pesos específicos “bulk” de todas las briquetas.
- b. Se calcula el peso específico promedio del agregado total, mediante la expresión:

$$G_{agr} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \dots}$$

Donde

G_{agr} = peso específico promedio del agregado.

$P_1, P_2, P_3 \dots$ = Porcentajes en peso de cada una de las fracciones de material que intervienen en el total del agregado.

$G_1, G_2, G_3 \dots$ = Pesos específicos de los materiales.

- c. Se determina el porcentaje en volumen que ocupa el agregado de la siguiente manera:

$$V_{agr} = \frac{\%agregados \times G_b}{G_{agr}}$$

Donde

V_{agr} = volumen que ocupa el agregado.

G_b = peso específico “bulk”.

G_{agr} = peso específico del agregado.

- d. Se calcula el peso específico máximo teórico de la muestra, el valor se calcula así:

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{\% \text{ agregados}}{G_{agr}} + \frac{\% \text{ cemento asfáltico}}{G_{asf}}}$$

Donde

G_{mm} = peso específico máximo teórico.

G_{agr} = peso específico del agregado.

G_{asf} = peso específico del cemento asfáltico.

- e. Se calcula el porcentaje de vacíos con aire respecto al volumen total de la briqueta.

$$V_v = 1 - \frac{G_b}{G_{mm}} * 100$$

Donde

V_v = porcentaje de vacíos con aire.

G_b = peso específico “bulk”.

G_{mm} = peso específico máximo teórico.

- f. Se calcula el volumen de asfalto efectivo como porcentaje de volumen total de la briqueta.

$$V_{ae} = 100 - (V_{agr} + V_v)$$

Donde

Vae = volumen de asfalto efectivo.

Vagr = volumen que ocupa el agregado.

Vv = porcentaje de vacíos con aire.

- g.** Se determina el porcentaje de vacíos en los agregados en la mezcla compactada.

$$V_{am} = 100 - V_{agr}$$

Donde

Vam = porcentaje de vacíos en los agregados.

Vagr = volumen que ocupa el agregado.

5.2. MARCO LEGAL

- **DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL (INV E- 717-13).**

La viscosidad es la resistencia del material a fluir. No es una propiedad intrínseca del asfalto, es decir, depende de la temperatura y del tipo de ensayo que se realiza. La viscosidad rotacional se determina midiendo el torque necesario para mantener constante la velocidad rotacional de un vástago cilíndrico sumergido en la muestra a una temperatura constante.

Este ensayo permite encontrar una relación en la variación de la viscosidad del asfalto en función de la temperatura. La prueba tiene por finalidad determinar la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que el pavimento suele experimentar durante su servicio.

Figura 2. Viscosímetro rotacional



Fuente: Autoras

- **DUCTILIDAD DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS (INV-E-702-13)**

La ductilidad es la capacidad para mantenerse cohesionado bajo las deformaciones inducidas por el tránsito. Este es un ensayo que consiste en someter el material a tracción, determinando la longitud máxima que se estira la muestra en cm hasta el instante de su rotura. (5cm/minuto, 25° C). Es un ensayo principalmente de identificación que cuantitativo. Los asfaltos provenientes de destilación del petróleo al vapor o al vacío muestran alta ductilidad, en tanto que en los obtenidos por oxidación o soplado la ductilidad es baja.

Figura 3. Ductímetro



Fuente: Autoras

- **PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS (INV E-706-13)**

Determina la consistencia de los materiales asfálticos, mediante la penetración de una aguja normalizada de 100 gramos que penetra verticalmente el material en condiciones definidas de carga, en un tiempo de 5 segundos y a una temperatura de 25°C, definida como la distancia y expresada en décimas de milímetro.

Figura 4. Penetrómetro Humboldt



Fuente: Autoras

- **PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS (APARATO DE ANILLO Y BOLA) (INV E-712-13)**

Es la temperatura a la cual el cemento asfáltico se vuelve lo suficientemente blando como para comenzar fluir. El concepto del punto de ablandamiento es algo arbitrario y no corresponde exactamente a un cambio físico del producto, por cuanto la consistencia del asfalto disminuye gradualmente sin presentar un punto de fusión definido.

Figura 5. Aparato de anillo y bola



Fuente: Autoras

- **EFFECTO DEL CALOR Y DEL AIRE SOBRE EL ASFALTO EN LÁMINA DELGADA Y ROTATORIA (INV E – 720 – 13)**

La durabilidad de un asfalto está determinada por el envejecimiento que sufre el material. Este envejecimiento se debe principalmente a dos factores: el proceso de mezclado en caliente en una planta de mezclado y la acción del medio ambiente durante el servicio.

El ensayo RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) muestra la calidad que tiene el asfalto después de fabricar la mezcla asfáltica en caliente. Al asfalto envejecido se le realizan ensayos para conocer el cambio cuando se fabrica la mezcla en caliente. Con esto se conocen las propiedades y comportamiento del mismo en el momento en que empieza a desempeñarse como pavimento.

Figura 6. Horno de pared doble



Fuente: Autoras

- **ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL EQUIPO MARSHALL (INV E-748 – 13).**

Este método se emplea para dosificar mezclas en caliente de agregados pétreos y ligante asfáltico. Permite el diseño de mezclas en laboratorio, y el control de éstas en campo, para poder verificar las correctas proporciones de ligante y agregado. Los aspectos que evalúa el método son:

- La estabilidad para garantizar la respuesta de la mezcla asfáltica a las exigencias del tránsito cuando se encuentra puesta en servicio.
- La cantidad de asfalto presente en la mezcla para asegurar el recubrimiento y la adherencia entre los agregados y la perfecta impermeabilización de las capas subyacentes de los pavimentos.

- Control de los vacíos con aire presentes en la mezcla después de haber sido compactada, como una reserva para las deformaciones producidas por las cargas del tránsito.

Figura 7. (a) Máquina de ensayo de compresión (b) Compactador Marshall



(a)



(b)

Fuente: Autoras

6. METODOLOGÍA

6.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

El enfoque de investigación es de tipo cuantitativo porque se realizan procesos inductivos, es decir que se explora y recolecta información por medio de ensayos de laboratorio para determinar las propiedades del asfalto convencional y modificado, de este modo evaluar el comportamiento de la mezcla con adición de corcho y determinar cuál es el porcentaje óptimo, estableciendo las ventajas y desventajas de la mezcla asfáltica modificada en cada uno de los porcentajes seleccionados, haciendo uso de las herramientas necesarias para cuantificar, recolectar y analizar la información que dé respuesta a la pregunta de investigación.

6.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo exploratoria porque no se encuentran investigaciones previas sobre mezclas asfálticas modificadas por vía húmeda con corcho, por lo que será necesario indagar, explorar y recolectar la información que sea necesaria, se debe ser cuidadoso con la información recolectada sobre el asfalto, las mezclas que se modifican con sus diferentes métodos, además de la información hallada sobre el corcho, con el fin de darle veracidad a la investigación y autenticidad a los resultados obtenidos de los ensayos correspondientes al proyecto.

Tabla 1. Metodología de los ensayos de laboratorio

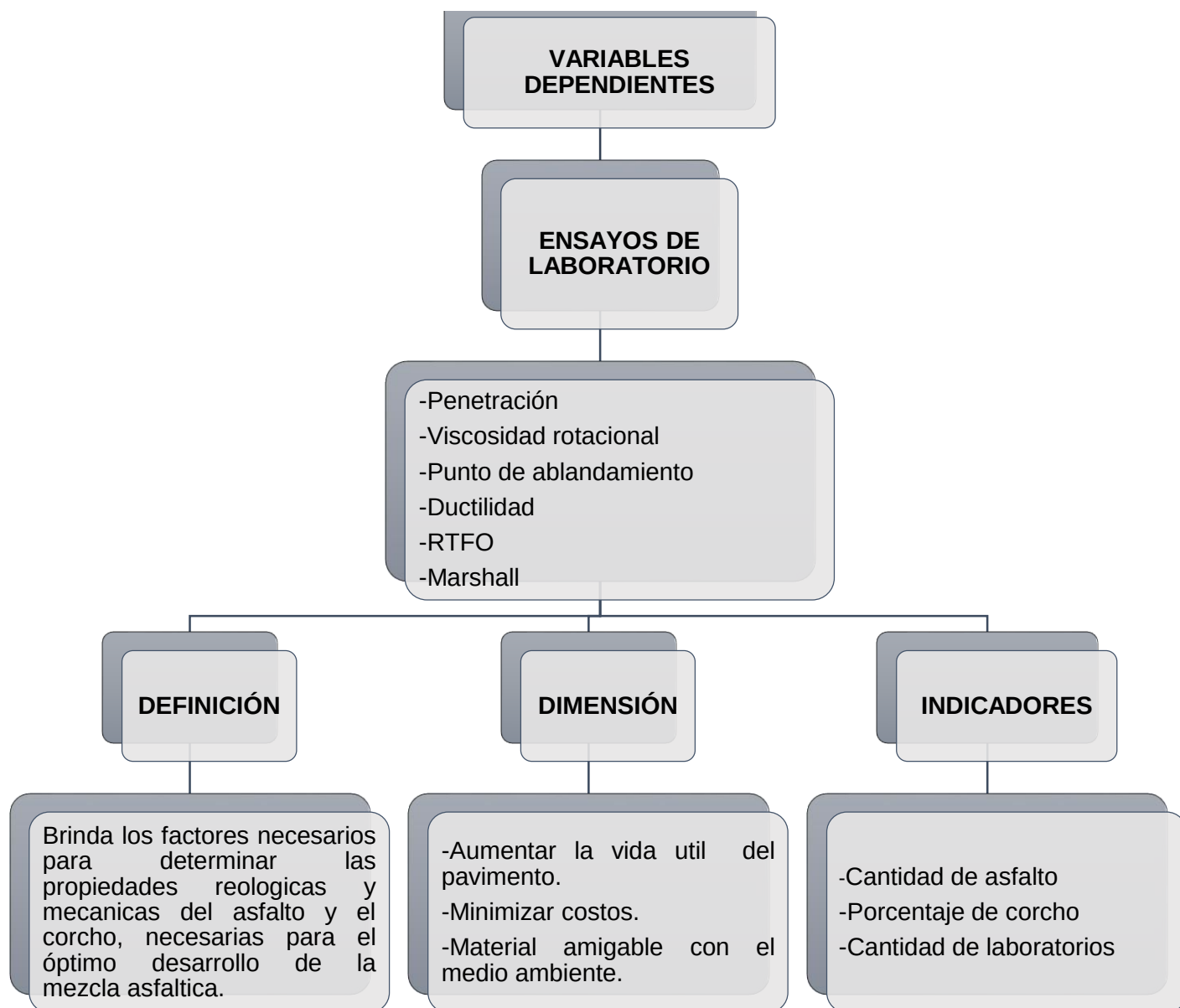
ENSAYO	METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO	
PENETRACIÓN Y DUCTILIDAD	Temperatura	25°C
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	Temperatura	-
VISCOSIDAD ROTACIONAL	Temperatura	100, 135 y 150°C
	RPM	10, 20 y 50
RTFO	Temperatura	163°C
MARSHALL CONVENCIONAL	Temperatura de mezcla	150°C
	Temperatura de compactación	135 - 140°C
	Tiempo de mezcla	30 Minutos
	Origen agregado	Concrescol
	Origen Corcho	Portugal
	No. de golpes por capa	75 Golpes
	No. de briquetas	15 Briquetas
MARSHALL MODIFICADO	Temperatura de mezcla	150°C
	Temperatura de compactación	135 - 140°C
	Tiempo de mezcla	30 Minutos
	Origen agregado	Concrescol
	Origen Corcho	Portugal
	No. de golpes por capa	75 Golpes
	No. de briquetas	9 Briquetas

Fuente: Autoras

6.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

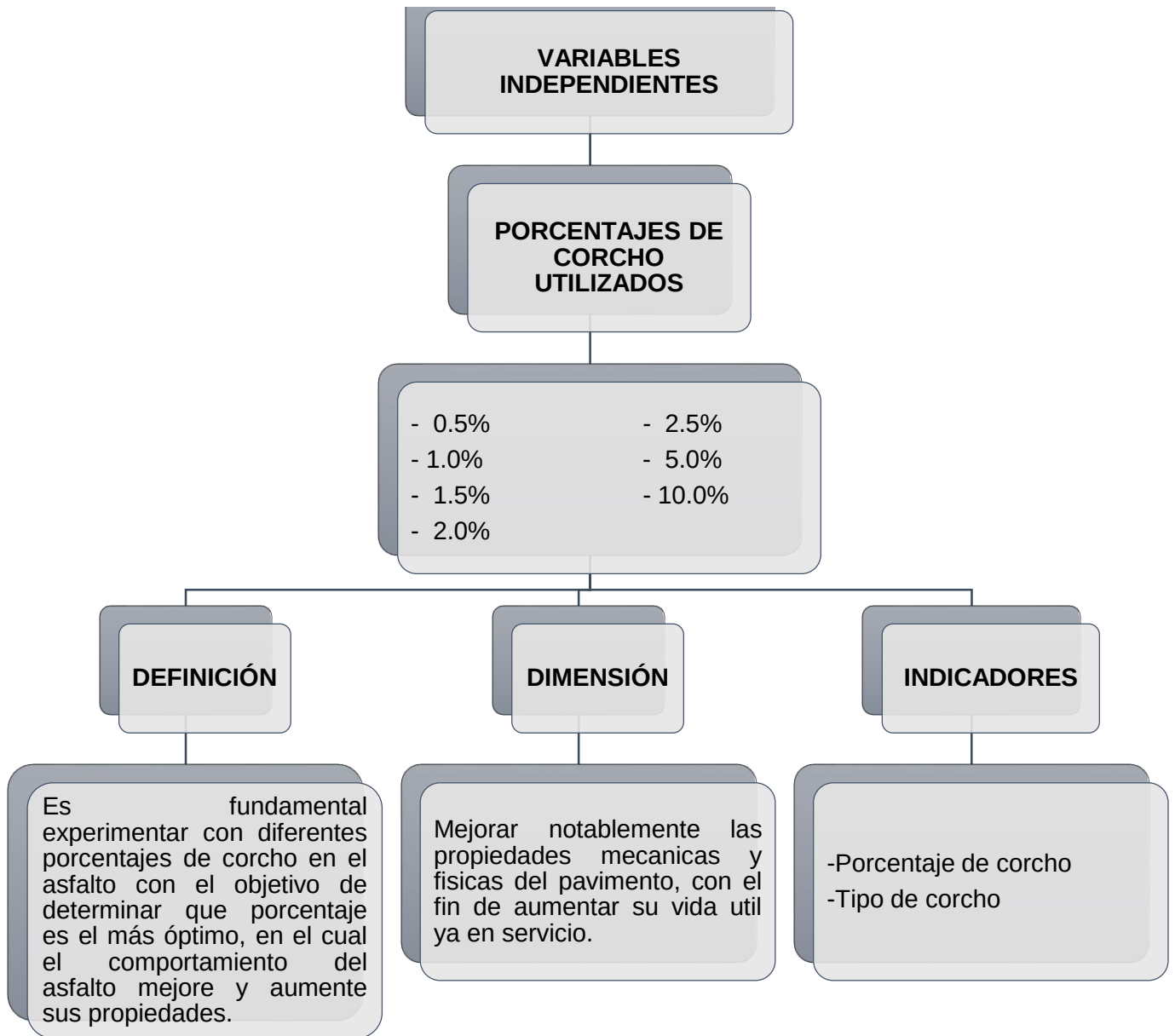
Al realizar la definición y la operacionalización se debe definir que variables con dependientes e independientes en el diseño de la mezcla asfáltica modificada.

Figura 8. Variables dependientes



Fuente: Autoras

Figura 9. Variables independientes



Fuente: Autoras

6.4. FASES DE INVESTIGACIÓN

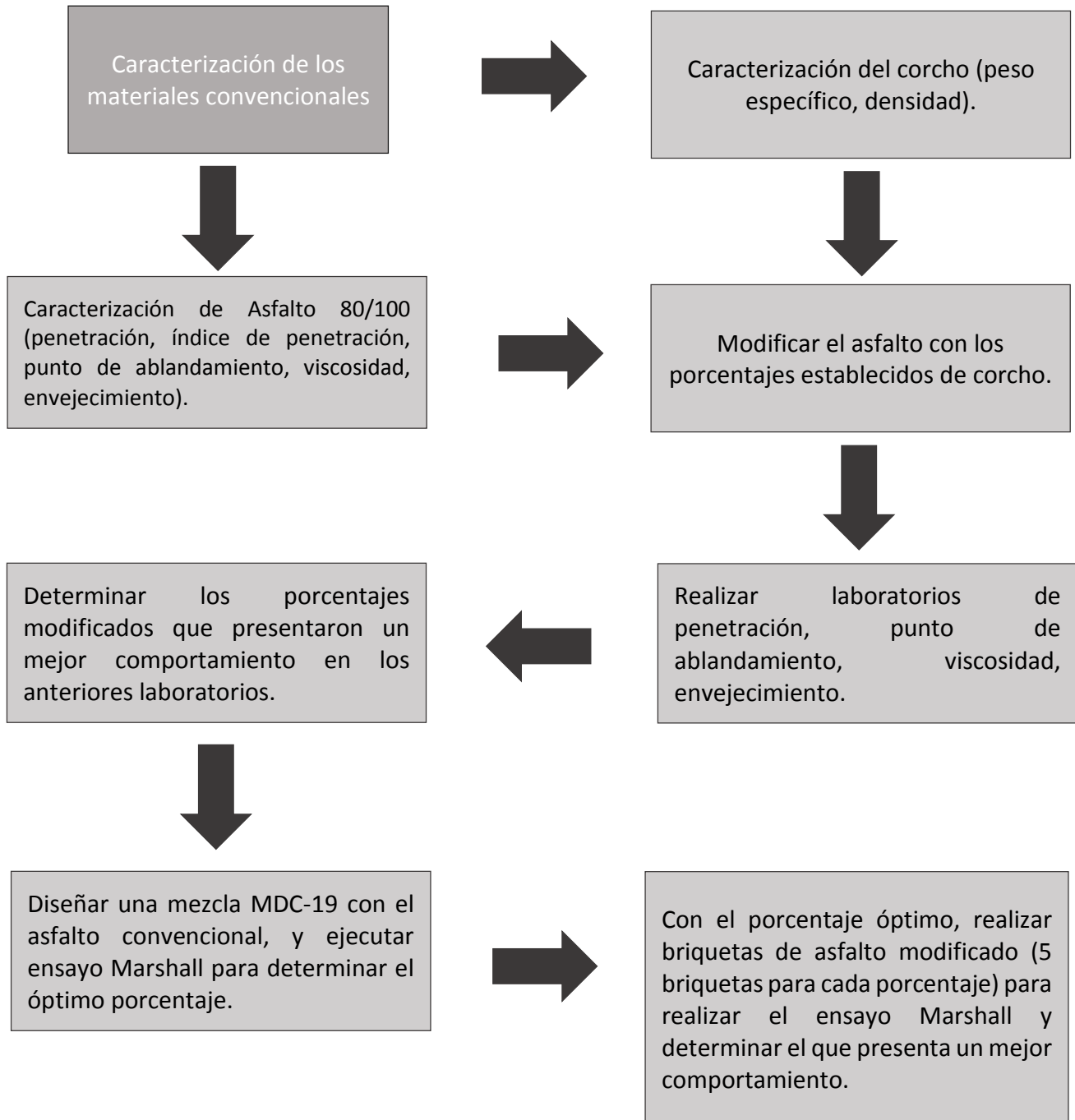
El desarrollo de la presente investigación se realizó en diferentes fases las cuales se describen a continuación:

- I. **Recopilación de información:** Se desarrolló una revisión de conceptos sobre temas relacionados con asfaltos convencionales, mezclas asfálticas modificadas, métodos de diseño de mezclas asfálticas, normas empleadas para la realización de los diferentes ensayos aplicados a las muestras, entre otros.
- II. **Caracterización física:** Se realizaron los ensayos de penetración, ductilidad, punto de ablandamiento y RTFO para poder determinar las propiedades del cemento asfáltico convencional como del cemento asfáltico modificado con corcho.
- III. **Caracterización reológica:** Se desarrolló el ensayo de viscosidad rotacional, tanto para el cemento asfáltico convencional como para el modificado con corcho.
- IV. **Caracterización mecánica:** Primero se realizó el ensayo Marshall sobre las mezclas convencionales empleando porcentajes de asfalto de 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 y 6.5%, con el fin de realizar el diseño Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto. El ensayo realizado a la mezcla asfáltica fue el de resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall (INV E – 748 – 13) y el diseño MDC-19 se realizó con base en los criterios presentes en el artículo 450-13 de las especificaciones generales de construcción del INVIAS (2013).

Las muestras de mezcla asfáltica modificada se fabricaron del tipo Marshall (compactadas a 75 golpes por cara) utilizando la mezcla modificada en las proporciones 0,5%, 1,0% y 1.5% de adición de corcho y realizando respectivamente 3 briquetas por porcentaje.

- v. Análisis de la información:** Los ensayos elaborados permitieron realizar la comparación de las propiedades una mezcla asfáltica modificada por vía húmeda con corcho respecto a una mezcla de asfalto convencional.

Figura 10. Diseño de investigación.



Fuente: Autoras

6.5. POBLACIÓN Y MUESTRA

La investigación busca determinar el comportamiento de una mezcla asfáltica modificada por vía húmeda con corcho en proporciones del 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%, 5.0% y 10.0% p/p; para así, determinar la condición más favorable en cuanto a contenidos óptimos de asfalto y cantidad optima de agentes modificadores para un buen desempeño del asfalto.

6.6. TÉCNICAS DE ANÁLISIS Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para la determinación del contenido óptimo de asfalto, se hace un diseño de mezcla densa en caliente tipo MDC-19 donde se preparan 3 briquetas por cada uno de los porcentajes de variación (4,5%, 5%, 5,5%, 6% y 6.5%), para luego aplicar el ensayo del método Marshall, con el propósito de analizar su estabilidad y flujo y determinar cuál es el que mejor comportamiento mecánico tiene. Después de determinar el porcentaje óptimo de mezcla, se procede a hacer la fabricación de las briquetas de asfalto modificado con corcho, ejecutando nuevamente el método Marshall para estas briquetas y determinar cual tiene un mejor comportamiento mecánico según los porcentajes modificados seleccionados.

7. MATERIALES

7.1. CEMENTO ASFÁLTICO

El cemento asfáltico empleado en este trabajo investigativo, fue una muestra 80/100 de planta de la empresa INCOASFALTOS S.A., localizada en el municipio de Mosquera, Cundinamarca. En el Anexo A se encuentra la ficha técnica del asfalto.

7.2. CORCHO

El corcho utilizado en esta investigación proviene de la empresa Mesa hermanos & CÍA, producto que importan desde Portugal, así mismo, el corcho se tamizó en el tamiz 80 para poder efectuar la modificación del asfalto. La información correspondiente al corcho se detalla en el Anexo B.

7.3. AGREGADO PÉTREOS

Los agregados analizados y usados en este trabajo, provienen de la empresa CONCRESCOL, estos agregados los extraen del río Coello.

Los datos referentes a los agregados empleados se encuentran en el Anexo C.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

8.1. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 80/100

El cemento asfáltico empleado en la investigación proviene de la planta de la empresa INCOASFALTOS S.A., localizada en la zona rural del municipio de Mosquera y corresponde a un asfalto 80/100, haciendo la caracterización de este material con los diferentes laboratorios planteados en el marco teórico-referencial, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 2. Resultados ensayos asfalto convencional

ENSAYO	UNIDAD	NORMA DE ENSAYO INV	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO
			Min.	Máx.	
Penetración (25°C)	0,1 mm	E-706	80	100	90
Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola	°C	E-712	42	53	48
Viscosidad a 100°C	cP	E-717	1000	-	2600
Ductilidad a 25°C	cm	E-702	100	-	>150
PERDIDA DE MASA EN EL HORNO DE LAMINA ASFALTICA DELGADA EN MOVIMIENTO (INV E-720) Y ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO					
Pérdida de masa	%	E-720	-	1,0	0,41
Penetración del residuo luego del residuo de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento.	%	E-706	-	5,0	62

Fuente: Autoras

8.2. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO

8.2.1. Ensayo de penetración (INV E – 706 – 13)

El ensayo de penetración se *determina midiendo en decimas de milímetros la profundidad que entra una aguja normalizada en una muestra de asfalto con unas condiciones específicas de tiempo, temperatura y carga*²³. Este ensayo se encarga de medir si la muestra asfáltica se encuentra en condiciones líquidas, sólidas o semisólidas, bajo 25°C de temperatura, 100 g de carga y 5 segundos de tiempo que exige la norma, el fin de este ensayo es clasificar el asfalto en grados normalizados y determinar si la consistencia de la muestra asfáltica varía en relación con la densidad.

En La gráfica 1 se observa que la muestra de asfalto convencional con 0% de adición de corcho arroja una penetración es de 90 dmm, y a medida que aumenta el porcentaje de corcho incorporado al asfalto su rigidez incrementa significativamente. Para el ensayo de penetración se utilizaron 8 porcentajes diferentes de corcho los cuales fueron adicionados al asfalto sustituyendo por el asfalto peso sobre peso (p/p) con el fin de su respectiva modificación, siendo estos 0%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5%, 5,0%, y 10%. De acuerdo a los resultados de la gráfica 1, el Cemento Asfáltico (CA) convencional tuvo una penetración de 90 dmm, identificando un CA 80/100. Al modificar el CA se obtuvo que para el 0,5% de adición de corcho (CH) la penetración fue de 73,3 dmm aumentando su rigidez un 18,56%, para el 1,0%(CH) se obtuvo una penetración de 71,67 dmm aumentando su rigidez un 20,37% con respecto al convencional, para el 1,5%(CH) la penetración fue 68,33 dmm, para el 2,0% la penetración fue 65,20 dmm aumentando la rigidez en un 27,56%, y para el 2,5% aumentó su rigidez un 30,56%. Al presentar una

²³ VILLARINO OTERO, Alberto. Materiales bituminosos. Escuela Politécnica Superior de Ávila España. [En línea]. Disponible en: <http://ocw.usal.es/enseñanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%207-%20MATERIALES%20BITUMINOSOS.pdf> [citado 25 oct., 2015].

modificación superior al 5,0%(CH) la penetración superó las 55dmm, incrementando su rigidez hasta un 47.03% con la adición del 10%. Comparando con el asfalto convencional se determina que la penetración expresada en 1/10mm, disminuye progresivamente con el incremento de corcho, reduciendo la penetración hasta un 53% al modificarla con el 10%; por ende se identifica una mayor resistencia a la penetración lo cual eleva su rigidez a medida en que aumenta el porcentaje de corcho con el que se modifica la muestra de asfalto.

Se comprobó que el asfalto modificado con corcho se rigidiza excesivamente a partir del 5% de adición, lo cual provoca que el materia tienda a fracturarse, provocando fenómenos de deterioro del pavimento, como lo son las fisuras y sus tipos ya sean longitudinales, transversales, en las juntas, por reflexión, en medialuna, de borde y en bloque, su alta rigidez también puede provocar los fenómenos de piel de cocodrilo, descascaramiento, y baches; por lo cual al analizar la gráfica 1 se identifica que para el asfalto modificado se obtiene un óptimo que se encuentra dentro del 0 y 5% puesto que dentro de este rango el material asfáltico no se rigidiza tanto y al compararlo con otros materiales los cuales han sido utilizado para la modificación de la asfalto como los polímeros se encuentra que estos también dan como resultado un aumento significativo es su rigidez.

- **Varianza**

Siendo:

σ^2 = varianza

X_i = datos obtenidos de cada repetición del ensayo

$\bar{X}$ = promedio

n = numero de datos

Promedio	67
----------	----

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n}$$

$$\sigma^2 = \frac{(90 - 67)^2 + (73,3 - 67)^2 + (71,67 - 67)^2 + (68,33 - 67)^2 + (65,2 - 67)^2 + (62,5 - 67)^2 + (57,33 - 67)^2 + (47,67 - 67)^2}{8}$$

$$\sigma^2 = \frac{(23)^2 + (6,3)^2 + (4,67)^2 + (1,33)^2 + (-1,8)^2 + (-4,5)^2 + (9,67)^2 + (-19,33)^2}{8}$$

$$\sigma^2 = \frac{529 + 39,69 + 21,80 + 1,76 + 3,24 + 20,25 + 93,50 + 373,64}{8}$$

$$\sigma^2 = 135,36$$

- **Desviación estándar**

Siendo:

S = desviación estándar

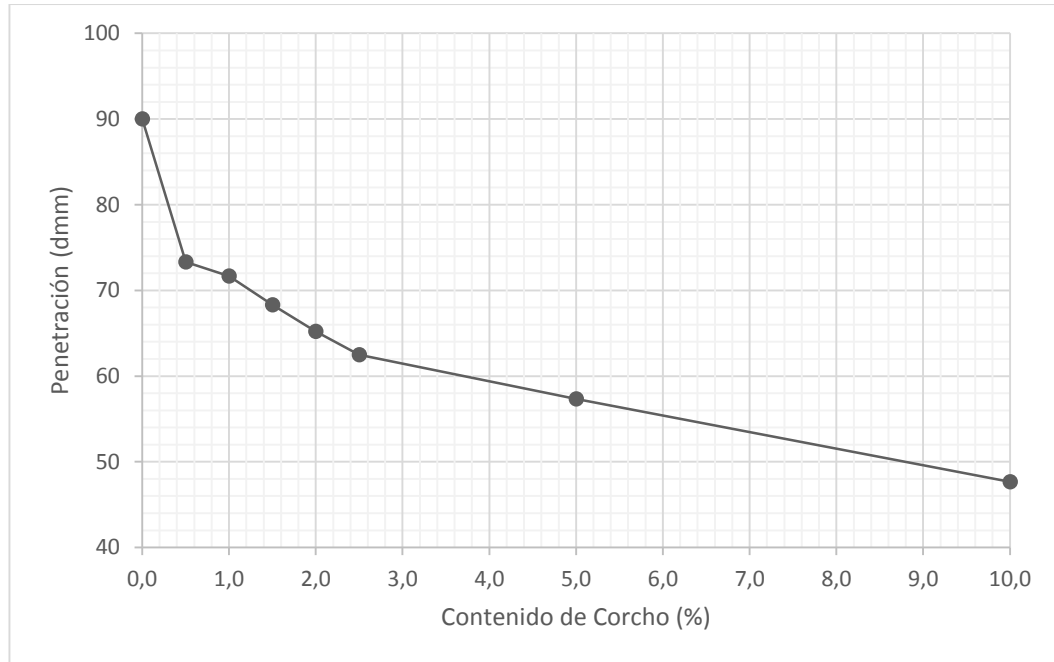
σ^2 = varianza

$$S = \sqrt{\sigma^2}$$

$$S = \sqrt{135,36}$$

$$S = 11,63$$

Gráfica 1. Penetración Vs Contenido de Corcho



Fuente: Autoras

8.2.1.1. Índice de penetración (INV E - 724-13)

El índice de penetración de Pfeiffer y Van Doormaal (IP) busca estimar la susceptibilidad térmica de los cementos asfálticos, debido a que el asfalto es un material termoplástico, es decir que a bajas temperatura se comporta como un material sólido, a temperaturas intermedias adquiere propiedades visco elásticas ya altas temperaturas se comporta como un material líquido viscoso.

Se determina que el índice de penetración IP del asfalto modificado con corcho se clasifica en el grupo $IP > +1$: *Son cementos asfálticos con poca susceptibilidad a la temperatura, presentando cierta elasticidad y tixotropía. Se les denomina tipo gel o soplado, ya que la mayoría de los asfaltos oxidados pertenecen a este grupo*²⁴. El

²⁴ INVIAS. Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos. Índice de penetración de Los cementos asfálticos E-724-13. Instituto Nacional de Vías. [citado 25 oct., 2015].

índice de penetración se relaciona con el tipo reológico del asfalto y al clasificarse en el grupo $IP > +1$ se establece que el asfalto modificado con corcho es menos sensible a los cambios bruscos de temperatura.

$$IP = \frac{20 - 10f}{1 + f}$$

Siendo:

IP = índice de penetración establecido por la INVE 724 – 13

f = se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{50 \times \log \left[\frac{800}{p} \right]}{T_{AB} - 25}$$

T_{AB} = promedio punto de ablandamiento, °C

p = promedio de penetración en 0,1 dmm a 25°C

$$f = \frac{50 \times \log \left[\frac{800}{67} \right]}{57,06 - 25}$$

$$f = 1,68$$

$$IP = \frac{20 - 10(1,68)}{1 + 1,68}$$

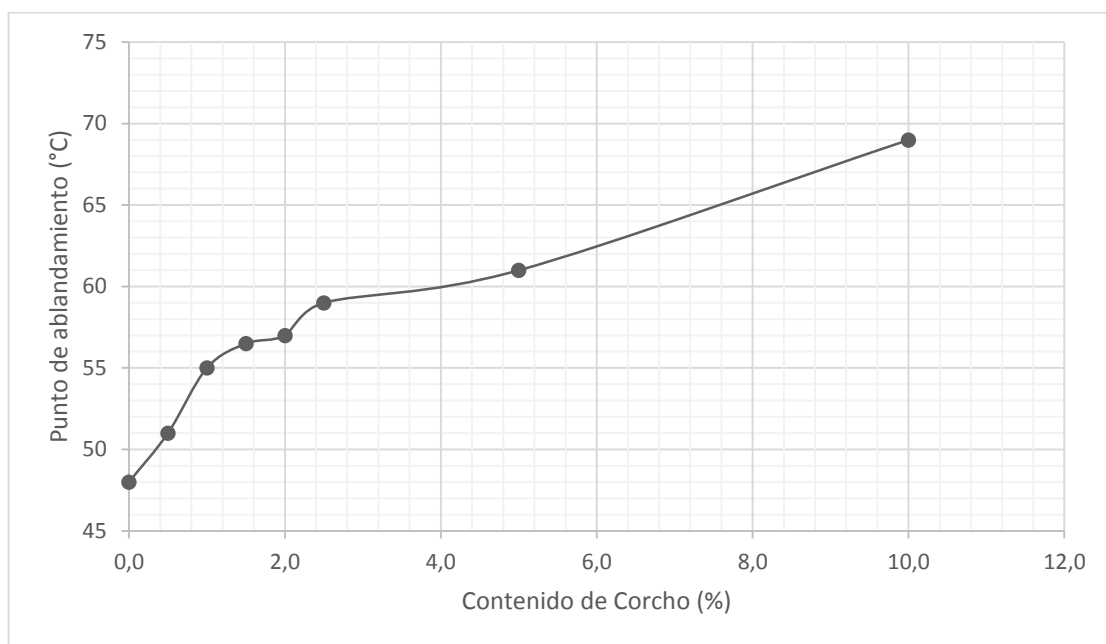
$$IP = 1,19$$

Tixotropía: es la capacidad de un líquido para reducir su viscosidad aparente mientras se aplica una cierta cantidad de calor o energía mecánica, como el corte o la vibración.

8.2.2. Ensayo de punto de ablandamiento (INV E – 712 - 13)

El punto de ablandamiento es la temperatura a la cual el cemento asfáltico se vuelve lo suficientemente blando como para comenzar a fluir. Se realizaron dos determinaciones por cada muestra de asfalto modificado, el valor que muestra la gráfica 2 muestra el promedio entre estos valores.

Gráfica 2. Punto de ablandamiento



Fuente: Autoras

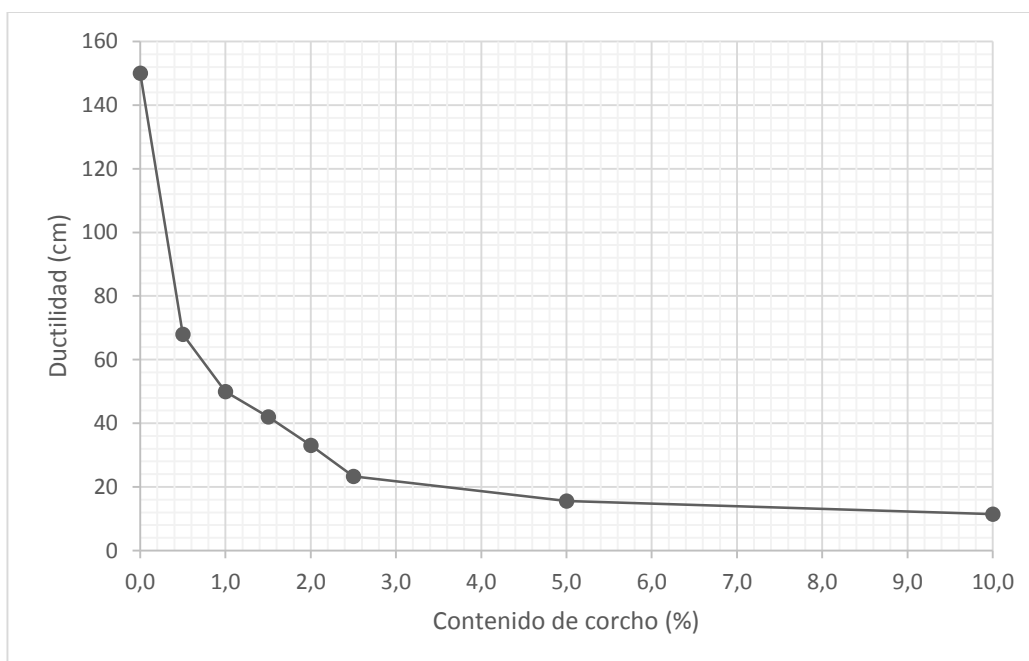
Se observa en la gráfica 2 que el punto de ablandamiento aumenta a medida que se incrementa el contenido de corcho, observando un CA más rígido, esto hace que el asfalto modificado fluya a mayor temperatura

Se identifica que el asfalto modificado presenta una resistencia a fluir, superior con respecto al convencional, para todos los porcentajes analizados. El punto de ablandamiento para el asfalto convencional es de 48° y la mayor temperatura a la cual comienza a fluir el material se obtiene cuando se adiciona el 10% de corcho, el incremento del punto de ablandamiento en este contenido de corcho es de 43,75% en comparación con el asfalto convencional.

8.2.3. Ensayo de ductilidad (INV E – 702 -13)

La ductilidad es un ensayo que se le realiza al asfalto a una temperatura constante de 25°C con una velocidad de 5cm/min, este ensayo permite identificar que al obtener una ductilidad muy elevada, hay una susceptibilidad a temperaturas muy altas, provocando ahuellamiento entre otros tipos de deterioros en el pavimento. Este ensayo se realizó dos veces por porcentaje, y los resultados que se muestran en la gráfica 3 son el promedio de estos valores.

Gráfica 3. Ductilidad



Fuente: Autoras

Durante la investigación se observa que la ductilidad para el asfalto convencional corresponde a 150 cm, al modificar el CA, con el 0,5%(CH) se obtiene una ductilidad de 68 cm es decir una reducción del (54.6%) con respecto al convencional, como se observa en la gráfica 3, así mismo para la sustitución de 10% de corcho se obtiene una ductilidad de 11,5 cm presentando significativamente una disminución en su ductilidad hasta de 138,5 cm lo que representa un 92,3%.

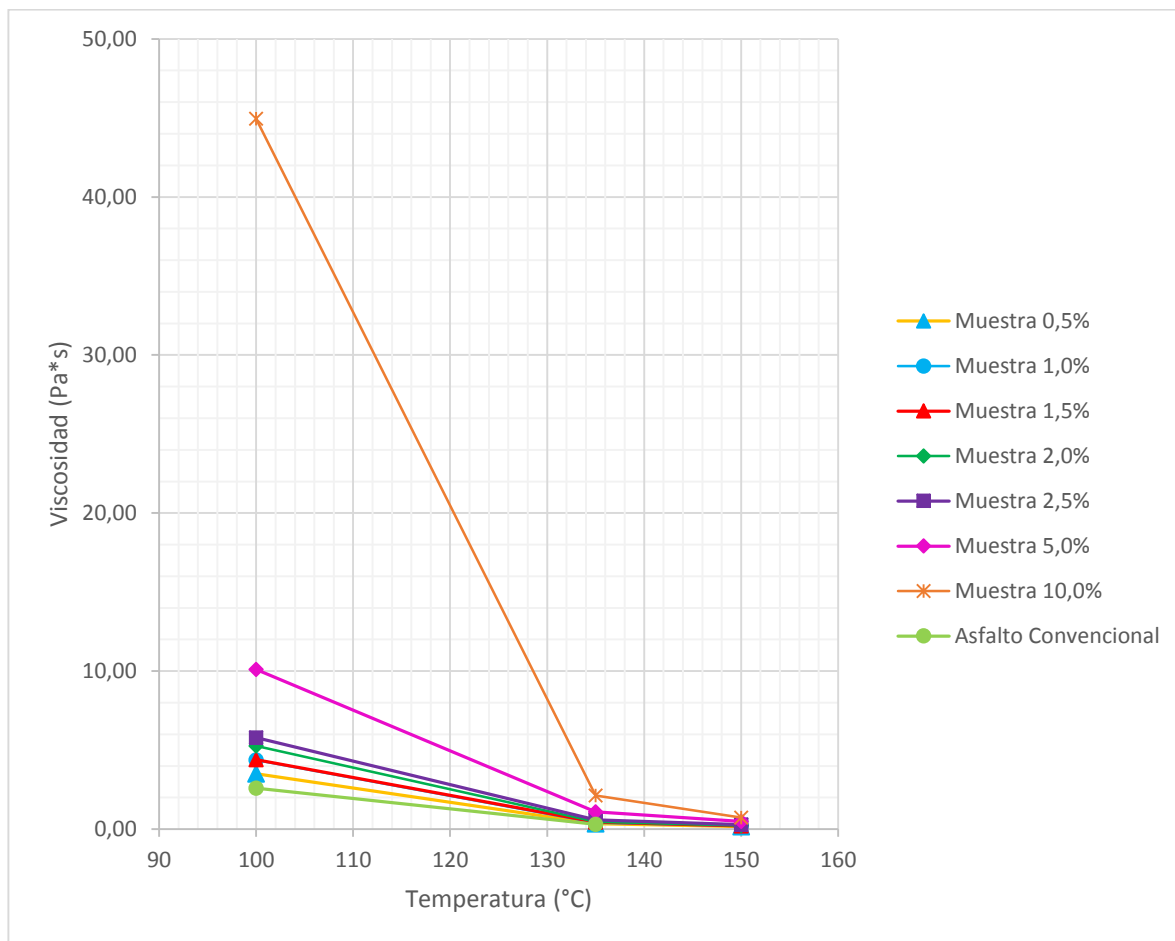
Los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos que les falta esta característica. Por otra parte, los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura. En algunas aplicaciones, como las mezclas para pavimentación, tienen gran importancia la ductilidad y el poder aglomerante, mientras que en otras, como la inyección bajo losas de hormigón y el relleno de grietas, la propiedad más esencial es una baja susceptibilidad a los cambios de temperatura.

El documento *Comparación de los resultados de la modificación de asfalto con poliestireno y llanta triturada obtenidos de procesos de mezcla manual y de mezcla con el dispersor de asfaltos*²⁵, para los asfaltos modificados con 1% de poliestireno la ductilidad es de 150 cm, mientras que al hacer la modificación con 1% de poliestireno y 20% de llanta triturada obtienen una ductilidad de 25 cm, un resultado similar (23,3 cm) al modificar el asfalto con 2,5% de corcho. Indicando que con tan poco porcentaje de material modificado da resultados similares al GCR (Grano de caucho reciclado)

²⁵ AMAYA RAMIREZ, Claudia, et al. Comparación de los resultados de la modificación de asfalto con poliestireno y llanta triturada obtenidos de procesos de mezcla manual y de mezcla con el dispersor de asfaltos. Universidad de la Salle. [En línea]. Disponible en: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/15333/T40.08%20A15c.pdf?sequence=1> [citado 25 oct., 2015].

8.2.4. Ensayo de viscosidad rotacional (INV E- 717–13)

Gráfica 4. Viscosidad en función de la temperatura



Fuente: Autoras

Como lo afirma Montejo²⁶, la determinación de la viscosidad tiene como objetivo establecer el estado de fluidez del asfalto en el rango de temperaturas que se usan durante su aplicación. Para la realización de este ensayo se evaluó el comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura (gráfica 4).

En la gráfica 4 se observa que la adición de corcho incrementó la viscosidad del asfalto a temperaturas entre los 100°C y 130°C, aunque a partir de los 135°C el

²⁶ MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. Tecnología de las mezclas bituminosas. Bogotá: Agora editores, 2002. p. 427.

incremento en la viscosidad fue menos significativo en comparación al asfalto convencional.

A una temperatura de 100°C, la viscosidad se incrementó 7,5 Pa*s con un porcentaje de sustitución de 5% de corcho en relación con el asfalto sin modificar, sus viscosidades respectivamente fueron 10,10 Pa*s y 2,6 Pa*s. Así mismo, se observa que para una sustitución de 10% de corcho, la viscosidad es de 44,95 Pa*s aumentando respecto al asfalto convencional en un 42,35 Pa*s. Un asfalto con una viscosidad de 44,95 Pa*s como la de 10% de sustitución con corcho, tendría un bombeo más complicado de efectuar respecto a un asfalto con viscosidades menores como es el caso del asfalto convencional y hasta un 2% de sustitución de corcho como se observa en la gráfica 4; así mismo el recubrimiento de los agregados no sería efectivo teniendo en cuenta que la manejabilidad y maniobra de este asfalto impediría ejecutar el recubrimiento de agregados en su totalidad, dejando mayores vacíos en el pavimento lo que generaría un endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración de partículas, el agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla, reflejado en la baja durabilidad del mismo.

8.2.5. Ensayo RTFO (INV E – 720 – 13)

El ensayo RTFO fue realizado para el asfalto modificado bajo los parámetros que exige la norma INV-720-13. El primer ensayo se realiza con el 0.5 % de corcho el cual indica una pérdida del 1% y una penetración al residuo de 52,6 dmm. Para el porcentaje de 1%, y 1,5% de corcho, se presenta expansión de este material el cual provoca una presión interna, presentando a los 30 minutos pérdida del material ensayado al ser este expulsado de los envases de la prueba. Únicamente se indica resultados con la modificación del 0.5%.

Figura 11. Prueba RTFO derrame del material



Fuente: Autoras

Tabla 3. Resultados ensayos mezcla asfáltica modificada con corcho

ENSAYO	UNIDAD	NORMA DE ENSAYO INV E	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%	5,0%	10,0%
Penetración (25°C)	0,1d mm	E-706	73	71	68	65	62	57	47
Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola	°C	E-712	51	55	56	57	59	61	69
Viscosidad a 100°C	cP	E-717	3500,0	4380,3	4400,0	5262,5	5787,5	10100,0	44950,0
Ductilidad a 25°C	cm	E-702	68,0	50,0	42,0	33,1	23,3	15,6	11,5
PERDIDA DE MASA EN EL HORNO DE LAMINA ASFALTICA DELGADA EN MOVIMIENTO (INV E-720) Y ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO									
Pérdida de masa	%	E-720	1	-	-	-	-	-	-
Penetración del residuo luego del residuo de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento	dmm	E-706	52,6	-	-	-	-	-	-

Fuente: Autoras

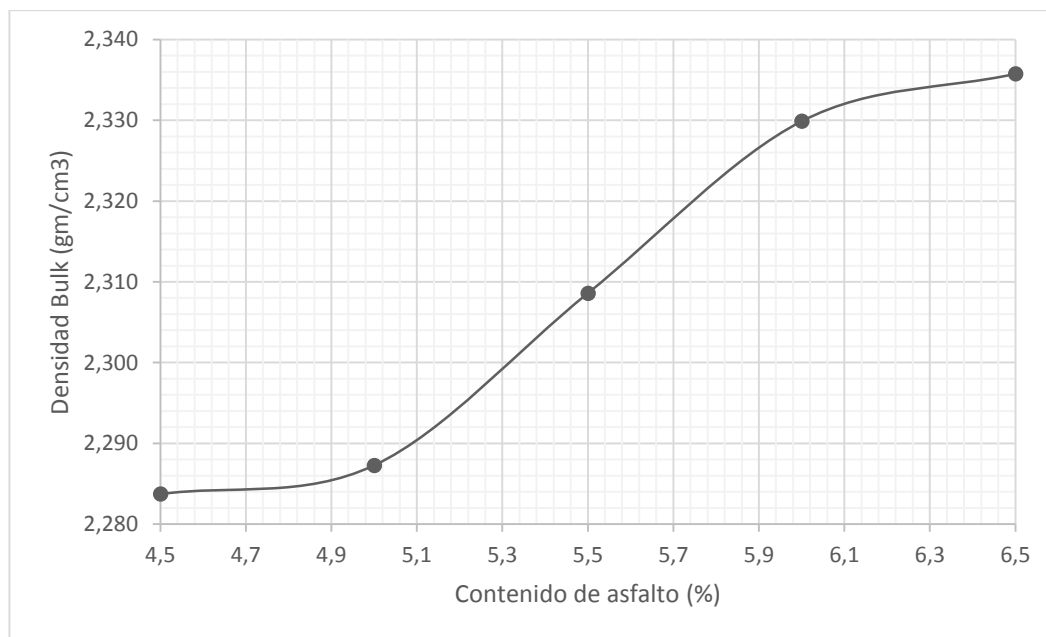
8.3. ANALISIS DE RESULTADOS MECÁNICOS

En el presente capítulo se identifica los resultados para el diseño Marshall y a partir de este el análisis de los ensayos mecánicos al ser modificado la mezcla asfáltica por vía húmeda.

8.3.1. Diseño Marshall convencional

Teniendo en cuenta la norma INV E-748-13 referente a la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall, se desarrolló un diseño de mezcla tipo MDC-19 para el asfalto convencional, con el propósito de determinar el óptimo y continuar a utilizar esta proporción en briquetas con el asfalto modificado con corcho.

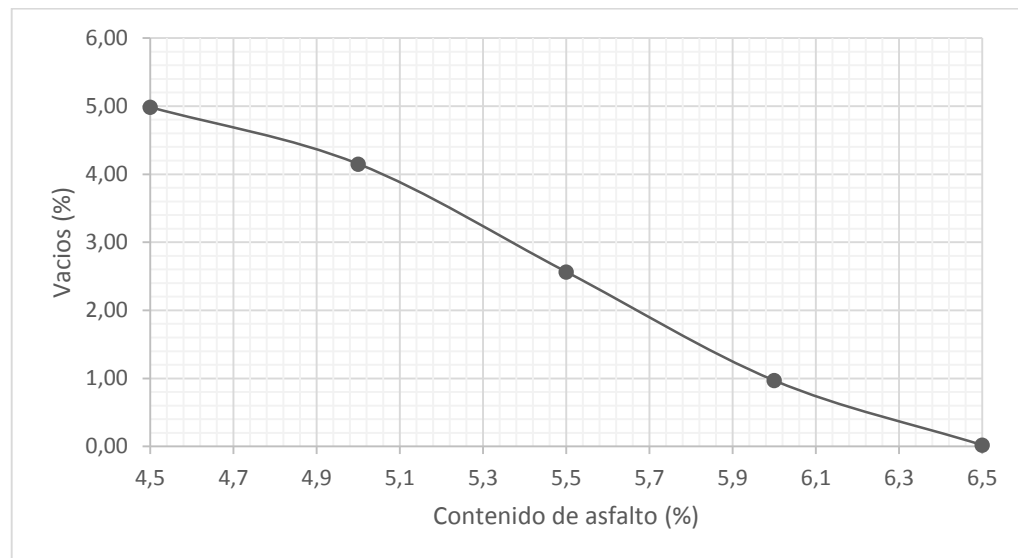
Gráfica 5. Densidad Bulk Vs Contenido de asfalto



Fuente: Autoras

Como se observa en la gráfica 5, la densidad Bulk aumenta para cada uno de los porcentajes de diseño (4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5%), las propiedades de la mezcla están relacionadas con la densidad de las muestras compactadas. La mezcla de 4.5% es el porcentaje con menor densidad con un valor de 2.28 gr/cm^3 , a partir de este valor empieza a aumentar la densidad de las mezclas, siendo el valor de 6% la mezcla con un valor superior a las demás mezclas con una densidad de 2.33 gr/cm^3 .

Gráfica 6. Vacíos Vs Contenido de asfalto



Fuente: Autoras

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir una compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios donde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje de vacíos permitido según la norma para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento²⁷.

²⁷ Diseño de mezclas asfálticas. S.f. *Biblioteca Universidad de Piura*. Recuperado de http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf, p.62. [citado 03 nov., 2015].

En la gráfica 6 se observa que la mezcla de 4.5% presenta vacíos del 4.98% siendo este un valor cercano al máximo permitido, la mezcla de 5% tiene 4.15% de vacíos, valor el cual está dentro del rango establecido y permitido, así mismo la mezcla los vacíos para las mezclas de 5.5%, 6% y 6.5% presentan un valor inferior al permitido por la norma.

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos; entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona espacios a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

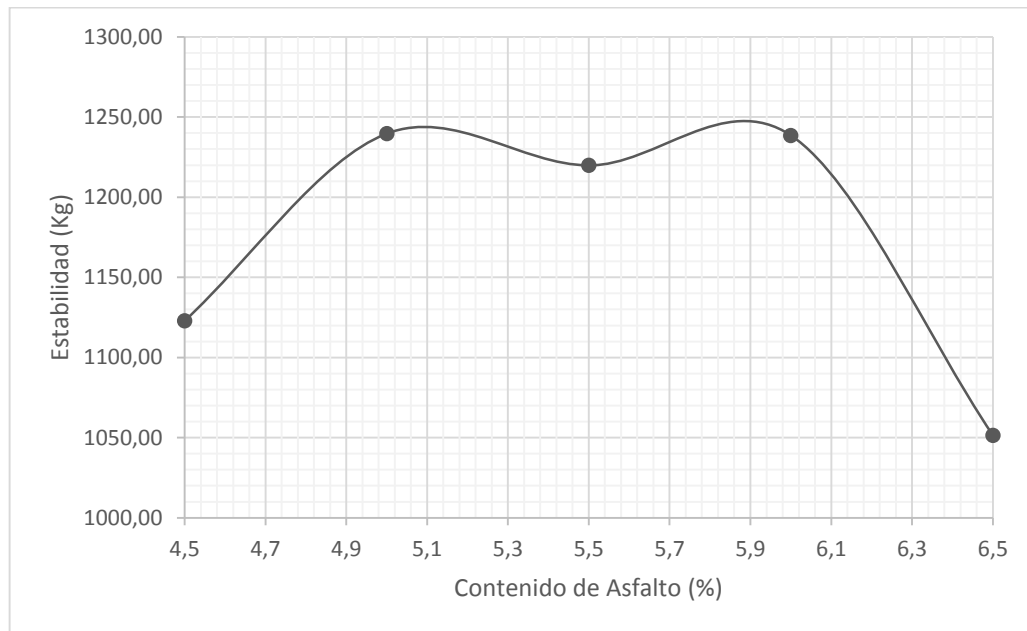
La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa, tal como se evidencia en las gráficas 5 y 6. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible de vacíos preferiblemente menos del 8 por ciento.

De acuerdo a la estabilidad de una mezcla asfáltica, se establece su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito, al identificar la estabilidad de la mezclas estudiadas (gráfica 7), se observa que la mezcla de 4.5% de CA presenta una estabilidad de 1122 Kg, incrementando este valor a 1239 kg para una mezcla con 5% CA, así mismo desciende con un porcentaje de 5.5% CA presentando una estabilidad de 1219 Kg. Se indica que para estos porcentajes de 5%, 5.5% y 6% presenta estabilidades entre 1220 y 1240 kg respectivamente. A partir de 6%, desciende a 1051 kg.

La gráfica 7 tiene una forma cóncava, en la cual, la disminución del valor de estabilidad para el porcentaje de 5.5% respecto al 5.0% y luego el aumento de estabilidad para el 6.0%, podría explicarse como un aviso de exceso de asfalto, proceso llamado exudación el cual ocurre cuando el asfalto llena los vacíos de la mezcla a altas temperaturas y luego se expande en la superficie del pavimento.

Los resultados que se observan en la gráfica 7, están relacionados tanto con la densidad como con los vacíos mostrados en las gráficas 5 y 6 respectivamente, lo que significa que a partir del 5.0% debería empezar a disminuir la estabilidad tanto para 5.5%, 6.0% como para 6.5%, en donde el 6.0% refleja el fenómeno de exudación, siendo así, se descarta a 6.0% como un óptimo de diseño, pues los porcentajes de 5.5% y 6.5% se encuentran dentro del comportamiento de tendencia.

Gráfica 7. Estabilidad Vs Contenido de asfalto



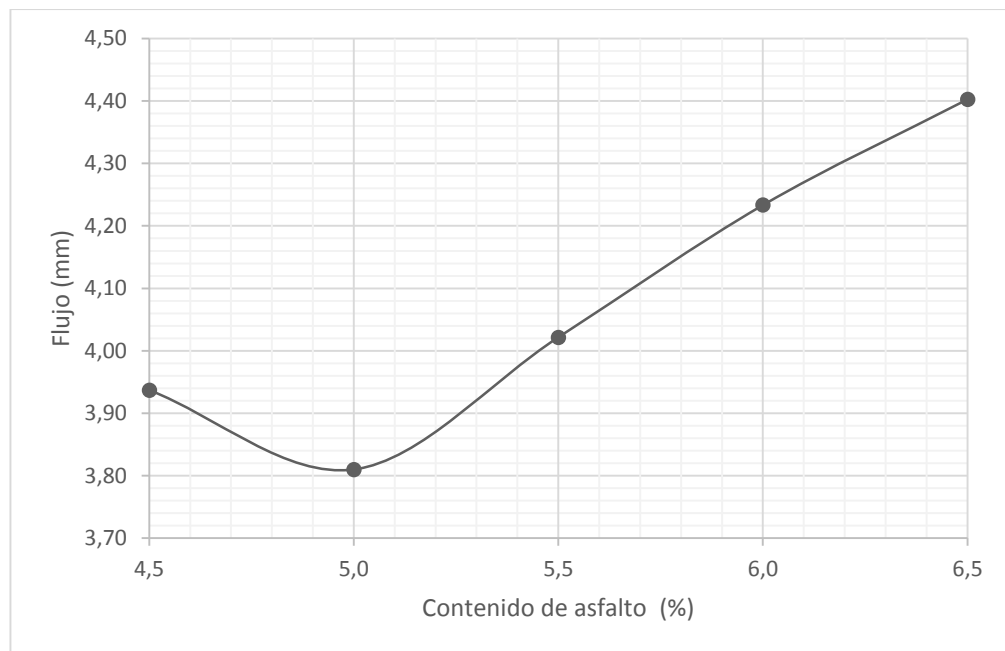
Fuente: Autoras

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un

pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito.

Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable de lo deseado²⁸. La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna²⁹, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

Gráfica 8. Flujo Vs Contenido de asfalto



Fuente: Autoras

El flujo mide la deformación bajo carga que ocurre en la mezcla, como se observa en la gráfica 8, el flujo para 4.5% es de 3.94 mm, para 5.0% presenta una

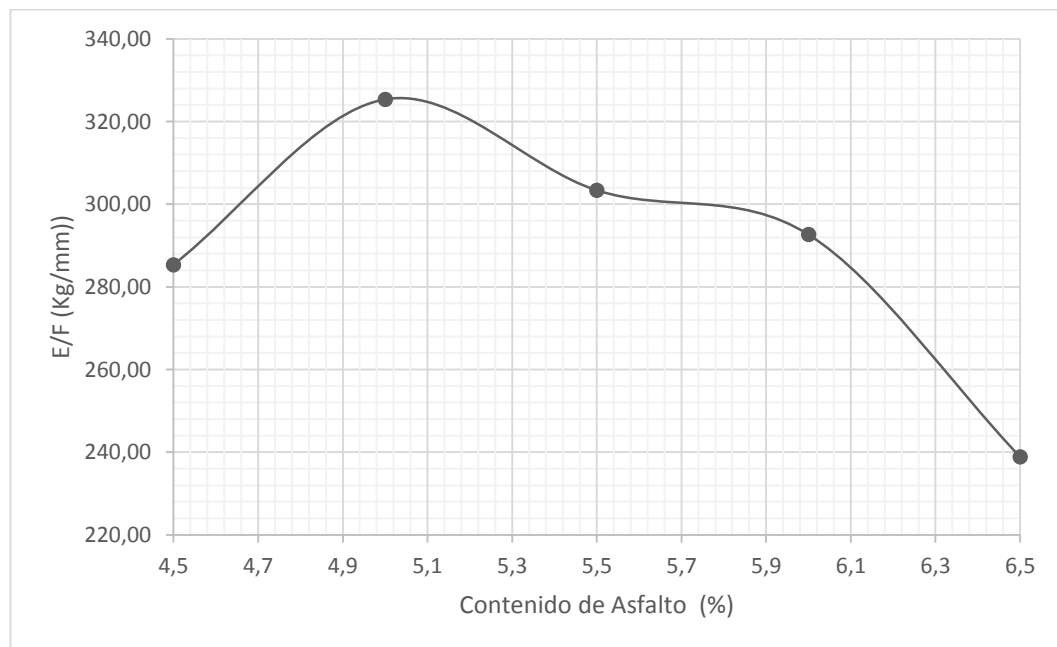
²⁸ *Ibíd.*, p. 65.

²⁹ *Ibíd.*, p. 65.

deformación de 3.81 mm, a partir del 5.5% empieza a ascender el valor de la deformación teniendo este porcentaje un 4.02 mm de deformación, para 6% y 6.5% se tiene 4.23 mm y 4.40 mm respectivamente. Con los valores anteriores se puede observar claramente que la menor deformación la tuvo la mezcla de 5%. Aquellas muestras que tienen valores altos de flujo son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

En la gráfica 9 se muestran los resultados de rigidez para cada uno de los porcentajes de diseño (4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5%), la mayor rigidez se presenta cuando hay un contenido de asfalto de 5.0% la rigidez es de 325,36 Kg/mm y la menor rigidez se logra cuando se incrementa el contenido de asfalto hasta el 6.5% para este caso es de 238,88 Kg/mm disminuyéndose en un 26.6% con respecto al 5.0% de adición de asfalto.

Gráfica 9. Rigidez Vs Contenido de asfalto



Fuente: Autoras

El porcentaje óptimo de asfalto es el de 5.0%, ya que es el porcentaje que tiene la proporción adecuada de cemento asfáltico en la mezcla, presenta suficiente

estabilidad como para satisfacer los requerimientos de servicio, presenta la menor deformación, en cuanto a los vacíos es el que se encuentra dentro del rango permitido proporciona una reserva de espacio que impide pérdidas de estabilidad al producirse una compactación adicional bajo cargas del tránsito, tiene suficiente asfalto como para asegurar el recubrimiento de las partículas de agregado.

En la Tabla 5 se presentan los valores de densidad Bulk, vacíos, estabilidad (E), flujo (F) y E/F para la mezcla convencional empleando porcentajes de asfalto de 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 y 6.5% para determinar el contenido óptimo de asfalto.

Tabla 4. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica convencional MDC-19

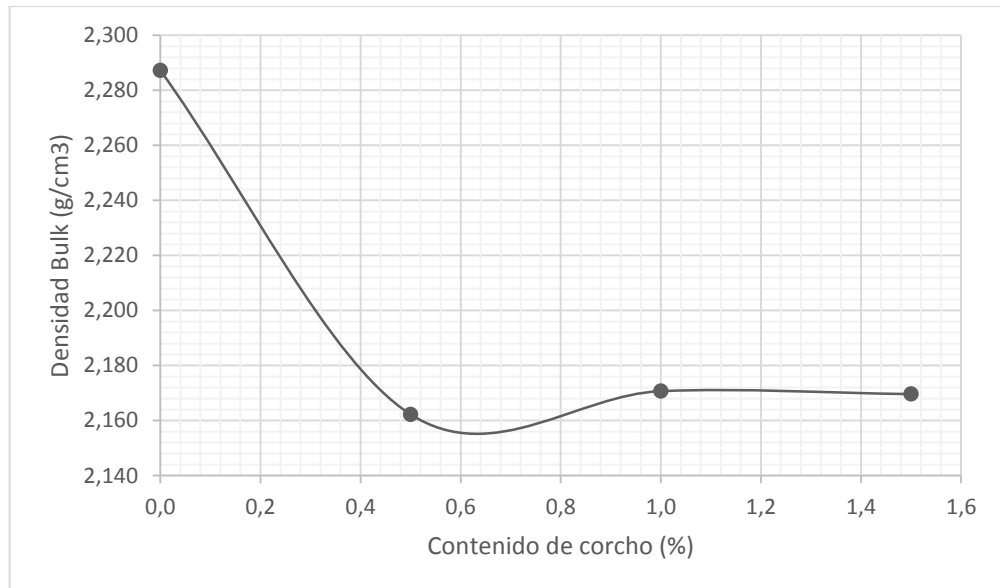
CA [%]	Densidad Bulk [g/cm ³]	Vacíos [%]	Estabilidad [kg]	E/F [kg/mm]	Corregido		Flujo [mm]
					Estabilidad [kg]	E/F [kg/mm]	
4,5	2,284	4,98	1166,05	296,32	1122,91	285,36	3,94
5,0	2,287	4,15	1254,70	329,32	1239,64	325,36	3,81
5,5	2,309	2,57	1213,78	301,86	1219,85	303,37	4,02
6,0	2,330	0,97	1200,14	283,59	1238,55	292,66	4,23
6,5	2,336	0,02	1002,39	227,72	1051,51	238,88	4,40

Fuente: Autoras

8.3.2. Diseño Marshall mezcla asfáltica modificada

Con el porcentaje de 5.0% obtenido a partir del diseño Marshall convencional se desarrollaron las probetas del asfalto modificado con porcentajes de corcho de 0,5%, 1.0% y 1.5%, con los ensayos de reología se observó que más allá de estos porcentajes el material se rigidiza demasiado y puede provocar fisuración y patologías hasta llegar a la fatiga.

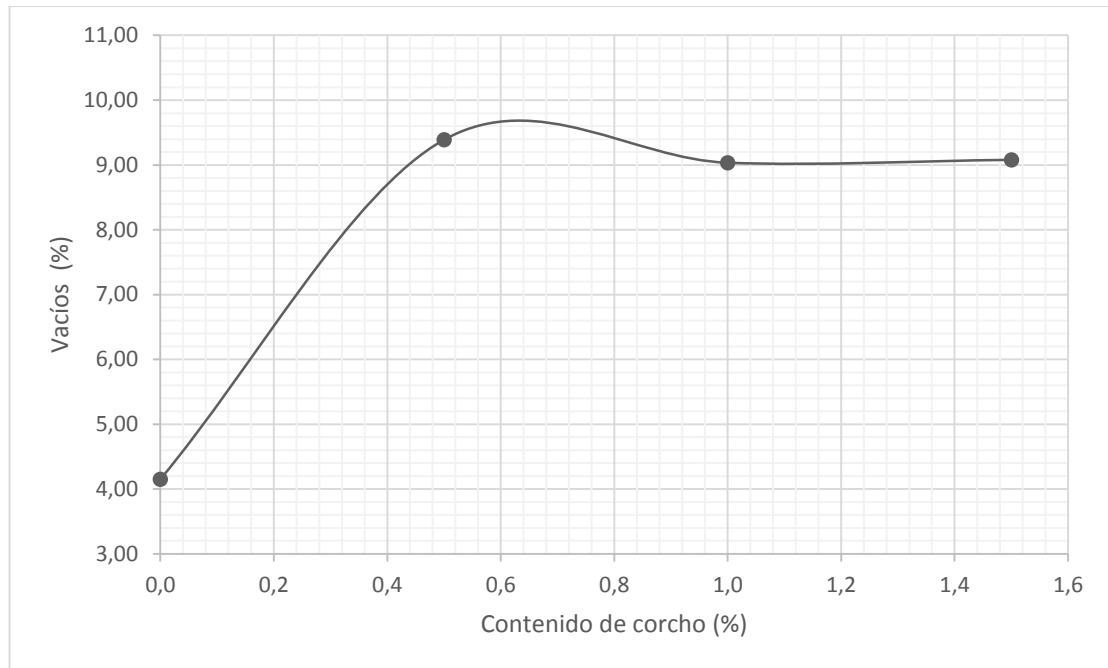
Gráfica 10. Densidad Bulk Vs Contenido de corcho



Fuente: Autoras

En la densidad Bulk se observa que la gráfica 10, a medida en que se le aumenta el porcentaje de corcho la densidad disminuye, con respecto a los resultados del Marshall convencional se obtiene un aumento de 2,287 g/cm³ para el 0%, en cuanto al 0,5% de corcho se nota una disminución de 5,5% con una densidad Bulk de 2,162 g/cm³, para el caso del 1,0% de corcho este disminuye 5,0% con una densidad Bulk de 2,171 g/cm³, finalmente para el 1,5% de contenido de corcho se observa un aumento muy insignificante de 5,1% con un densidad Bulk de 2,170 g/cm³.

Gráfica 11. Vacíos Vs Contenido de corcho

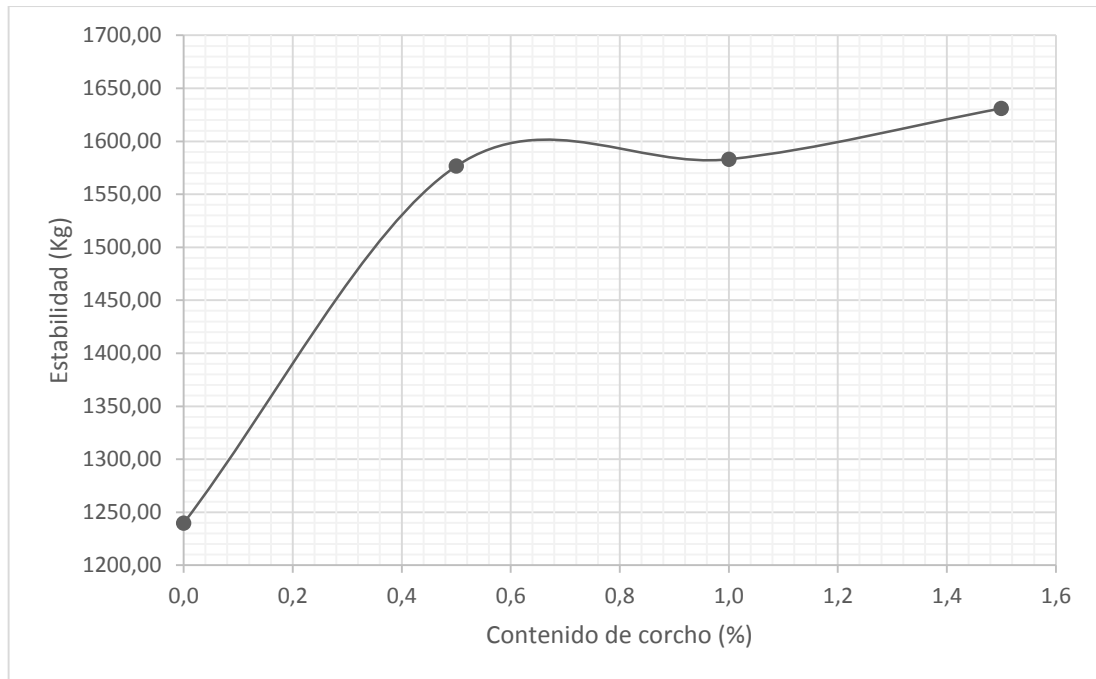


Fuente: Autoras

En la gráfica 11 se observa que para el Marshall convencional se obtienen vacíos de 4,15% y que a medida en que se le incrementa el contenido de corcho al asfalto este tiene un aumento importante y llega al punto de querer estabilizarse y mantener constante dichos vacíos, para el 0,5% de corcho se obtiene unos vacíos de 9,39% y se observa una diferencia porcentual de 5,24%, para el 1,0% de corcho la gráfica arroja vacíos de 9,03% y su diferencia porcentual baja a un valor insignificante de 4,88%, y para el 1,5% de corcho el valor de vacíos es de 9,08% con una diferencia porcentual de 4,93%.

La mezcla asfáltica modificada con corcho no cumple respecto a su relación de vacíos, pues el rango está entre 4 y 6, y los modificados tienen valores superiores a este rango; lo anterior induce que los agregados no alcanzan a ser cubiertos completamente con el asfalto y adición de corcho, aumentando los espacios entre la mezcla.

Gráfica 12. Estabilidad Vs Contenido de corcho



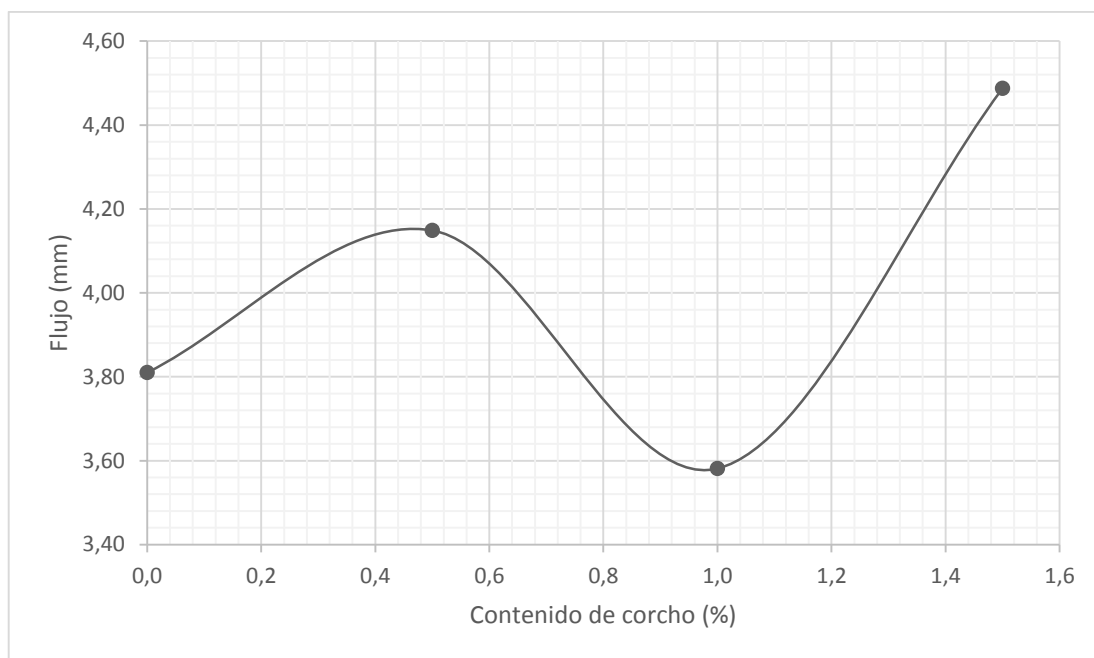
Fuente: Autoras

Para el caso de la estabilidad, se puede observar en la gráfica 12 que la mezcla asfáltica modificada con corcho presenta valores mayores para todos los porcentajes con respecto al convencional. La estabilidad de la mezcla convencional es de 1239,54 Kg, al adicionar 0.5% de corcho se obtiene una estabilidad de 1576,50 Kg, esto representa un incremento del 27,17% de la estabilidad, la mayor estabilidad se presenta cuando se adiciona 1.5% de corcho siendo este de 1622,92 kg, en este porcentaje la estabilidad es 31,6% mayor con respecto a la mezcla convencional.

Los valores de flujo en la mezcla asfáltica modificada con corcho se observan en la gráfica 13, el flujo para la mezcla convencional es de 3,81 mm, para la adición de 0.5% de corcho es de 4,15 mm, la menor deformación se presentó es el 1.0% de adición de corcho siendo este de 3,58 mm y la mayor deformación se presentó para el porcentaje 1.5% siendo este de 4,49 mm respectivamente.

Valores de flujo bajos y de estabilidad muy altos producen pavimentos frágiles y rígidos. Los valores de flujo alto producen mezclas asfálticas muy plásticas y con tendencia a la deformación.³⁰

Gráfica 13. Flujo Vs Contenido de corcho

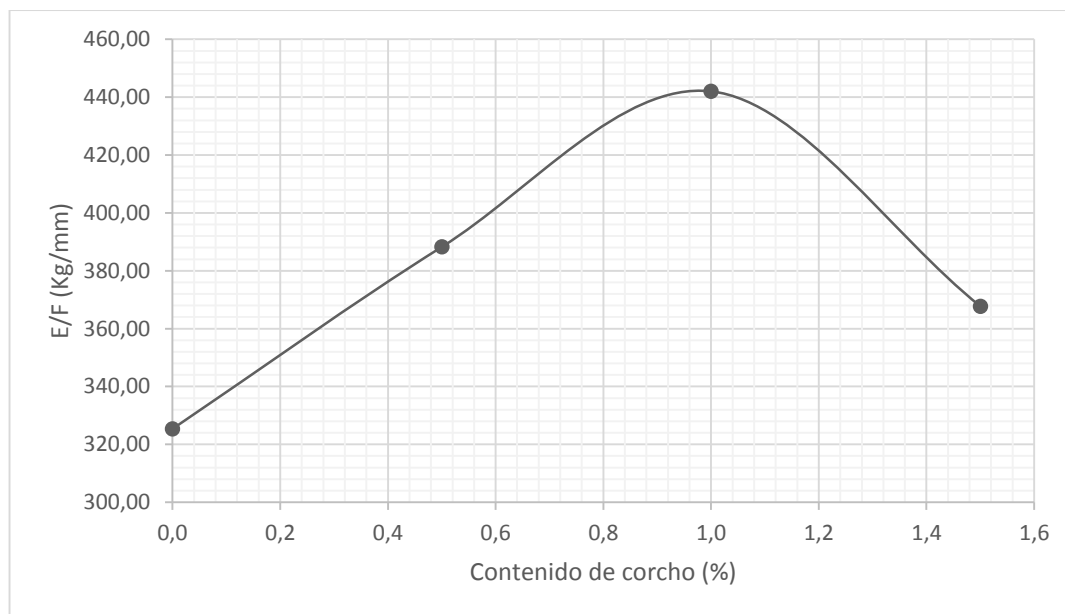


Fuente: Autoras

La mezcla que mejor comportamiento mecánico presentó fue el porcentaje de 1.0% de corcho, al presentar una estabilidad de 1583,06 Kg y flujo de 3,58 mm, ya que es el que presenta la mejor proporción, Valores inferiores o superiores a 1.0% de corcho generan disminución en la resistencia de las mezclas modificadas debido a que se podrán presentar mayores deformaciones bajo carga y puede disminuir la trabajabilidad.

³⁰ Evaluación de los diseños de mezcla densa en caliente. [En línea]. [Citado 01 octubre, 2015]. Disponible en: <http://goo.gl/MJl29W>

Gráfica 14. Rigidez Vs Contenido de corcho



Fuente: Autoras

En la gráfica 14 se observa el comportamiento de la rigidez que presenta un asfalto modificado con corcho, para el convencional se obtiene una rigidez de 325,36 Kg/mm, con respecto a dicho convencional en el 0,5% se aprecia una rigidez de 388,24 Kg/mm aumento está en 19,3%, para el porcentaje de corcho de 1,0% se observa una rigidez de 442,03 Kg/mm generando un crecimiento muy importante de 35,9%, finalmente para el 1,5% se observa que la rigidez disminuye considerablemente con respecto a los porcentajes de corcho anteriores generando este porcentaje una rigidez de 367,75 Kg/mm y una disminución de 13%.

Tabla 5. Resumen del Ensayo Marshall para la mezcla asfáltica modificada con corcho

Contenido de corcho [%]	Densidad Bulk [g/cm3]	Vacíos [%]	Estabilidad [kg]	E/F [kg/mm]	Corregido		Flujo [mm]
					Estabilidad [kg]	E/F [kg/mm]	
0,0	2,287	4,15	1254,70	329,32	1239,64	325,36	3,81
0,5	2,162	9,39	1595,65	392,96	1576,50	388,24	4,15
1,0	2,171	9,03	1575,19	439,83	1583,06	442,03	3,58
1,5	2,170	9,08	1622,92	365,92	1631,04	367,75	4,49

Fuente: Autoras

Como se observa en la Tabla 6, los valores de estabilidad están dentro del rango establecido en el artículo 450 de la norma del INVIAS, para los tres porcentajes de mezcla asfáltica modificada, como para el porcentaje óptimo de diseño los cuales se encuentran entre 918.36 Kg y 3443.87 Kg; así mismo el flujo está dentro de un rango entre 2 y 3,5 únicamente para el porcentaje de 1.0%, pues para 0,5% y 1.5% los valores sobrepasan el máximo permitido por la norma.

En cuanto a la rigidez, los tres porcentajes modificados y el óptimo de diseño se encuentran en el rango permitido, entre 306 Kg/mm y 612 Kg/mm, presentando un mayor valor el porcentaje de 1.0% de adición de corcho respecto al 0.5% y 1.0%.

Tabla 6. Comparación de los resultados obtenidos con la norma INVIAS

	Artículo 450 INVIAS		Contenido de corcho [%]			
	Mín.	Máx.	Convencional	0,5	1,0	1,5
Vacíos [%]	4	6	4,15	9,39	9,03	9,08
Estabilidad [kg]	918,36	3443,87	1239,64	1576,50	1583,06	1631,04
Flujo [mm]	2	3,5	3,81	4,1	3,5	4,5
E/F [kg/mm]	306	612	325,36	388,24	442,03	367,75

*Valores de referencia para tránsito NT3 (5.0x10⁶ ejes equivalentes de 80 kN) - (Artículo 100-13 INVIAS)

Fuente: Autoras

9. CONCLUSIONES

- Al comparar las propiedades físicas y reológicas del asfalto convencional junto con el modificado con corcho, se observó que la penetración del asfalto modificado se redujo para el 0.5% de corcho en un 18% y para 10% de corcho en un 47.03% respecto al convencional; así mismo la ductilidad de las mezclas modificadas se reduce a medida que aumenta el contenido de corcho, lo que sugiere una rigidización significativa de las muestras asfálticas cuando se le adiciona corcho natural, lo que provocaría un fracturamiento de la capa asfáltica.
- En cuanto al punto de ablandamiento y la viscosidad a 100°C se observa que aumentan los resultados de la mezcla asfáltica modificada respecto al asfalto convencional, lo que significa que entre mayor sea el contenido de corcho de la mezcla asfáltica, mayor será la temperatura que ésta necesita para empezar a fluir; por otra parte, con valores altos de viscosidad la mezcla será mucho más difícil de bombear en obra lo que impediría una integración completa entre agregados y asfalto, aumentando el número de vacíos y reduciendo la durabilidad del mismo.
- La muestra modificada que presentó menor deformación fue el porcentaje de 1.0% de adición de corcho, con un flujo de 3.58 mm, mientras que el asfalto convencional tuvo 3.81 mm, y los porcentajes de 0.5% y 1.5% de adición de corcho obtuvieron una fluencia de 4.15 mm y 4.49 mm, valores de deformaciones reflejados en los valores fuera de rango de vacíos en las mezclas asfálticas.
- Las mezclas asfálticas modificadas presentan un mejor comportamiento mecánico respecto al convencional, reflejando una mayor capacidad de soportar cargas de tránsito; sin embargo los vacíos que presentan son valores

fuera del rango permitido, ya que la durabilidad del pavimento está relacionada con la relación de vacíos, pues entre mayor sea este valor, más agua y aire pasara entre la muestra haciendo que se fracture en un menor tiempo y generando daños y fracturas en la estructura.

10. RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir investigando a profundidad la modificación de una mezcla asfáltica, para los diferentes tipos de ligante asfáltico ya sean de tipo 40/50, 60/70 o 80/100 con la adición de corcho por vía seca para conocer las propiedades que brinda el material al asfalto al modificarlo por otro método.
- Realizar ensayos nuevamente para verificar la relación de vacíos, por lo mecánicamente tiene un buen comportamiento la modificación del cemento asfáltico con corcho, pues al mejorar y reducir los vacíos podría hacerse un tramo de vía de prueba.
- Es importante ahondar sobre la modificación de mezclas asfálticas con materiales alternativos, tanto por vía seca como por vía húmeda para la implementación de nuevas tecnologías a los pavimentos y lograr que estos sean amigables con el medio ambiente.
- Se recomienda ejecutar un estudio costo/beneficio en el cual se determine la viabilidad de usar mezclas asfálticas modificadas con materiales alternativos para este caso con el corcho natural.
- Se recomienda realizar el ensayo de tracción indirecta descrito en la norma INV E -725 para la determinación de la susceptibilidad de las mezclas asfálticas a presentar daño por humedad.
- Realizar ensayos de caracterización dinámica, como son el de módulo resiliente, resistencia a la deformación permanente y ley de fatiga, para analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas densas en caliente.

11. GLOSARIO

CORCHO: Tejido vegetal de gran espesor que recubre la parte exterior del tronco y las ramas de algunos árboles, en especial del alcornoque; se caracteriza por su impermeabilidad y elasticidad por lo que se emplea en la fabricación de tapones, pavimentos y material aislante.

ASFALTO: Sustancia de color negro que constituye la fracción más pesada del petróleo crudo. Se encuentra a veces en grandes depósitos naturales, como en el lago Asfaltites o mar Muerto, lo que se llamó betún de Judea. Se utiliza mezclado con arena o gravilla para pavimentar caminos y como revestimiento impermeable de muros y tejados.

MEZCLA ASFÁLTICA: mezcla asfáltica o concreto bituminoso consiste en un agregado de asfalto y materiales minerales (mezcla de varios tamaños de áridos y finos) que se mezclan juntos, se extienden en capas y se compactan.

ASFALTO MODIFICADO: Producto de la incorporación de un polímero u otro modificador en el asfalto para mejorar sus propiedades físicas y geológicas como la disminución de la susceptibilidad a la temperatura y a la humedad.

VÍA HÚMEDA: Proceso por el cual se le adiciona al asfalto un producto y se hace una lechada con el fin mejorar algunas de sus características mecánicas y reológicas en una mezcla asfáltica.

VIA SECA: Proceso por el cual se prepara una mezcla en seco de las materias primas, homogenizando mediante aireación en un horno con el fin mejorar algunas de sus características mecánicas y reológicas en una mezcla asfáltica.

12. BIBLIOGRAFIA

Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. Estudio e investigación del estado actual de las obras de la Red Nacional de Carreteras. [Citado 1 abr., 2015]. Disponible en: <http://goo.gl/7drwev>.

FERNANDEZ, Laureano. El corcho en la construcción [PDF] [citado 1 abr., 2015]. Disponible en: <http://goo.gl/fm1mlk>

SAAE, Hened y VALDEZ, Janett. El corcho: Un material irremplazable. Revista investigación y ciencia de la UAA. p. 48-51. [pdf] [citado 1 abr., 2015]. Disponible en: <http://www.uaa.mx/investigacion/revista/archivo/revista28/Articulo%208.pdf>

MARÍN HERNÁNDEZ, Alberto. Asfaltos modificados y pruebas de laboratorio para caracterizarlos. Trabajo de grado Ingeniero Civil. México, D.F. Instituto Politécnico Nacional. Facultad de Ingeniería Civil, 2004. 135 p.

ASECOR. Corcho, un producto natural. Propiedades del corcho. [Citado 1 abr., 2015]. Disponible en: <http://www.asecor.com/corcho.php?lang=es&sec=2>

ESTRADA, Juan. GONZALEZ, Alejandro. Mejoramiento de mezclas asfálticas drenantes utilizando como ligante el asfalto – caucho. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería Civil, 2002. 139p.

MONTEJO FONSECO, Alfonso. Ingeniería de los pavimentos. Evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías. 3 ed. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2006. p. 301

PÉREZ, María A. et al. Estado del conocimiento de asfaltos modificados en Colombia y su influencia en la pavimentación. En: Revista virtual de los programas de ingeniería. Universidad de San Buenaventura. [En línea]. 2012. vol. 14 No.6, p. 89-105 [citado 11 septiembre, 2015]. Disponible en: <http://letravirtual.usbctg.edu.co/index.php/ingeniator/article/viewFile/290/273>

GAMBOA, Jhon. Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas modificadas vs mezcla tradicional, Bucaramanga Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana. [En línea]. 2012. vol. 4, [citado 28 mayo, 2015]. Disponible en: <http://apuntesdeinvestigacion.upbbga.edu.co/>

RONDÓN, Hugo et al. Experiencias sobre el estudio de materiales alternativos para modificar asfaltos. En: Revista Ingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas. [En línea]. 2009. vol. 14 no.2, [citado 17 abr., 2015]. ISSN 0124-8170. Disponible en: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/2376/3256>

GIL, Luis. Cork composites: a review. En: Materials 2009. [En línea]. 2009, p.776. [Citado 11 septiembre, 2015]. Disponible en: http://www.researchgate.net/publication/26635525_Cork_Composites_A_Review

PEREIRA, Simão M.S. et al. Mechanical performance of asphalt mixtures produced with cork or rubber granulates as aggregate partial substitutes. En: Construction and Building Materials. [En línea]. Abril, 2013 vol. 41. p. 209–215. [Citado 8 mayo, 2015]. Disponible en: <http://goo.gl/wij4jj>

OSVALDO, José M Silva. et al. Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. En: Materials and Design. [En línea]. 2009, p.1-7. [Citado 11 septiembre, 2015]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909002738>

Asociación de productores y pavimentadores asfálticos de Colombia. Cartilla del pavimento asfáltico: Generalidades del pavimento. 2004. p. 6. ISBN 958-33-6312-X.

Diseño de mezclas asfálticas. Biblioteca Universidad de Piura. [En línea]. [Citado 07 octubre, 2015]. Disponible en: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf

INVIAS. (2013). Penetración de los materiales asfálticos. I.N.V.E-706.

INVIAS. (2013). Ductilidad de los materiales asfálticos. I.N.V.E 702.

INVIAS. (2013). Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional. I.N.V.E 717.

INVIAS. (2013). Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola). I.N.V.E 712.

INVIAS. (2013). Efecto del calor y del aire sobre el asfalto en lámina delgada y rotatoria. I.N.V.E 720.

INVIAS. (2013). Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall. I.N.V.E-748.