

EVALUACIÓN DE ADITIVOS MEJORADORES DE ADHERENCIA PARA  
MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

NATALIA CAMARGO SANMIGUEL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2015

EVALUACIÓN DE ADITIVOS MEJORADORES DE ADHERENCIA PARA  
MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE

NATALIA CAMARGO SANMIGUEL

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:  
Ingeniera Química

Director:

Crisóstomo Barajas Ferreira

Ing. Químico MSc.

Co-directora:

Liz Yulin Ibarra Quintero

Ing. Química

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2015

A Cali, a Jorge, a Robert y a Cartagena.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ing. Fabio Méndez por darme esta oportunidad y por su confianza, a la Ing. Liz Ibarra y al Ing. Ricardo Carreño por su asesoría y a toda la familia MPI, especialmente a mis compañeros de laboratorio Fabián, Ledis, Jairo, Erika, Ismael, Rosario, Yessika, Eduardo, Christian y Douglas.

A la Universidad Industrial de Santander y a todos los profesores que contribuyeron a mi formación, en especial al profesor Crisóstomo Barajas por su apoyo y consejo y a los profesores María Paola Maradei y Arlex Chaves por sus recomendaciones.

## CONTENIDO

	<b>pág</b>
GLOSARIO	14
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1. MANUFACTURAS Y PROCESOS INDUSTRIALES (MPI)	17
1.1.1. Asfaltos de penetración con mejor adherencia	18
1.1.2. Diseño de mezclas asfálticas según el INVIAS	18
1.2. SUSCEPTIBILIDAD DE LAS MEZCLAS AL DAÑO POR HUMEDAD	19
1.2.1. Estructura del asfalto	19
1.2.2. Teorías de adherencia	20
1.2.3. Mecanismos del daño por humedad	20
1.2.4. Factores influyentes	21
1.2.5. Acción de aditivos mejoradores de adherencia	21
2. OBJETIVOS Y ALCANCE	23
3. METODOLOGÍA	24
3.1. MATERIAS PRIMAS Y CARACTERIZACIÓN	24
3.1.1. Asfalto	24
3.1.2. Material	26
3.2. DISEÑO DE LA MEZCLA Y PRUEBA DE SUSCEPTIBILIDAD	26
3.2.1. Diseño Marshall	26
3.2.2. Prueba de Tracción Indirecta	28
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	30

4.1. MATERIAS PRIMAS Y CARACTERIZACIÓN	30
4.1.1. Asfalto	30
4.1.2. Material	33
4.2. DISEÑO DE LA MEZCLA Y PRUEBA DE SUSCEPTIBILIDAD	33
5. CONCLUSIONES	35
6. RECOMENDACIONES	36
BIBLIOGRAFÍA	37
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
ANEXOS	41

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág</b>
Figura 1. Diagrama metodológico	24
Figura 2. Resultados de las pruebas de consistencia	30
Figura 3. Punto de chispa de los asfaltos	31
Figura 4. Resultados del envejecimiento RTFOT	32
Figura 5. Relación de tensión indirecta de las mezclas	33
Figura 6. Curva de viscosidad de asfaltos y rangos de mezclado y compactación	47
Figura 7. Curva granulométrica del material pétreo	48
Figura 1. Líneas de tendencia para parámetros de diseño Marshall	50

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág</b>
Tabla 1. Temperaturas de mezclado y compactación promedio	31
Tabla 2. Resumen de los resultados experimentales	34
Tabla 3. Tipo de mezcla a diseñar	41
Tabla 4. Criterios de diseño de mezclas asfálticas en caliente por el método	41
Tabla 5. Tipo de asfalto a emplear	42
Tabla 6. Especificaciones para asfaltos de penetración	42
Tabla 7. Especificaciones del material pétreo	43
Tabla 8. Denominación del material pétreo	44
Tabla 9. Rango de granulometría del material pétreo según el tipo de mezcla	44
Tabla 10. Caracterización del material pétreo y rangos permitidos	48
Tabla 11. Cálculo de parámetros de diseño Marshall	49
Tabla 12. Parámetros interpolados y rangos permitidos	49

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág</b>
ANEXO A. ESPECIFICACIONES DEL INVIAS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	41
ANEXO B. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO	45
ANEXO C. CURVA DE VISCOSIDAD DE ASFALTOS	47
ANEXO D. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO	48
ANEXO E. HOJA DE CÁLCULO PARA DISEÑO MARSHALL	49

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE ADITIVOS MEJORADORES DE ADHERENCIA PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE\*

**AUTOR:** NATALIA CAMARGO SANMIGUEL \*\*

**PALABRAS CLAVE:** Susceptibilidad a la humedad, Mezcla asfáltica, Tracción Indirecta, Caracterización, Adherencia.

**DESCRIPCIÓN:** La pérdida de adhesión entre el asfalto y el material pétreo por la acción de la humedad es de las principales causantes del deterioro de mezclas asfálticas destinadas a obras viales. Uno de los métodos usados para prevenir este tipo de falla consiste en aditivar los asfaltos con tensoactivos que actúan a nivel interfacial mejorando su afinidad con el material.

El presente trabajo se llevó a cabo en los laboratorios de calidad, desarrollo y mejora de Manufacturas y Procesos Industriales Ltda, Barrancabermeja. Consistió en la evaluación preliminar de dos nuevos aditivos comerciales (#2 y #3) en comparación con el aditivo #1 utilizado en la mejora de adherencia de asfaltos de penetración para mezclas asfálticas en caliente. Se siguieron los lineamientos del Instituto Nacional de Vías para evaluar el efecto de dosis de 0,5% y 1% de cada aditivo en la consistencia, seguridad y grado de envejecimiento del asfalto; diseñar y compactar mezclas asfálticas; evaluar su susceptibilidad a la humedad mediante una prueba de tracción indirecta.

Según los resultados de la evaluación, el aditivo #2 no tiene un efecto deseable en las propiedades del asfalto y es menos eficaz que el #1 y el #3. El aditivo #3 mostró una mejor relación de tracción indirecta que el aditivo #1 pero alteró considerablemente la consistencia del asfalto. Se presume que dosis de aditivo #3 menores al 0,5% pueden tener un mejor desempeño tanto en la caracterización del asfalto como en la adherencia de la mezcla.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Msc. Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirectora: Ing. Liz Yulin Ibarra Quintero.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF ANTISTRIPPING ADDITIVES FOR HOT MIX ASPHALT\*

**AUTHOR:** NATALIA CAMARGO SANMIGUEL\*\*

**KEYWORDS:** Moisture damage, Asphalt mix, Tensile strength, Characterization, Adhesion.

**DESCRIPCIÓN:** The loss of adhesion between asphalt and aggregate due to the presence moisture is one of the main contributors to the detriment of hot mix asphalt pavements. One of the most common ways to prevent this kind of failure is adding surfactants to the asphalt which help improving its affinity with the aggregate.

This study was accomplished in the quality and development laboratories of *Manufacturas y Procesos Industriales Ltda, Barrancabermeja*. Consisting in a preliminary evaluation of two new commercial antistripping additives (#2 and #3) in comparison with additive #1, which is currently used for the adhesion promotion of hot mix asphalts. The study was completed according to the specifications of the *Instituto Nacional de Vías*. It includes the effect of 0,5% and 1% additive doses on asphalt consistency, security and aging; design and compaction of asphalt mixes; moisture damage evaluation through a tensile strength ratio test.

The evaluation of additive #2 showed unwanted changes in asphalt properties and bad efficiency. Additive #3 had the best tensile strength ratio but caused great changes on asphalt consistency. It is possible that a lower dose of additive #3 will have a better performance on both characterization and adhesion tests.

---

\* Bachelor Thesis.

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: MSc. Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirector: Eng. Liz Yulin Ibarra Quintero.

## GLOSARIO

**ABRASIÓN:** es un ensayo para cuantificar la durabilidad y la resistencia al desgaste de los agregados gruesos en presencia de agua y de cargas abrasivas.

**ASFALTO:** es un material obtenido a partir de la destilación al vacío de las fracciones más pesadas del petróleo. A temperatura ambiente se comporta como un sólido viscoelástico, a medida que recibe calor se transforma en un fluido viscoso y a temperaturas muy bajas es sólido y frágil. Se usa como ligante en la mezcla gracias a sus propiedades reológicas, impermeabilidad, adhesividad y durabilidad.

**DAÑO POR HUMEDAD:** es la pérdida de adhesión entre la película de asfalto y la superficie de material pétreo por la acción del agua. Ésta debilita la estructura de la mezcla y disminuye la vida útil del pavimento por fallas como deformaciones, fisuras y desprendimientos.

**ENVEJECIMIENTO RTFOT:** es una simulación del envejecimiento que sufre el asfalto durante el mezclado previo a su aplicación. El calor y el aire hacen que el asfalto pierda masa y cambie de consistencia por la volatilización de livianos y la oxidación de sus componentes.

**EQUIVALENTE DE ARENA:** es una medida empírica del grado de contaminación del agregado fino con polvos o arcillas indeseadas. durabilidad.

**GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DE LA MEZCLA ( $G_{mb}$ ):** gravedad específica de un volumen de mezcla compactada, incluyendo el volumen de los vacíos.

**GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DEL MATERIAL ( $G_{sb}$ ):** gravedad específica de una unidad de volumen de material, incluyendo el volumen de los vacíos de aire.

**GRAVEDAD ESPECÍFICA EFECTIVA DEL MATERIAL ( $G_{se}$ ):** gravedad específica de una unidad de volumen de material excluyendo los vacíos permeables al asfalto.

**GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA DE LA MEZCLA ( $G_{mm}$ ):** gravedad específica de un volumen de mezcla disgregada, excluyendo el volumen de los vacíos.

**ÍNDICE DE PENETRACIÓN (IP):** es un indicador del comportamiento reológico del asfalto y la susceptibilidad de su consistencia a los cambios de temperatura. Suele variar entre 1 y -1. A mayor índice, menor susceptibilidad térmica del asfalto.

**MATERIAL PÉTREO:** es una combinación de áridos naturales o de trituración que conforman la estructura de la mezcla asfáltica. Se divide según su granulometría en agregado grueso, agregado fino o arena y llenante mineral o polvo. Se pueden clasificar según su naturaleza química en silíceos o calizos. Los materiales silíceos cuentan con mayor concentración de sílica, son de naturaleza ácida, son hidrófilos y más propensos al daño por humedad. Los calizos tienen alto contenido de carbonato de calcio, son hidrófobos y son más afines al asfalto, por lo que se consideran de mejor calidad.

**MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE:** es la combinación de asfalto y material pétreo mezclados y compactados a altas temperaturas para formar capas de pavimento. Sus propiedades dependen del tipo de asfalto, las características del material, las proporciones en la que se mezclen y el grado de compactación.

**PARTÍCULAS FRACTURADAS:** se consideran fracturadas las partículas de agregado grueso que tengan al menos una cara fracturada con área transversal mayor o igual a la cuarta parte del área transversal máxima de la partícula.

**PENETRACIÓN ( $P_n$ ):** es un indicador empírico de la consistencia de los asfaltos y también una forma de clasificarlos. Representa la distancia en decimas de milímetro que penetra una aguja al caer verticalmente con una carga de 100 gramos durante 5 segundos en una probeta de asfalto a 25°C.

**PORCENTAJE DE ASFALTO ABSORBIDO ( $P_{ba}$ ):** Porcentaje de volumen de asfalto que es absorbido por los poros de las partículas de material.

**PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO ( $P_{be}$ ):** Contenido de asfalto en la mezcla excluyendo la fracción absorbida por material. Se expresa como porcentaje de la masa total de la mezcla.

**PUNTO DE ABLANDAMIENTO ( $T_{AB}$ ):** otro método arbitrario de consistencia del asfalto que indica su tendencia a fluir al someterse a temperaturas altas.

**PUNTO DE CHISPA:** ensayo de seguridad del asfalto con el que se determina la temperatura a la cual sus vapores se encienden en presencia de una chispa o llama.

**RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA (TI):** Relación entre la carga diametral máxima soportada por una probeta de mezcla y su área lateral.

**VACÍOS DE AIRE ( $\%V_a$ ):** es el volumen de vacíos con aire de una mezcla compactada. Se expresa como porcentaje del volumen de la mezcla.

**VACÍOS EN MATERIAL ( $\%VAM$ ):** es el volumen del espacio entre las partículas de material en la mezcla compactada, incluyendo el volumen ocupado por el asfalto y los vacíos de aire. Se expresa como porcentaje del volumen de la mezcla.

**VACÍOS LLENOS DE ASFALTO ( $\%VFA$ ):** fracción de vacíos en material llena de asfalto.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. MANUFACTURAS Y PROCESOS INDUSTRIALES (MPI)

MPI es una empresa con más de 40 años de experiencia en la transformación, comercialización y aplicación de productos asfálticos para el sector vial. Cuenta con plantas de procesos y almacenamiento en las ciudades de Barrancabermeja, Villavicencio y Cartagena. Los productos que ofrece son el resultado de la transformación de asfalto base procedente de la refinería de Ecopetrol o de asfaltos importados. Estos son:

- Asfaltos de penetración normalizados
- Asfaltos de penetración con mejor adherencia (40/50, 60/70, 80/100)
- Asfaltos modificados con polímeros
- Asfaltos modificados con polímeros con mejor adherencia
- Asfalto caucho
- Emulsiones asfálticas
- Asfalto líquido

La misión de la empresa involucra la mejora continua de sus productos y la garantía de su calidad. Para esto cuenta con un laboratorio de calidad, desarrollo y mejora ubicado en la sede de Barrancabermeja en donde:

- Se verifica que los productos y procedimientos satisfagan las necesidades del cliente y cumplan con las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).
- Se prestan servicios a compañías del sector vial como la caracterización de materiales pétreos y el diseño y evaluación de mezclas asfálticas.
- Se evalúan nuevas técnicas y materias primas que permitan mejorar tanto los procesos como los productos.

**1.1.1. Asfaltos de penetración con mejor adherencia** El asfalto de penetración aditivado con mejorador de adherencia es el producto relevante para el desarrollo de la práctica. Estos asfaltos se utilizan para mezclas asfálticas que presentan susceptibilidad al daño por humedad.

Este tipo de asfalto se produce normalizando el asfalto base según las especificaciones del INVIAS y posteriormente adicionándole el aditivo mejorador de adherencia. La normalización consiste en ablandar o endurecer el asfalto base dependiendo del grado de penetración que se requiera. Normalmente la penetración del asfalto base oscilan entre 70 y 80 por lo que para asfaltos 40/50 y 60/70 se debe endurecer, mientras que para los 80/100 generalmente se ablanda.

La susceptibilidad de una mezcla a la humedad y la efectividad de un aditivo se evalúan según la norma INV E 725 [1] con una prueba de tracción indirecta. El ensayo consiste en determinar la relación de tracción indirecta (RTI) de la mezcla como la razón entre la carga máxima resistida por una muestra húmeda y una muestra seca. Para que una mezcla se considere resistente a la humedad su valor de RTI debe ser igual o superior al 80%.

**1.1.2. Diseño de mezclas asfálticas según el INVIAS** El INVIAS regula las características de la mezcla y de sus componentes con la norma INV ART 450 [2]. para garantizar que sea resistente el desgaste por las condiciones ambientales y soporte las cargas del tráfico sin quebrarse o deformarse. Ver Anexo A.

1.1.2.1. Mezcla El tipo de mezcla a diseñar se selecciona según el espesor y el nivel de la capa (superficial, intermedia o base). Este diseño se realiza mediante el método Marshall con el cual se determina el porcentaje de asfalto necesario para que la mezcla cumpla los criterios de deformación, resistencia, rigidez, porcentaje de vacíos, y relación llenante/asfalto efectivo.

1.1.2.2. Asfalto El tipo de asfalto de penetración se selecciona en función del tipo de capa, la temperatura promedio de la zona y el nivel de tráfico requerido, siendo el asfalto 60/70 el más utilizado. Esto se regula para garantizar que el asfalto a utilizar sea poco susceptible a los cambios de temperaturas y mantenga su naturaleza viscoelástica de tal forma que a las condiciones de trabajo no sea tan rígido como para quebrarse por fatiga ni tan blando como para deformarse. La norma también especifica otros criterios de comportamiento reológico, susceptibilidad térmica, envejecimiento y seguridad que debe cumplir el asfalto según su rango de penetración.

1.1.2.3. Material La granulometría del material empleado debe estar dentro de límites establecidos para cada tipo de mezcla y cumplir con los estándares de dureza, limpieza y geometría especificados para cada nivel de tráfico.

1.1.2.4. Aditivo Si se requiere el uso de aditivos, estos deben ser estables a las temperaturas de trabajo del asfalto y no alterar sus propiedades disminuyendo su calidad.

## **1.2. SUSCEPTIBILIDAD DE LAS MEZCLAS AL DAÑO POR HUMEDAD**

**1.2.1. Estructura del asfalto** Está conformado por hidrocarburos que según su estructura se agrupan en asfaltenos, resinas, aromáticos y saturados. Los asfaltenos y resinas son anillos aromáticos condensados con cadenas alifáticas y heteroátomos de nitrógeno, azufre y oxígeno; que forman moléculas insolubles de alta polaridad y alto peso molecular. Éstas se unen formando una red que le da la estructura y resistencia mecánica al asfalto. Por otro lado, los aromáticos y saturados son moléculas apolares y de menor peso molecular que le aportan fluidez al asfalto y conforman el medio en el que están dispersos los aromáticos y

resinas. Las concentraciones de cada fracción varían según el crudo de origen y el proceso de fraccionamiento [3] [4].

**1.2.2. Teorías de adherencia** Existen diferentes teorías que explican el tipo de interacciones que da lugar al fenómeno de la adherencia entre el asfalto y el material [4]:

- Teoría mecánica: El asfalto penetra en las irregularidades del material y al endurecerse queda fijo a su superficie.
- Teoría de reacción química: La interacción química de mayor relevancia se da entre ácidos carboxílicos del asfalto que reaccionan con metales presentes en la superficie del material. Puede formar sales monovalentes de sodio y potasio que son fácilmente removidas por el agua o sales divalentes de calcio que al ser insolubles resisten la acción del agua [5].
- Teoría de orientación molecular y energía superficial: Las moléculas polares disueltas en el medio apolar se alinean en la superficie de asfalto para satisfacer la demanda energética de la superficie también polar del material, resultando en una atracción por fuerzas débiles. Al disminuir energía libre superficial en la interfase, aumenta la mojabilidad del material.

**1.2.3. Mecanismos del daño por humedad** Se han propuesto diversos mecanismos mediante los cuales el agua afecta la estructura de la mezcla. Los más reconocidos son [4] [6]:

- Separación entre la película de asfalto y la superficie del material: El asfalto, a diferencia del agua, tiene baja polaridad y se une al material principalmente por la acción de fuerzas débiles de dispersión, mientras que las moléculas dipolares de agua se interponen en la interfase desplazando al asfalto. Por otro lado, la afinidad del material y el agua se evidencia en la disminución de la energía libre superficial cuando el agua entra en contacto con la interface. La

interfase húmeda conforma un sistema termodinámicamente más estable que la seca.

- Desplazamiento: Los bordes finos del material, la presencia arcillas o un recubrimiento incompleto son factores que pueden provocar rupturas en la película de asfalto que permiten la llegada del agua a interfase. Cambios en el pH del agua al llegar a la interfase alteran el tipo de grupos polares adsorbidos, ocasionando la formación de una capa cargada negativamente en las superficies del agregado. Este desequilibrio atrae más agua y desplaza la capa de asfalto.
- Emulsificación espontánea: Es la emulsificación inversa de gotas de agua que avanza hasta llegar al material y romper el enlace adhesivo. Aumenta con asfaltos de baja viscosidad y con la presencia de emulsificantes como arcillas.
- Presión en poros: El agua atrapada en los vacíos de la mezcla es sometida a esfuerzos por las cargas repetitivas producto del tráfico y las variaciones de temperatura. Esto hace que la presión en los poros aumente contribuyendo a la ruptura de la película de asfalto y a la formación de grietas.
- Erosión hidráulica: Se produce por la entrada de agua al pavimento por la presión que ejercen las llantas sobre una superficie saturada.

**1.2.4. Factores influyentes** Los siguientes son factores que disminuyen el riesgo de la mezcla a fallar por humedad [6]:

- Asfaltos viscosos con mayor concentración de moléculas polares y baja permeabilidad.
- Material calizo, duro, rugoso, seco y libre de arcillas.
- Mezclas con bajo contenido de vacíos con aire ligado a un diseño y compactación adecuados.

**1.2.5. Acción de aditivos mejoradores de adherencia** Son sustancias tensoactivas que aumentan la adherencia entre el asfalto y el material gracias a que promueven la orientación de moléculas polares del asfalto hacia a la interfase.

También facilitan la mojabilidad del material al disminuir la tensión superficial del asfalto. Su efectividad depende de su afinidad con el asfalto y el material.

Los más utilizados son compuestos aminados con cadenas alifáticas largas. Su naturaleza catiónica los hace afines a los materiales de carácter ácido que son los más propensos al daño por humedad. El grupo amino de la molécula forma un enlace iónico con la sílice de la superficie del material, mientras que la cadena alifática permanece disuelta en el asfalto. [7]

Deben usarse en las proporciones adecuadas. Con concentraciones muy bajas, la cantidad de aditivo que alcanza a migrar a la interfase puede ser insuficiente y con concentraciones muy altas el exceso de aditivo se alinea formando una segunda capa en la interfase, la cual es fácilmente removible por el agua. También debe tenerse en cuenta la estabilidad del aditivo a altas temperaturas. Ciertos aditivos pueden reaccionar con algunos componentes del asfalto durante su adición y homogenización, inactivándose y disminuyendo su efectividad [8].

## 2. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de la práctica empresarial es evaluar a nivel de laboratorio el desempeño de dos nuevos aditivos comerciales (#2 y #3) en comparación con el aditivo #1, usado actualmente por la empresa en la producción de asfaltos de penetración con mejor adherencia. El criterio de evaluación corresponde al efecto de los aditivos en la caracterización del asfalto y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla, tomando como control al asfalto base normalizado.

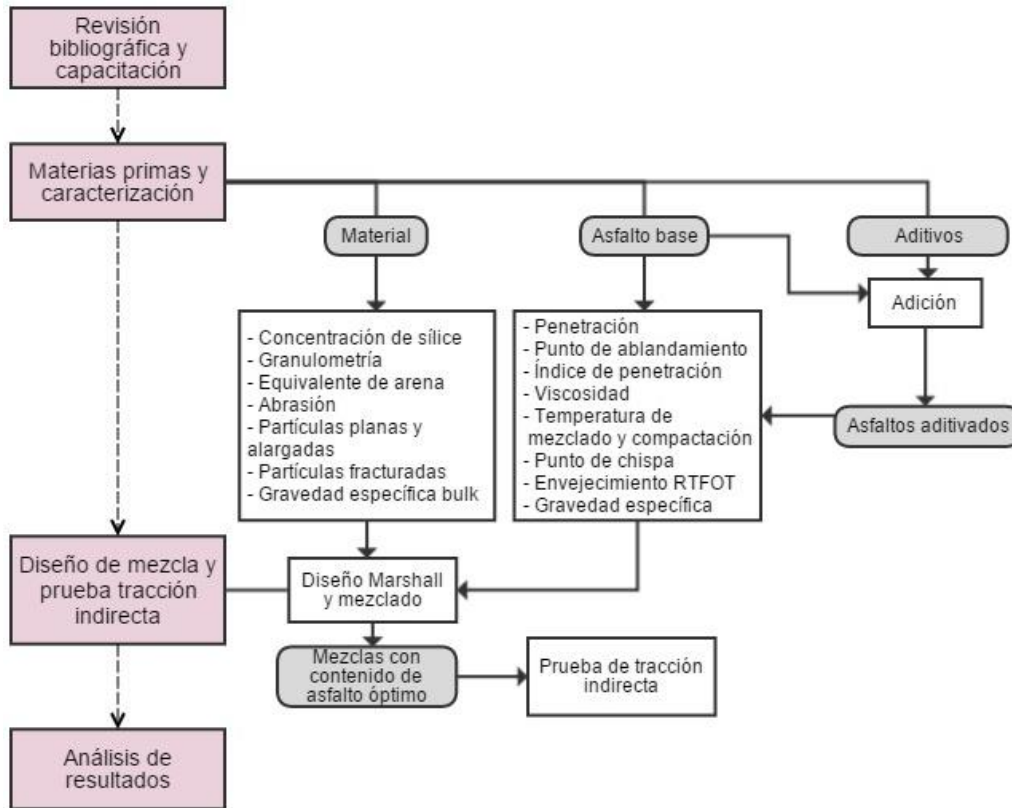
Los objetivos específicos establecidos son:

- Aditivar y caracterizar asfalto base normalizado y observar el efecto de cada aditivo en su consistencia, seguridad y grado de envejecimiento.
- Construir probetas de mezclas asfálticas con el contenido óptimo de asfalto y con material normalizado que demuestre potencial al daño por humedad.
- Evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de las probetas mediante una prueba de tracción indirecta.

Se espera que este estudio, en caso de obtener resultados positivos, sirva como punto de partida para mejorar el proceso de transformación de asfaltos con la incorporación de nuevos aditivos. En el caso contrario, se espera que aporte argumentos que justifiquen descartar los aditivos evaluados.

### 3. METODOLOGÍA

Figura 2. Diagrama metodológico



Fuente: Autor

#### 3.1. MATERIAS PRIMAS Y CARACTERIZACIÓN

**3.1.1. Asfalto** Se partió de un asfalto base normalizado de penetración 60/70 procedente de la refinería de Ecopetrol, al cual se le adicionó cada aditivo en las dosis utilizadas comúnmente para este proceso que son 0.5% y 1% del peso del asfalto. Se homogenizó cada asfalto con un agitador mecánico durante 30 minutos a 150°C para simular el tratamiento que se le da en planta. Posteriormente se hicieron los ensayos de caracterización.

3.1.1.1. Penetración (Pn) INV E-706 [9] Utilizando un penetrómetro automático se mide la penetración de cada asfalto.

3.1.1.2. Punto de ablandamiento (T<sub>AB</sub>) INV E-712 [10] Se calientan en un baño de agua dos discos de asfalto a una tasa de temperatura controlada, sobre cada uno de ellos se ubica una esfera metálica. Se toma como punto de ablandamiento al promedio de temperaturas a las cuales los discos se ablandan lo suficiente para que las esferas desciendan una distancia de 25 mm.

3.1.1.3. Índice de penetración (IP) INV E-724 [11] Se calcula con las ecuaciones 1 y 2 a partir del T<sub>AB</sub> y el Pn.

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

$$f = \frac{50 * \log[800/Pn]}{T_{AB} - 25} \quad [2]$$

3.1.1.4. Viscosidad INV E-717 [12] Utilizando un viscosímetro Brookfield se construye una curva registrando la viscosidad del asfalto a diferentes temperaturas, desde 60°C hasta 160°C, a intervalos de 20°C.

3.1.1.5. Temperatura de mezclado y compactación INV 753 [13] Son los rangos de temperatura a los que el asfalto presenta una viscosidad de 150 a 190 cP y de 250 a 310 cP respectivamente. Se determinan linealizando la curva de viscosidad e interpolando los rangos de temperatura correspondientes a cada rango de viscosidad.

3.1.1.6. Punto de chispa INV E-709 [14] Se calienta una copa con asfalto a una tasa de temperatura controlada mientras se pasa una llama sobre ella a intervalos de tiempo regulares. Se registra la temperatura a la cual el fuego se propaga por la superficie de asfalto.

3.1.1.7. Envejecimiento RTFOT E-720 [15] En un horno giratorio a 163°C se calientan las películas de asfalto en movimiento poniéndolas en contacto con una corriente de aire durante 85 minutos. Se pesa y caracteriza el asfalto antes y después del ensayo. Se determina el porcentaje masa perdida, el incremento en el punto de ablandamiento, la relación entre la penetración del asfalto original y el residual y la relación entre las viscosidades o índice de envejecimiento.

3.1.1.8. Gravedad específica ( $G_b$ ) INV E-707 [16] Utilizando un picnómetro calibrado se determina la gravedad específica de una muestra de asfalto como la relación entre su peso y el peso del mismo volumen de agua.

**3.1.2. Material** Se seleccionó y caracterizó un triturado de roca utilizado para mezclas densas en caliente tipo MDC-2 y nivel de tráfico NT3. Se caracterizó para verificar que sus propiedades y granulometría se ajustaran a la norma y se corroboró su baja calidad mediante una prueba de concentración de sílice. La descripción de los ensayos de caracterización se presenta en el Anexo B.

## **3.2. DISEÑO DE LA MEZCLA Y PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA**

**3.2.1. Diseño Marshall** Se aplica el método Marshall (INV E-748) [17] para hallar el porcentaje de asfalto óptimo con el que se prepararán las mezclas a evaluar.

3.2.1.1. Mezclado y compactación Se mezcla el asfalto con el material en una mezcladora planetaria. Se preparan 5 mezclas variando el porcentaje de asfalto en incrementos del 0.5% dentro de un rango establecido a partir de la experiencia previa con mezclas similares. Por cada mezcla se compactan 3 probetas cilíndricas de 1200 g cada una, sometiéndolas a 70 golpes por cada cara con un martillo de mango fijo. El mezclado y la compactación se hacen a temperaturas dentro de los rangos obtenidos a partir de la curva de viscosidad.

3.2.1.2. Gravedad específica máxima de la mezcla ( $G_{mm}$ ) INV E-735 [18] Para cada mezcla se toma una muestra, se pesa en seco, se satura con agua y utilizando un picnómetro se mide la masa de agua desplazada. Se calcula la razón entre la masa seca de la muestra y la masa de agua.

3.2.1.3. Gravedad específica bulk de la mezcla ( $G_{mb}$ ) INV E-733 [19] Se pesa una probeta de mezcla compactada, se satura con agua aplicando vacío, se seca su superficie y se determina su peso al aire y su peso sumergida en agua. La diferencia entre ambas medidas es la masa de agua desplazada. Se calcula la razón entre las masa de la probeta seca y la masa de agua

3.2.1.4. Análisis de densidad y vacíos INV E-799 [20] A partir de los valores de  $G_{mm}$ ,  $G_{mb}$ ,  $G_{sb}$  y porcentaje de asfalto ( $P_b$ ) se determina el porcentaje de vacíos de aire de cada probeta ( $\%V_a$ ), el porcentaje de vacío entre las partículas de agregado ( $\%VAM$ ) y el porcentaje vacíos llenos de asfalto ( $\%VFA$ ). Se calculan con las ecuaciones 3, 4 y 5.

$$\%V_a = 100 \left[ 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right] \quad [3]$$

$$\%VAM = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} (100 - P_b) \quad [4]$$

$$\%VFA = 100 \left[ 1 - \frac{\%V_a}{\%VAM} \right] \quad [5]$$

3.2.1.5. A partir de los valores de  $G_{mm}$ ,  $G_b$ ,  $G_{sb}$ ,  $P_b$  y porcentaje de llenante mineral ( $P_{200}$ ), se calcula la gravedad específica efectiva del material ( $G_{se}$ ), el porcentaje de asfalto absorbido por el material ( $P_{ba}$ ), el porcentaje de asfalto efectivo ( $P_{be}$ ) y la relación llenante/asfalto efectivo, utilizando las ecuaciones 6, 7, 8 y 9.

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad [6]$$

$$P_{ba} = 100 \left[ \frac{G_{ss} - G_{sb}}{G_{ss} * G_{sb}} \right] G_b \quad [7]$$

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} (100 - P_b) \quad [8]$$

$$\text{Relación llenante/asfalto efectivo} = \frac{P_{200}}{P_{be}} \quad [9]$$

3.2.1.6. Deformación y resistencia: Se mantienen las probetas en un horno a 60°C durante 2 horas. Se aplica carga sobre cada una hasta la falla, utilizando una prensa con una velocidad vertical de 50 mm/min. Se registra la carga máxima resistida por cada probeta y su deformación al fallar. Se calcula la rigidez de la probeta como la relación entre su resistencia y su deformación.

3.2.1.7. Se promedian los valores de deformación, resistencia, porcentaje de vacíos y relación llenante/asfalto efectivo de las tres probetas de cada mezcla, se grafican en función del porcentaje de asfalto y se ajustan a una línea de tendencia. Utilizando las ecuaciones de tendencia se interpola el rango de porcentaje de asfalto para el cual los valores obtenidos se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma. Se toma como asfalto óptimo al promedio entre el porcentaje máximo y el mínimo permitido.

**3.2.2. Prueba de Tracción Indirecta INV E 725 [1]** Una vez obtenido el porcentaje de asfalto óptimo se procede a preparar las mezclas y determinar su RTI.

3.2.2.1. Se mezcla material con cada uno de los 6 tipos de asfalto en la proporción obtenida con el método Marshall y se determina la  $G_{mm}$  de cada mezcla.

3.2.2.2. Para cada mezcla se compactan 6 probetas cilíndricas en un compactador giratorio automático, ajustando el %V<sub>a</sub> entre 6% y 8%. Se mide la altura de cada probetas, se halla su G<sub>mb</sub> y se calcula el %V<sub>a</sub>.

3.2.2.3. Se clasifican los especímenes en dos subgrupos, uno húmedo y uno seco, de tal forma que el promedio del %V<sub>a</sub> de un grupo sea aproximadamente igual al del otro. El subgrupo seco se guarda a temperatura ambiente

3.2.2.4. Se satura con agua el subgrupo húmedo en una cámara de vacío durante 5 minutos. Se halla el volumen de vacíos con aire (V<sub>a</sub>) con el %V<sub>a</sub> y el volumen total de la probeta. Se toma la diferencia de masa de la probeta antes y después de ser saturada como el volumen de agua absorbida (V<sub>wa</sub>). Se calcula el grado de saturación (%Sat) con la ecuación 10 y se verifica que quede entre 55% y 80%.

$$\%Sat = \frac{V_{wa}}{V_a} * 100 \quad [10]$$

Se acondicionan las probetas húmedas en un baño de agua a 60°C por 24 h y posteriormente se pasan a un baño a 25°C por 1 h. Se calcula nuevamente su %Sat. Las probetas secas se acondicionan en un baño a 25°C por 20 minutos. Se mide la altura (t) y el diámetro (D) de todas las probetas.

3.2.2.5. Se aplica una carga diametral con una prensa a una velocidad de 50 mm/min, hasta registrar la carga máxima resistida por cada probeta (P). Se calcula la resistencia a la tensión indirecta (TI) de cada una con la ecuación 11 y la relación entre la TI promedio de las húmedas y la TI promedio de las secas (RTI).

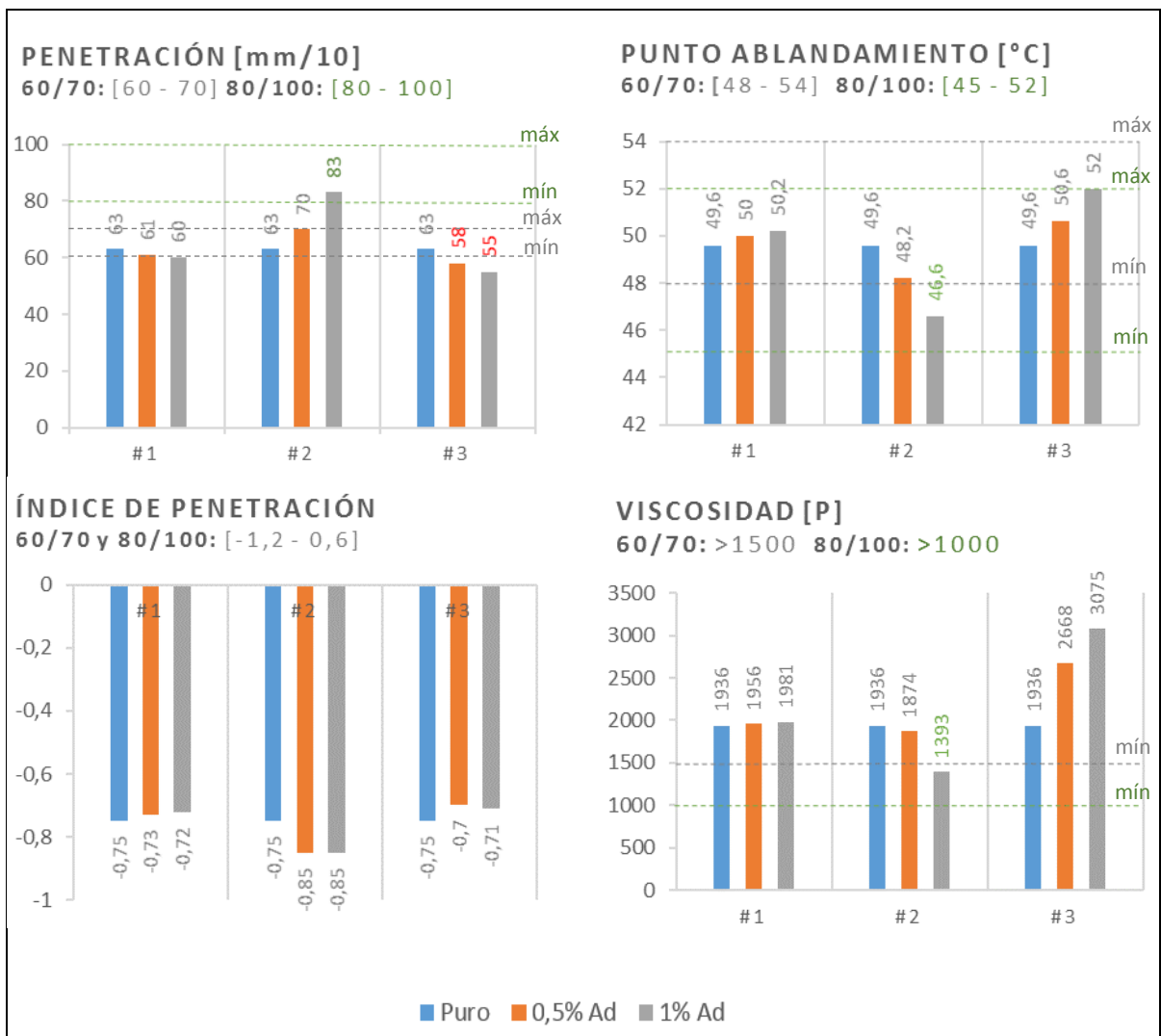
$$TI = \frac{2P}{\pi tD} \quad [11]$$

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. MATERIAS PRIMAS Y CARACTERIZACIÓN

**4.1.1. Asfalto** La figura 2 muestra los resultados de los ensayos de consistencia, junto con los rangos permitidos para asfaltos de penetración 60/70 y 80/100.

Figura 3. Resultados de las pruebas de consistencia



Fuente: Autor.

Comparando el grado de dispersión de los datos se encontró que el #1 es el aditivo de mejor comportamiento, al ser el que genera menor variación en la consistencia del asfalto. Este aditivo endurece ligeramente el asfalto lo cual se evidencia en la disminución de la penetración y el aumento del punto de ablandamiento, índice de penetración y viscosidad. Lo sigue el aditivo #3 que endurece el asfalto en mayor proporción y aumenta significativamente su viscosidad. Por último, el aditivo #2 fue el que más afectó la consistencia del asfalto ablandándolo considerablemente y convirtiéndolo en 80/100 a dosis de 1%.

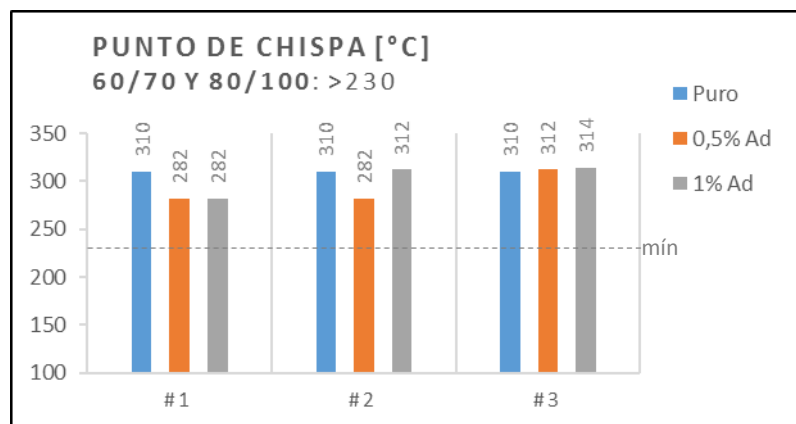
La tabla 1 muestra el promedio de los rangos de temperatura de mezclado y compactación (Anexo B). Se ve un aumento significativo en las temperaturas de los asfaltos # 3 debido a su alta viscosidad.

Tabla 1. Temperaturas de mezclado y compactación promedio

Temperaturas	Tipo de asfalto						
	Puro	#1		#2		#3	
		0,5% Ad	1% Ad	0,5% Ad	1% Ad	0,5% Ad	1% Ad
<b>Mezclado [°C]</b>	149,5	150,0	149,5	148,5	148,0	154,0	154,5
<b>Compactación [°C]</b>	138,5	139,0	138,5	137,5	135,5	141,5	143,5

Fuente: Autor.

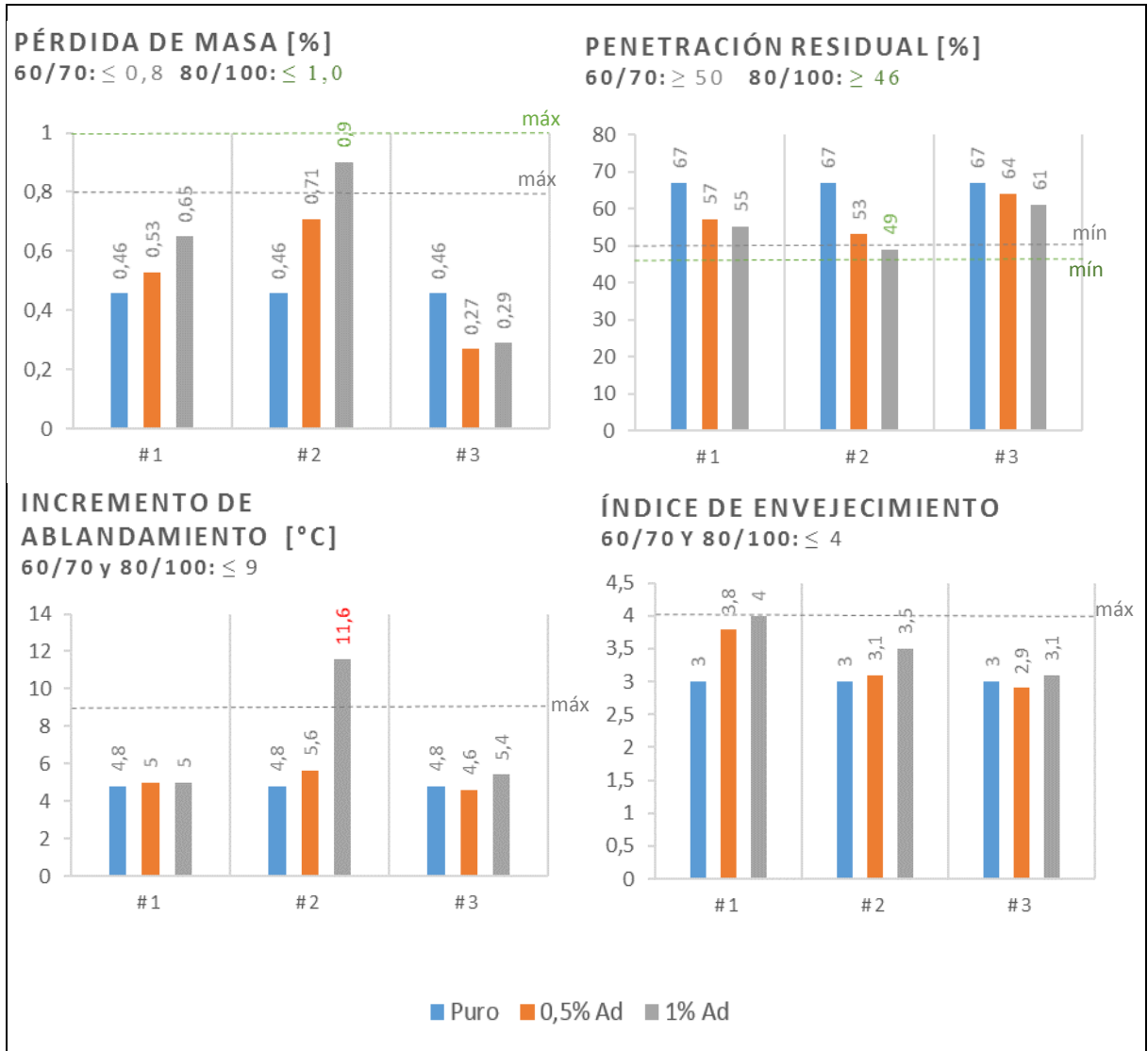
Figura 4. Punto de chispa de los asfaltos



Fuente: Autor.

En la figura 3 se muestran los resultados del ensayo de punto de chispa. Los 7 asfaltos presentan valores alejados de 230 °C, que es la temperatura mínima permitida, por lo que se consideran seguros.

Figura 5. Resultados del envejecimiento RTFOT



Fuente: Autor.

Los resultados de los ensayos de envejecimiento de la figura 4 indican que los aditivados con el #3 son los menos sensibles a la pérdida de volátiles y el endurecimiento por la acción del aire y la temperatura. El aditivo #1 muestra un

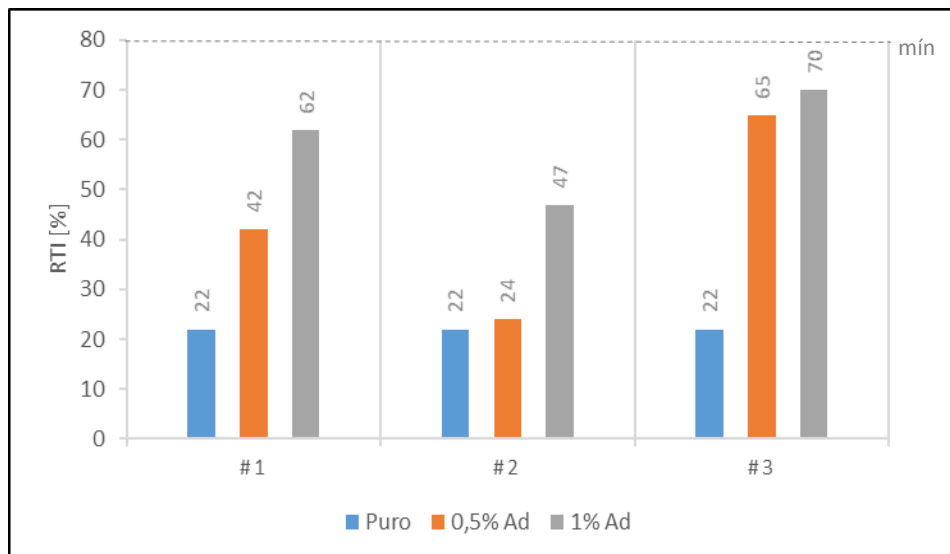
índice de envejecimiento elevado, sin embargo se mantiene dentro de la norma, a diferencia del #2 que a una concentración de 1% supera el máximo incremento de ablandamiento permitido.

**4.1.2. Material** El porcentaje de sílice del material seleccionado fué de 78,1%. Esto indica que es adecuado para el estudio pues su carácter ácido lo hace propenso al daño por humedad. Las propiedades de dureza, limpieza y geometría se encuentran dentro de los rangos permitidos. Ver Anexo C.

#### 4.2. DISEÑO DE LA MEZCLA Y PRUEBA DE ADHERENCIA

El porcentaje de asfalto óptimo obtenido con el método Marshall fue de 5,1%. En el Anexo E se muestra la hoja de cálculo utilizada para su determinación.

Figura 6. Relación de tensión indirecta de las mezclas



Fuente: Autor.

En la figura 5 se muestran los resultados de la prueba de tracción indirecta. Ninguna mezcla se considera resistente a la humedad al no alcanzar el valor de RTI mínimo (80%).

La mezcla # 3 es la que muestra mejor desempeño. Con un 0,5% de concentración de aditivo supera la RTI de las demás mezclas casi triplicando la resistencia de la mezcla original.

La mezcla #1 también presenta una mejora en su adherencia. Se destaca que los valores de RTI para la mezcla # 1 son más sensibles a la concentración de aditivo que los valores de la mezcla #3, que muestran poca variabilidad.

La mezcla # 2 fue la más susceptible a la humedad. Muestra una mejora casi despreciable con dosis de aditivo del 0,5%.

Tabla 2. Resumen de los resultados experimentales.

CRITERIO		ADITIVOS		
		#1	#2	#3
ASFALTO	Consistencia	Poca variación	Ablanda	Endurece
	Seguridad	Cumple	Cumple	Cumple
	Envejecimiento	Incrementa	Incrementa	Poca variación
	Manejabilidad	Poca variación	Poca variación	Disminuye
MEZCLA	RTI	Incremento significativo	Incremento leve	Incremento significativo
	Sensibilidad de RTI respecto a concentración de aditivo	Muy sensible	Muy sensible	Poco sensible

Fuente: Autor.

## 5. CONCLUSIONES

El aditivo #1 mostró los resultados satisfactorios que se esperaban tanto en la caracterización como en el ensayo de susceptibilidad. Generó cambios mínimos en la consistencia del asfalto y lo mantuvo normalizado. Esto, sumado a la tendencia que muestran valores de RTI, sugiere que con dosis superiores al 1% se puede esperar un aumento significativo en la RTI sin que se vea afectada la calidad del asfalto.

El aditivo # 2 tuvo el peor desempeño. A dosis altas ablanda el asfalto drásticamente dificultando su normalización e incumple los criterios de envejecimiento, y a dosis bajas no genera una mejora significativa en la susceptibilidad de la mezcla a la humedad.

Se evidenció que el aditivo # 3 fué el más eficaz de los tres aditivos. Sin embargo la caracterización del asfalto mostró que el aditivo afecta su consistencia, en especial su viscosidad. El aumento en la viscosidad, aunque favorece la adherencia en la mezcla, dificulta su manejabilidad durante el mezclado y la compactación, demandando temperaturas más altas. También se observó poca variabilidad de la RTI de la mezcla #3 respecto a la concentración de aditivo utilizada. Aunque los datos no son suficientes para determinar una tendencia confiable, esta característica abre la posibilidad de que a concentraciones menores de 0,5% se sigan obteniendo buenos resultados con menor variación en la consistencia del asfalto.

Las conclusiones obtenidas con este estudio aplican únicamente para mezclas asfálticas en caliente, con materiales de carácter ácido y asfaltos de penetración.

## 6. RECOMENDACIONES

Se concluye que el aditivo #2 muestra evidencia suficiente para afirmar que no cumple con los requerimientos del proceso y se sugiere descartarlo.

Por el contrario, la evaluación del aditivo # 3 no es concluyente y queda abierta a estudios posteriores. Se presume que este aditivo podría traerle mejoras al proceso. Para comprobarlo se recomienda:

- Evaluar su desempeño a concentraciones menores de 0,5% para comprobar la hipótesis de que con dosis bajas de este aditivo se pueden obtener mejoras significativas en la RTI de la mezcla sin desnormalizar el asfalto.
- Realizar un estudio de consistencia más amplio, partiendo de asfaltos base no normalizados para considerar aprovecharlo como mejorador de adherencia y al mismo tiempo como agente normalizante para producir asfalto 60/70 con mejor adherencia.

## BIBLIOGRAFÍA

DAS, Subrata K. Evaluation of asphalt--aggregate bond and stripping potential. Texas, 2004. P. 94.

HICKS Russel G. Moisture damage in asphalt concrete. National Cooperative Highway Research Program. Washington D.C. 1991. P. 90.

LITTLE, Dallas N y JONES IV, David. Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements. Moisture sensitivity of asphalt pavements: A national seminar. Washington D.C, 2003. P. 361.

MEHRARA, Amir y KHODAII, Ali. A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete. Construction and Building Materials, 2013, vol. 38, P. 19.

PUELLO, Juliana. Evolución del comportamiento viscoelástico lineal de fracciones pesadas del petróleo sometidas a envejecimiento acelerado. Tesis doctoral. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2012. P. 237.

WAGH Vinay. The effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding. Strategic Highway Research Program. Washington D.C. 1991. P. 24.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INV E 725 (2013). Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta.
- [2] INV ART. 450 (2013). Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico).
- [3] PUELLO, Juliana. Evolución del comportamiento viscoelástico lineal de fracciones pesadas del petróleo sometidas a envejecimiento acelerado. Tesis doctoral. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2012. P. 237.
- [4] LITTLE, Dallas N y JONES IV, David. Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements. Moisture sensitivity of asphalt pavements: A national seminar. Washington D.C, 2003. P. 361.
- [5] DAS, Subrata K. Evaluation of asphalt--aggregate bond and stripping potential. Texas, 2004. P. 94.
- [6] MEHRARA, Amir y KHODAIL, Ali. A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete. Construction and Building Materials, 2013, vol. 38, p. 19.
- [7] WAGH Vinay. The effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding. Strategic Highway Research Program. Washington D.C. 1991. P. 24..
- [8] HICKS Russel G. Moisture damage in asphalt concrete. National Cooperative Highway Research Program. Washington D.C. 1991. P. 9o.
- [9] INV E 706 (2013). Penetración de los materiales bituminosos.
- [10] INV E 712 (2013). Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola).

- [11] INV E 724 (2013). Índice de penetración de los cementos asfálticos.
- [12] INV E 717 (2013). Determinación de la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional.
- [13] INV E 753 (2013). Gráfica viscosidad temperatura para cementos asfálticos.
- [14] INV E 709 (2013). Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland.
- [15] INV E 720 (2013). Efecto del calor y el aire sobre el asfalto en lámina delgada y rotatoria.
- [16] INV E 707 (2013). Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro).
- [17] INV E 748 (2013). Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall.
- [18] INV E 735 (2013). Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos.
- [19] INV E 733 (2013). Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos.
- [20] INV E 799 (2013). Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente.
- [21] INV E 213 (2013). Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino
- [22] INV E 133 (2013). Equivalente de arena de suelos y agregados finos.
- [23] INV E 238 (2013). Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-deval.
- [24] INV E 240 (2013). Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos.

[25] INV E 227 (2013). Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.

[26] INV E 128 (2013). Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua.

[27] INV E 222 (2013). Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.

[28] INV E 223 (2013). Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.

## ANEXO A

### ESPECIFICACIONES DEL INVIAS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Tabla 3. Tipo de mezcla a diseñar

TIPO DE CAPA	ESPELOR COMPACTO (mm)	TIPO DE MEZCLA
Rodadura	30 – 40	MDC-10
	40 – 60	MDC-19, MSC-19
	> 60	MDC-25, MDC-19, MSC-19
Intermedia	> 50	MDC-25, MSC-25
Base	> 75	MSC-25, MGC-38, MGC-25

Fuente: INVIAS [2]

Tabla 4. Criterios de diseño de mezclas asfálticas en caliente por el método

CARACTERÍSTICA		NORMA ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS		
			CATEGORÍA DE TRÁNSITO		
			NT1	NT2	NT3
Compactación (golpes/cara)		E-748 ( E-800) (Nota 1)	50	75 (112)	75 (112)
Estabilidad mínima (N)			5,000	7,500 (16,875)	9,000 (33,750)
Flujo(mm) (Nota 2)			2.0 a 4.0	2.0 a 4.0 (3.0 a 6.0)	2.0 a 3.5 (3.0 a 5.3)
Relación Estabilidad / Flujo (kN/mm)			2.0 a 4.0	3.0 a 5.0 (4.5 a 7.5)	3.0 a 6.0 (4.5 a 9.0)
Vacíos con aire (Va), % (Nota 3)	Rodadura	E-736	3.0 a 5.0	3.0 a 5.0	4.0 a 6.0
	Intermedia	o	4.0 a 8.0	4.0 a 7.0	4.0 a 7.0
	Base	E-799	NA	5.0 a 8.0	5.0 a 8.0
Vacíos en los agregados minerales (VAM), % mínimo	T. Máx. 38 mm	E-799	13.0		
	T. Máx. 25 mm		14.0		
	T. Máx. 19 mm		15.0		
	T. Máx. 10 mm		16.0		
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %		E-799	65 a 80	65 a 78	65 a 75
Relación Llenante / Ligante efectivo, en peso		E-799	0.8 a 1.2		

Fuente: INVIAS [2]

Tabla 5. Tipo de asfalto a emplear

TIPO DE CAPA	NT 1			NT 2			NT 3		
	TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA REGIÓN (° C)								
	> 24	15-24	< 15	> 24	15-24	< 15	> 24	15-24	< 15
<b>Rodadura e Intermedia</b>	60-70	60-70 u 80-100	80-100	60-70	60-70 u 80-100	80-100	40-50 60-70 o Tipo II (a o b) o Tipo III	40-50 60-70 o Tipo II (a o b)	60-70 80-100 o Tipo IIb
<b>Base</b>	NA			60-70 u 80-100	60-70 u 80-100	80-100	60-70	60-70 u 80-100	80-100

Fuente: INVIAS [2]

Tabla 6. Especificaciones para asfaltos de penetración

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	GRADO DE PENETRACIÓN					
		40-50		60-70		80-100	
		MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
<b>Asfalto original</b>							
Penetración (25° C, 100 g, 5 s), 0.1 mm	E-706	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento, °C	E-712	52	58	48	54	45	52
Índice de penetración	E-724	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6
Viscosidad absoluta (60° C), P	E-716 o E-717	200 0	-	150 0	-	100 0	-
Ductilidad (25° C, 5 cm/min), cm	E-702	80	-	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno, %	E-713	99	-	99	-	99	-
Contenido de agua, %	E-704	-	0.2	-	0.2	-	0.2
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, °C	E-709	240	-	230	-	230	-
Contenido de parafinas, %	E-718	-	3	-	3	-	3
<b>Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo INV E-720</b>							
Pérdida de masa por calentamiento, %	E-720	-	0.8	-	0.8	-	1.0
Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	E-706	55	-	50	-	46	-
Incremento en el punto de ablandamiento, °C	E-712	-	8	-	9	-	9
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60° C) del asfalto residual y el asfalto original	E-716 o E-717	-	4	-	4	-	4

Fuente: INVIAS [2]

Tabla 7. Especificaciones del material pétreo

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	NIVEL DE TRÁNSITO		
		NT1	NT2	NT3
<b>Dureza, agregado grueso (O)</b>				
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%) - Capa de: rodadura / intermedia / base, 500 revoluciones - Capa de: rodadura / intermedia / base, 100 revoluciones	E-218	25/35/- 5/7/-	25/35/35 5/7/7	25 / 35 / 35 5/7/7
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%) - Capa de: rodadura / intermedia / base	E-238		25/30/30	20/25/25
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de: rodadura / intermedia / base - Valor en seco, mínimo (kN) - Relación húmedo/seco, mínima (%)	E-224			110/90/75 75/75/75
Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo	E-232	0.45	0.45	0.45
<b>Durabilidad (O)</b>				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E-220	18	18	18
<b>Limpieza, agregado grueso (F)</b>				
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237	0.5	0.5	0.5
<b>Limpieza, gradación combinada (F)</b>				
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	NP	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo (%) (Nota 1)	E-133	50	50	50
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
<b>Geometría de las partículas, agregado grueso (F)</b>				
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	10	10	10
Caras fracturadas, mínimo (%) - Una cara: rodadura / intermedia / base - Dos caras: rodadura / intermedia / base	E-227	75/60/- -/-/-	75/75/60 60/-/-	85/75/60 70/-/-
<b>Geometría de las partículas, agregado fino (F)</b>				
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%) - Capa de: rodadura / intermedia / base	E-239	40/35/-	45/40/35	45/40/35
<b>Adhesividad (O)</b>				
- Agregado grueso: Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo (%) - Agregado fino: adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método riedel-weber), índice mínimo	E-757 E-774	Reportar  4		

Fuente: INVIAS [2]

Tabla 8. Denominación del material pétreo

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
Agregado grueso	Porción del agregado retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4).
Agregado fino	Porción del agregado comprendida entre los tamices de 4.75 mm y 75 µm (No. 4 y No. 200)
Llenante mineral – Llenante mineral de aporte	Porción que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200). – Fracción del llenante que se incorpora a la mezcla por separado.

Fuente: INVIAS [2]

Tabla 9. Rango de granulometría del material pétreo según el tipo de mezcla

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm / U.S. Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
		% PASA									
DENSA	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
SEMIDENSA	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
GRUESA	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6

Fuente: INVIAS [2]

## ANEXO B

### DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO

- **Concentración de sílice** Se muele la muestra de material en un molino de bolas hasta que pasa el tamiz No. 100. Se lleva el polvo obtenido al Laboratorio de Consultas Industriales de la escuela de Química para la determinación de su porcentaje de sílice por medio de un análisis gravimétrico.
- **Granulometría INV E-213 [21]** Se separa una muestra de agregado utilizando tamices de diferente abertura, se halla el porcentaje másico de cada fracción y se grafica la distribución de tamaños.
- **Equivalente de arena INV E-133 [22]** Se agita una muestra de agregados finos inmersos en una solución floculante dentro de una probeta. Los polvos se separan y quedan suspendidos sobre la arena. Se halla el porcentaje de arenas a partir de la relación entre el nivel observado de arena y de arcilla.
- **Abrasión INV E-238 [23]** Se prepara la muestra de agregado grueso sumergiéndola en agua por una hora y luego se somete a un ciclo de molienda en un cilindro giratorio cargado con agua y balines magnéticos. Se pasa la muestra por un tamiz y se halla el porcentaje de muestra retenida.
- **Partículas aplanadas y alargadas E-240 [24]** Se toma una muestra de material y se divide en fracciones por medio de tamices. Se utiliza un calibrador de espesores y otro de longitudes para separar las partículas aplanadas y alargadas de cada fracción y se determina su porcentaje másico.
- **Partículas fracturadas E-227 [25]** De una muestra de agregado grueso se separan manualmente las partículas fracturadas y se determina su porcentaje másico.

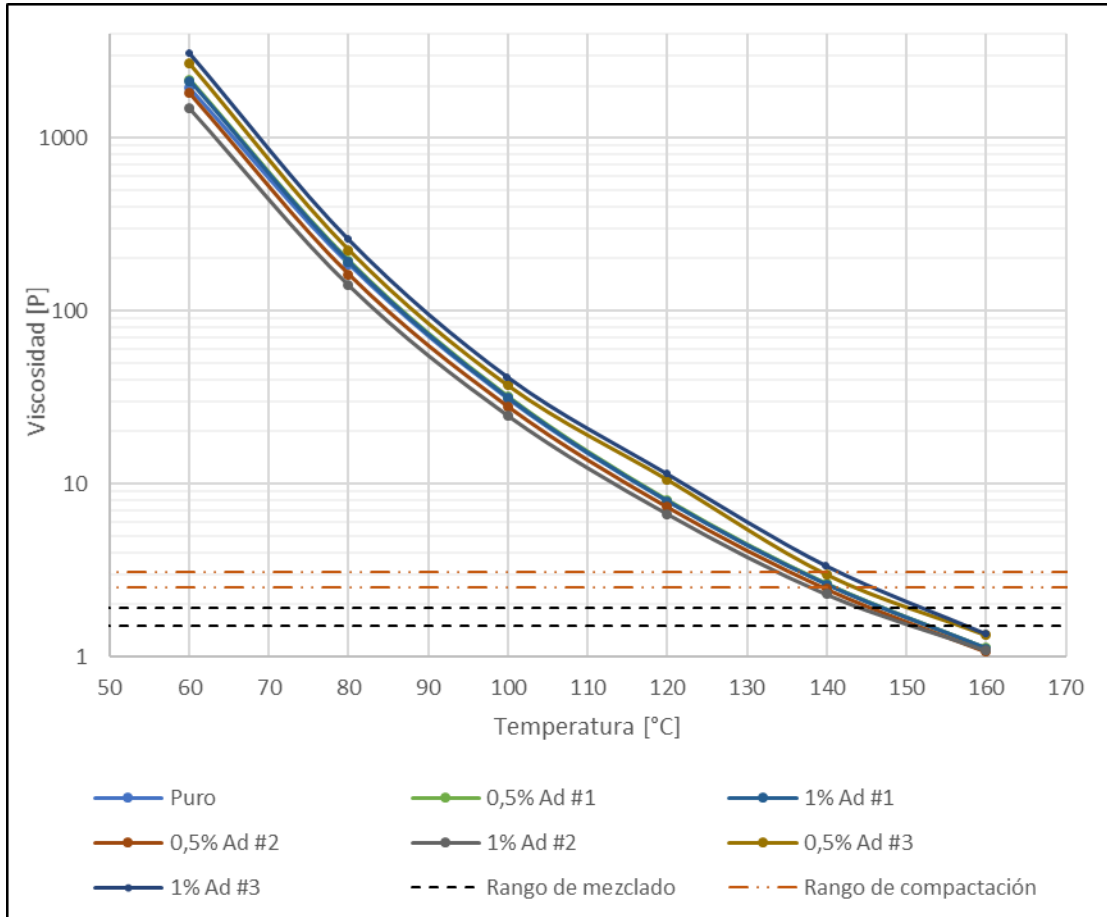
- Gravedad específica bulk ( $G_{sb}$ ) E.-799 [20], E-128 [26], E-222 [27], E-223 [28] Se separa la muestra de material en gruesos, finos y llenante y se halla la gravedad específica de cada fracción por separado. Para los agregados finos y el llenante se utiliza un picnómetro. Para el agregado grueso se satura la muestra con agua, se seca su superficie y se determina su peso al aire y sumergida en agua, la diferencia entre ambas medidas es la masa de agua desplazada. Se calcula la gravedad específica bulk global con la ecuación 12, donde  $G_1$ ,  $G_2$  y  $G_3$  corresponden a las gravedades específicas de las tres fracciones y  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  a los porcentajes de cada una.

$$G_{sb} = \frac{1}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3}} \quad [12]$$

## ANEXO C

### CURVA DE VISCOSIDAD DE ASFALTOS

Figura 7. Curva de viscosidad de asfaltos y rangos de mezclado y compactación

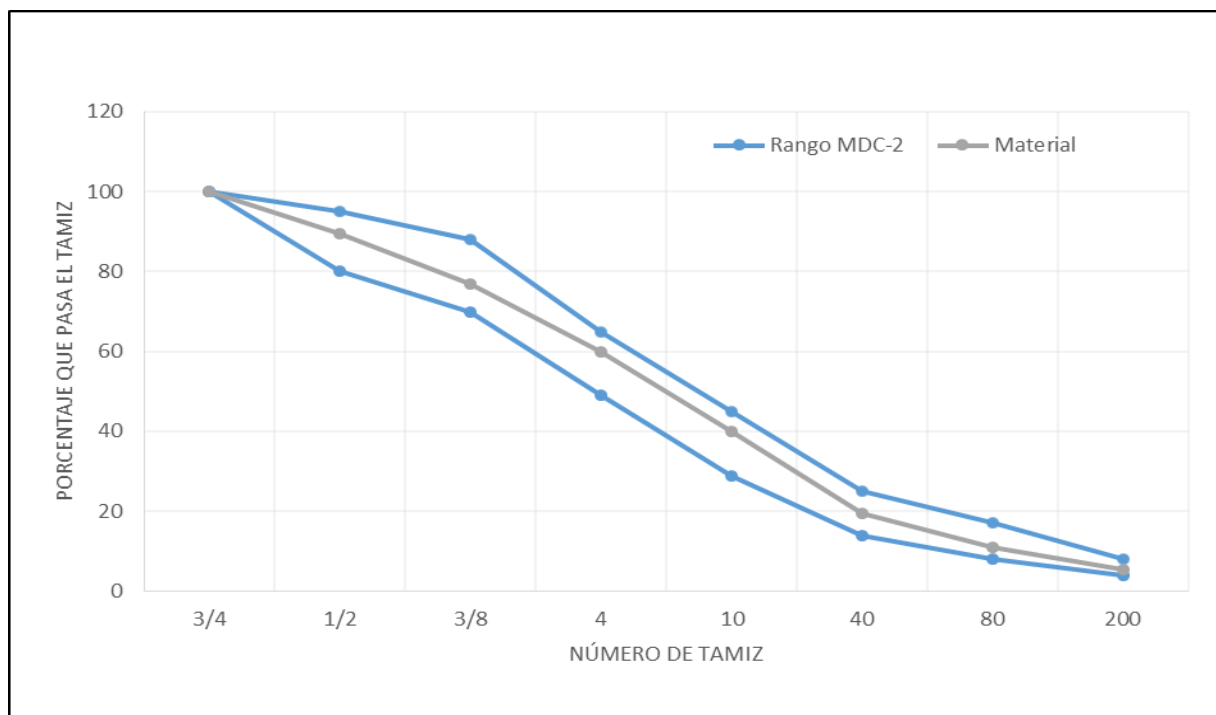


Fuente: Autor.

## ANEXO D

### RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO

Figura 8. Curva granulométrica del material pétreo



Fuente: Autor.

Tabla 10. Caracterización del material pétreo y rangos permitidos

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>	<b>Norma</b>
Concentración de sílice [%]	78,1	-
Equivalente de arena [%]	58,1	>50 cumple
Abrasión [%]	13,65	<20 cumple
Partículas aplanadas [%]	23,9	<30 cumple
Partículas alargadas [%]	23,4	<30 cumple
Partículas con 1 cara fracturada [%]	94,5	>85 cumple
Partículas con 2 caras fracturadas [%]	90,6	>70 cumple
Gravedad específica bulk	2,632	-

Fuente: Autor.

**ANEXO E**  
**HOJA DE CÁLCULO PARA DISEÑO MARSHALL**

Tabla 11. Cálculo de parámetros de diseño Marshall

Probeta	Pb [%]	t [mm]	Gmb	Gmm	Gsb	Gse	Pba [%]	Va [%]	VAM [%]	VFA [%]	Deform. [mm]	Pbe [%]	Relación Llenante	Resist. [kgf]
1		63,0	2,291					7,6	16,4	53,7	2,24		1,40	1668
2	4,0	63,2	2,303	2,480	2,632	2,637	0,07	7,1	16,0	55,5	2,39	3,93	1,40	1648
3		62,3	2,295					7,4	16,3	54,3	2,43		1,40	1579
<b>Promedio</b>			<b>2,297</b>					<b>7,4</b>	<b>16,2</b>	<b>54,5</b>	<b>2,35</b>		<b>1,40</b>	<b>1632</b>
1		64,5	2,313					6,1	16,1	62,1	2,74		1,24	1677
2	4,5	64,7	2,323	2,463	2,632	2,639	0,09	5,7	15,7	63,9	2,65	4,41	1,24	1640
3		64,4	2,307					6,3	16,3	61,2	2,90		1,24	1688
<b>Promedio</b>			<b>2,314</b>					<b>6,0</b>	<b>16,0</b>	<b>62,4</b>	<b>2,76</b>		<b>1,24</b>	<b>1668</b>
1		64,8	2,327					4,9	16,0	69,2	2,85		1,13	1670
2	5,0	65,2	2,319	2,448	2,632	2,642	0,15	5,3	16,3	67,8	2,93	4,86	1,13	1707
3		64,7	2,322					5,1	16,2	68,2	2,90		1,13	1730
<b>Promedio</b>			<b>2,323</b>					<b>5,1</b>	<b>16,2</b>	<b>68,4</b>	<b>2,89</b>		<b>1,13</b>	<b>1702</b>
1		62,9	2,346					3,4	15,8	78,5	3,28		1,02	1664
2	5,5	62,4	2,334	2,428	2,632	2,640	0,11	3,9	16,2	76,2	3,27	5,40	1,02	1735
3		64,1	2,339					3,7	16,0	77,1	3,23		1,02	1631
<b>Promedio</b>			<b>2,340</b>					<b>3,6</b>	<b>16,0</b>	<b>77,3</b>	<b>3,26</b>		<b>1,02</b>	<b>1677</b>
1		63,5	2,340					2,9	16,4	82,1	3,33		0,93	1549
2	6,0	63,0	2,339	2,411	2,632	2,640	0,12	3,0	16,5	81,8	3,56	5,89	0,93	1595
3		63,8	2,340					2,9	16,4	82,2	3,32		0,93	1556
<b>Promedio</b>			<b>2,340</b>					<b>3,0</b>	<b>16,4</b>	<b>82,0</b>	<b>3,40</b>		<b>0,93</b>	<b>1567</b>

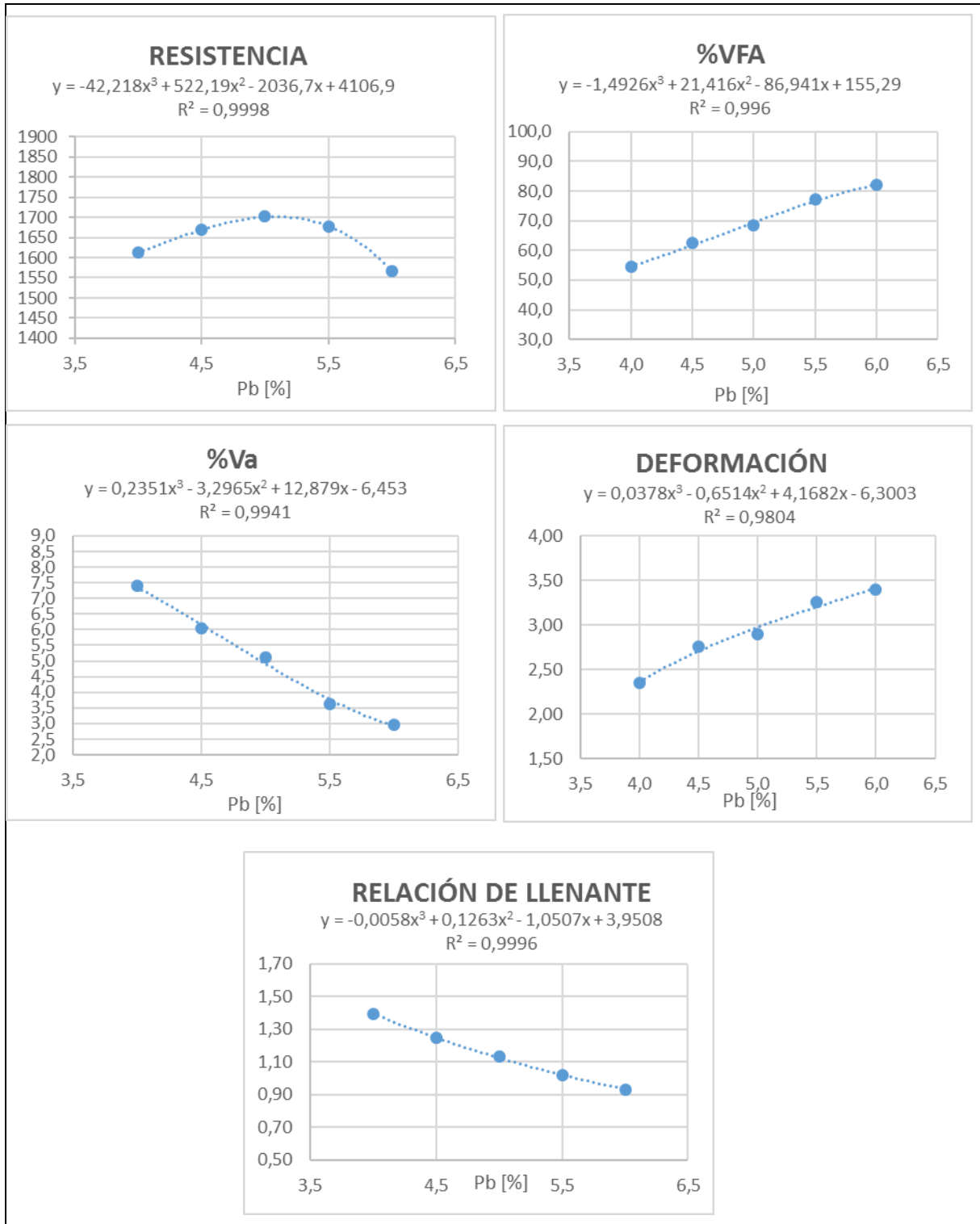
Fuente: Autor.

Tabla 12. Parámetros interpolados y rangos permitidos

Parámetro	Resultado	Norma
<b>Pb [%]</b>	5,1	
<b>Resistencia [Kgf]</b>	1701	>900 cumple
<b>Deformación [mm]</b>	3,0	2 – 3,5 cumple
<b>%Va</b>	4,7	4 – 6 cumple
<b>%VFA</b>	71	65-75 cumple
<b>Relación llenante</b>	1,1	0,8 – 1,2 cumple
<b>Rigidez</b>	562	300 – 600 cumple

Fuente: Autor.

Figura 9. Líneas de tendencia para parámetros de diseño Marshall



Fuente: Autor.