

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO DE MEZCLADO EN LA
MODIFICACIÓN DE UN CEMENTO ASFÁLTICO**

EDWIN ALIRIO GUERRERO RAGA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ D.C.**

2019

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO DE MEZCLADO EN LA
MODIFICACIÓN DE UN CEMENTO ASFÁLTICO**

EDWIN ALIRIO GUERRERO RAGA

DIRECTOR:

Ing. M.Sc. JUAN MIGUEL SÁNCHEZ DURÁN

CODIRECTOR:

Ing. Ph.D. HUGO ALEXANDER RONDÓN QUINTANA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ D.C.**

2019

DEDICATORIO

Es un motivo de orgullo, el poder culminar satisfactoriamente esta etapa en mi formación académica, por ello quiero dedicar esta obra a Dios, quien guía mis pasos por el buen camino e impulsa los logros que me he trazado.

Igualmente, quiero agradecer a mi madre Marisela Raga, la persona a quien le debo lo que hoy soy, inculcándome la educación como la salida para una mejor calidad de vida, gracias por ser mi ejemplo de vida.

Finalmente, dedico esta obra a mi compañera sentimental y amiga Marcela Carolina Pérez Bejarano y a mis hijas Dafne Gabriela Tais Guerrero y Danna Mariana Guerrero Pérez, ya que son cómplices en los logros que me he propuesto, aportando paciencia, motivación y sobre todo tiempo, gracias por su comprensión.

AGRADECIMIENTO

Escribo estas líneas para expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que me han apoyado en el transcurso de este proyecto, en especial al Ingeniero Hugo Alexander Rondón Quintana, por la orientación, seguimiento y supervisión continúa del mismo, pero sobre todo quiero agradecerle el permitirme ser partícipe de una de sus investigaciones. Así mismo, agradecer a su padre Hugo Alfonso Rondón Soto, por brindar su ayuda y dedicación para finalizar correctamente este proyecto.

Agradezco a el Ingeniero Juan Miguel Sánchez Duran, quien llevo a cabo la dirección del proyecto, gracias a su disciplina, sabiduría maestril y por la confianza depositada en mis capacidades.

Finalmente, agradezco a mis hermanos Jennifer, Gina, Juan, Angie y mi tío Alirio Raga, quienes me apoyaron incondicionalmente, gracias por sus enseñanzas y consejos, los cuales seguirán siendo una virtud que llevare presente en todo momento de mi vida.

RESUMEN

Con base en la literatura consultada a la fecha, cuando un asfalto es modificado por vía húmeda con polímeros termoplásticos (elastómeros o plastómeros), por lo general se obtiene un incremento notable en su rigidez, expresado a través de la disminución de la penetración y la ductilidad, y el incremento en el punto de ablandamiento, la viscosidad, el grado de funcionamiento (PG) a altas temperaturas de servicio, el módulo de corte (G^*) en ensayos de reología, entre otros.

Cuando el cemento asfáltico es modificado por vía húmeda, éste es mezclado con el aditivo a elevadas temperaturas durante un tiempo predeterminado. La temperatura y tiempo de mezcla de ambos componentes depende principalmente del tipo de aditivo que se utilice. Durante este proceso de exposición del asfalto a altas temperaturas, sus propiedades físico-químicas cambian, debido principalmente a un proceso de oxidación y envejecimiento del ligante, el cual incide de manera directa en el incremento de la rigidez y la disminución de la ductilidad (Fernández, Rondón, & Reyes, 2011), (Rondón y Reyes, 2015).

Por lo general, los estudios realizados sobre asfaltos modificados en el mundo, no discriminan cual es el aporte real del aditivo en el proceso de rigidización del asfalto, y cual es debido a los procesos de exposición del ligante a elevadas temperaturas durante largos períodos de tiempo cuando se modifica el asfalto por vía húmeda.

El presente estudio pretende generar un aporte en ese sentido, intentando evaluar, la influencia que tiene la temperatura y los tiempos de exposición a los que son sometidos los asfaltos, cuando se modifican por vía húmeda.

Para tal fin se realizaron ensayos de caracterización física (Penetración, Punto de ablandamiento y gravedad específica) sobre un asfalto 60-70 sometido a tres temperaturas y tres tiempos de exposición. Los tiempos y las temperaturas a las cuales se sometió el cemento asfalto se escogieron con base en la revisión bibliográfica, intentando reproducir las condiciones de modificación por vía húmeda. Se considera necesario precisar que, la velocidad de mezclado del

cemento asfáltico no fue controlada durante el proceso de sometimiento de las muestras, toda vez a que no fue posible conseguir los medios para realizar dicho control.

Así mismo, sobre mezclas MDC-19 fabricadas con estos asfaltos tratados térmicamente, fueron ejecutados ensayos de resistencia bajo carga monotónica Marshall (INV. E-748), carga máxima a Tracción indirecta (INV E-725-13) y pérdida por desgaste por medio del ensayo Cantabro (INV E-760-13).

Con base en los resultados obtenidos de los laboratorios realizados en el presente estudio, se permite concluir que, las temperaturas y los tiempos de exposición a los cuales son sometidos los cementos asfálticos durante el proceso de modificación de los mismos por vía húmeda, influyen de manera directa en la respuesta mecánica que experimenta una mezcla MDC-19.

Adicionalmente, Altas temperaturas utilizadas para mezclar el asfalto, genera un incremento notable en la consistencia del asfalto, expresado a través de la disminución de la penetración y el incremento en el punto de ablandamiento y la gravedad específica, no obstante, el manipular este material en la mezcla con los agregados se hace complejo, toda vez a que el material pierde condiciones de aglutinante y su cohesión con los agregados disminuye.

Finalmente, El fenómeno de envejecimiento sobre el cemento asfáltico producto del tratamiento térmico generó un cambio en su composición y su comportamiento reológico. Este como se pudo apreciar en los resultados obtenidos, se caracteriza por un endurecimiento del asfalto y tuvo dos efectos en la mezcla: primera, incrementar la capacidad de soporte de cargas generadas, y segundo, aumentar la resistencia a la deformación de la mezcla, producto de un aumento en la rigidez. No obstante, esta manipulación del cemento asfáltico reduce la flexibilidad de la mezcla por pérdida de ductilidad, conllevando a que la mezcla sea propensa a daños por fatiga y pérdida de potencial de recuperación.

Palabras Claves: Asfaltos modificados, Gravedad específica, Punto de ablandamiento, Penetración, Marshall (INV. E-748), Tracción indirecta (INV E-725-13), Ensayo Cantabro (INV E-760-13)

ABSTRACT

Based on the literature consulted to date, when an asphalt is modified wet with thermoplastic polymers (elastomers or plastomers), a remarkable increase in its rigidity is usually obtained, expressed through the decrease in penetration and ductility, and the increase in the softening point, the viscosity, the degree of operation (PG) at high service temperatures, the cutting module (G^*) in rheology tests, among others.

When the asphalt cement is wet modified, it is mixed with the additive at elevated temperatures for a predetermined time. The temperature and time of mixing of both components depends mainly on the type of additive used. During this process of exposing asphalt to high temperatures, its physical-chemical properties change, mainly due to a process of oxidation and aging of the binder, which directly affects the increase in stiffness and the decrease in ductility (Fernández, Rondón, & Reyes, 2011), (Rondón and Reyes, 2015).

In general, the studies carried out on modified asphalts in the world, do not discriminate what is the real contribution of the additive in the stiffening process of the asphalt, and what is due to the processes of exposure of the binder at high temperatures for long periods of time when the asphalt is modified wet.

The present study tries to generate a contribution in that sense, trying to evaluate, the influence that has the temperature and the times of exhibition to which the asphalts are submitted, when they are modified by wet way.

For this purpose, physical characterization tests (penetration, softening point and specific gravity) were carried out on an asphalt 60-70 subjected to three temperatures and three exposure times. The times and temperatures at which the asphalt cement was subjected were chosen based on the literature review, trying to reproduce the wet modification conditions. It is considered necessary to specify that the mixing speed was not controlled during the process of submitting the samples, since it was not possible to obtain the means to carry out said control.

Likewise, on MDC-19 mixtures manufactured with these thermally treated asphalts, resistance tests were carried out under monotonic load Marshall (INV E-748), maximum load with indirect traction (INV E-725-13) and loss by wear by half of the Cantabro trial (INV E-760-13).

Based on the results obtained from the laboratories carried out in the present study, it is possible to conclude that, the temperatures and the exposure times to which the asphaltic cements are subjected during the process of modifying them by wet process, influence in a direct in the mechanical response that a MDC-19 mix experiences.

Additionally, high temperatures used to mix the asphalt, generates a remarkable increase in the consistency of the asphalt, expressed through the decrease of the penetration and the increase in the point of softening and the specific gravity, however, the manipulation of this material in the mixture with the aggregates becomes complex, every time the material loses binder conditions and its cohesion with the aggregates decreases.

Finally, the aging phenomenon on the asphalt cement product of the thermal treatment generated a change in its composition and its rheological behavior. This was seen in the results obtained, is characterized by a hardening of the asphalt and had two effects on the mixture: first, increase the support capacity of loads generated, and second, increase the resistance to deformation of the mixture, product of an increase in rigidity. However, this handling of the asphalt cement reduces the flexibility of the mixture due to loss of ductility, leading to the mixture being prone to damage by fatigue and loss of recovery potential.

Key words: Specific gravity, Softening point, Penetration, Marshall (INV E-748), Indirect traction (INV E-725-13), Cantabrian test (INV E-760-13)

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN	4
3. OBJETIVOS	7
3.1 GENERAL	7
3.2 ESPECÍFICOS	7
4. ESTADO DEL ARTE	8
5. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	25
5.1 ASFÁLTO	25
5.1.1 Definición	25
5.1.2 Composición química	26
5.1.3 Clasificación	28
5.1.4 Propiedades de los Ligantes Asfálticos.....	30
5.2 CEMENTOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS	34
5.2.1 Definición	34
5.2.2 Polímeros	35
5.3 AGREGADOS PÉTREOS	36
5.3.1 Definición	36
5.3.2 Clasificación	36
5.3.3 Propiedades.....	36
5.4 CONCRETO ASFÁLTICO.....	38
5.5 MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS	41
5.6 ENSAYOS DE LABORATORIO	41
5.6.1 Ensayos de laboratorio sobre agregados pétreos.....	41
5.6.2 Ensayos de laboratorio sobre el cemento asfáltico.....	43

5.6.3	Ensayos de laboratorio sobre mezclas asfálticas	44
5.7	ENVEJECIMIENTO	46
5.7.1	Fases del envejecimiento	46
5.7.2	Envejecimiento físico y envejecimiento químico	47
5.7.3	Variables que intervienen en el proceso de envejecimiento.....	48
6.	METODOLOGÍA.....	53
7.	FASE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS.....	59
7.1	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	60
7.1.1	Cemento asfáltico de control.....	60
7.1.2	Agregado Pétreo	60
7.1.3	Tratamiento térmico y caracterización del asfalto	61
7.2	ENSAYO MARSHALL	73
7.2.1	Mezcla asfáltica de control	73
7.2.2	Mezcla asfáltica con asfaltos sometidos a tratamiento térmico	80
7.3	ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA (INV. E-725-13)	89
7.4	ENSAYO CANTABRO (INV. E-760-13)	97
8.	CONCLUSIONES	101
9.	RECOMENDACIONES	104
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	105

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Proyectos desarrollados con asfaltos modificados por procesos por vía húmeda	21
Tabla 2. Resultado del análisis SARA a los asfaltos colombianos	28
Tabla 3. Clasificación de los cementos asfálticos por viscosidad.....	29
Tabla 4. Polímeros populares para la modificación del asfalto.	35
Tabla 5. Franjas granulométricas para MDC.	39
Tabla 6. Criterios para el diseño de mezclas MDC por el método Marshall.	40
Tabla 7. Ensayos de caracterización del CA 60-70.	54
Tabla 8. Ensayos del agregado pétreo para mezclas asfálticas en caliente	54
Tabla 9. Granulometría de la mezcla MDC-19.....	55
Tabla 10. Cronograma de actividades.....	58
Tabla 11. Combinaciones de CA tratado térmicamente	59
Tabla 12. Ensayos de caracterización sobre el CA 60-70.....	60
Tabla 13. Ensayos sobre el agregado pétreo.	61
Tabla 14. Ensayo de penetración de cementos asfálticos tratados térmicamente	62
Tabla 15. Ensayo de penetración a cementos asfálticos	62
Tabla 16. Punto de ablandamiento de cementos asfálticos tratados térmicamente.....	65
Tabla 17. Resumen ensayo de punto de ablandamiento de cementos asfálticos.....	65
Tabla 18. Ensayo gravedad específica de cementos asfálticos	69
Tabla 19. Resumen de resultados de caracterización del asfalto	71
Tabla 20. Granulometría Marshall MDC-19.	73
Tabla 21. Especificaciones para la fabricación de probetas MDC -19	74
Tabla 22. Resumen ensayo Marshall composición volumétrica mezcla de control.....	74
Tabla 23. Diseño de mezcla Marshall CA 60-70 (4.5%).....	75
Tabla 24. Diseño de mezcla Marshall CA 60-70 (5.0%).....	75
Tabla 25. Diseño de mezcla Marshall CA 60-70 (5.5%).....	75
Tabla 26. Diseño de mezcla Marshall CA 60-70 (6.0%).....	75
Tabla 27. Resumen ensayo Marshall mezcla de control.....	76
Tabla 28. Criterios exigidos en el Artículo 450-13 INVIAS para el diseño de mezclas MDC-19.	76
Tabla 29. Resumen ensayo Marshall – Composición volumétrica mezcla tratadas térmicamente.....	80
Tabla 30. Resumen ensayo Marshall MDC-19 – Carga monotónica.....	80
Tabla 31. Ensayo tracción indirecta MDC-19 - Composición volumétrica probetas en seco.....	89
Tabla 32. Resumen Resistencia promedio a la Tensión – Probetas en Seco	89
Tabla 33. Ensayo tracción indirecta MDC-19 - Composición volumétrica al agua.....	93

Tabla 34. Resumen Resistencia promedio a la Tensión – Probetas acondicionadas al agua	93
Tabla 35. Resultados de la prueba de Tracción Indirecta	96
Tabla 36. Resultados ensayo cántabro	97
Tabla 37. Resultados promedio ensayo cántabro.....	98

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Composición química del cemento asfáltico.	26
Figura 2. Penetración Promedio [0,1 mm] vs Tiempo de mezclado [minutos].....	63
Figura 3. Penetración Promedio [0,1 mm] vs Temperatura de mezclado [°C]	64
Figura 4. Punto de Ablandamiento [°C] vs Tiempo de mezclado [minutos]	66
Figura 5. Punto de Ablandamiento [°C] vs Temperatura de mezclado [°C].....	67
Figura 6. Gb [-] vs Tiempo de mezclado [minutos].....	70
Figura 7. Gb [-] vs Temperatura de mezclado [°C]	71
Figura 8. Estabilidad [N] vs Cemento asfáltico de control [%]	77
Figura 9. Flujo [mm] vs Cemento Asfáltico de control [%]	77
Figura 10. E/F [kN/mm] vs Cemento asfáltico de control [%]	78
Figura 11. Vacíos con aire – Va [%] vs Cemento asfáltico de control [%]	78
Figura 12. Vacíos en agregados minerales – VMA [%] vs Cemento asfáltico de control [%]	79
Figura 13. Vacíos llenos de asfalto – VFA [%] vs Cemento asfáltico de control [%].....	79
Figura 16. Flujo [mm] vs Tiempo de mezclado [minutos]	83
Figura 17. E/F [kN/mm] vs Temperatura de mezclado [°C].....	85
Figura 18. Vacíos con aire – Va [%] vs Tiempo de mezclado [minutos]	86
Figura 19. Vacíos en los agregados minerales (VAM) [%] vs Temperatura de mezclado [°C]	87
Figura 20. Vacíos llenos de asfalto (VFA) [%] vs Temperatura de mezclado [°C].....	88
Figura 21. RTS [kPa] vs Tiempo de mezclado [minutos].....	91
Figura 22. RTS [kPa] vs Temperatura de mezclado [°C]	92
Figura 23. RTH [kPa] vs Tiempo de mezclado [minutos]	94
Figura 24. RTH [kPa] vs Temperatura de mezclado [°C].....	95
Figura 25. Pérdida por desgaste [%] vs Tiempo de mezclado [Minutos]	99
Figura 26. Pérdida por desgaste [%] vs Temperatura de mezclado [°C]	100

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Resistencia a la tensión (R_T)	57
Ecuación 2. Relación de resistencia a la tensión (RRT)	57
Ecuación 3. Desgaste Cantabro	97

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe un creciente interés por construir pavimentos de alto rendimiento, generado por el aumento significativo del número de vehículos, la velocidad y las cargas del tráfico (Ahmadinia, Zargar, Karim, Abdelaziz, & Ahmadinia, 2012). Las sobrecargas repentinas a la que son expuestas las estructuras viales y de alguna manera no planificadas, han acortado la vida útil de los pavimentos y han aumentado el costo de mantenimiento y los riesgos para los usuarios. Con el fin de contrarrestar lo anteriormente expuesto, para el caso de pavimentos asfálticos, el interés se ha concentrado en intentar mejorar las propiedades de los materiales que conforman estas estructuras viales y para las mezclas asfálticas, su comportamiento mecánico se ha intentado modificar y mejorar mediante la adición de polímeros al aglutinante asfáltico (Polacco, Filippi, Mesuri, & Stastna, 2015), con el propósito de limitar el deterioro de las redes de carreteras y mejorar la calidad y el rendimiento de los pavimentos.

El asfalto ha sido utilizado como un aglutinante en la construcción de carreteras durante un largo tiempo (Polacco, Filippi, Mesuri, & Stastna, 2015). A pesar de aportar una pequeña proporción gravimétrica y volumétrica en las mezclas asfálticas (compuestas de asfalto y agregados minerales), el asfalto determina en gran medida el comportamiento del pavimento (García, Partal, Navarro, R., & Gallegos, 2004). Según (Rondón Quintana., Fernández, & Castro, 2010), con la adición de polímeros al asfalto se modifican sus propiedades mecánicas, químicas y reológicas, para intentar mejorar el comportamiento que experimentan las mezclas asfálticas tradicionales. Por lo general, las propiedades que se intentan mejorar son la rigidez, la resistencia bajo carga monotónica, al ahuellamiento, a fatiga, al envejecimiento, y disminuir la susceptibilidad térmica.

Según (Rodríguez, Aguiar, Salazar, Zúñiga, & Loría, 2017), la incorporación de aditivos poliméricos que se utilizan para modificar al asfalto, agrega complejidad a la mezcla de compuestos que conforman el asfalto. Esta incorporación, implica definir nuevos valores para las

variables que han sido constantes durante muchos años y que varían de acuerdo con el aditivo, además de incrementar la necesidad de estudios para entender los procesos químicos, físicos y mecánicos que se producen con la adición de los modificantes. Con base en la literatura consultada a la fecha, cuando un asfalto es modificado por vía húmeda con polímeros termoplásticos (elastómeros o plastómeros), por lo general se obtiene un incremento notable en su rigidez, expresado a través de la disminución de la penetración y la ductilidad, y el incremento en el punto de ablandamiento, la viscosidad, el grado de funcionamiento (PG) a altas temperaturas de servicio, el módulo de corte (G^*) en ensayos de reología, entre otros. Cuando el cemento asfáltico es modificado por vía húmeda, éste es mezclado con el aditivo a elevadas temperaturas durante un tiempo predeterminado. La temperatura y tiempo de mezcla de ambos componentes depende principalmente del tipo de aditivo que se utilice. Durante este proceso de exposición del asfalto a altas temperaturas, sus propiedades físico-químicas cambian, debido principalmente a un proceso de oxidación y envejecimiento del ligante, el cual incide de manera directa en el incremento de la rigidez y la disminución de la ductilidad (Fernández, Rondón, & Reyes, 2011), (Rondón y Reyes, 2015).

De acuerdo con (Villegas, Aguiar, & Loria, 2015), la comprensión del fenómeno de envejecimiento y oxidación de los asfaltos es clave para el entendimiento de cómo se va a desempeñar el ligante durante su vida de diseño. La forma en la cual el asfalto se envejece y oxida es fundamental para el ingeniero que diseña pues influye en las propiedades fisicoquímicas del ligante, lo que implica puede resultar en una mayor susceptibilidad de la mezcla al agrietamiento y al daño por humedad, entre otros mecanismos de falla.

Por lo general, los estudios realizados sobre asfaltos modificados en el mundo, no discriminan cual es el aporte real del aditivo en el proceso de rigidización del asfalto, y cual es debido a los procesos de exposición del ligante a elevadas temperaturas durante largos períodos de tiempo, durante el proceso de mezcla con el aditivo. Por lo anterior, el presente estudio pretende generar un aporte en ese sentido, intentando evaluar, la influencia que tiene la temperatura y los tiempos de exposición a los que son sometidos los asfaltos, cuando se modifican por vía húmeda.

En el Capítulo 2 se presenta el planteamiento del problema con su respectiva justificación. El objetivo general y los específicos son presentados en el Capítulo 3. La descripción del estado

del conocimiento de la temática de estudio, así como el marco teórico y conceptual son reportados en los Capítulos 4 y 5, respectivamente. La descripción de la metodología utilizada para la ejecución del presente estudio se reporta en el Capítulo 6. Los resultados obtenidos de la fase experimental son presentados en el Capítulo 7. Los Capítulos 8 y 9 presentan las conclusiones y las recomendaciones, respectivamente. Por último, en el Capítulo 10 se enuncian las referencias bibliográficas utilizada para la elaboración del presente documento.

2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN

El cemento asfáltico es responsable del comportamiento viscoelástico de la mezcla asfáltica y juega un papel importante en la resistencia a la deformación permanente, al agrietamiento por fatiga y al daño por humedad, entre otros. El rendimiento satisfactorio del asfalto puede ser asegurado si se controlan cuatro propiedades: reología, cohesión, adhesión y durabilidad (Read & Whiteoak, 2003).

El asfalto es un material termoplástico cuya consistencia y viscosidad disminuyen al incrementar la temperatura y se rigidiza al reducirla, pero también es viscoelástico, es decir presenta características mecánicas de flujo y de deformación elástica, en ciertos rangos de temperatura (Kanabar, 2010).

Cuando se maneja adecuadamente, el cemento asfáltico se puede recalentar o mantener a temperaturas elevadas durante un tiempo considerable sin afectar adversamente sus propiedades (Read & Whiteoak, 2003). Sin embargo, el mal manejo en función de una serie de parámetros como la temperatura de calentamiento, la presencia de aire, el medio de calentamiento y el tiempo de exposición en el mezclado, permiten que el material sea expuesto a condiciones que promueven el envejecimiento prematuro y rigidización del cemento asfáltico. El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos altera las propiedades físico-químicas del material y por ende la durabilidad de los pavimentos asfálticos, ocasionando pérdidas económicas debido a deterioros prematuros de las carpetas asfálticas (Vargas & Reyes, 2010).

El cemento asfáltico es una mezcla compleja de hidrocarburos que no tienen puntos de ebullición bien definidos porque sus componentes hierven en un amplio rango de temperatura. Según (Read & Whiteoak, 2003), la emisión de vapores visibles normalmente comienza a desarrollarse a aproximadamente 150 °C. La cantidad de humo generado se duplica por cada aumento de 10 a 12 °C en temperatura. Los humos están compuestos principalmente de hidrocarburos y pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y compuestos aromáticos

policíclicos (PACs). El fenómeno del envejecimiento en los asfaltos produce un cambio en su comportamiento reológico y en su composición (Asphalt Institute, 1983). Éste se caracteriza principalmente por un endurecimiento del asfalto y puede tener dos efectos: por un lado, incrementar la capacidad de soporte de cargas y, por otro, aumentar la resistencia a la deformación de la mezcla, produciendo un aumento en los valores de rigidez o reduciendo la flexibilidad del pavimento (López & Miró, 2015).

Para el almacenamiento y manipulación del asfalto es necesario exponerlo a temperaturas elevadas, adicionalmente la modificación del asfalto requiere temperaturas y tiempos de calentamiento aún mayores. La aplicación de altas temperaturas por tiempos extendidos se relaciona con el envejecimiento y la oxidación (Rodríguez, Aguiar, Salazar, Zúñiga, & Loría, 2017). Aunque el uso de aditivos poliméricos ha sido ampliamente aceptado como una estrategia prometedora para mejorar el amplio espectro de deficiencias en el pavimento, los mecanismos inducidos por el envejecimiento de los aglutinantes de asfalto modificados con polímeros y las mezclas aún tienen aspectos críticos que deben estudiarse en gran medida (Diab, Enieb, & Singh, 2019).

De acuerdo con (Chávez Valencia & Hernández Barriga, 2009), el estudio de los procesos de envejecimiento en el asfalto es muy antiguo y considera la complejidad de la composición del asfalto. En general se ha determinado que existen tres etapas fundamentales en el proceso, a saber, la pérdida de componentes aceitosos, los cambios en la composición química como resultado de la reacción con el oxígeno y los efectos tixotrópicos históricos producidos por estructuración molecular. El envejecimiento es un fenómeno inminente en el asfalto. Por tanto, es de esperar que el material presente problemas asociados a este fenómeno. Durante años se ha culpado al asfalto de la mayoría de los problemas de la mezcla y por ende del comportamiento de la carpeta asfáltica. Muchas veces se escuchan expresiones como que el asfalto está envejecido u oxidado, en algunas ocasiones el término es indistinto para el que lo usa porque prácticamente es lo mismo a su entender (Villegas, Aguiar, & Loria, 2015).

Con la adición de polímeros u otros aditivos al asfalto, se intentan modificar sus propiedades físico-mecánicas, químicas y reológicas. La idea de emplear asfaltos modificados tiene como propósito mejorar la respuesta que experimentan las mezclas que los utilizan, cuando

son sometidas a diferentes condiciones de carga (estática, monotónica y/o cíclica) y del medio ambiente (Rondón & Reyes, 2015). El uso de esta tecnología es también frecuente cuando es necesario que la superficie de la carretera posea una vida útil más larga de lo normal, o en aplicaciones especializadas que permiten espesores más delgados de capas asfálticas o disminuir dichos espesores (D. Casey & McNally, 2008).

Como objetivo general del presente estudio, se evalúa la influencia que tiene, sobre el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas MDC-19, la temperatura y el tiempo de mezclado al que se ven sometidos los cementos asfálticos cuando son modificados por vía húmeda. Para tal fin se realizaron ensayos de caracterización física sobre un asfalto sometido a tres temperaturas y tres tiempos de exposición. Los tiempos y las temperaturas a las cuales se sometió el cemento asfalto se escogieron con base en la revisión bibliográfica, intentando reproducir las condiciones de modificación por vía húmeda. Así mismo, sobre mezclas MDC-19 fabricadas con estos asfaltos tratados térmicamente, fueron ejecutados ensayos de resistencia bajo carga monotónica Marshall (I.N.V. E-748), potencial de daño por humedad a tracción indirecta (I.N.V. E-725-13) y pérdida por desgaste cantabro (I.N.V. E-760-13).

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Evaluar la influencia que tiene la temperatura y los tiempos de exposición a los que son sometidos los asfaltos modificados por vía húmeda, sobre las propiedades físicas de un cemento asfáltico y la respuesta ante la acción de cargas monolíticas, cargas máximas de soporte y desgaste mediante el ensayo Cantabro de una mezcla densa en caliente MDC-19.

3.2 ESPECÍFICOS

Realizar la investigación documental sobre la modificación de asfaltos y mezclas asfálticas por vía húmeda, para establecer, las temperaturas y tiempos de exposición que se utilizarán en el presente estudio, con el fin de tratar térmicamente el asfalto de control.

Comparar la respuesta que experimenta el asfalto de control vs el asfalto sometido a las tres temperaturas y tres tiempos de exposición al mezclado, con el fin de evaluar los cambios obtenidos en sus características físicas.

Evaluar la resistencia mecánica bajo carga monotónica, carga máxima de soporte y pérdida por desgaste que experimenta una mezcla MDC-19 de control, con las obtenidas sobre mezclas MDC-19 fabricadas con los asfaltos tratados térmicamente.

4. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se describen algunos estudios consultados sobre asfaltos y mezclas modificadas.

(Figuerola Infante, Reyes Lozano, Hernández Barrera, Jiménez, & Bohórquez, 2007), ejecutaron un estudio de tipo experimental que consistió en fabricar una mezcla asfáltica cuyo ligante era un asfalto modificado con poliestireno obtenido de la trituración de vasos desechables. La estabilidad Marshall obtenida en la mezcla modificada fue superior con respecto a la mezcla convencional, y el flujo se conserva casi igual, permitiendo suponer que estas mezclas obtienen un nivel de rigidez importante favoreciendo su uso en climas cálidos.

(Sengoz, Topal, & Isikyakar, 2009), modificaron mezclas asfálticas SBS, Acetato de etileno vinilo (EVA) y polímeros a base de acrilato de etileno (PMB). Los resultados indicaron que las propiedades fundamentales y la morfología de los asfaltos modificados dependen del tipo de polímero y del contenido de polímero. La modificación del polímero mejoró las propiedades convencionales del asfalto base, como la penetración, el punto de ablandamiento y la susceptibilidad a la temperatura. A bajos contenidos de polímero, las muestras revelan la existencia de partículas poliméricas dispersas en una fase bituminosa continua, mientras que a altos contenidos de polímero se observa una fase polimérica continua. Además, se descubre que existe una relación entre el contenido de polímero y el porcentaje de distribución de área de los polímeros. Las muestras de asfalto modificado se prepararon por medio de un mezclador de alto cizallamiento que gira de 1000–1200 rpm. En la preparación, el asfalto base se calentó hasta la condición del fluido (180 – 185 °C) y luego se añadieron los polímeros lentamente. Al alcanzar la temperatura de 185 °C, la temperatura se mantuvo constante y el proceso de mezcla continuó hasta que se obtuvo una mezcla homogénea.

(Reyes, Figuerola, & Fonseca, 2010), ejecutaron un estudio cuyo objetivo principal era obtener una mezcla asfalto-polímero estable que, además de disminuir costos, tuviera mejores características físico-químicas que el asfalto convencional proveniente del Complejo Industrial de Barrancabermeja (Colombia). De acuerdo con los resultados de este trabajo, el porcentaje óptimo

de cada polímero para la modificación del asfalto convencional resultó ser de 1% de icopor y 14% de llanta, ya que esta dosificación generó un ligante modificado estable (respecto a las interacciones ligante-polímero). Las temperaturas de mezclado adecuadas para modificar el asfalto oscilaron entre 190 y 200 °C. La caracterización físico-química permitió establecer que los vasos de icopor empleados como polímero modificador mantienen y mejoran las propiedades elásticas del ligante, mientras que el caucho de llanta molido mejora propiedades como la susceptibilidad térmica, la resistencia a la fatiga, la inflamabilidad y la resistencia a los solventes. Los resultados indican que se logró una mezcla asfalto-polímero compatible y estable, que conserva la relación máltenos - asfáltenos del asfalto original y con características fisicoquímicas que permiten predecir un adecuado desempeño cuando se emplee en mezclas asfálticas para pavimentación.

(Rondón Quintana., Fernández, & Castro, 2010), presentan los resultados experimentales de ensayar una mezcla asfáltica tipo MDC-2 (INVIAS 2007) modificada por vía húmeda con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). Para la evaluación del comportamiento de las mezclas asfálticas convencionales (sin aditivo) y modificadas se realizaron ensayos Marshall, módulo dinámico, deformación permanente y resistencia a fatiga. Las mezclas fueron elaboradas con un cemento asfáltico (CA) producido en Colombia tipo CA 80-100. Se mezcló por vía húmeda el CA y el desecho de polietileno (PEBD) en relaciones de PEBD/CA=1,0, 3,0, 5,0 y 7,5% a una temperatura entre 145 ± 5 °C. Los tiempos de mezclado variaron entre 30 a 55 minutos para PEBD/CA=1,0 y 7,5% respectivamente. Al CA con y sin aditivo, se realizaron ensayos de caracterización de asfaltos como penetración y punto de ablandamiento. Las mezclas modificadas con desecho de PEBD experimentan mayor rigidez (bajo carga monotónica y cíclica) y resistencia a la deformación permanente en comparación con las convencionales. Sin embargo, la resistencia a fatiga de las mezclas convencionales disminuye cuando se adiciona PEBD al CA. Adicionalmente, el CA modificado presenta mayor resistencia a la penetración, mayor punto de ablandamiento y menor susceptibilidad térmica a fluir que el convencional.

(Al-Jaberi, Sultan, & Ateeq, 2013), realizaron un estudio sobre asfaltos modificados con grano de caucho reciclado de llanta (CRM). La principal virtud de este estudio es conocer el efecto de la clasificación de las fuentes de CRM y cómo esto mejorará las propiedades del ligante de asfalto modificado con caucho de neumáticos. La mejora se estima utilizando los rangos (150-180 °C) de temperatura, a tiempos de mezcla (20-60) minutos. Los resultados mostraron que los valores

óptimos de respuesta en el ensayo de penetración y punto de ablandamiento del asfalto modificado fueron bajo temperatura de 180 °C y tiempo de mezcla de 60 minutos. El resultado de estabilidad Marshall de las mezclas asfálticas modificadas fue mayor que el de las mezclas asfálticas no modificadas.

(Qadir, 2013), investigó el comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con fibras de polipropileno. Para la preparación de muestras de cemento asfáltico, se utilizó asfalto AC 60/70. Para agregar polipropileno en el cemento asfáltico se utilizó el proceso de modificación por vía húmeda, se calentó el asfalto a 150 °C y se mezcló el polipropileno hasta que la mezcla adquiere uniformidad. El método Marshall se utilizó para determinar el contenido óptimo de asfalto para ambos tipos de muestras. Preparadas las muestras tanto de control como modificadas, éstas fueron luego probadas en el equipo para evaluar la resistencia a la deformación permanente. Las muestras se analizaron a cuatro temperaturas, 40 °C, 50 °C, 55 °C y 60 °C y bajo la aplicación de 10000 pasadas de carga de 700 N por eje. Se encontró que las fibras de polipropileno aumentaban la estabilidad Marshall en casi 25%. También se determinó que las fibras son efectivas contra la formación de roderas a temperaturas elevadas. Adicionalmente se encontró que, la modificación aumentó la resistencia a la tensión indirecta, y rigidizó la mezcla a alta temperatura.

(Yu, Jiao, Ni, & Yang, 2014), evaluaron la comparación entre dos mezclas asfálticas modificadas. Una mezcla comúnmente utilizada en China, la cual corresponde a asfalto modificado con cauchos naturales del tipo estireno-butadieno-estireno (SBS) y una mezcla con asfalto modificado con una proporción de 40:1 de caucho desmenuzado y polvo de polipropileno (ARP). A lo largo del estudio, se reveló que: (1) Como aglutinante, la ARP es más débil en términos de punto de ablandamiento, recuperación elástica y rendimiento a la fatiga en comparación con el asfalto SBS, pero las diferencias son limitadas; (2) La mezcla con ARP presenta un comportamiento similar con respecto a la mezcla con asfalto SBS para altas temperaturas de servicio y el funcionamiento a bajas temperaturas. Los autores encontraron que la estabilidad del ARP depende de la temperatura y el tiempo de almacenamiento, las propiedades del asfalto base y el contenido del modificador. Finalmente recomiendan, una temperatura de mezclado entre el asfalto base y el modificador de 170–180 °C para asegurar el recubrimiento de la partícula - trabajabilidad.

(Shafabakhsh & Jafari Ani, 2015) Esta investigación tiene como objetivo analizar los resultados de las pruebas de laboratorio que se realizaron en la mezcla de asfalto de escoria de acero (SSAM) modificada que contiene TiO_2 y partículas de Nano SiO_2 , los materiales que se agregan para mejorar la resistencia de las mezclas asfálticas fueron Nano modificadas. En esta investigación se buscaba encontrar las características reológicas del betún modificado, se utilizaron diferentes pruebas para determinar las propiedades del aglomerante asfáltico, incluido el grado de penetración, el punto de ablandamiento, la ductilidad, la viscosidad rotacional (RV) y el reómetro dinámico de cizallamiento (DSR). Además, para determinar el contenido óptimo de betún en la mezcla asfáltica convencional y modificada, se utilizó la Prueba Marshall; y luego, para determinar la resistencia contra la formación de acumulaciones y la vida útil de la fatiga, se realizaron dos pruebas que incluían la prueba axial de carga repetida (RLA) y la prueba de fatiga en mezclas de asfalto de concreto que contenían escoria de acero. Los resultados de las pruebas mostraron que la adición de Nano TiO_2 y Nano SiO_2 refuerzan las características reológicas del betún y mejoran la tenacidad y la viscosidad en un promedio de 30% y 109%, respectivamente, mientras que reducen el grado de penetración. Además, se mejoró la resistencia a la rodadura y la vida de fatiga del asfalto.

(Malarvizhi, Sabermathi, & Kamaraj, 2015) En la presente investigación, se reporta los beneficios potenciales del uso de Nano Arcilla en polvo PPA (ácido polifosfórico $\text{H}_n + 2\text{PnO}_3\text{n} + 1$) y SBS en mezclas de asfalto utilizadas en pavimentos. La Nano arcilla como modificador aglutinante (NCMB) se utilizó en cinco tipos: VG 30 + 5.5% SBS + 0.5 PPA designado como 1, VG 30 + 5.5% SBS + 0.5 PPA + 0.125% NC como 2, VG 30 + 5.5% SBS + 0.5 PPA + 0.25% NC como 3, VG 30 + 5.5% SBS + 0.5 PPA + 0.50% NC como 4 respectivamente. Se prepararon muestras de asfalto modificadas y no modificadas, y se realizaron las pruebas de Estabilidad Marshall y resistencia a la tracción indirecta. Los resultados de esta investigación indicaron que la mezcla de asfalto modificada por 5.5% de SBS más 0,5% de polvo de nano arcilla, mejoran los resultados de las propiedades mecánicas del aglomerante asfáltico y la mezcla convencional.

(Arabani & Faramarzi, 2015) en este estudio se realizan algunas pruebas para comparar las propiedades funcionales de nanotubos limpios y de carbono (CNT) como modificador de mezclas de asfalto. Como primer paso, se examinó la morfología del ligante asfáltico modificado con CNT en nano escala mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Como segundo paso, la

mecánica de HMA. Se evaluaron propiedades que incluyen módulo de resiliencia, comportamiento de fluencia y rendimiento de fatiga. Los resultados de este estudio muestran una notable mejora en las propiedades mecánicas de HMA que contienen CNT, contra los fenómenos de fatiga y deformación permanente en comparación con el HMA convencional.

(Yilmaz & Yalcin, 2015) En este estudio, se experimentó los efectos del uso de estireno-butadieno-estireno (SBS), gilsonita americana (AG) y gilsonita iraní (IG) en la modificación del betún, y el uso de cal hidratada en la modificación de la mezcla sobre el rendimiento de los asfaltos de mezcla caliente (HMA), se utilizaron 4,0% de SBS, 11,0% de AG y 10,0% de IG con respecto al peso del betún. Se usó cal hidratada como relleno en proporción del 2% con respecto al peso agregado. Se determinó que las propiedades a alta temperatura de los ligantes bituminosos se mejoraron con el uso de aditivos bituminosos. La estabilidad y el flujo Marshall, la resistencia al daño inducido por la humedad, el módulo de rigidez a la tracción indirecta y las pruebas de seguimiento de las ruedas se aplicaron a las mezclas. Los experimentos de mezcla revelaron que tanto la estabilidad y rigidez de los HMA como la resistencia al daño por humedad y al seguimiento de las ruedas aumentaron con el uso de aditivos hidratantes de cal y aglomerantes. Se observó que la cal hidratada no era tan efectiva como los aditivos aglutinantes y el aditivo más efectivo era generalmente AG en términos de estabilidad, rigidez y seguimiento de las ruedas. Se detectó que el SBS era el aditivo más eficaz para la resistencia al daño inducido por la humedad.

(Castro, Rondón, & Barrero, 2016), realizaron un estudio de caracterización reológica y térmica sobre un cemento asfáltico CA 60-70 convencional y uno modificado con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). La modificación del asfalto se realizó por vía húmeda en una proporción de PEBD/CA=5% con respecto a la masa a una temperatura de entre 150 ± 5 °C. La temperatura fue escogida debido a que por encima de la misma el CA experimenta envejecimiento por pérdida de componentes químicos por oxidación y, por debajo, el mezclado se dificulta. El tiempo de mezclado fue de 40 minutos. Para tal fin, se realizaron ensayos de reología usando un reómetro dinámico de corte (DSR), y técnicas de Termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) sobre los asfaltos. Como resultado se estableció que, el asfalto modificado con PEBD desarrolla un incremento notable en la rigidez y mejoramiento del grado de funcionamiento del asfalto a altas temperaturas. Adicionalmente, el asfalto modificado es más resistente a la oxidación y al envejecimiento por aumento de temperatura. Sin embargo,

experimenta disminución de la resistencia al agrietamiento, bajo temperaturas bajas e intermedias de servicio.

(Sahu & Singh, 2016), esta investigación explica el método de modificación de asfaltos por vía húmeda para la incorporación de desechos plásticos. Estos desechos, después de ser lavados, fueron molidos hasta convertirlos en polvo. 6–8% de este material de desecho se mezcló directamente con el asfalto antes de mezclarlo a los agregados. El rango de temperatura utilizado para mezclar el asfalto con el desecho plástico osciló entre 155 y 165 °C. Como resultado las mezclas modificadas presentar un mejor comportamiento en el ensayo Marshall.

(Ameri & Nasr, 2016), evaluó la posible incorporación del tereftalato de polietileno devulcanizado (PET) para mejorar las características de funcionamiento de mezclas asfálticas. Para lograr este objetivo, se modificaron mediante vía húmeda, siete mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de residuos de PET devulcanizado (DWP) (0, 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5 y 15% en peso de aglutinante asfáltico). Para el método aplicado en este estudio, la temperatura de mezclado (asfalto – aditivo) se mantuvo constante a 160°C. El proceso de mezcla se realizó mecánicamente durante un período de 70 minutos. Las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas no modificadas y modificadas con DWP se investigaron utilizando pruebas de estabilidad Marshall, resistencia a la tracción indirecta y al ahuellamiento. Con base en los resultados de la prueba, la presencia de PET aumentó la estabilidad Marshall y la resistencia a las deformaciones permanentes. Adicionalmente, redujo la susceptibilidad al daño por humedad.

(Rondon, Hernández, & Urazán, 2016), presentaron los resultados de laboratorio de pruebas realizadas en muestras de asfálticas modificadas con gilsonita por vía húmeda y seca. La gilsonita aumentó la rigidez y mejoró el grado de funcionamiento del ligante virgen a altas temperaturas de servicio. Además, las mezclas modificadas con gilsonita desarrollaron una mayor resistencia y rigidez bajo cargas monótonas y dinámicas en comparación a la mezcla de control (sin modificación). Dentro de las conclusiones realizadas se puede apreciar, el aumento en la rigidez reportado en las mezclas modificadas. Además, reportan que la gilsonita se puede usar como un aditivo modificador de mezclas asfálticas para mejorar la resistencia a la deformación permanente en climas de altas temperaturas de servicio. Sin embargo, en bajas temperaturas, la mezcla podría experimentar fragilización, disminuyendo su resistencia contra fenómenos, como el

agrietamiento por fatiga a baja temperaturas. Respecto al valor TSR, las mezclas modificadas desarrollan magnitudes similares en comparación con la mezcla no modificada, lo que sugiere que la gilsonita no afectó la resistencia contra el daño a la humedad. Para el método de modificación por vía húmeda, la gilsonita fue añadida al asfalto a una temperatura de 160°C durante 20 min.

(Amin, El-Badawy, Breakah, H.Z., & Ibrahim, 2016) Este trabajo tiene como objetivo principal, el investigar el efecto del uso de nanotubos de carbono de múltiples paredes (MWCNT) como aditivo en las propiedades reológicas del asfalto. Los prístinos (P-MWCNTs) se mezclaron a 120°C en contenidos de 0.5%, 1.0%, 2.0% y 3.0% en peso de asfalto. Las propiedades empíricas y reológicas (usando la prueba Superpave) del control y los asfaltos modificados se evaluaron en diferentes condiciones de envejecimiento. Se encontró que las propiedades reológicas de los asfaltos modificados mejoraban al aumentar el porcentaje de P-MWCNTs. La alta temperatura de falla y la resistencia a la formación de grietas de los asfaltos modificados envejecidos en horno de película delgada (RTFO) sobre el asfalto base, aumentaron con el aumento del porcentaje de P-MWCNT y se hicieron adecuados para las condiciones climáticas egipcias como lo requiere la caracterización del aglomerante Superpave. A una temperatura dada, la resistencia al agrietamiento por fatiga y la resistencia al agrietamiento a baja temperatura disminuyeron al aumentar el porcentaje de P-MWCNT.

(Hasaninia & Haddadi, 2017) El objetivo de este estudio es investigar las características de un asfalto convencional contra uno modificado con nanosilica en peso del 2%, 4%, 6% y 8% en peso. Se utilizaron las pruebas de estabilidad Marshall, de fluencia dinámica y de tensión indirecta para estudiar los efectos de la nanosilica en las características de rendimiento de las mezclas. Los resultados mostraron que la nanosilica puede mejorar la estabilidad Marshall, el módulo elástico, la resistencia a la tracción indirecta y la vida de fatiga en comparación con las mezclas no modificadas. Sin embargo, el parámetro de relación de resistencia a la tracción en las pruebas de sensibilidad a la humedad indicó una disminución en la resistencia de las mezclas modificadas contra el daño por humedad. En las pruebas de ITS, RM y Marshall, se pudo observar que la adición de nanosilica a la cantidad del 6% conduce a un aumento en la prueba de resistencia a la tracción indirecta en un 29%, el módulo elástico en un 31% y ligero aumento en el parámetro del cociente de Marshall en comparación con las muestras de control.

(Gibreil & Feng, 2017) Se investigaron los efectos del polietileno de alta densidad (HDPE) y el polvo de caucho de miga (CRP) en las propiedades del asfalto de mezcla caliente. Las propiedades físicas, la penetración, los puntos de ablandamiento y la ductilidad del asfalto modificado y no modificado se midieron para diversos contenidos de HDPE y CRP. También se realizaron pruebas de estabilidad y flujo Marshall, cociente Marshall, sensibilidad a la humedad y seguimiento de la rueda (rodamiento). Los resultados mostraron que el uso de HDPE y CRP como modificadores mejora las propiedades físicas del asfalto y las propiedades Marshall de las mezclas de HMA. La resistencia al daño por humedad aumentó significativamente después de la adición de HDPE y CRP, al igual que la resistencia a la deformación permanente.

(Wulandari & Tjandra, 2017), investigaron el efecto de agregar grano de caucho a una mezcla asfáltica por vía húmeda. En este estudio, se investigaron dos contenidos de caucho (1% y 2% en peso de la mezcla de asfalto) y dos tamaños diferentes (# 40 y # 80). Se realizó un estudio comparativo entre las mezclas de concreto asfáltico no modificadas y modificadas considerando el valor de estabilidad Marshall y las propiedades volumétricas. Los resultados mostraron que se recomienda el uso de grano de caucho como aditivo en la mezcla asfáltica, ya que todos los resultados de las pruebas están dentro de los requisitos estándar. La adición de caucho tendió a aumentar la resistencia y la calidad de la mezcla asfáltica. Para el método aplicado en este estudio, la temperatura de mezclado (asfalto – aditivo) se mantuvo constante entre 135 y 150°C. El proceso de mezcla se realizó manualmente hasta alcanzar una mezcla homogénea.

(Kwabena Appiah, Berko-Boateng, & Ama Tagbor, 2017), estudiaron el efecto de modificar asfaltos con polímeros termoplásticos de desecho (Polietileno de alta densidad - HDPE) y Polipropileno (PP). Los plásticos se trituraron y se mezclaron por vía húmeda, a una temperatura entre 160 °C y 170 °C hasta obtener una mezcla homogénea (30 minutos a 1 hora). Se emplearon parámetros de caracterización básicos como la penetración, el punto de ablandamiento de anillo y bola y las pruebas de viscosidad para determinar los cambios resultantes del asfalto base. Para todos los ligantes modificados, los valores de penetración disminuyeron a medida que aumentó la relación de polímero al asfalto, mientras que la temperatura del punto de ablandamiento y la viscosidad aumentaron.

(Jahanian, Shafabakhsh, & Divandari, 2017) En este estudio de laboratorio, se realizaron pruebas de bitumen basadas en el rendimiento funcional común en muestras mediante la adición de Gilsonita con 0, 2, 4, 6, 8, 10 % en peso de especímenes de betún fabricados. Luego, se calculó el porcentaje óptimo utilizando el AHP. Se realizaron las muestras que contenían betún puro 60–70 y betún modificado 60–70 con Gilsonita en dos agregaciones diferentes (4 y 5) y los efectos de agregar Gilsonita en Estabilidad y flujo Marshall, resistencia a la tracción indirecta y sensibilidad a la humedad, así como dinámica. El dispositivo UTM evaluó la fluencia y el módulo elástico. La investigación mostró que la adición de gilsonita al betún en mezclas de asfalto caliente aumenta considerablemente el parámetro Estabilidad Marshall y el módulo de resistencia en las muestras de asfalto. Sin embargo, la prueba de módulo de resiliencia indicó una reducción significativa en la propiedad de flexibilidad de las mezclas asfálticas hechas de betunes modificados.

(Bansal, Kumar Misra, & Bajpai, 2017) El presente estudio intenta utilizar materiales de desecho como plástico, bolsas de polietileno, botellas, neumáticos de goma, etc., como reemplazo parcial del betún y así desarrollar un aglutinante modificado el cual se pudiese comparar con un betún base. Para ello se realizó un Análisis de estabilidad Marshall, en las muestras preparadas reemplazando parcialmente el 'Contenido de betún óptimo' con plástico de desecho (4%, 6%, 8% y 10%) y caucho de miga (5%, 10% y 15%). Los resultados experimentales demuestran que la sustitución parcial de betún con residuos de plástico produce hasta un 16% de incremento en resistencia mientras que con material de caucho, se observó un incremento de aproximadamente 50% en resistencia comparado con la mezcla convencional (CM). Los resultados de las pruebas de laboratorio indican que al usar materiales de desecho, se puede obtener concreto bituminoso de la fuerza y densidad requeridas y se puede preparar un pavimento verde amigable con el medio ambiente con menos costo de material.

(Tahami & Arabani, 2017) el uso de ceniza de cáscara de arroz (RHA), como un subproducto de desecho de la molienda de arroz, en pavimentos asfálticos proporciona ventajas valiosas como la reducción de la degradación ambiental, la reducción de los costos de construcción y el ahorro de recursos naturales. Sin embargo, hay un número limitado de estudios sobre la aplicación de este material en mezclas asfálticas. El objetivo de este estudio fue investigar los efectos del RHA como un modificador de asfaltos. Mezclas asfálticas con 5%, 10%, 15% y 20% de modificador de RHA fueron fabricadas. Para la evaluación de las propiedades reológicas de los

aglutinantes de asfalto, se realizaron pruebas que incluyeron la penetración, la ductilidad, el punto de ablandamiento, la viscosidad rotacional y la reología. Además, se evaluaron las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, incluida la estabilidad Marshall, el módulo de rigidez y la resistencia a la fatiga. Los resultados mostraron que las propiedades reológicas del asfalto se mejoraron al agregar RHA. Además, la modificación de RHA tuvo un impacto positivo en la estabilidad de Marshall, el módulo de rigidez y la resistencia a la fatiga. Para modificar el asfalto con el RHA, se usó una temperatura de 160 °C, mezclándolos a una velocidad de 2500 rpm durante 30 min.

(Rodríguez, Aguiar, Salazar, Zúñiga, & Loría, 2017), este estudio presenta los efectos de la temperatura y el tiempo de calentamiento en las características del asfalto, en el cual sometieron muestras de asfalto a 135 °C, 150 °C y 165 °C durante dos, tres y cuatro horas en un horno de convención forzada para replicar las condiciones en las que se manipula y almacena el asfalto en planta. Para simular las condiciones de modificación se utiliza como base la experiencia adquirida y las recomendaciones del fabricante de polímeros, por lo que se preparan en el recipiente de mezclado muestras calentadas a 170°C durante tres horas, a 180°C durante tres horas y media y a 190°C durante 5 horas. Para este estudio se utilizó FTIR (Espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier) para demostrar que la exposición a las temperaturas durante largos y diversos períodos no corresponde al factor principal que promueve la formación de los grupos funcionales de sulfóxidos y carbonilos asociados con la oxidación. Estos compuestos se producen por la exposición adicional al aire y a la presión, que se utiliza en los ensayos de la metodología Superpave, para simular las condiciones de fabricación, colocación en campo y operación del asfalto en el pavimento, tal como se demuestran los espectros infrarrojos de las muestras en estudio. Para determinar el efecto en el desempeño de la temperatura y los períodos de calentamiento en el desempeño se utilizan los parámetros reológicos de la metodología Superpave. Con las mediciones realizadas se logró demostrar que el envejecimiento provocado por la exposición a altas temperaturas no tiene un efecto tan nocivo como se espera en los parámetros de desempeño del asfalto acondicionado a las diversas temperaturas. De hecho, los resultados obtenidos no permiten establecer una correlación directa entre temperatura, tiempo y susceptibilidad a la deformación y susceptibilidad a la fatiga. No obstante, para la muestra calentada a 190 °C en el recipiente de mezclado durante 5 horas si se obtienen los resultados esperados de baja susceptibilidad a la deformación y alta susceptibilidad a la fatiga.

Consecuentemente, también demuestra buen soporte a altas cargas de tránsito según los parámetros de Prueba de fluencia y recuperación de estrés múltiple - MSCR.

(Al-Hadidy, 2018), realizó una investigación para determinar la influencia del envejecimiento en el laboratorio sobre las características de las mezclas de concreto modificadas con polipropileno (PPMCM) utilizando diferentes porcentajes de material. El contenido de betún de diseño se obtuvo para la mezcla densa mediante el método Marshall utilizando mezclas de agregados que cumple con la Norma Americana para Pruebas y Materiales, ASTM (D-3515). Se realizaron ensayos de rigidez Marshall, resistencia a la tracción indirecta, módulos elásticos, envejecimiento y viscosidad en los PPMCM envejecidos a una temperatura de 100 °C a dos niveles de envejecimiento entre 48 y 96 h para evaluar el cambio de rendimiento. Los PPMCMs alcanzan los límites especificados por ASTM; revelan características superiores de durabilidad, elasticidad y adherencia con mayor resistencia a la deformación permanente y al daño por humedad.

(Rondón Q., Zafra, & Chaves, 2018) Este documento muestra los resultados experimentales de la prueba de una mezcla de asfalto en caliente (HMA) cuando se reemplaza el agregado natural grueso por una escoria de alto horno (BFS), y su cemento de asfalto (AC 60-70) se modifica por vía húmeda con un asfalto natural tipo Gilsonita (G). Se realizaron pruebas de resistencia Marshall, tracción indirecta (ITS) y el ensayo de Cantabro para evaluar la resistencia a la abrasión. La resistencia al daño por humedad se evaluó a través de la relación de resistencia a la tracción (TSR). Los resultados mostraron que, al reemplazar el agregado natural por BFS, disminuyeron las propiedades estudiadas (resistencia bajo carga monotónica y daño por abrasión y humedad). Sin embargo, estas propiedades mejoran cuando se usa asfalto modificado con Gilsonita.

(Wong, 2018) Esta investigación describe la caracterización de las propiedades y el rendimiento del asfalto de mezcla en caliente, que se centra en el asfalto de masilla de piedra (SMA), con varios tipos de polímeros reciclados (plásticos de desecho). Se realizaron investigaciones sobre el grado de rendimiento del betún (valor de penetración y punto de ablandamiento), así como la resistencia de la mezcla (estabilidad Marshall, flujo Marshall y cociente Marshall) para diferentes mezclas de plásticos de desecho. Los aglutinantes estudiados fueron betún convencional, betún blanco (betún modificado con polímero) y residuos plásticos

(LDPE, PP, PS y HDPE). El betún base fue comparado con el betún modificado con polímeros reciclados (10% en peso de LDPE, 10% en peso de PP, 25% en peso de PS y 2% en peso de HDPE). Como resultado se estableció que los betunes modificados tienen propiedades más ligantes que el betún convencional debido a la disminución de los valores de penetración y al aumento de los puntos de ablandamiento. La mezcla modificada mostró la mayor estabilidad Marshall y el cociente Marshall, mientras que la mezcla convencional mostró los valores más bajos, lo que sugiere el papel ventajoso del betún modificado con polímeros sobre el betún convencional. Adicionalmente se encontró que las mezclas de SMA que tienen contenidos individuales óptimos de 10% en peso de LDPE, 10% en peso de PP, 25% en peso de PS y 2% en peso de HDPE son formulaciones de diseño factibles para la resistencia de la mezcla.

(Arabani & Shabani, 2019), el objetivo de este estudio fue evaluar las propiedades reológicas de un ligante asfáltico modificado con fibra cerámica. Para este fin, se prepararon aglutinantes de asfalto modificados con 1, 3 y 5% en peso de fibras cerámicas y se realizaron pruebas al aglutinante que incluyeron penetración, punto de ablandamiento y ductilidad, viscosímetro rotacional, reómetro de cizallamiento dinámico y reómetro de haz de flexión. Los resultados de los experimentos indicaron que, el uso de fibras cerámicas reduce ligeramente la resistencia del aglomerante asfáltico a bajas temperaturas, pero mejora su rendimiento a alta temperatura. Estos resultados fueron confirmados mediante ensayos de resistencia a la deformación permanente y mediante pruebas de fatiga por tracción indirecta. Para modificar el asfalto, la temperatura y tiempo de mezclado se mantuvo constante a 160 °C y 45 minutos, respectivamente.

(Diab, Enieb, & Singh, 2019), presentaron un estudio en donde modificaron un asfalto con seis productos poliméricos diferentes: SBS, polipropileno (PP), estireno-acrilonitrilo (SAN), Polietileno de alta densidad (HDPE), policarbonato (PC) y acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS). Cada uno se aplicó a tasas de 2% y 5% (en peso del aglutinante asfáltico) para preparar los asfaltos modificados. Los resultados mostraron que la modificación del asfalto con los polímeros tuvo una influencia positiva en todas las propiedades evaluadas (tensión indirecta, módulo resiliente, resistencia al daño por humedad y a la fatiga). El asfalto y los polímeros fueron mezclados mecánicamente a 2000 rpm, bajo una temperatura de 160 °C durante 2 horas.

(Abdulruhman Saleh & Musbah Al Allam, 2019) El objetivo principal de este estudio, es evaluar la influencia de las partículas de Resina de tereftalato de polietileno (RPET) en las propiedades mecánicas del asfalto de mezcla en caliente mediante la realización de varias pruebas como: Módulo resistente, fluencia dinámica y prueba de seguimiento de la rueda. Varios contenidos de RPET a saber; Se añadieron 3, 5 y 7% en peso de betún a la mezcla de asfalto utilizando el método húmedo. A partir de la prueba de módulo elástico, se encontró que la rigidez de las mezclas modificadas con RPET aumentó en comparación con la mezcla de asfalto no modificada. La mejora de la rigidez para temperaturas intermedias y altas fue de entre 68% para 3% de PET, mientras que 3,88% para 7% de PET, respectivamente. Los resultados de la fluencia dinámica han mostrado una mejora en la formación de surcos, el 3% de RPET mostró la mejor resistencia a la deformación permanente en comparación con la muestra de control. Los resultados de la prueba de seguimiento de la rueda demostraron que la modificación de la mezcla de asfalto con RPET mejoró significativamente la resistencia a la deformación permanente (formación de surcos). La adición de RPET tiene un buen rendimiento en el asfalto de mezcla en caliente.

(Hainin, y otros, 2019) En este estudio se presentó la influencia de la arcilla de caolín en las propiedades de estabilidad Marshall de concreto asfáltico AC14 en diferentes condiciones de envejecimiento. Estas condiciones de envejecimiento se evaluaron a corto plazo y a largo plazo. El aglutinante asfáltico convencional de grado de penetración 60/70 se utilizó en esta investigación. Se emplearon cuatro niveles diferentes de reemplazo de arcilla de caolín (es decir, 0%, 3%, 6% y 9% por peso de aglomerante). Se prepararon mezclas de asfalto al contenido óptimo seleccionado de asfalto (5%). El desempeño fue evaluado en base a las características de Estabilidad Marshall y los vacíos. Los resultados indicaron la mejora en el rendimiento de estabilidad de las mezclas modificadas con arcilla de caolín sobre las condiciones de envejecimiento. El resultado también mostró que el uso de arcilla de caolín del 6% al 9%, puede producir mezclas de concreto asfáltico más duraderas con una mejor capacidad de servicio. En términos de condiciones de envejecimiento, el envejecimiento a largo plazo tiene un mayor rendimiento en comparación con el envejecimiento a corto plazo.

En la Tabla 1 se presentan de manera resumida, las temperaturas y tiempos de mezcla empleados por diversos investigadores para modificar por vía húmeda los asfaltos utilizados en sus estudios.

Tabla 1. Proyectos desarrollados con asfaltos modificados por procesos por vía húmeda

Referencia	Artículo	Temperatura de Mezclado (Asfalto + Aditivo)	Tiempo de mezclado (minutos)
(Sengoz, Topal, & Isikyakar, 2009)	Morphology and image analysis of polymer modified bitumens	180 – 185 °C	No reporta
(Reyes, Figueroa, & Fonseca, 2010)	Caracterización fisicoquímica y morfologica de asfaltos modificados con materiales reciclados	190 - 200 °C	No reporta
(Rondón Quintana., Fernández, & Castro, 2010)	Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD)	135 – 155 °C	30 - 55
(Qadir, 2013)	Rutting performance of polypropylene modified asphalt concrete	150 °C	No reporta
(Al-Jaberi, Sultan, & Ateeq, 2013)	The Effects of Classifying CRM Sources on the Asphalt Cement Modification for Paving Roads	150 – 180 °C	30 - 60
(Yu, Jiao, Ni, & Yang, 2014)	Evaluation of plastic-rubber asphalt: Engineering property and environmental concern	170 - 180 °C	No reporta
(Yilmaz & Yalcin, 2015)	The effects of using different bitumen modifiers and hydrated lime together on the properties of hot mix asphalts	180° C	60

Tabla 1. Proyectos desarrollados con asfaltos modificados por procesos por vía húmeda

Referencia	Artículo	Temperatura de Mezclado (Asfalto + Aditivo)	Tiempo de mezclado (minutos)
(Arabani & Faramarzi, 2015)	Characterization of CNTs-modified HMA's mechanical properties	160° C	40
(Shafabakhsh & Jafari Ani, 2015)	Experimental investigation of effect of Nano TiO ₂ /SiO ₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates	155° C	15
(Amin, El-Badawy, Breakah, H.Z., & Ibrahim, 2016)	Laboratory evaluation of asphalt binder modified with carbon nanotubes for Egyptian climate	120° C	60
(Ameri & Nasr, 2016)	Performance properties of devulcanized waste PET modified asphalt mixtures	160 °C	70
(Castro, Rondón, & Barrero, 2016)	Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD	150 ± 5 °C	40
(Sahu & Singh, 2016)	Application of waste plastic materials in road construction	155 - 165 °C	No reporta

Tabla 1. Proyectos desarrollados con asfaltos modificados por procesos por vía húmeda

Referencia	Artículo	Temperatura de Mezclado (Asfalto + Aditivo)	Tiempo de mezclado (minutos)
(Jahanian, Shafabakhsh, & Divandari, 2017)	Performance evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite	180° C	30
(Kwabena Appiah, Berko-Boateng, & Ama Tagbor, 2017)	Use of waste plastic materials for road construction in Ghana	160 - 170 °C	30 - 60
(Tahami & Arabani, 2017)	Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture	160 °C	30
(Wulandari & Tjandra, 2017)	Use of Crumb Rubber as an Additive in Asphalt Concrete Mixture	135 – 150 °C	No reporta
(Wong, 2018)	Use of recycled polymers in asphalt concrete for infrastructural applications	160° C – 170° C	No reporta
(Al-Hadidy, 2018)	Engineering behavior of aged polypropylene-modified asphalt pavements	150 ± 5 C	No reporta
(Arabani & Shabani, 2019)	Evaluation of the ceramic fiber modified asphalt binder	160 °C	45

Tabla 1. Proyectos desarrollados con asfaltos modificados por procesos por vía húmeda

Referencia	Artículo	Temperatura de Mezclado (Asfalto + Aditivo)	Tiempo de mezclado (minutos)
(Diab, Enieb, & Singh, 2019)	Influence of aging on properties of polymer-modified asphalt	160 °C	120
(Abdulruhman Saleh & Musbah Al Allam, 2019)	Evaluation of the Mechanical Properties of Asphalt Mixture Modified with RPET	150° C	60
(Hainin, y otros, 2019)	Marshall stability properties of asphaltic concrete with kaolin clay under aging	170° C	No reporta

Fuente: Propia.

5. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

5.1 ASFÁLTO

5.1.1 Definición

Actualmente en la construcción de carreteras se usa ampliamente el asfalto, el cual puede ser de origen natural (rocas o lagos asfálticos) o artificial (producto de la refinación del petróleo crudo). Dadas sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad, tiene gran variedad de aplicaciones en la construcción de pavimentos flexibles como, por ejemplo, mezclas asfálticas, bases estabilizadas, riegos de sello, emulsiones asfálticas, riegos de liga, riegos de impregnación, entre otros (Padilla, 2004).

Los asfaltos son una mezcla compleja de hidrocarburos de peso molecular elevado, que se presenta en forma de cuerpo viscoso más o menos elástico, no cristalino y de color negro. Son productos obtenidos de la destilación natural o artificial del petróleo. Es el residuo sólido que queda una vez que se hayan extraído los componentes más ligeros y volátiles del petróleo. Aunque el asfalto puede considerarse como un desecho, también puede verse como un producto de gran calidad, sobre el que se fundamenta gran parte de la construcción de los pavimentos flexibles, denominados también pavimentos asfálticos (Padilla, 2004).

De acuerdo con (Read & Whiteoak, 2003), la configuración de la estructura interna de un asfalto está determinada en gran medida por la constitución química de las especies moleculares presentes. El asfalto es una mezcla química compleja de moléculas que son predominantemente hidrocarburos con una pequeña cantidad de especies heterocíclicas estructuralmente análogas y grupos funcionales que contienen átomos de azufre, nitrógeno y oxígeno. El asfalto también contiene cantidades de metales como vanadio, níquel, hierro, magnesio y calcio, que se producen en forma de sales inorgánicas y óxidos o en estructuras de porfirina. El análisis elemental de los

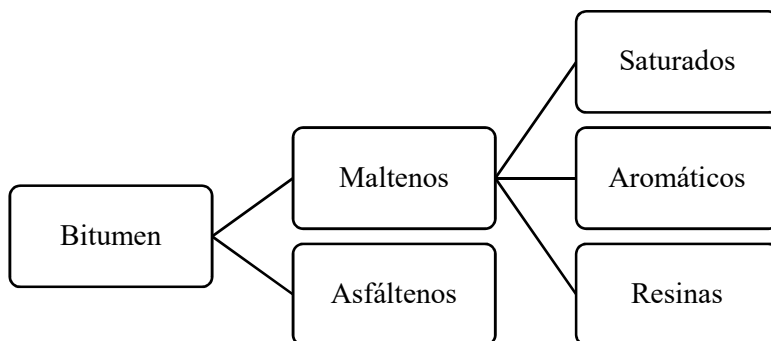
asfaltos fabricados a partir de una variedad de aceites crudos muestra que la mayoría de los mismos contienen:

- Carbono 82–88%.
- Hidrógeno 8-11%.
- Azufre 0–6%
- Oxígeno 0–1,5%.
- Nitrógeno 0–1%.

5.1.2 Composición química

Según (Read & Whiteoak, 2003), la composición química del asfalto es extremadamente compleja, sin embargo, es posible separar el asfalto en dos amplias sustancias químicas llamadas asfáltenos y máltenos. Los máltenos se pueden subdividir en saturados, aromáticos y resinas. (Véase Figura 1).

Figura 1. Composición química del cemento asfáltico.



Fuente: (Read & Whiteoak, 2003)

5.1.2.1 Asfáltenos

De acuerdo con (Read & Whiteoak, 2003), los asfáltenos son sólidos amorfos negros o marrones insolubles en n-heptano que contienen, además de carbono e hidrógeno, algo de nitrógeno, azufre y oxígeno. En general, se considera que los asfáltenos son materiales aromáticos altamente polares y complejos de peso molecular bastante alto. Los diferentes métodos para determinar los pesos moleculares han llevado a diferentes valores que varían ampliamente de 600 a 300000 dependiendo de la técnica de separación empleada. Sin embargo, la mayoría de los datos de prueba indican que los pesos moleculares de los asfáltenos varían de 1000 a 100000; tienen un

tamaño de partícula de 5 a 30 nm y una relación atómica de hidrógeno/carbono (H/C) de aproximadamente 1,1. El contenido de asfáltenos tiene un gran efecto sobre las características reológicas del asfalto. El aumento del contenido de asfáltenos produce un asfalto más viscoso con una menor penetración, un mayor punto de ablandamiento y, en consecuencia, una mayor viscosidad. Los asfáltenos constituyen del 5 al 25% del asfalto.

5.1.2.2 Resinas

Las resinas son solubles en n-heptano. Al igual que los asfáltenos, están compuestos principalmente de hidrógeno y carbono y contienen pequeñas cantidades de oxígeno, azufre y nitrógeno. Son de color marrón oscuro, sólidos o semisólidos y, al ser de naturaleza polar, son muy adhesivos. Las resinas son agentes dispersantes o peptizantes para los asfáltenos. La proporción de resinas a asfáltenos gobierna, hasta cierto punto, el carácter de tipo de solución (SOL) o gelatinoso (GEL) del asfalto. Se encuentra que las resinas separadas de los asfaltos tienen pesos moleculares que van desde 500 a 50000, un tamaño de partícula de 1 a 5 nm y una relación atómica H/C de 1,3 a 1,4 (Read & Whiteoak, 2003).

5.1.2.3 Aromáticos

Los aromáticos comprenden los compuestos aromáticos nafténicos de peso molecular más bajo en el asfalto y representan la mayor proporción del medio de dispersión para los asfáltenos peptizados. Constituyen del 40 al 65% del asfalto total y son líquidos viscosos de color marrón oscuro. El rango de peso molecular promedio está en la región de 300 a 2000. Consisten en cadenas de carbono no polares en las que dominan los sistemas de anillos insaturados (aromáticos) y tienen una alta capacidad de disolución para otros hidrocarburos de alto peso molecular (Read & Whiteoak, 2003).

5.1.2.4 Saturados

Los saturados consisten en hidrocarburos alifáticos de cadena lineal y ramificada junto con alquil-naftenos y algunos alquil-aromáticos. Son aceites viscosos no polares de color blanco pajizo o blanco. El rango de peso molecular promedio es similar al de los aromáticos y los componentes. Incluyen saturados cerosos y no cerosos. Esta fracción forma del 5 al 20% del asfalto (Read & Whiteoak, 2003).

En la Tabla 2 se presenta la composición química de los asfaltos colombianos, de acuerdo con la técnica de fraccionamiento SARA.

Tabla 2. Resultado del análisis SARA a los asfaltos colombianos

Fracción	Valor Promedio		
	Cartagena	Barrancabermeja	Apiay
Saturados (%)	25,37	23,85	21,67
Aromáticos (%)	25,67	32,77	26,76
Resinas (%)	36,32	31,88	30,47
Asfáltenos (%)	12,64	10,83	21,10

Fuente: (Arenas H. , 2006)

5.1.3 Clasificación

Los asfaltos se agrupan en tres clases, principalmente:

5.1.3.1 Cementos asfálticos (AC)

El cemento asfáltico es un material pegajoso de color negro a marrón oscuro, compuesto principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular. Se deriva de la destilación del petróleo crudo (Koole & Thagesen, 2004). Es un material termoplástico que se ablanda gradualmente cuando se calienta y se caracteriza por su consistencia a ciertas temperaturas. La consistencia se mide mediante la prueba de penetración, la prueba de punto de ablandamiento y la prueba de viscosidad. Los métodos de caracterización desarrollados más recientemente utilizan un complejo módulo a diferentes temperaturas (Koole & Thagesen, 2004).

El cemento asfáltico se designa por las letras CA o AC (Asphalt Cement en un país anglosajón) y se clasifica por lo general de acuerdo con su consistencia evaluada a través de dos ensayos: Penetración y Viscosidad (Rondón & Reyes, 2015). Se preparan comercialmente en grados o rangos de consistencia, con base en el ensayo de penetración, por ejemplo: AC 70-90, AC-60-80, AC 80-100. Los números indican la penetración en décimas de milímetro (ASOPAC, 2004). De acuerdo con (Rondón & Reyes, 2015), en otros países, la clasificación del CA se realiza a través de su viscosidad (Véase Tabla 3). Para entender la Tabla 3, CA 5 y CA 40 corresponden a una viscosidad de 500 ± 100 y 4000 ± 800 poises respectivamente, medidos a una temperatura

de 60 °C. AR (por sus siglas en inglés) significa CA envejecido en horno de película delgada rotatoria (RTFOT por sus siglas en inglés).

Tabla 3. Clasificación de los cementos asfálticos por viscosidad

Especificación	Tipo de cemento asfáltico					
AASHTO M 226 Y	CA-2,5	CA-5	CA-10	CA-20	CA-30	CA-40
ASTM D 3381	AR-10	AR-20	AR-40	AR-80	AR-120	AR-160

Fuente: (Rondón & Reyes, 2015)

5.1.3.2 Asfaltos líquidos, rebajados o cut-back

Se producen diluyendo cemento asfáltico en algún solvente derivado del petróleo, generalmente gasolina o benceno. Se designan con las letras RC (Asfaltos rebajados de curado rápido, solvente gasolina), MC (Asfaltos rebajados de curado medio, solvente queroseno) y SC (Asfaltos rebajados de curado lento, solvente aceites pesados de baja volatilidad), seguidos de un número que indica su viscosidad cinemática, medida en centistokes. En Colombia se ha disminuido su uso debido al incremento en los costos de los solventes y por el alto grado de contaminación ambiental. (Rondón & Reyes, 2015)

5.1.3.3 Emulsiones asfálticas

Según (Rondón & Reyes, 2015), son el producto de la adición de agua a un cemento asfáltico. Para que estos dos materiales se puedan mezclar es necesario incorporar un tercer componente, denominado agente emulsificante, que puede ser arcilla coloidal, silicatos solubles o insolubles, jabón o aceites vegetales sulfatados. Este emulsificante aporta carga eléctrica a la emulsión. Para la fabricación de emulsiones asfálticas se utilizan molinos coloidales o turbinas. El contenido de cemento asfáltico en volumen en la emulsión se encuentra entre 55% y 70%. De acuerdo a la velocidad con que se produce el rompimiento (salida del agua de la mezcla) estas emulsiones se dividen en:

- ✓ Emulsión asfáltica de rompimiento rápido (RR).
- ✓ Emulsión asfáltica de rompimiento medio (RM).
- ✓ Emulsión asfáltica de rompimiento lento (RL).

5.1.4 Propiedades de los Ligantes Asfálticos

A continuación, se enlistan las propiedades de los cementos asfálticos, que son resultado de ensayos empíricos o semi-empíricos, aunque se plantea determinar su funcionamiento a partir también de sus propiedades reológicas. (Padilla, 2004)

5.1.4.1 Densidad

La densidad de los asfaltos que se utilizan en la construcción de pavimentos varía desde 0,9 – 1,4 kg/dm³. Los valores más altos de densidad de un asfalto corresponden a los asfaltos procedentes de crudos con un alto contenido de hidrocarburos aromáticos. La densidad puede dar idea de las impurezas que contiene un producto y su medida sirve de control de la uniformidad de un suministro. La densidad relativa de un ligante es la razón entre el peso de un determinado volumen de ligante y el peso de un volumen igual de agua a una determinada temperatura, por ejemplo 25 grados centígrados. Su conocimiento permite pasar de pesos a volúmenes o viceversa. Se determina con un picnómetro. Los asfaltos tienen una densidad relativa a 25 grados centígrados del orden de 1,03.

5.1.4.2 Penetración

La penetración es una medida de la consistencia del producto asfáltico, que se determina midiendo en décimas de milímetro, la longitud de una aguja normalizada que entra en una muestra en unas condiciones especificadas de tiempo, temperatura y carga. Esta propiedad, por sí sola, no nos permite identificar un asfalto, pero sí nos define si el producto que está sometido al ensayo es líquido, semisólido o sólido. La penetración de un producto asfáltico disminuye cuando la densidad del mismo aumenta.

5.1.4.3 Viscosidad

La viscosidad es la relación entre la fuerza aplicada a un fluido y la velocidad con la que fluye. Por lo tanto, la viscosidad de un ligante es una de sus características esenciales desde el punto de vista de su comportamiento en el momento de su aplicación cuando su consistencia es suficientemente reducida. La viscosidad de los ligantes hidrocarbonatos depende de la temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas da una buena idea de cuál es su susceptibilidad térmica. Sólo para ciertas investigaciones se utilizan viscosímetros capilares para la obtención de la viscosidad cinemática absoluta del producto a una temperatura. En la

práctica se suele recurrir a determinar la viscosidad relativa. Los viscosímetros más utilizados son los de Saybolt (Furol o Universal). Se basan en la determinación del tiempo en que una cierta cantidad de producto asfáltico a una temperatura prefijada fluye por un orificio por la acción de la gravedad en unas condiciones normalizadas. Si sometemos un fluido a la acción de una fuerza, se produce una deformación de dicho fluido. Pero esta deformación corresponde solamente a parte de la energía aplicada al fluido. El resto de la energía aplicada se transformará en energía calorífica, debido al frotamiento interno que se produce en el fluido. Cuando éste sea viscoso, esta energía empleada en vencer los frotamientos internos será grande.

5.1.4.4 Susceptibilidad térmica

Para poner en obra un material asfáltico, se requiere que tenga una viscosidad baja, lo cual puede conseguirse por medio de una disolución en un disolvente volátil, por emulsión en agua o por un aumento en la temperatura, el cual éste último es el procedimiento frecuentemente utilizado. La Susceptibilidad térmica de un producto asfáltico, es la aptitud que presenta para variar su viscosidad en función de la temperatura. Es muy importante la susceptibilidad debido a que se puede conocer la temperatura adecuada para que el producto asfáltico adquiriera la viscosidad requerida para el uso que le daremos.

5.1.4.5 Ductilidad

La ductilidad se mide por el alargamiento, antes de producirse la rotura de una probeta de material asfáltico estirada por sus extremos con una velocidad constante. Los materiales asfálticos están sometidos frecuentemente a variaciones de temperatura que le provocan cambios dimensionales, para esto es necesario que el material asfáltico tenga suficiente ductilidad para alargarse sin que se produzcan grietas. Una ductilidad excesiva tampoco es conveniente debido a que se corre el riesgo de que se presenten ondulaciones por efectos de las cargas del tráfico.

Puede comprobarse experimentalmente que, para un mismo material, la ductilidad crece cuando crece la temperatura, y para materiales distintos, pero del mismo tipo, la ductilidad aumenta cuando la penetración aumenta o cuando la viscosidad disminuye.

5.1.4.6 Punto de Inflamación

Es la temperatura a la cual arden los vapores del asfalto al aproximar a la superficie del material una llama de prueba. Su determinación es interesante, puesto que cuando comprobemos

que el punto de inflamación está 25 o 30 grados centígrados por encima de la temperatura a la que manejamos el asfalto para su utilización en la obra, procederemos a estas operaciones con notables precauciones. El punto de inflamación de un asfalto debe de estar alrededor de los 215 grados centígrados.

5.1.4.7 Volatilidad

Indica la cantidad de aceites volátiles que contiene un asfalto, mediante calentamiento a una temperatura determinada durante un cierto tiempo. Esta propiedad nos da un índice de inalterabilidad del asfalto durante las operaciones previas a su puesta en obra.

5.1.4.8 Solubilidad

Por definición, un asfalto es totalmente soluble en sulfuro de carbono. Si al realizar el ensayo de un material quedara un residuo insoluble, el resultado del ensayo nos permitiría juzgar sobre la cantidad de asfalto puro que contiene dicho material. Por otro lado, la propiedad de solubilidad, sirve para comprobar la uniformidad de composición de un producto de este tipo y para determinar la cantidad de asfalto de que consta un pavimento.

5.1.4.9 Fragilidad

La fragilidad estática, se caracteriza por la rotura de un material en cuanto se sobrepasa su límite elástico y sin que haya sufrido una deformación plástica apreciable. Un material que sufre deformaciones lentas de carácter plástico puede romperse bajo el efecto de un choque. Se dice entonces que el material no tiene tenacidad.

5.1.4.10 Cohesión

Esta propiedad indica la dificultad de un producto asfáltico o de una mezcla de un producto asfáltico y un agregado pétreo para romperse por tracción sin que falle la adherencia entre el producto asfáltico y el agregado pétreo.

5.1.4.11 Adherencia

Está representada como la resistencia que presenta a desprenderse un producto asfáltico de un agregado pétreo, pero esta adherencia no puede tener lugar más que si el agregado mineral es mojado por el asfalto. Además de esto, tiene que existir afinidad entre las moléculas de uno y de otro cuerpo.

5.1.4.12 Envejecimiento

El asfalto está compuesto por moléculas orgánicas que reaccionan con el oxígeno del aire oxidándose lo que les hace más duros y frágiles. Este envejecimiento oxidativo se produce de forma muy lenta cuando el asfalto está en el pavimento, aunque este proceso es más rápido cuando las temperaturas a las que se ve sometido son mayores. Se debe tener en cuenta también que gran parte de este envejecimiento o endurecimiento oxidativo tiene lugar antes de que el asfalto esté compactado, durante el proceso de mezcla en el que el ligante está sometido a altas temperaturas y en forma de película fina sobre la superficie del ligante, lo que hace que el proceso sea más rápido, pudiéndose producir en este período otros tipos de envejecimiento, como la pérdida de los componentes más volátiles del asfalto, que se traduce en un endurecimiento del mismo.

Esto quiere decir que, si se quieren comparar las propiedades del asfalto con su comportamiento en la mezcla, se debe estudiar el asfalto en el estado de envejecimiento en el que va a estar el material cuando esté en uso, y por lo tanto habrá que someterlo a un envejecimiento artificial acelerado antes de estudiar algunas de sus propiedades.

Los productos asfálticos son colocados en obra en un estado plástico, pero con el tiempo se van endureciendo y se producen entonces un aumento de la cohesión al mismo tiempo que crecen la viscosidad y la dureza. Estos fenómenos tienen lugar hasta que se ha alcanzado una dureza determinada y para valores mayores de esta dureza crítica, la cohesión disminuye. Entonces el producto asfáltico se vuelve frágil y es muy sensible a los esfuerzos bruscamente aplicados. Esto se debe a que los productos asfálticos sufren durante su uso la acción de diversos agentes naturales que producen modificaciones irreversibles y pérdidas en sus propiedades iniciales.

5.1.4.13 Permeabilidad

La impermeabilidad de los materiales asfálticos es una de las características más típicas. Se debe, en primer lugar, a que la solubilidad del agua en dichos materiales es muy pequeña y, además, a la elevada viscosidad de tales productos. En general, cuanto menor es la penetración de un producto asfáltico, más lentamente se difunde el agua a través de él.

5.2 CEMENTOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS

5.2.1 Definición

Según (Padilla, 2004), es un asfalto al cual se le ha añadido de manera homogénea y estable, en un cierto porcentaje previamente analizado, algún tipo de aditivo, para mejorar sus propiedades reológicas. El asfalto es un material susceptible a los cambios de temperatura, además experimenta envejecimiento por intemperismo, es afectado por la oxidación y la fotodegradación. Sus propiedades mecánicas en algunas ocasiones no son ideales: puede ser quebradizo a bajas temperaturas y fluye un poco arriba de la temperatura del medioambiente, además de tener una baja recuperación elástica, lo que limita ampliamente su rango de utilidad. Por estas razones el material asfáltico en ocasiones tiene que ser modificado mediante la adición de un agente químico para mejorar sustancialmente sus propiedades reológicas, es decir, que mejoren su comportamiento para una amplia gama de condiciones de temperatura o de aplicación de las cargas.

Existen una amplia gama de aditivos que se pueden emplear para la modificación de asfaltos, tanto en lo que se refiere a su naturaleza como a las mejoras conseguidas e incluso a las técnicas de incorporación a los ligantes de partida. Dejando de lado los agentes tensoactivos (activantes), con los que únicamente se pretende mejorar su adhesividad con los agregados, podemos hablar de polímeros del tipo termoplásticos (polietileno, polipropileno), polímeros termoendurecibles (epoxi, poliéster), caucho de neumáticos (polímeros 50% + negro de carbono 22% + otros 28%), fibras de diferente naturaleza (amianto, celulosa, acrílicas, elastómeros, azufre, entre otros).

Los polímeros elastotermoplásticos: EVA (etileno-acetato de vinilo) y SBS (estirenobutadieno-estireno) son los que han presentado mayor desarrollo como aditivo modificante, principalmente el SBS. La compatibilidad entre un asfalto y un polímero significa que ambos se pueden mezclar para formar un producto homogéneo en que las propiedades se encuentran mejoradas con respecto a las del asfalto base y en el que la mezcla se puede manipular sin precauciones excesivas. Así, las mezclas drenantes y los microaglomerados de granulometría discontinua deben su desarrollo, en una gran medida, al hecho de poder contar con unos asfaltos modificados que proveen de suficiente cohesión a las mezclas.

La modificación del asfalto con polímeros es un proceso que se lleva a cabo a una alta temperatura, en algunas ocasiones oscila entre 180° y 200° C.

5.2.2 Polímeros

Los polímeros se pueden clasificar en dos grandes grupos: termoendurecibles y termoplásticos. Los primeros no se utilizan para modificar asfaltos, pues son materiales que a altas temperaturas se descomponen o degradan totalmente sus propiedades. Los termoplásticos, por el contrario, son los utilizados para modificar asfaltos, ya que pueden ser sometidos a altas temperaturas sin que se degraden demasiado sus propiedades. Los termoplásticos a su vez se subdividen en dos clasificaciones: elastómeros y plastómeros (Castro, Rondón, & Barrero, 2016). En la Tabla 4 podemos ver los polímeros populares para la modificación de cementos asfálticos.

Tabla 4. Polímeros populares para la modificación del asfalto.

Categoría	Ejemplo	Ventajas	Desventajas
Plastómeros	Polietileno (PE) Polipropileno (PP)	Buenas propiedades a altas temperaturas. Costo relativamente bajo	Mejora limitada en la elasticidad. Problemas de separación de fases.
	Etileno-acetato de vinilo (EVA) Etileno-acrilato de butilo (EBA)	Relativamente buena estabilidad de almacenamiento Alta resistencia al celo.	Mejora limitada en la recuperación elástica. Mejora limitada en baja temperatura propiedades.
	Estireno – butadieno – estireno (SBS) Estireno – isopreno – estireno (SIS)	Aumento de la rigidez Sensibilidad a la temperatura reducida. Respuesta elástica mejorada.	Problemas de compatibilidad en algunos bitúmenes. Baja resistencia al calor, oxidación y ultravioleta Costo relativamente alto.
Termoplástico elastómeros	Estireno – etileno / butileno– estireno (SEBS)	Alta resistencia al calor, oxidación y ultravioleta	Problemas de inestabilidad en el almacenamiento. Relativamente reducida elasticidad. Alto costo.

Fuente: (Zhu, Birgisson, & Kringos, 2014)

5.3 AGREGADOS PÉTREOS

5.3.1 Definición

Un agregado pétreo es material mineral inerte, usado en forma de partículas gradadas o fragmentos, como parte de un pavimento. Constituye entre el 90% y 95% en peso y entre el 75 y 85% en volumen en la mayoría de las estructuras de pavimento (ASOPAC, 2004).

Consisten en partículas provenientes de la roca triturada o grava natural o triturada, combinadas de manera que forman una granulometría que los haga mecánicamente estable, trabajables y fáciles de compactar (Sánchez Sabogal & Campagnoli Martínez, 2016).

5.3.2 Clasificación

(Koole & Thagesen, 2004) Los agregados generalmente se clasifican como agregado grueso y agregado fino:

El agregado grueso es el agregado mineral retenido en el tamiz de 2,36 mm; se produce triturando roca o grava natural para obtener una textura angular y rugosa.

El agregado fino es material que pasa el tamiz de 2,36 mm; puede ser roca triturada o arena natural. El agregado debe tener las siguientes características:

- ✓ Estar limpio
- ✓ Ser de baja absorción
- ✓ Debe tener forma angular
- ✓ Tener buena fuerza
- ✓ Ser resistente al pulido
- ✓ Ser resistente a la intemperie
- ✓ Tener buena afinidad con el asfalto.

5.3.3 Propiedades

De acuerdo a (ASOPAC, 2004) los agregados pétreos deben cumplir las siguientes propiedades para ser considerados apropiados para una mezcla asfáltica:

5.3.3.1 Gradación

Se requiere que las partículas estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño esté presente en ciertas proporciones.

5.3.3.2 Limpieza

En los agregados existen materiales indeseables que le restan propiedades y afectan desfavorablemente el comportamiento del pavimento. Dentro de estos se tienen vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, materia orgánica, etc.

5.3.3.3 Dureza

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla y las exigencias durante la vida de servicio del pavimento.

5.3.3.4 Forma de la partícula

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla, la cantidad de fuerza necesaria para compactarla y la resistencia de la estructura del pavimento. Las partículas irregulares y angulares proporcionan las mejores características.

5.3.3.5 Textura de la superficie

Es un factor que determina la trabajabilidad, la resistencia final de la mezcla y las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Según la textura, los agregados pueden ser rugosos o lisos.

5.3.3.6 Capacidad de absorción

La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto es un elemento importante de información, pues un agregado poroso requiere cantidades mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso.

5.3.3.7 Afinidad con el cemento asfáltico

Es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto.

5.4 CONCRETO ASFÁLTICO

El concreto asfáltico es una combinación de cemento asfáltico y agregados pétreos en porciones exactas y previamente especificadas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades y características de la mezcla (ASOPAC, 2004). Consiste en la selección de agregados minerales con un aglutinante asfáltico. El "contenido de cemento asfáltico de diseño" exacto, es determinado por el uso de un método de diseño de mezcla. El diseño de la mezcla para el concreto asfáltico se lleva a cabo comúnmente utilizando la metodología del ensayo Marshall (Koole & Thagesen, 2004). Estas mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total (Padilla, 2004).

(ASOPAC, 2004) menciona, que las características o propiedades más notables que se pueden considerar en una mezcla asfáltica, con su correspondiente definición, son las siguientes:

- ✓ Estabilidad: Es la capacidad para resistir la deformación bajo las cargas del tráfico. Una estructura del pavimento presenta varios tipos de fallas o deformaciones como ahuellamientos, fisuraciones y fatiga.
- ✓ Durabilidad: Es la capacidad que tiene la estructura de pavimento para resistir la acción de los factores climáticos y del tránsito, que se observa en los cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto.
- ✓ Impermeabilidad: Es la resistencia que posee la estructura al paso del agua y aire hacia el interior del pavimento.
- ✓ Resistencia a la fatiga: Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tráfico. Expresa la capacidad de la mezcla a deformarse repetidamente sin fracturarse.
- ✓ Resistencia al deslizamiento: La cual se define como la “capacidad de proveer suficiente fricción para minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada”.

Estas mezclas, también denominadas mezclas densas en caliente (MDC), se fabrican con asfaltos a temperaturas elevadas, en el rango de los 150 a 190 grados centígrados, según la viscosidad del ligante. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores al ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente (Padilla, 2004). De acuerdo con (Rondón & Reyes, 2015), internacionalmente, son conocidas como HMA (por sus siglas en inglés). Presentan agregados pétreos con granulometría bien gradada y con tamaño de partículas sólidas diferentes (gravas, arenas, finos, llenante mineral), mezclados con cemento asfáltico y se caracterizan por presentar un bajo contenido de vacíos con aire en volumen (entre 3% a 9% por lo general).

En el presente estudio se utilizó como mezcla de control, un concreto asfáltico tipo MDC-19 (de gradación continua, con agregado de tamaño máximo 19 mm), el cual es usado generalmente para construir capas de rodadura en vías con tráfico medio y alto en Colombia. Para realizar el diseño Marshall correspondiente al tipo de mezcla que se necesita de acuerdo a los requerimientos del proyecto, es necesario hacerlo con base en las franjas granulométricas establecidas en las especificaciones INVÍAS 2013 (véase Tabla 5). Así mismo, para verificar los criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall, se recurre a los criterios para el diseño de mezclas MDC establecidos por las especificaciones INVÍAS 2013 (véase Tabla 6).

Tabla 5. Franjas granulométricas para MDC.

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									
DENSE	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
SEMIDENSE	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	65-80	47-67	40-60	28-46	17-32	7-27	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-27	4-11	2-6

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									
ALTO MODULO	MAM-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9
TOLERANCIAS EN LA PRODUCCIÓN SOBRE LA FORMULA DE TRABAJO (+-)		-	0,04					0,03			0,02

Fuente: (INVÍAS, 2013).

Tabla 6. Criterios para el diseño de mezclas MDC por el método Marshall.

CARACTERÍSTICA	NORMA ENSAYO INV		MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MODULO
			CATEGORÍA DE TRÁNSITO			
			NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes /cara)	E-748		50	75	75	75
Estabilidad mínima (N)			5.000	7.500	9.000	15.000
Flujo (mm)			2,0 a 4,0	2,0 a 4,0	2,0 a 3,5	2,0 a 3,0
Relación Estabilidad/Flujo (kN/mm)			2,0 a 4,0	3,5 a 5,0	3,0 a 6,0	-
Vacíos con aire (Va), %	Rodadura	E-736 o E-799	3,0 a 5,0	3,0 a 5,0	4,0 a 6,0	NA
	Intermedia		4,0 a 8,0	4,0 a 7,0	4,0 a 7,0	4,0 a 6,0
	Base		NA	5,0 a 8,0	5,0 a 8,0	4,0 a 6,0
Vacíos en los agregados minerales (VAM), % mínimo	T. Máx. 38 mm	E-799	13,0			-
	T. Máx. 25 mm		14,0			14,0
	T. Máx. 19 mm		15,0			-
	T. Máx. 10 mm		16,0			-
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %	E-799		65 a 80	68 a 78	65 a 75	63 a 75

Fuente: (INVÍAS, 2013).

5.5 MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS

Existe en el mundo dos técnicas de utilización de polímeros o aditivos para modificar las propiedades de mezclas asfálticas. A estas técnicas de modificación se les denomina vía húmeda y seca. Por vía húmeda, el polímero o aditivo es agregado al asfalto a alta temperatura y, luego, este ligante ya modificado es adicionado al agregado pétreo para conformar la mezcla asfáltica. Por vía seca, el aditivo reemplaza parte del agregado pétreo (por lo general las fracciones más finas) para luego mezclarse con el asfalto a altas temperaturas y formar la mezcla asfáltica. (Rondón & Reyes, 2015)

(Rondón & Reyes, 2015) destacan que, cuando se modifican los asfaltos, lo que se busca principalmente es mejorar algunas de las propiedades de las mezclas asfálticas, entre las que se pueden destacar las siguientes:

- ✓ Resistencia a la fisuración y susceptibilidad térmica.
- ✓ Resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento) bajo carga cíclica y monotónica.
- ✓ Rigidez.
- ✓ Adherencia entre los agregados pétreos.
- ✓ Cohesividad.
- ✓ Resistencia al envejecimiento.
- ✓ Resistencia a la fatiga.
- ✓ Resistencia al daño por humedad.

5.6 ENSAYOS DE LABORATORIO

La caracterización de cada uno de los componentes de la mezcla (agregados y asfalto) es determinada de acuerdo a los siguientes ensayos de laboratorio.

5.6.1 Ensayos de laboratorio sobre agregados pétreos

Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV. E-213-13). Método para determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados

gruesos y finos de un material, a través de una serie de tamices de abertura progresivamente más pequeño.

Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm (1 1/2") por medio de la máquina de los ángeles (INV. E-218-13). Método para determinar la resistencia a la degradación de los materiales gruesos menores de 37,5 mm (1 1/2"), por medio de la máquina de los Ángeles, como resultado de una combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda en un tambor de acero rotatorio que contiene un número determinado de esferas metálicas.

Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval (INV. E-238-13). Procedimiento para medir la resistencia a la abrasión y durabilidad de agregados pétreos, como resultado de una acción combinada de abrasión y molienda con esferas de acero en presencia de agua.

Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfatos de sodio o de magnesio (INV. E-220-13). Procedimiento a seguir para determinar la resistencia de los agregados pétreos cuando deben soportar la intemperie en concretos y otras aplicaciones. Este efecto se simula sometiendo los agregados a inmersión repetida en soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio, seguida de sacado al horno para deshidratar parcial o completamente la sal precipitada en los poros permeables de las partículas del agregado.

Valor de azul de metileno en agregados finos (INV E-235-13). Procedimiento para estimar la cantidad de arcilla nociva presente en un agregado. Consiste en añadir de manera sucesiva pequeñas dosis de una solución de azul de metileno a una suspensión de muestra de ensayo en agua.

Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV. E-133-13). Procedimiento para estimar un valor empírico a la cantidad relativa, finura y carácter del material arcilloso o similar, presente en una muestra de suelo o de agregado fino. Consiste en colocar un volumen de suelo normalizado o de agregado fino y una pequeña cantidad de solución floculante, en un cilindro de plástico graduado para posteriormente agitar, con esto se lleva a que las partículas de arena pierdan la cobertura de material arcilloso o similar.

Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras (INV. E-230-13). Procedimiento para determinar las partículas de forma defectuosa que pueden generar inconvenientes en las capas granulares y en las mezclas asfálticas, las cuales pueden ser propensas a rotura y desintegración durante el proceso de compactación, modificando la granulometría del agregado y afectando adversamente su comportamiento.

Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E-227-13). Esta norma describe el procedimiento para determinar el porcentaje en peso del material que presente una o más caras fracturadas de las muestras de los agregados pétreos.

Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso (INV E-223-13). Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso (sin incluir los vacíos entre ellas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso.

5.6.2 Ensayos de laboratorio sobre el cemento asfáltico

Ductilidad de los materiales asfálticos (INV E-702-13). Procedimiento para determinar la ductilidad de los materiales asfálticos de consistencia sólida y semisólida, mediante la distancia hasta la cual se elonga una probeta. Consiste en someter una probeta de material asfáltico a un ensayo a tracción, en condiciones normales de velocidad y temperatura.

Penetración de los materiales asfálticos (INV E-706-13). Esta norma refiere a la determinación de la consistencia de los materiales asfálticos sólidos a semisólidos en los cuales el único o principal componente es un asfalto. La penetración se define como la distancia expresada en décimas de mm, hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura.

Densidad de materiales asfálticos sólidos y semisólidos (método del picnómetro) (INV E-707-13). Describe el procedimiento para determinar la densidad y la densidad relativa (gravedad específica) de materiales asfálticos semisólidos, cementos asfálticos y alquitranes blandos, empleando un picnómetro.

Punto de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland (INV E-709-13). Procedimiento para determinar los puntos de inflamación y de combustión de productos de petróleo, empleando una copa Cleveland de manejo manual o automática. El método es aplicable a todos los productos de petróleo con puntos de inflamación por encima de 79° C (175 °F) y por debajo de 400 °C (752 °C).

Punto de ablandamiento de materiales asfálticos (Aparato de Anillo y bola) (INV E-712-13). Procedimiento para determinar el punto de ablandamiento de productos asfálticos en el intervalo de 30 a 157°C (86 a 315°F), utilizando el aparato de anillo y bola sumergido en agua destilada (30 a 80°C) o en glicerina. El método consiste en fundir dos discos horizontales de material bituminoso en anillos de latón, que posteriormente se calientan a una velocidad controlada en un baño líquido, mientras cada uno de ellos soporta una bola de acero. El punto de ablandamiento se considera como el valor medio de las temperaturas a las cuales los dos discos se ablandan lo suficiente, para que cada bola envuelta en material bituminoso caiga una distancia de 25 mm (1”).

Índice de penetración de los cementos asfálticos (INV E-724-13). Este índice, concebido por Pfwiffer y Van Doormaal, se calcula a partir de los valores de la penetración a 25°C (norma INV E-706) y del punto de ablandamiento con anillo y bola (norma INV E-712) y proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad térmica de estos materiales y de su comportamiento reológico.

5.6.3 Ensayos de laboratorio sobre mezclas asfálticas

Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall (INV E-748-13). Esta norma describe el procedimiento para determinar la resistencia a la deformación plástica de especímenes de mezclas asfálticas para pavimentación. Los especímenes, de forma cilíndrica de 102 mm (4”) de diámetro y una altura nominal de 63.5 mm (2 1/2”), se someten a curado en un baño de agua o en un horno, y luego a carga en dirección perpendicular a su eje cilíndrico empleando el aparato Marshall, determinándose su estabilidad y su deformación (flujo).

Las probetas elaboradas de acuerdo con el procedimiento descrito en esta norma, se utilizan tanto para determinar la estabilidad y el flujo, como para realizar análisis de densidad y de vacíos, los cuales se aplican tanto en el diseño de mezclas asfálticas como en la evaluación de la compactación en campo.

Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (INV E-725-13). Procedimiento para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico, con el fin de medir el efecto del agua sobre su resistencia a la tracción indirecta. El método es aplicable a las mezclas densas y permite evaluar el efecto de la humedad sobre mezclas elaboradas con o sin aditivos mejoradores de adherencia, sean líquidos o sólidos pulverizados.

Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cantabro de pérdida por desgaste (INV E-760-13). El ensayo se aplica a mezclas asfálticas fabricadas en caliente y de granulometría abierta, cuyo tamaño máximo de partícula es igual o inferior a 25 mm. Permite valorar empíricamente la resistencia a la disgregación de la mezcla, ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tránsito automotor.

El ensayo consiste en fabricar, con la mezcla que se quiere estudiar, una probeta tipo Marshall e introducirla en la máquina de los ángeles (sin la carga abrasiva) a una temperatura dada. Después de un número determinado de vueltas se saca la probeta, que durante el ensayo ha ido perdiendo por desgaste parte de los agregados situados en la superficie, y se pesa. Como resultado del ensayo se obtiene el valor de la pérdida por desgaste, expresado en tanto por ciento de la masa inicial.

5.7 ENVEJECIMIENTO

Uno de los fenómenos que contribuyen al deterioro de las mezclas asfálticas es el del envejecimiento. Conocer su efecto, así como los distintos factores que influyen en el mismo es muy importante para evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas. Por este motivo, una mezcla asfáltica debe ser diseñada y construida no sólo para que resista las cargas impuestas por el tráfico, sino también la acción del envejecimiento (López & Miró, 2015).

5.7.1 Fases del envejecimiento

El envejecimiento de las mezclas asfálticas es un proceso complejo el cual ocurre durante el mezclado en la planta, la construcción de la carretera y la vida de servicio. En el mundo es ampliamente aceptado que el mecanismo de funcionamiento del envejecimiento ocurre en dos etapas a saber: el envejecimiento a corto y a largo plazo (Fernández, Rondón, & Reyes, 2011).

5.7.1.1 Envejecimiento a corto plazo

El envejecimiento a corto plazo se produce durante la fabricación, el mezclado, el transporte y la colocación de la mezcla asfáltica. Éste se inicia tan pronto como se prepara la mezcla, siendo en la etapa de fabricación donde el asfalto será más rápidamente envejecido. Éste se debe especialmente al incremento de la temperatura del asfalto para poder proceder a la fabricación de la mezcla (López & Miró, 2015). Primero, el asfalto caliente (160 °C) es puesto en contacto con los áridos calientes (200 – 250 °C) y cubrirá los áridos con una película delgada. Esto llevará a la pérdida de volátiles, la oxidación y, en un primer contacto, el asfalto será parcialmente absorbido por los áridos (endurecimiento exudativo). Durante esta etapa, el oxígeno reacciona rápidamente con el asfalto caliente, aumentando el nivel de envejecimiento. Este aumento en el nivel de envejecimiento hace que aumente la viscosidad de la mezcla (Abu Al-Rub, Darabi, Kim, Little, & Glover, 2013). Mientras la mezcla es transportada, puesta en obra y compactada, estos procesos continúan a un ritmo más lento. Durante el mezclado y colocación de la mezcla asfáltica, ésta envejece de tal manera que el gradiente de envejecimiento y viscosidad a lo largo de la profundidad del pavimento es despreciable.

5.7.1.2 Envejecimiento a largo plazo

El envejecimiento a largo plazo se refiere al proceso de oxidación del asfalto durante su vida en servicio. Éste se produce con el tiempo como resultado de factores ambientales, tales como la temperatura, el oxígeno disponible en la atmósfera, la radiación solar y la humedad, después de la construcción del pavimento asfáltico, y de las cargas durante su vida en servicio. (Renken, 2013)

5.7.2 Envejecimiento físico y envejecimiento químico

5.7.2.1 Envejecimiento físico o endurecimiento estérico

El envejecimiento físico o endurecimiento estérico es el correspondiente al cambio en la orientación o reorganización molecular en la estructura del asfalto y la lenta cristalización de ceras a temperatura ambiente (Van der Bergh, 2011), es decir, la cristalización de los alcanes lineares presentes en las fracciones de asfaltenos. Debido a esta reorganización molecular, el asfalto se endurece a temperatura ambiente a lo largo del tiempo, caracterizándose por ser un proceso físico mediante el cual las propiedades reológicas del asfalto cambian sin modificar su composición química. Por lo tanto, este proceso es reversible, pudiendo revertirse mediante exposición a calor o trabajo mecánico (Swiertz, 2010).

5.7.2.2 Envejecimiento químico

El envejecimiento químico es el más importante y complejo, y corresponde a pérdida de volátiles, endurecimiento debido a la exudación, y principalmente a un proceso de oxidación. La suma de estos tres procesos químicos conduce a un endurecimiento de la mezcla bituminosa (Read & Whiteoak, 2003), consecuencia del envejecimiento del asfalto, el cual se vuelve más duro y quebradizo (Lesueur, 2008). Al contrario que el endurecimiento físico, este tipo de endurecimiento es irreversible.

5.7.2.2.1 Volatilización

El fenómeno de volatilización se define como la pérdida de peso del asfalto debido a la evaporación de sus componentes volátiles. Esta pérdida de peso, a su vez, reduce las propiedades de flujo del asfalto, es decir, su viscosidad, especialmente dada la velocidad con la que se produce la volatilización. Los investigadores han encontrado que la viscosidad aumenta entre el 150 y el

400% (Bell, 1989) (Christensen & Anderson, 1992). La volatilización sólo juega un papel importante durante la fabricación de la mezcla bituminosa (altas temperaturas), ya que el asfalto de penetración tiene un carácter volátil bajo. Este hecho vincula a la volatilización con el envejecimiento a corto plazo de la mezcla bituminosa, donde las temperaturas alcanzan y sobrepasan los 150°C, punto en el cual las fracciones que componen el asfalto comienzan a evaporarse. De acuerdo con (Read & Whiteoak, 2003) una temperatura adicional de 10 a 12°C podría duplicar las emisiones de volátiles.

5.7.2.2.2 Oxidación

(Read & Whiteoak, 2003) Al igual que muchas sustancias orgánicas, el asfalto se oxida lentamente cuando entra en contacto con el oxígeno atmosférico. Se forman grupos polares que contienen oxígeno y estos tienden a asociarse en micelas de mayor peso micelar, lo que aumenta la viscosidad del asfalto. Se forman grupos hidroxilo, carbonilo y carboxílicos polares, dando como resultado, moléculas más grandes y más complejas que hacen que el asfalto sea más rígido y menos flexible. El grado de oxidación depende en gran medida de la temperatura, el tiempo y el espesor de la película de asfalto. La tasa de oxidación se duplica para cada aumento de 10 °C en la temperatura por encima de 100 °C.

El proceso de oxidación ocurre principalmente durante el mezclado con los áridos, relacionado con el tiempo, temperatura, volumen de vacíos y espesor de la capa asfáltica. Sin embargo, también tiene lugar, aunque en menor medida, durante el transporte, compactación y vida de servicio de las mezclas (López & Miró, 2015).

5.7.3 Variables que intervienen en el proceso de envejecimiento

5.7.3.1 Variables intrínsecas

Las variables intrínsecas corresponden a las características propias de la mezcla asfáltica, es decir, los materiales y las características de fabricación. Entre ellas se cuenta el asfalto y los agregados, referidos a los materiales y el contenido de vacíos con aire y la permeabilidad como características propias de la fabricación de la mezcla. (Fernández, Rondón, & Reyes, 2011).

5.7.3.1.1 El asfalto

Los asfaltos han sido tradicionalmente descritos como sistemas coloidales donde las partículas sólidas (los asfáltenos) están dispersas en una matriz líquida aceitosa (los máltenos). Los cambios en el estado de la matriz de máltenos debidos a la temperatura provocan que el material se comporte como un sólido elástico o como un fluido newtoniano (Lesueur, 2008).

En la actualidad, la mayor parte de los procedimientos separan los asfaltos mediante precipitación con hidrocarburos saturados de bajo peso molecular (n-pentano o n-heptano). (Martínez, Martín, & Páez, 2003). A la fracción insoluble se le denomina asfáltenos y a la soluble máltenos. Estos últimos pueden dividirse en saturados, aromáticos y resinas. Por lo tanto, la composición de los asfaltos viene dada en función de las cantidades relativas de estas cuatro fracciones, denominadas SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos). (López & Miró, 2015).

(Corbett, 1970) Los efectos de la funcionalidad de las cuatro fracciones SARA sobre las propiedades físicas del asfalto se han descrito de la siguiente forma:

- ✓ Los asfáltenos, junto con los saturados y los aromáticos, son los responsables de las condiciones de flujo del asfalto.
- ✓ Los asfáltenos funcionan como espesantes. Las características reológicas del asfalto se ven muy afectadas por esta fracción. Al aumentar el contenido de asfáltenos, se obtendrá un asfalto de mayor dureza (menor penetración, mayor punto de ablandamiento y, por lo tanto, mayor viscosidad).
- ✓ Los saturados y los aromáticos dan fluidez al asfalto.
- ✓ Las resinas proporcionan ductilidad a los asfaltos.

(Corbett, 1970) concluyó que cada una de las fracciones tiene una determinada función en las propiedades físicas de las mezclas. Además, las propiedades físicas de un determinado asfalto dependerán del conjunto combinado de estas fracciones y de las proporciones que representan cada una en el total del asfalto.

Durante los procesos de fabricación y de puesta en obra de la mezcla bituminosa, así como en su posterior vida de servicio, se va produciendo el progresivo envejecimiento del ligante, que

se traduce en una reducción en el contenido de aromáticos y un aumento en las resinas, lo que a su vez incrementa el contenido de asfáltenos, mientras que los saturados, en general, no presentan cambios, tal vez por su baja reactividad química. (Farcas, 1996) (Petersen, 2009) (Petersen, 1984) (Qi & Wang, 2003) (Qi & Wang, 2004) (Siddiqui & Ali, 1999).

5.7.3.1.2 La película del asfalto

(Fernández, Rondón, & Reyes, 2011) En general, un adecuado espesor de la película alrededor de los agregados asegura una razonable durabilidad a la mezcla asfáltica. Esta película es la que realmente experimenta la acción del envejecimiento y en consecuencia es la que se endurece, por esta razón los ensayos de laboratorio para simular el envejecimiento se realizan sobre muestras de película delgada de asfalto del orden de uno a tres milímetros de espesor. Los cambios de temperatura producidos por el clima y el tránsito hacen que a medida que pasa el tiempo el asfalto se oxide y presente comportamiento quebradizo con la consecuente aparición de grietas.

5.7.3.1.3 Los agregados

Según (Abubeker, Safwat, Xiaohu, & Håkan, 2018) dependiendo del tipo de árido (naturaleza mineralógica y características de superficie), el comportamiento a envejecimiento de un mismo ligante mezclado con diferentes tipos de árido puede variar debido al contenido mineral en la superficie de los áridos, las propiedades de adsorción de los áridos, y la orientación de las moléculas polares del ligante en las proximidades de la interfaz ligante-superficie mineral.

5.7.3.1.4 Contenido de vacíos en el aire

(Fernández, Rondón, & Reyes, 2011) La función de los vacíos en la mezcla es la de generar unos espacios de estabilización de la mezcla en sí, ya que en el momento de incrementarse la temperatura por efecto del clima o por el tránsito vehicular, el asfalto tiende a fluir y puede ocupar esos espacios vacíos. De hecho, debe existir un equilibrio en la cantidad y distribución de los vacíos pues el exceso de ellos genera deformaciones plásticas y se permite el paso de agua y vapor, por el contrario, contenidos de vacíos muy bajos producen además de deformaciones plásticas, problemas de exudación.

Estudios sobre asfaltos han demostrado que entre mayor sea el contenido de vacíos en las mezclas, los asfaltos recuperados de las mismas, experimentan una reducción significativa en la penetración, lo que indica un endurecimiento de la mezcla en el tiempo de servicio (Said, 2005).

5.7.3.2 Variables extrínsecas

Investigadores que han estudiado los efectos del envejecimiento sobre asfaltos convencionales y modificados han establecido que variables como la temperatura, la humedad, la radiación solar y el tiempo de exposición, generan procesos de oxidación que producen envejecimiento en los materiales (Vallerga, 1981) (Traxler, 1963). A continuación, se describen algunas de estas variables.

5.7.3.2.1 Temperatura

La temperatura es sin duda el primer agente externo al cual es sometida la mezcla asfáltica para su elaboración, el asfalto es elevado a temperaturas entre 150 y 170 grados centígrados, ambiente en el cual ocurre la volatilización del asfalto y en consecuencia ocurre alguna pérdida de masa, adicionalmente ocurre la polimerización de algunas moléculas pequeñas. La volatilización del asfalto inicia a los 150 °C y la cantidad de volátiles se puede incrementar al doble cada 10 o 12°C adicionales, este proceso ocurre por la evaporación de los componentes aromáticos del asfalto y en todos los casos la volatilización está acompañada de reacciones de oxidación lo que influye directamente en el incremento de la rigidez (Fernández, Rondón, & Reyes, 2011).

5.7.3.2.2 Humedad

La humedad es uno de los factores que afecta en mayor grado el desempeño de la mezcla asfáltica debido a que produce una degradación en las propiedades mecánicas del material por la presencia de agua en forma líquida o como vapor (Caro, Masad, Bhasin, & Little, 2008). La degradación de las propiedades mecánicas se da por la pérdida de adhesividad entre el asfalto y el agregado y la pérdida de resistencia cohesiva en el cemento asfáltico por la presencia de agua (Kiggundu & Roberts, 1988). Para que esto ocurra es necesario que exista algún elemento que permita el ingreso de agua o vapor dentro de la mezcla y esta situación es atribuible a una deficiente superficie de rodadura y a problemas de drenaje (Kandhal, 1992).

5.7.3.2.3 Radiación solar

La radiación solar es uno de los factores responsables del envejecimiento de los asfaltos, provocando la disminución en la vida útil de las mezclas asfálticas (Araújo, Lins, & Pasa, 2011). Los efectos de la radiación ultra violeta en el cemento asfáltico pueden cambiar la estructura molecular del mismo, así como pueden acelerar los procesos de envejecimiento térmico o alterarla susceptibilidad al agua de las mezclas (Cortes, y otros, 2010).

5.7.3.2.4 Tiempo de exposición

(Fernández, Rondón, & Reyes, 2011) El tiempo de exposición es quizás la variable que los investigadores han intentado predecir en las diferentes pruebas y ensayos de laboratorio. La búsqueda de la duración del tipo de la prueba que sea equivalente al proceso de envejecimiento de corto plazo y la duración de la prueba que sea equivalente al envejecimiento de largo plazo. Sin embargo, estas aproximaciones están dadas para algunos de los cementos asfálticos utilizados en los Estados Unidos, pero es evidente que para otras localizaciones y otros tipos de materiales esa equivalencia no es del todo correcta.

De todas maneras, es aceptado a nivel mundial que el envejecimiento sucede en dos etapas la primera el envejecimiento a corto plazo que ocurre en el momento de la mezcla, el transporte y la construcción. Esta etapa se caracteriza por que la mezcla experimenta la volatilización y una parte de la oxidación de una manera muy rápida, el proceso es llevado a cabo en cuestión de horas. La segunda etapa corresponde al envejecimiento de largo plazo asociado exclusivamente a la vida de servicio del pavimento. Allí las moléculas superficiales del pavimento reaccionan con las condiciones ambientales y se presentan procesos de oxidación, en contraste con la primera etapa, este proceso es lento y sus efectos se detectan con el paso de los años.

6. METODOLOGÍA

Para realizar el presente estudio se han reconocido nueve etapas que permitieron una adecuada utilización de los recursos, una optimización del tiempo y el logro de los objetivos planteados.

1. **Revisión bibliográfica.** Durante el desarrollo del proyecto, se realizó la revisión bibliográfica para profundizar en el estado del conocimiento sobre el tema. Adicionalmente, se desarrolló un resumen de los diferentes proyectos investigados, sobre las propiedades mecánicas de mezclas de concreto asfáltico convencionales contra mezclas de concreto asfálticas que empleaban cementos asfálticos modificados por vía húmeda sometidos a diferentes temperaturas y tiempos de mezclado con diversos aditivos. Con base en la revisión bibliográfica realizada, se establecieron las temperaturas y tiempos de mezclado a los cuales se sometió el cemento asfáltico en el presente estudio.
2. **Consecución de materiales.** Para la fabricación de las mezclas, se utilizó un cemento asfáltico tipo CA 60-70, por ser el ligante que más se produce y utiliza en Colombia para tal fin. Este fue suministrado por la planta de asfaltos CONCRESCOL S.A. proveniente de la refinería de Barrancabermeja. El agregado pétreo fue obtenido de la planta de asfaltos CONCRESCOL S.A., el cual cumple con los requisitos mínimos de calidad exigidos por la especificación (INVÍAS, 2013) para fabricar mezclas de concreto asfáltico.
3. **Caracterización de materiales.** En la Tablas 7 y 8 se presentan los ensayos realizados en el CA 60-70 y en el agregado pétreo, respectivamente. Esta fase experimental tuvo como objetivo principal revisar que, los materiales cumplieran con los requisitos mínimos de calidad establecidos por la especificación (INVÍAS, 2013) para la fabricación de mezclas de concreto asfáltico.

Tabla 7. Ensayos de caracterización del CA 60-70.

Ensayo	Método
Penetración (25°C, 100 g, 5 s), 0,1 mm	INV. E- 706
Punto de ablandamiento, °C	INV. E-712
Índice de penetración	INV. E-724
Viscosidad (60 °C), P	INV. E-717
Ductilidad (25°C, 5cm/min), cm	INV. E- 702
Peso específico de asfaltos	INV. E-707
RTFOT (ensayo de película delgada, INV. E-721)	
Pérdida de masa	ASTM D-2872
Punto de ablandamiento	INV. E-712
Penetración (25°C, 100 g, 5 s), 0,1 mm	INV. E- 706

Fuente: Propia

Tabla 8. Ensayos del agregado pétreo para mezclas asfálticas en caliente

Ensayo	Método
Resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles	INV. E-218
Micro-Deval	INV. E-238
10% de finos en seco	INV. E-224
Pérdida en ensayo de solidez	INV. E-220
Índice de plasticidad	INV. E-125, 126
Equivalente de arena	INV. E-133
Valor de Azul de metileno	INV. E-235
Partículas planas	INV. E-240
Partículas alargadas	
Caras fracturadas 1 cara	INV. E-227

Fuente: Propia

4. **Diseño mezcla asfáltica de control.** Realizados los ensayos al agregado pétreo y al CA 60-70, se fabricaron tres probetas (compactadas a 75 golpes por cara) para cada porcentaje de asfalto de 4,5%, 5,0%, 5,5% y 6,0%, con el fin de realizar el diseño Marshall de la mezcla de control. Como mezcla de control se seleccionó la MDC-19 (INVÍAS, 2013), debido a que es la más utilizada en Colombia actualmente para la conformación de capas de rodadura en

pavimentos asfálticos (ver granulometría en la Tabla 9). Para fabricar las mezclas (agregado – asfalto), las temperaturas de mezclado y compactación de las probetas fueron obtenidas con base en el ensayo de viscosidad cumpliendo con el rango especificado para mezclas del tipo denso (viscosidad promedio de mezcla de 170 cP y de compactación de 280 cP).

De acuerdo con los resultados obtenidos, se escogió el contenido óptimo de asfalto de la mezcla de control, así como su resistencia bajo carga monotónica (evaluada a través de los parámetros de estabilidad - E, flujo - F y relación E/F) y la composición volumétrica (vacíos con aire – Va, vacíos en agregados minerales – VMA y vacíos llenos de asfalto – VFA). En esta fase, fueron fabricadas y ensayadas 12 probetas Marshall (4 porcentajes de asfalto cada uno con 3 muestras).

Tabla 9. Granulometría de la mezcla MDC-19.

Tamiz		Mezcla
Normal	Alternativo	MDC-19
19,0 mm	3/4"	100
12,5 mm	1/2"	80-95
9,5 mm	3/8"	70-88
4,75 mm	Nº.4	49-65
2,00 mm	Nº.10	29-45
0,425 mm	Nº.40	14-25
0,180 mm	Nº.80	8-17
0,075 mm	Nº.200	4-8

Fuente: (INVÍAS, 2013)

5. **Tratamiento térmico del cemento asfáltico y caracterización.** Con el fin de cumplir el objeto principal del presente estudio, el CA 60-70 fue sometido a tres temperaturas y tres tiempos de exposición tomados de acuerdo con la revisión bibliográfica ejecutada para simular las temperaturas y tiempos de exposición a los que son expuestos los asfaltos cuando son modificados por vía húmeda con diversos aditivos. Es decir, de este proceso se obtuvieron 9 muestras de cemento asfáltico (3 temperaturas y 3 tiempos de exposición). Sobre estas muestras asfálticas se llevaron a cabo ensayos de penetración (INV E- 706), gravedad

específica (INV. E-707) y punto de ablandamiento (INV. E-712), para así evaluar el cambio en las propiedades físicas que experimentó el CA 60-70.

6. **Ensayos Marshall (INV. E-748-13).** Con el propósito de evaluar la resistencia mecánica bajo carga monotónica y el cambio en la composición volumétrica de la mezcla MDC-19 fabricada con los asfaltos obtenidos después del proceso de exposición a las tres temperaturas y tres tiempos de mezclado establecidos, se realizó el ensayo Marshall. Las muestras fueron fabricadas empleando el contenido óptimo de asfalto seleccionado en el diseño de la mezcla de control. Por lo anterior, para este ensayo fueron fabricadas y ensayadas 27 probetas Marshall (9 asfaltos cada uno con 3 muestras).
7. **Ensayos de tracción indirecta (INV. E-725-13).** Sobre mezclas tipo Marshall fabricadas con el contenido óptimo de asfalto, con CA 60-70 con y sin tratamiento térmico (10 tipos de asfalto: CA 60-70 virgen y 9 con tratamiento térmico), fueron ejecutados ensayos de tracción indirecta. Para el ensayo a tracción indirecta, se elaboraron seis especímenes para cada mezcla, tres para ser probados en seco y tres para ser probados después de saturados parcialmente y acondicionados en un baño con agua. Se colocan los especímenes en el aparato a carga, con las franjas de carga centradas y paralelas sobre el plano diametral vertical y se aplicó la carga a una velocidad de 50 ± 2 mm/min hasta que se alcanzó su máxima carga. El método permitió establecer la máxima carga que soporta las probetas tanto en seco como acondicionadas en agua. En total fueron fabricadas y ensayadas 60 muestras en esta fase (10 asfaltos cada uno de 6 muestras). El método recomienda la realización del ensayo sobre mezclas fabricadas con contenidos de vacíos de $7 \pm 1\%$. En el presente estudio no se tuvo en cuenta esta recomendación, ya que se quiso evaluar la resistencia a tracción de las mezclas con el contenido de vacíos obtenido bajo las mismas temperaturas de mezcla y compactación, y con el mismo número de golpes durante el proceso de compactación.

Los valores de resistencia a la tracción se determinaron mediante los valores máximos de carga obtenidos en la prueba mediante la Ecuación 1.

Ecuación 1. Resistencia a la tensión (R_T)

$$R_T = \frac{2000 * P}{\pi * t * D}$$

Fuente: (INVÍAS, 2013)

Donde:

R_T : resistencia a la tensión (kPa);

P: carga máxima (N);

T: es la altura promedio del espécimen antes de la prueba (mm)

D: Diámetro del espécimen, (mm).

Al calcular los valores de la resistencia a la tensión, se podría calcular la relación de resistencia a tensión, con la Ecuación 2.

Ecuación 2. Relación de resistencia a la tensión (RRT)

$$RRT = \frac{RTH}{RTS} * 100$$

Fuente: (INVÍAS, 2013)

Donde:

RRT: Relación de resistencia a la tensión, %;

RTH: Resistencia promedio a la tensión, del subgrupo acondicionado al agua;

RTS: Resistencia promedio a la tensión del subgrupo mantenido en seco.

8. **Ensayo Cantabro.** Sobre las mezclas MDC-19 fabricadas con los 10 asfaltos mencionados anteriormente se realizaron ensayos de pérdida por desgaste Cantabro (INV. E-760-13), a una temperatura de 25°C, introduciendo las probetas en el tambor de la máquina de los ángeles a una revolución de 188 a 208 rad/min (30 a 33 rpm), durante 500 vueltas. El ensayo de cantabro se realizó sobre tres muestras por tipo de mezcla. En total en esta fase, se fabricaron y ensayaron 30 muestras (10 asfaltos cada uno con 3 muestras).
9. **Informes técnicos y documento final.** Durante el transcurso del estudio se elaboraron los documentos respectivos para la publicación y divulgación de los resultados basados en la

revisión bibliográfica consultada y los resultados obtenidos de la fase experimental. Se remitieron informes parciales al director del trabajo de grado para su respectiva revisión y se elaboró el presente documento final en donde se reporta el análisis de los resultados, las conclusiones y recomendaciones del estudio.

En la Tabla 10, se presenta el cronograma de actividades de acuerdo a la metodología propuesta.

Tabla 10. Cronograma de actividades.

Descripción de la Actividad / Mes		1	2	3	4	5
1	Revisión bibliográfica					
2	Consecución de materiales					
3	Caracterización de materiales					
4	Diseño mezcla asfáltica de control					
5	Tratamiento térmico del CA 60-70 y caracterización					
6	Ensayos Marshall					
7	Ensayo de tracción indirecta					
8	Ensayo Cantabro					
9	Informes técnicos y documento final					

Fuente: Propia

7. FASE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS

Con base en la revisión bibliográfica realizada, se establecen las temperaturas y tiempos de mezclado a los cuales se sometió el cemento asfáltico del presente estudio. Lo anterior, con el fin de simular las temperaturas y tiempos de exposición a los que son sometidos los asfaltos cuando son modificados por vía húmeda con diversos aditivos, estableciendo las siguientes temperaturas y tiempos de exposición:

- ✓ Temperaturas de mezclado: 160, 170 y 180 °C.
- ✓ Tiempo de exposición a temperaturas de mezclado: 40, 60 y 90 minutos.

Se realizaron combinaciones de CA 60-70 con las temperaturas y tiempos establecidos para un total de 9 muestras a evaluar, comparadas con la muestra de CA 60-70 de control (Véase Tabla 11).

Tabla 11. Combinaciones de CA tratado térmicamente

Muestra	CA	Temperatura de mezclado (°C)	Tiempo de mezclado (minutos)
1	60-70 Control	NA	NA
2	60-70	160	40
3	60-70	160	60
4	60-70	160	90
5	60-70	170	40
6	60-70	170	60
7	60-70	170	90
8	60-70	180	40
9	60-70	180	60
10	60-70	180	90

Fuente: Propia

7.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

7.1.1 Cemento asfáltico de control

Para la caracterización del cemento asfáltico CA 60-70, se realizaron los ensayos que exige la especificación del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013), (Véase Tabla 12). En ellos se observa que el asfalto cumple con los requisitos mínimos de calidad para ser utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas.

Tabla 12. Ensayos de caracterización sobre el CA 60-70.

Ensayo	Método	Grado de Penetración 60 -70		Resultado
		Mínimo	Máximo	
Penetración (25°C, 100 g, 5 s), 0,1 mm	INV. E- 706	60	70	64
Punto de ablandamiento, °C	INV. E-712	48	54	44
Índice de penetración	INV. E-724	-1,2	+0,6	-1.14
Viscosidad (60 °C), P	INV. E-717	1500	-	1600
Ductilidad (25°C, 5cm/min), cm	INV. E- 702	100	-	125
Peso específico de asfaltos	INV. E-707			1.012
RTFOT (ensayo de película delgada, INV. E-721)				
Pérdida de masa (%)	ASTM D-2872	-	1.0	0.3
Punto de ablandamiento	INV. E-712	48	54	52
Penetración (25°C, 100 g, 5 s), 0,1 mm	INV. E- 706	60	70	65

Fuente: Propia

7.1.2 Agregado Pétreo

Se realizaron ensayos de caracterización al agregado pétreo necesarios para el estudio. Los resultados de estos ensayos se presentan en la Tabla 13, en la cual se observa que los valores cumplen con los requerimientos mínimos de calidad exigidos por las especificaciones (INVÍAS, 2013) para fabricar mezclas tipo MDC-19 para capas de rodadura.

Tabla 13. Ensayos sobre el agregado pétreo.

Ensayo	Método	Unidad	Nivel de Tránsito NT3	Resultado
Resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles	INV. E-218	%	máximo 25	23.0
Micro-Deval	INV. E-238	%	máximo 20	18,9
10% de finos en seco	INV. E-224	kN	mínimo 110	140
Pérdida en ensayo de solidez	INV. E-220	%	máximo 18	13.0
Índice de plasticidad	INV. E-125, 126	%	NA	
Equivalente de arena	INV. E-133	%	mínimo 50	58
Valor de Azul de metileno	INV. E-235		máximo 10	8
Partículas planas	INV. E-240	%	máximo 10	9.5
Partículas alargadas				9.1
Caras fracturadas 1 cara	INV. E-227	%	mínimo 85	92

Fuente: Propia

7.1.3 Tratamiento térmico y caracterización del asfalto

Caracterizado el cemento asfáltico CA 60-70 de control y establecidas las temperaturas y tiempos de mezclado a las cuales estaría expuesto el asfalto para simular la modificación por vía húmeda, se realiza el tratamiento térmico a las nueve muestras en estudio (3 temperaturas para 3 tiempos de exposición a mezclado) para luego realizar nuevamente los ensayos penetración, punto de ablandamiento y gravedad específica.

7.1.3.1 Penetración

El ensayo de penetración se usa para medir la consistencia de un material bituminoso expresado por medio de la distancia, en decimas de milímetro, hasta la cual penetra verticalmente una aguja normalizada en el material en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. El ensayo se realizó a 25 °C, durante un tiempo de 5 segundos y una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 gramos. Los resultados del ensayo para las temperaturas a 160, 170 y 180 °C y tiempos de exposición al mezclado de 40, 60 y 90 minutos, se presentan en la Tabla 14. Por otra parte, en la Tabla 15 y en la Figura 2 se presentan los resultados del promedio del ensayo de penetración de los cementos asfálticos utilizados en el estudio.

Tabla 14. Ensayo de penetración de cementos asfálticos tratados térmicamente

Ensayo de Penetración INV. E -706						
160 °C			170 °C		180 °C	
	Pen [0,1 mm]	Promedio	Pen [0,1 mm]	Promedio	Pen [0,1 mm]	Promedio
40 minutos	58	58.3	53	53.7	50	50.3
	59		53		48	
	58		55		53	
	Pen [0,1 mm]	Promedio	Pen [0,1 mm]	Promedio	Pen [0,1 mm]	Promedio
60 minutos	54	54.7	48	48.7	46	46.0
	56		49		47	
	54		49		45	
	Pen [0,1 mm]	Promedio	Pen [0,1 mm]	Promedio	Pen [0,1 mm]	Promedio
90 minutos	45	46.0	44	44.7	43	42.0
	46		45		42	
	47		45		41	

Fuente: Propia

Tabla 15. Ensayo de penetración a cementos asfálticos

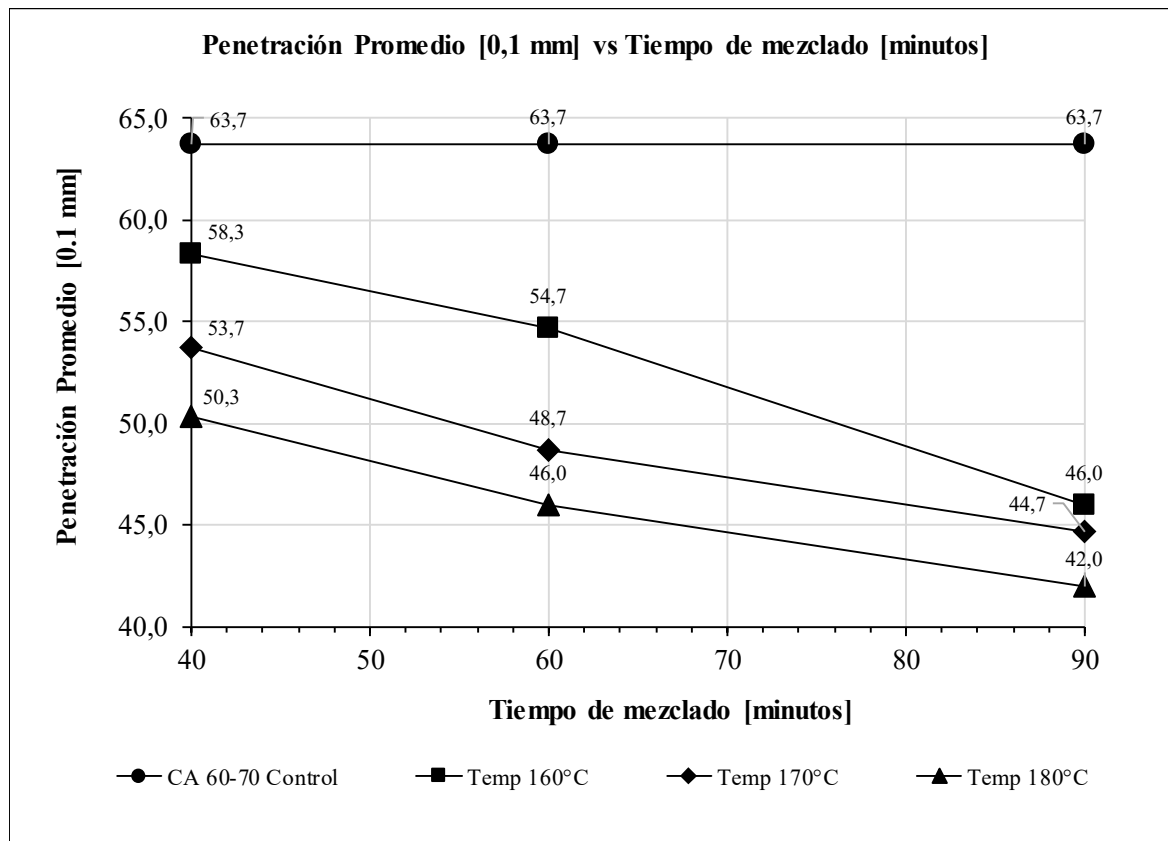
Muestra	Características	Penetración Promedio [0,1 mm]
1	CA 60-70 Control	63,7
2	CA 60-70 (40 Min Mezclado – Temp 160 °C)	58,3
3	CA 60-70 (40 Min Mezclado – Temp 170 °C)	53,7
4	CA 60-70 (40 Min Mezclado – Temp 180 °C)	50,3
5	CA 60-70 (60 Min Mezclado – Temp 160 °C)	54,7
6	CA 60-70 (60 Min Mezclado – Temp 170 °C)	48,7
7	CA 60-70 (60 Min Mezclado – Temp 180 °C)	46,0
8	CA 60-70 (90 Min Mezclado – Temp 160 °C)	46,0
9	CA 60-70 (90 Min Mezclado – Temp 170 °C)	44,7
10	CA 60-70 (90 Min Mezclado – Temp 180 °C)	42,0

Fuente: Propia

Como se puede apreciar en la Figura 2, el cemento asfáltico sometido a temperaturas y tiempos de mezclado presenta una mayor resistencia a la penetración que el cemento asfáltico de control, es debido al reacomodamiento de la estructura molecular del asfalto por el tiempo y temperatura de exposición, el cual induce a la reducción de las fracciones más livianas del asfalto (aromáticos) y un aumento de la fracción más pesada del mismo (asfáltenos), fracción que en gran

medida, representa el aumento de rigidez en el cemento asfáltico (Farcas, 1996) (Petersen, 2009) (Petersen, 1984) (Qi & Wang, 2003) (Qi & Wang, 2004) (Siddiqui & Ali, 1999).

Figura 2. Penetración Promedio [0,1 mm] vs Tiempo de mezclado [minutos]

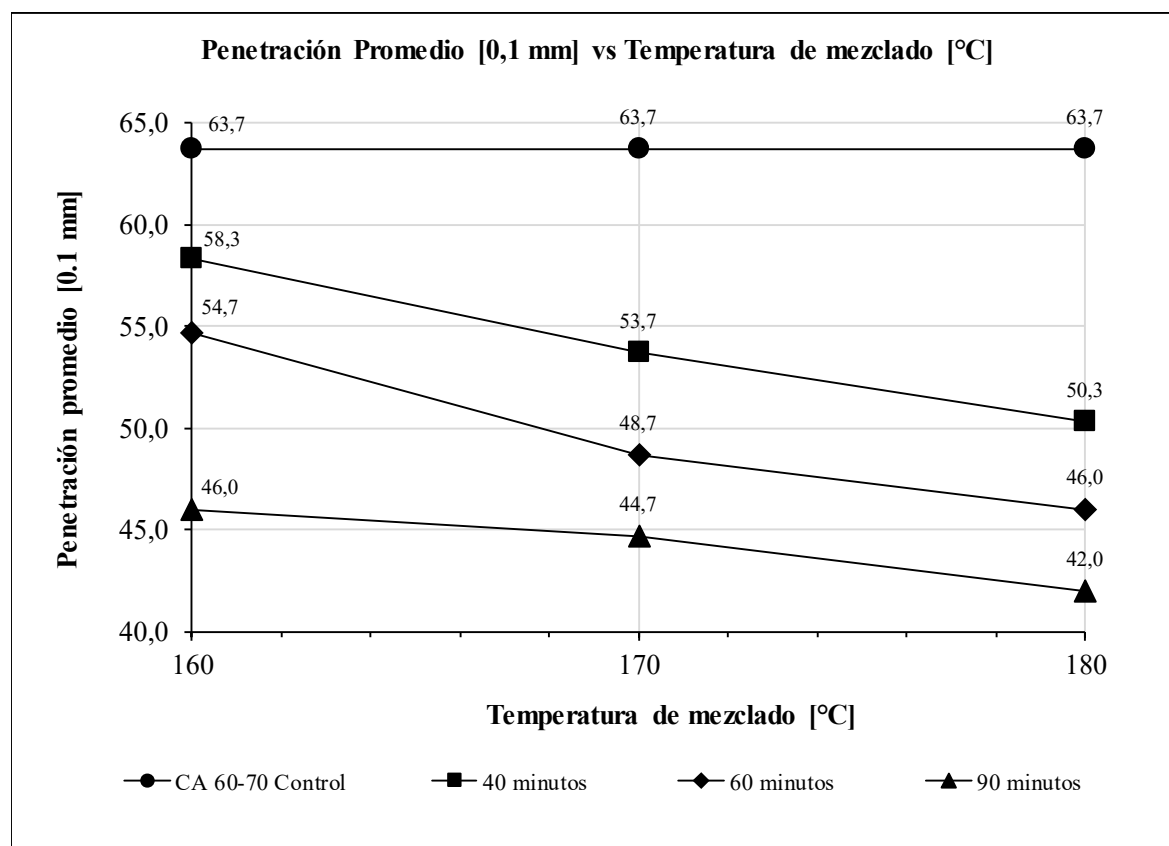


Fuente: Propia

Así mismo, comparado el cemento asfáltico sometido al mismo tiempo de exposición al mezclado bajo condiciones de temperatura en aumento, disminuye notablemente la penetración, esto dando mayor rigidez al asfalto producto de una mayor pérdida de fracciones livianas durante su calentamiento. Para tiempos de mezclado de 40 minutos a temperaturas de 160, 170 y 180 °C se aprecia una disminución de la penetración promedio de 7.1% por cada 10° C de temperatura. Para tiempos de mezclado de 60 minutos a temperaturas de 160, 170 y 180 °C se observa una disminución de la penetración promedio de 8.3% por cada 10° C de temperatura. Para tiempos de mezclado de 90 minutos a temperaturas de 160, 170 y 180 °C esta disminución de la penetración promedio es de 4.4% por cada 10° C de temperatura.

Por otra parte, comparado el cemento asfáltico a la misma temperatura de mezclado, pero a los diferentes tiempos de exposición, se puede apreciar el mismo fenómeno denotado anteriormente (Véase Figura 3). Para temperaturas de mezclado de 160 °C bajo tiempos de mezclado de 40, 60 y 90 minutos, se aprecia una disminución de la penetración promedio de 11.0% por cada 10° C de temperatura. Para temperaturas de mezclado de 170 °C bajo tiempos de mezclado de 40, 60 y 90 minutos, dicha disminución de la penetración promedio es de 8.7% por cada 10° C de temperatura. Para temperaturas de mezclado de 180 °C bajo tiempos de mezclado de 40, 60 y 90 minutos, esta disminución de la penetración promedio es de 8.6% por cada 10° C de temperatura. Finalmente, comparando el asfalto de control con el asfalto expuesto a las mayores temperaturas y tiempos de exposición (90 minutos – 180 °C), se presenta una disminución de la penetración promedio de 34.0%.

Figura 3. Penetración Promedio [0,1 mm] vs Temperatura de mezclado [°C]



Fuente: Propia

7.1.3.2 Punto de ablandamiento

La prueba de punto de ablandamiento de anillo y bola es la prueba estándar para determinar la consistencia del cemento asfáltico y representa la temperatura a la que se produce un cambio de fase de sólido a líquido en el CA. Corresponde a la temperatura a la cual cae una bola de acero estándar de 3/8 pulgadas que pesa 3.55 g y toca la placa base que está a 25.4 mm de distancia. Los resultados del cemento asfáltico expuesto a tiempos de mezclado de 40, 60 y 90 minutos durante temperaturas de 160, 170 y 180 °C, se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Punto de ablandamiento de cementos asfálticos tratados térmicamente

Ensayo de punto de ablandamiento INV. E -712						
	160 °C		170 °C		180 °C	
	Temperatura (°C)	Promedio	Temperatura (°C)	Promedio	Temperatura (°C)	Promedio
40 minutos	45,2	45,4	45,8	46,0	46,8	47,0
	45,5		46,2		47,1	
60 minutos	45,5	45,6	46,7	46,8	48,2	48,4
	45,7		46,8		48,5	
90 minutos	46,7	46,7	47,6	47,8	48,9	49,1
	46,7		47,9		49,2	

Fuente: Propia

En la Tabla 17 y en la Figura 4 se presentan los resultados del promedio de las temperaturas alcanzadas por los diferentes cementos asfálticos trabajados en el estudio.

Tabla 17. Resumen ensayo de punto de ablandamiento de cementos asfálticos

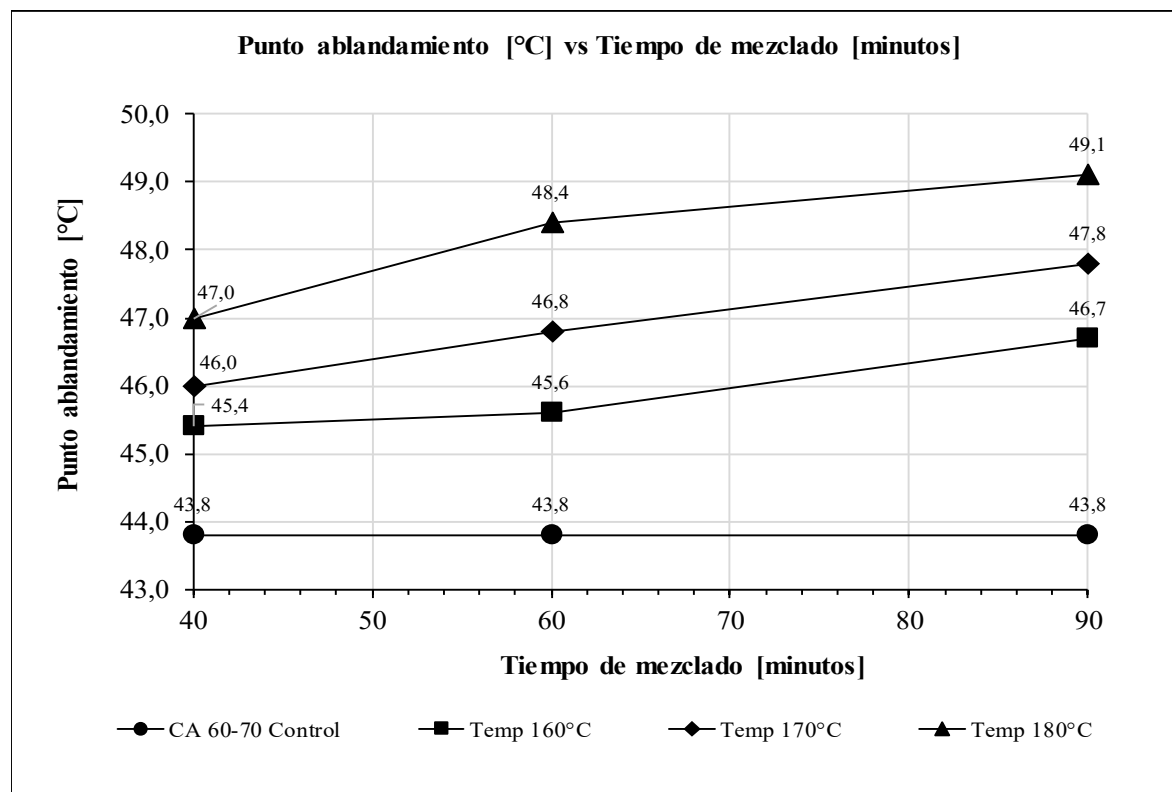
Muestra	Características	Punto ablandamiento Promedio [°C]
1	CA 60-70 Control	43,8
2	CA 60-70 (40 Min Mezclado – Temp 160 °C)	45,4
3	CA 60-70 (40 Min Mezclado – Temp 170 °C)	46,0
4	CA 60-70 (40 Min Mezclado – Temp 180 °C)	47,0

Muestra	Características	Punto ablandamiento Promedio [°C]
5	CA 60-70 (60 Min Mezclado – Temp 160 °C)	45,6
6	CA 60-70 (60 Min Mezclado – Temp 170 °C)	46,8
7	CA 60-70 (60 Min Mezclado – Temp 180 °C)	48,4
8	CA 60-70 (90 Min Mezclado – Temp 160 °C)	46,7
9	CA 60-70 (90 Min Mezclado – Temp 170 °C)	47,8
10	CA 60-70 (90 Min Mezclado – Temp 180 °C)	49,1

Fuente: Propia

Como se puede apreciar en la Figura 4, el cemento asfáltico tratado térmicamente presenta una mayor resistencia a fluir respecto al cemento asfáltico de control, confirmando lo analizado en el ensayo de penetración, lo cual permite establecer, que al someter a temperaturas y tiempos de mezclado al cemento asfáltico, aumenta su rigidez y consistencia como producto de la pérdida de las fracciones livianas a la que se expone el material al calentarse.

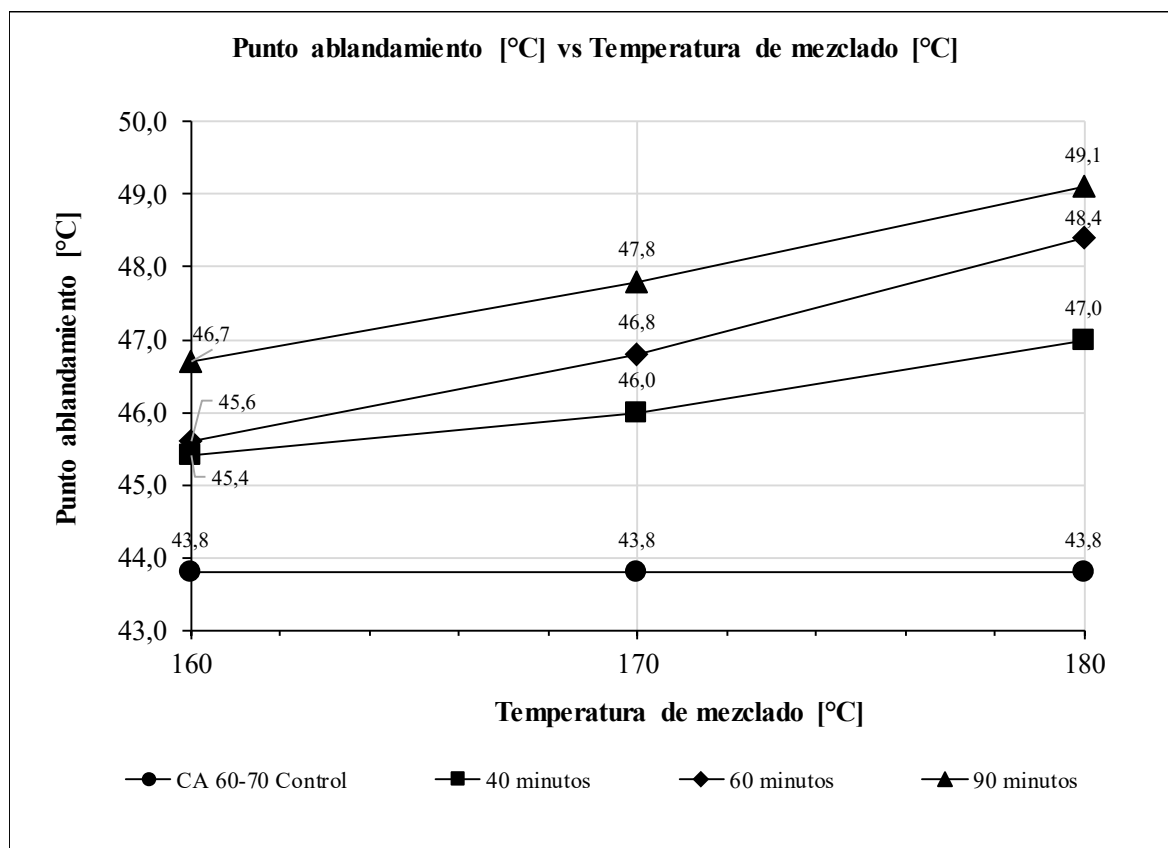
Figura 4. Punto de Ablandamiento [°C] vs Tiempo de mezclado [minutos]



Fuente: Propia

Así mismo, comparando el cemento asfáltico sometido al mismo tiempo de exposición al mezclado bajo condiciones de temperatura en aumento, permiten determinar que el material presenta una mayor resistencia a fluir. Para tiempos de mezclado de 40 minutos a temperaturas de 160, 170 y 180 °C se aprecia un aumento en la temperatura de ablandamiento promedio de 2.4% por cada 10° C de temperatura. Para tiempos de mezclado de 60 minutos a temperaturas de 160, 170 y 180 °C se observa un aumento en la temperatura de ablandamiento promedio de 4.3% por cada 10° C de temperatura. Para tiempos de mezclado de 90 minutos a temperaturas de 160, 170 y 180 °C este aumento en la temperatura de ablandamiento promedio es de 3.7% por cada 10° C de temperatura.

Figura 5. Punto de Ablandamiento [°C] vs Temperatura de mezclado [°C]



Fuente: Propia

Adicionalmente, comparado el cemento asfáltico a la misma temperatura de mezclado, pero a los diferentes tiempos de exposición, se puede apreciar el mismo fenómeno de endurecimiento, indicando que el asfalto puede estar experimentando un cambio en su

comportamiento dúctil a frágil a mayor exposición a tiempos de mezclado. Para temperaturas de mezclado de 160 °C bajo tiempos de mezclado de 40, 60 y 90 minutos, se aprecia un aumento de la temperatura de ablandamiento promedio de 1.6% por cada 10° C de temperatura. Para temperaturas de mezclado de 170 °C bajo tiempos de mezclado de 40, 60 y 90 minutos, dicho aumento de la temperatura de ablandamiento promedio es de 2.8% por cada 10° C de temperatura. Para temperaturas de mezclado de 180 °C bajo tiempos de mezclado de 40, 60 y 90 minutos, este aumento de la temperatura promedio es de 3.72% por cada 10° C de temperatura. Finalmente, comparando el asfalto de control con el asfalto expuesto a las mayores temperaturas y tiempos de exposición (90 minutos – 180 °C), se presenta una disminución de la penetración promedio de 12.1%. (Véase Figura 5).

El envejecimiento de los cementos asfálticos sometidos a temperaturas y tiempos de mezclado queda evidenciado con la disminución de la penetración y el aumento del punto del punto de ablandamiento de las muestras estudiadas y tratadas térmicamente.

7.1.3.3 Gravedad específica

La densidad relativa o gravedad específica es la relación entre la masa de un volumen dado de material asfáltico y la masa de un volumen igual de agua a la misma temperatura. El ensayo consiste en colocar una muestra en un picnómetro calibrado. Se pesa el picnómetro con la muestra. El volumen remanente del picnómetro es completado con agua. Luego se lleva a la temperatura del ensayo y se determina su masa. La densidad de la muestra se calculó a partir de la masa de la muestra y de la masa del agua desalojada por la muestra en el picnómetro. Los resultados del ensayo de gravedad específica para las temperaturas a 160, 170 y 180 °C y tiempos de exposición al mezclado de 40, 60 y 90 minutos, así como los resultados del asfalto de control, se presentan en la Tabla 18 y en la Figura 6.

Tabla 18. Ensayo gravedad especifica de cementos asfálticos

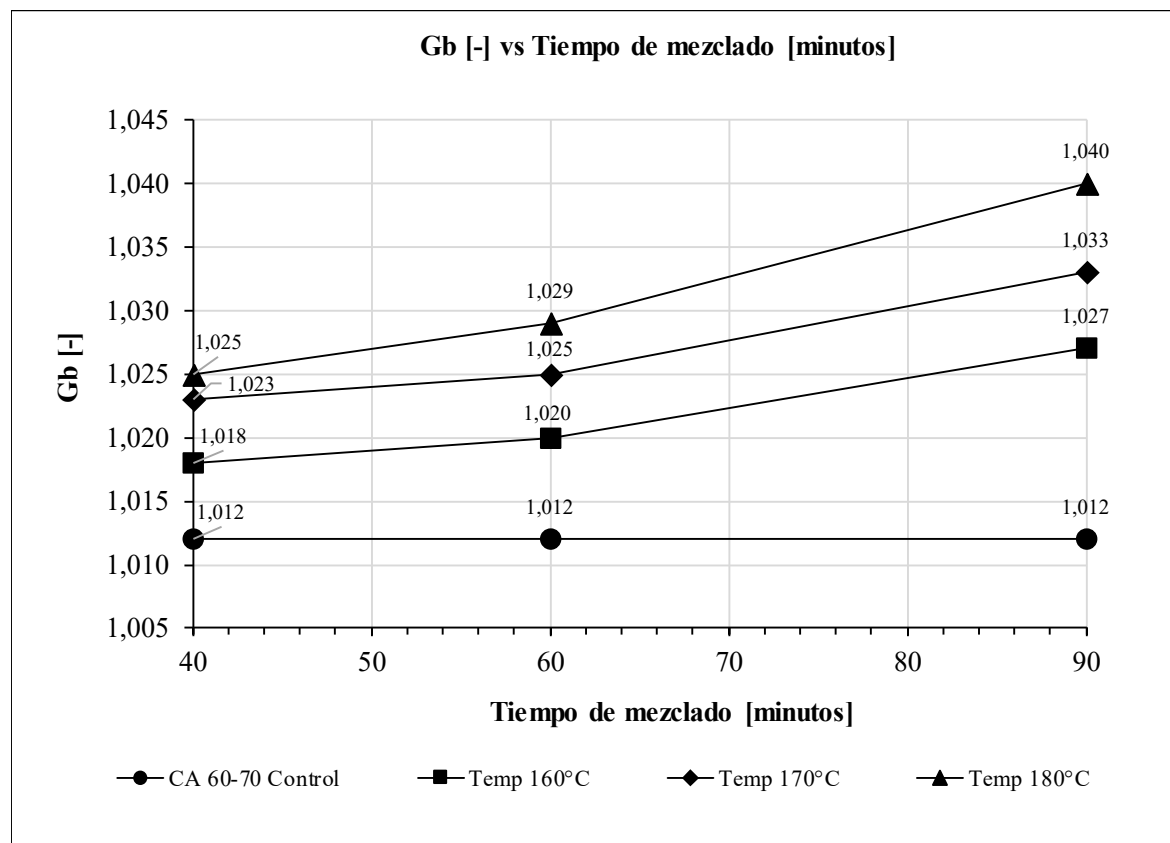
Muestra	Características	Gravedad Específica Gb [-]
1	CA 60-70 Control	1,012
2	CA 60-70 (40 Min Mezclado – Temp 160 °C)	1,018
3	CA 60-70 (40 Min Mezclado – Temp 170 °C)	1,023
4	CA 60-70 (40 Min Mezclado – Temp 180 °C)	1,025
5	CA 60-70 (60 Min Mezclado – Temp 160 °C)	1,020
6	CA 60-70 (60 Min Mezclado – Temp 170 °C)	1,025
7	CA 60-70 (60 Min Mezclado – Temp 180 °C)	1,029
8	CA 60-70 (90 Min Mezclado – Temp 160 °C)	1,027
9	CA 60-70 (90 Min Mezclado – Temp 170 °C)	1,033
10	CA 60-70 (90 Min Mezclado – Temp 180 °C)	1,040

Fuente: Propia

Como se puede apreciar en la Figura 6, la gravedad específica de los asfaltos sometidos a temperaturas y tiempos de mezclado respecto al asfalto de control presenta un aumento. Cabe precisar que este se debe a la pérdida de fracciones livianas del asfalto cuando este fue sometido al tratamiento térmico. Se aclara la importancia de la estimación de este valor, toda vez que este es tomado para calcular el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica, así como es esencial

para calcular la cantidad de asfalto absorbido por los poros internos del agregado en una mezcla asfáltica.

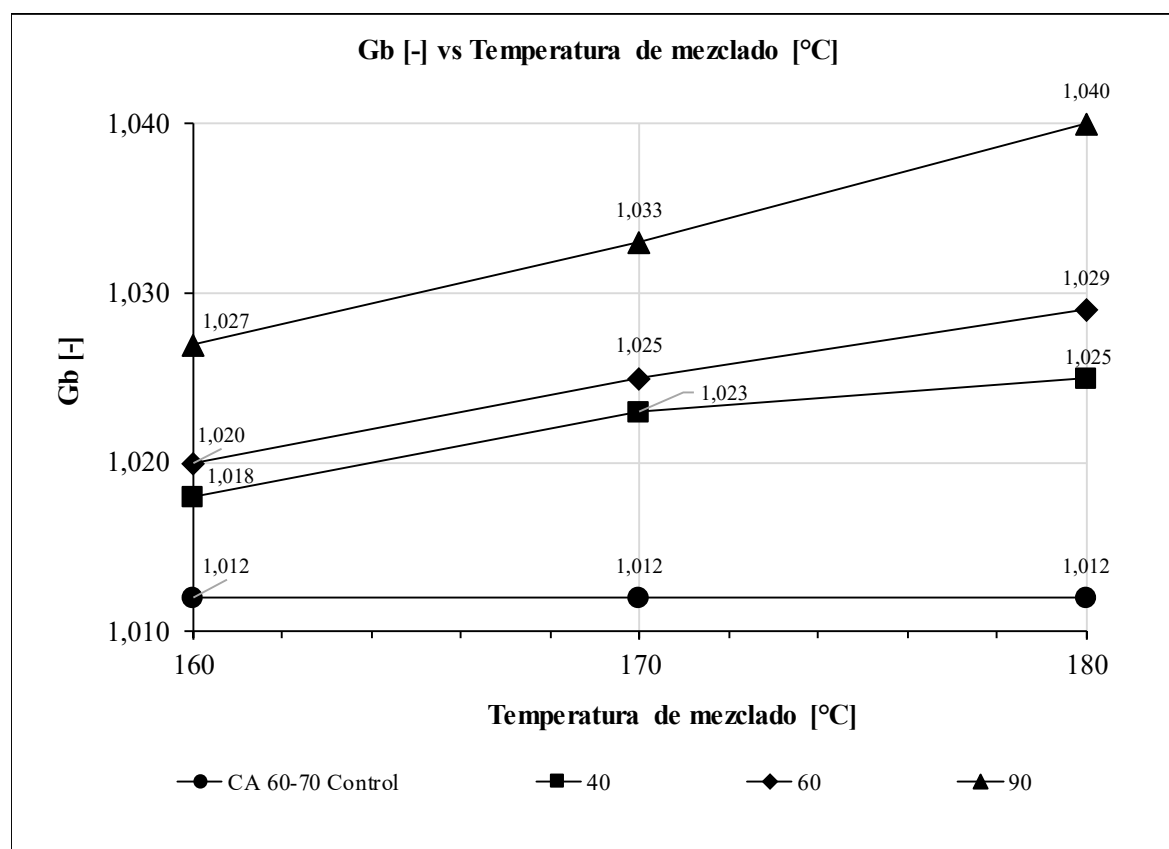
Figura 6. Gb [-] vs Tiempo de mezclado [minutos]



Fuente: Propia

Así mismo, comparando el cemento asfáltico sometido al mismo tiempo de exposición al mezclado bajo condiciones de temperatura en aumento, permiten evidenciar un cambio creciente de la gravedad específica. Adicionalmente, comparado el cemento asfáltico a la misma temperatura de mezclado, pero a los diferentes tiempos de exposición, se puede apreciar el mismo fenómeno (Véase Figura 7). Comparado el asfalto de control contra el asfalto con mayor temperatura y tiempo de exposición al mezclado (90 minutos – 180 °C), se obtiene como resultado un aumento del 2.7% de la gravedad específica.

Figura 7. Gb [-] vs Temperatura de mezclado [°C]



Fuente: Propia

En la Tabla 19 se presenta el resumen de los resultados de las propiedades físicas de los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y gravedad específica del asfalto de control, así como de los asfaltos sometidos al tratamiento térmico.

Tabla 19. Resumen de resultados de caracterización del asfalto

Características	Penetración [0,1 mm]	Punto de ablandamiento [° C]	Gb [-]
MDC-19 Convencional	63,7	63,7	1,012
MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 160 °C)	58,3	58,3	1,018
MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 170 °C)	53,7	53,7	1,023
MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 180 °C)	50,3	50,3	1,025
MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 160 °C)	54,7	54,7	1,020
MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 170 °C)	48,7	48,7	1,025

Características	Penetración [0,1 mm]	Punto de ablandamiento [° C]	Gb [-]
MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 180 °C)	46,0	46,0	1,029
MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 160 °C)	46,0	46,0	1,027
MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 170 °C)	44,7	44,7	1,033
MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 180 °C)	42,0	42,0	1,040

Fuente: Propia

7.2 ENSAYO MARSHALL

7.2.1 Mezcla asfáltica de control

Realizadas las pruebas en el agregado y en el cemento asfáltico, se efectúa la dosificación del agregado pétreo y del cemento asfáltico con porcentajes de 4.5 a 6.0 %, con intervalos de 0,5%, para la fabricación de probetas cilíndricas de mezcla asfáltica de 102 mm (4") de diámetro y una altura nominal de 63.5 mm (2,5"), las cuales se compactan a 75 golpes por cara, tal y como lo establece el procedimiento de diseño de mezcla Marshall para la mezcla de referencia MDC-19 (Véase Tabla 20).

Tabla 20. Granulometría Marshall MDC-19.

MDC - 19						
TAMIZ (PULG)	% PASA	% RETENIDO	54 g de CA	60 g de CA	66 g de CA	72 g de CA
3/4"	100	0	0	0	0	0
1/2"	87,5	12,5	143,3	142,5	141,8	141
3/8"	79	8,5	97,4	96,9	96,4	95,9
Nº4	57	22	252,1	250,8	249,5	248,2
Nº10	37	20	229,2	228	226,8	225,6
Nº40	19,5	17,5	200,6	199,5	198,5	197,4
Nº80	12,5	7	80,2	79,8	79,4	79
Nº200	6	6,5	74,5	74,1	73,7	73,3
FONDO	0	6	68,8	68,4	68	67,7
		100	1146	1140	1134	1128

Fuente: Propia

En la determinación de las temperaturas de mezcla y compactación se tuvo en cuenta los siguientes criterios: La temperatura a la cual se debe calentar el cemento asfáltico para las mezclas, corresponde a la requerida para generar una viscosidad de 170 ± 20 centiestokes (1 centiestoke = $1 \text{ mm}^2/\text{S}$), y la temperatura a la cual deberá calentarse el cemento asfáltico para que alcance una viscosidad de 280 ± 30 centiestokes, la cual será empleada como la temperatura de compactación. En la Tabla 21 se presentan las especificaciones generales para la fabricación de probetas MDC - 19 del proyecto.

Tabla 21. Especificaciones para la fabricación de probetas MDC -19

Especificaciones para la fabricación MDC -19	
Temperatura de mezclado	150 °C
Temperatura de compactación	145 °C
Peso específico del agregado fino (gr)	2,634
Peso específico del agregado grueso (gr)	2,648
Peso específico del asfalto (gr)	1,012
Peso específico de los agregados para el diseño	2,572

Fuente: Propia

Fabricadas las probetas, se pesan en seco, en agua y superficialmente secas para determinar las propiedades volumétricas de cada uno de los porcentajes de asfalto, para el cual se obtuvo la densidad Bulk, el porcentaje de vacíos de aire (Va), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenados con asfalto (VFA). Los resultados se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Resumen ensayo Marshall composición volumétrica mezcla de control

CA [%]	Densidad Bulk [g/cm³]	Vacíos con aire – Va (%)	Vacíos en agregados minerales – VMA (%)	Vacíos llenos de asfalto – VFA (%)
4,5	2.302	4.29	14.53	70.47
5,0	2.301	3.66	15.02	75.67
5,5	2.300	2.97	15.48	80.80
6,0	2.313	1.77	15.48	88.61

Fuente: Propia

Posteriormente, las probetas fueron sometidas a curado en baño de agua a 60 °C, para luego ser cargadas en dirección perpendicular a su eje cilíndrico empleando la prensa Marshall bajo condiciones normalizadas, determinándose su estabilidad y su deformación (flujo). (Véase de la Tabla 23 a la Tabla 26). El resumen de los resultados para cada porcentaje de asfalto se presenta en la Tabla 27.

Tabla 23. Diseño de mezcla Marshall CA 60-70 (4.5%)

CA 60-70 (4.5%)				
Estabilidad [kN]	Estabilidad corregida [kN]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kN/mm]
12,98	12,5	165,0	4,191	3,0
13,16	12,6	170,0	4,318	2,9
13,30	12,7	170,0	4,318	2,9
13,15	12,6	168,3	4,28	2,9

Fuente: Propia

Tabla 24. Diseño de mezcla Marshall CA 60-70 (5.0%)

CA 60-70 (5.0%)				
Estabilidad [kN]	Estabilidad corregida [kN]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kN/mm]
14,81	14,56	150,0	3,810	3,8
14,62	14,62	155,0	3,937	3,7
14,34	14,27	145,0	3,683	3,9
14,59	14,48	150,0	3,81	3,8

Fuente: Propia

Tabla 25. Diseño de mezcla Marshall CA 60-70 (5.5%)

CA 60-70 (5.5%)				
Estabilidad [kN]	Estabilidad corregida [kN]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kN/mm]
14,55	14,6	165,0	4,191	3,5
14,82	14,7	170,0	4,318	3,4
14,40	14,4	165,0	4,191	3,4
14,6	14,6	166,7	4,23	3,5

Fuente: Propia

Tabla 26. Diseño de mezcla Marshall CA 60-70 (6.0%)

CA 60-70 (6.0%)				
Estabilidad [kN]	Estabilidad corregida [kN]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [kN/mm]
12,21	12,3	170,0	4,318	2,9
12,66	12,8	175,0	4,445	2,9
12,51	12,5	170,0	4,318	2,9
12,21	12,3	170,0	4,318	2,9

Fuente: Propia

Tabla 27. Resumen ensayo Marshall mezcla de control

CA [%]	Estabilidad [kN]	Flujo [mm]	E/F [kN/mm]
4,5	12.58	4.28	2.94
5,0	14.48	3.81	3.80
5,5	14.60	4.23	3.45
6,0	12.57	4.36	2.88

Fuente: Propia

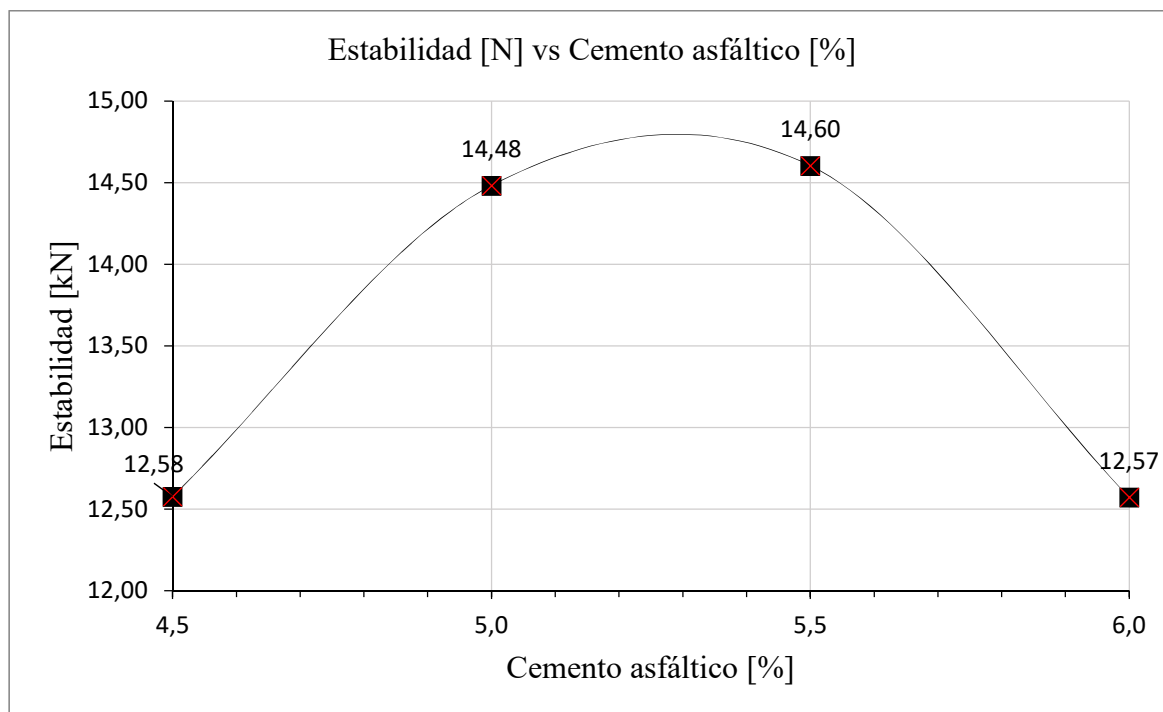
Un porcentaje óptimo de asfalto de 5.0% fue establecido de acuerdo con el análisis desarrollado en las Tabla 27, y las gráficas que estos valores representan (Véase Figura 8 a la Figura 13). Asimismo, este contenido de asfalto se escogió, teniendo en cuentas los criterios de diseño exigidos en el Artículo 450-13 del INVÍAS (2013) para el diseño de mezclas MDC-19 (Véase Tabla 28).

Tabla 28. Criterios exigidos en el Artículo 450-13 INVÍAS para el diseño de mezclas MDC-19.

CARACTERÍSTICA	TRÁNSITO	RESULTADOS	CONDICIÓN
	NT2		
Estabilidad mínima (N)	7500	14482	Cumple
Flujo (mm)	2,0 a 4,0	3.81	Cumple
Relación Estabilidad/Flujo (kN/mm)	3,0 a 5,0	3.80	Cumple
Vacios con aire (Va), % Rodadura	3,0 a 5,0	3.66	Cumple
Vacios en los agregados minerales (VAM), % mínimo T. Máx. 19 mm	15	15.02	Cumple
Vacios llenos de asfalto (VFA), %	65 a 78	75.67	Cumple

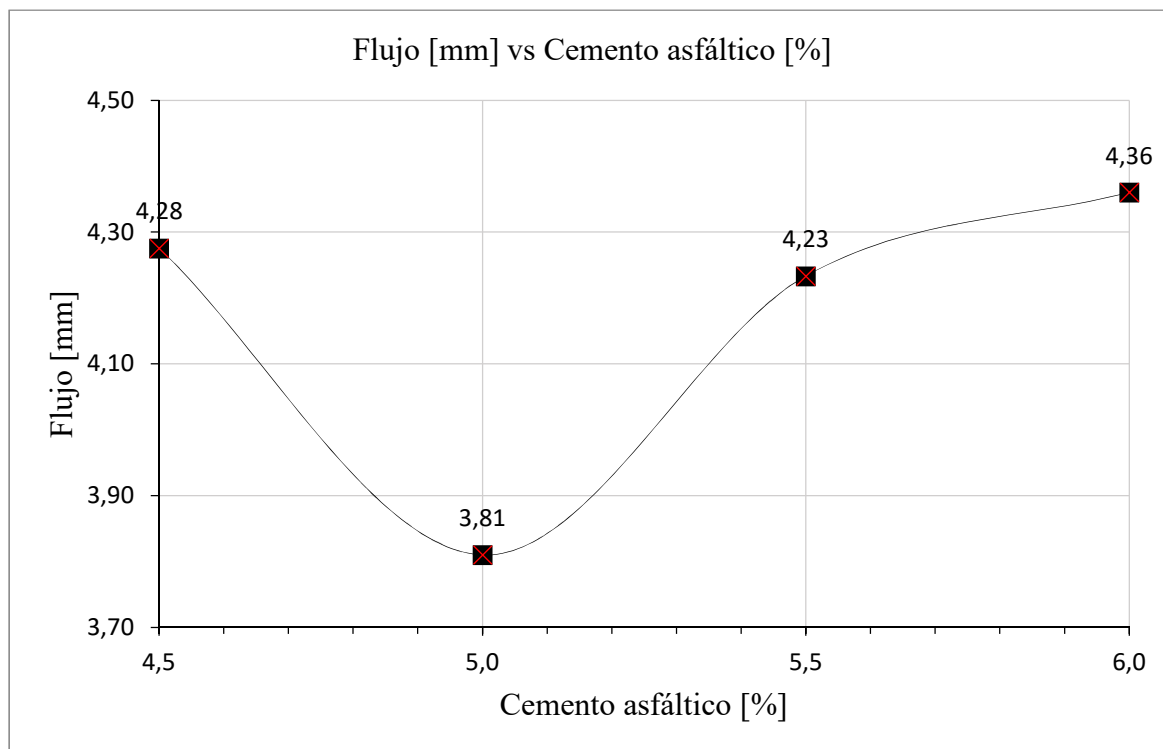
Fuente: Propia

Figura 8. Estabilidad [N] vs Cemento asfáltico de control [%]



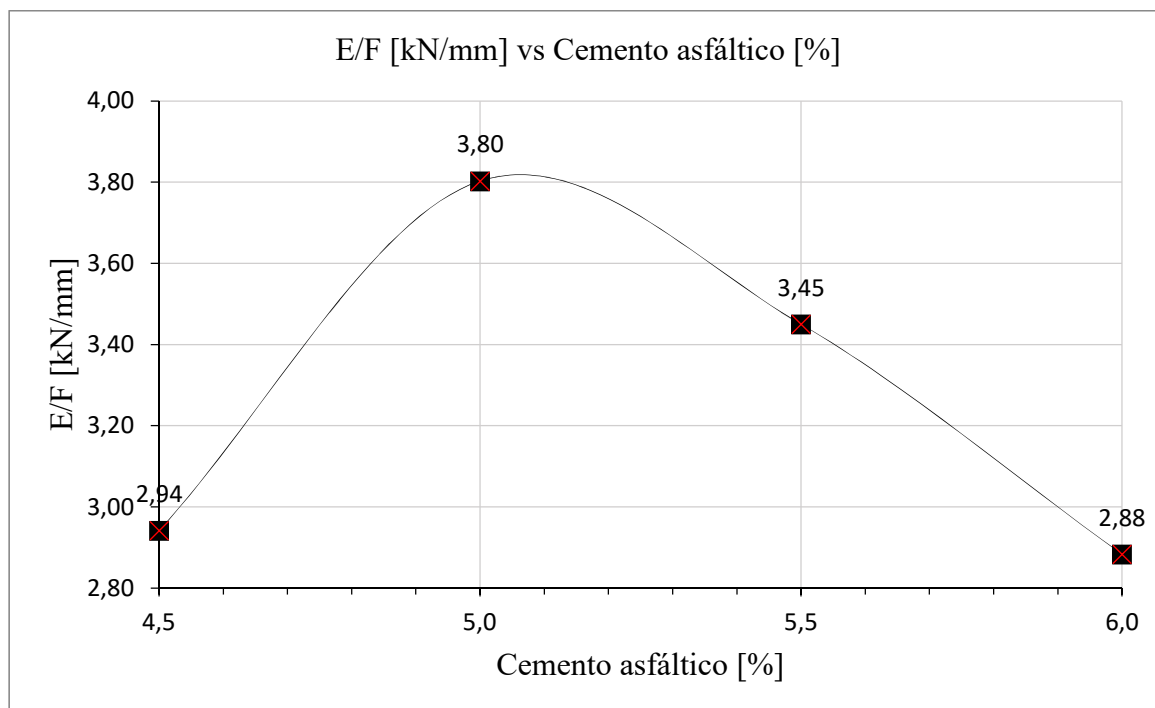
Fuente: Propia

Figura 9. Flujo [mm] vs Cemento Asfáltico de control [%]



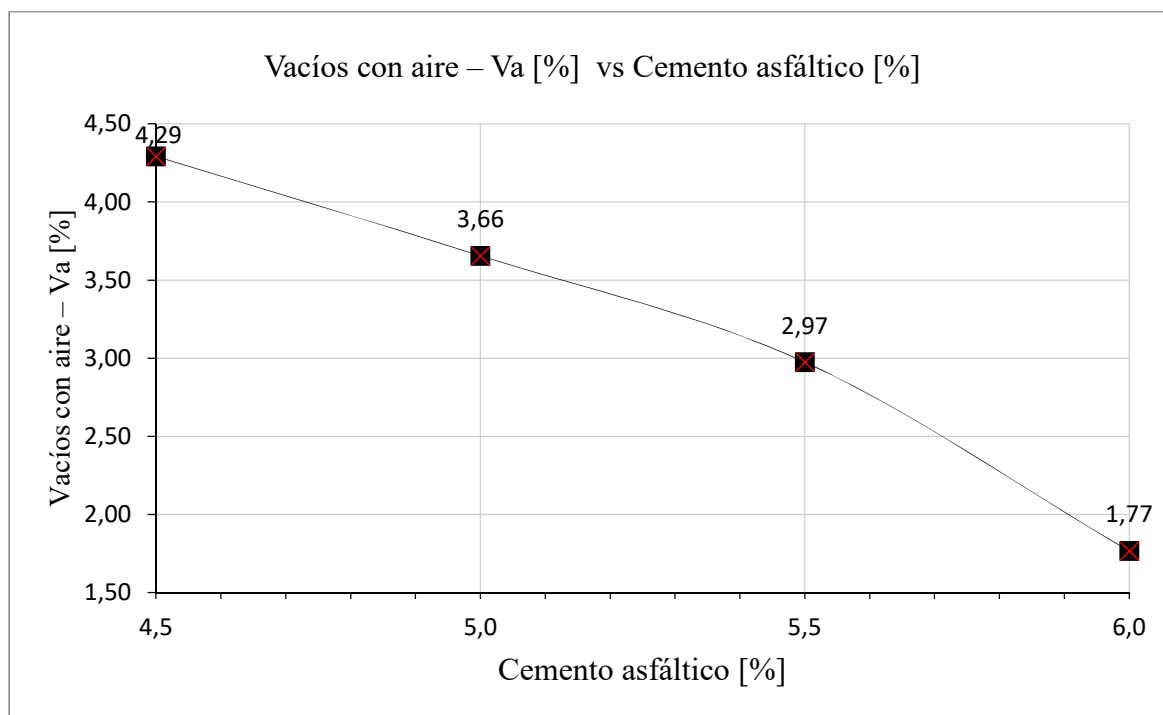
Fuente: Propia

Figura 10. E/F [kN/mm] vs Cemento asfáltico de control [%]



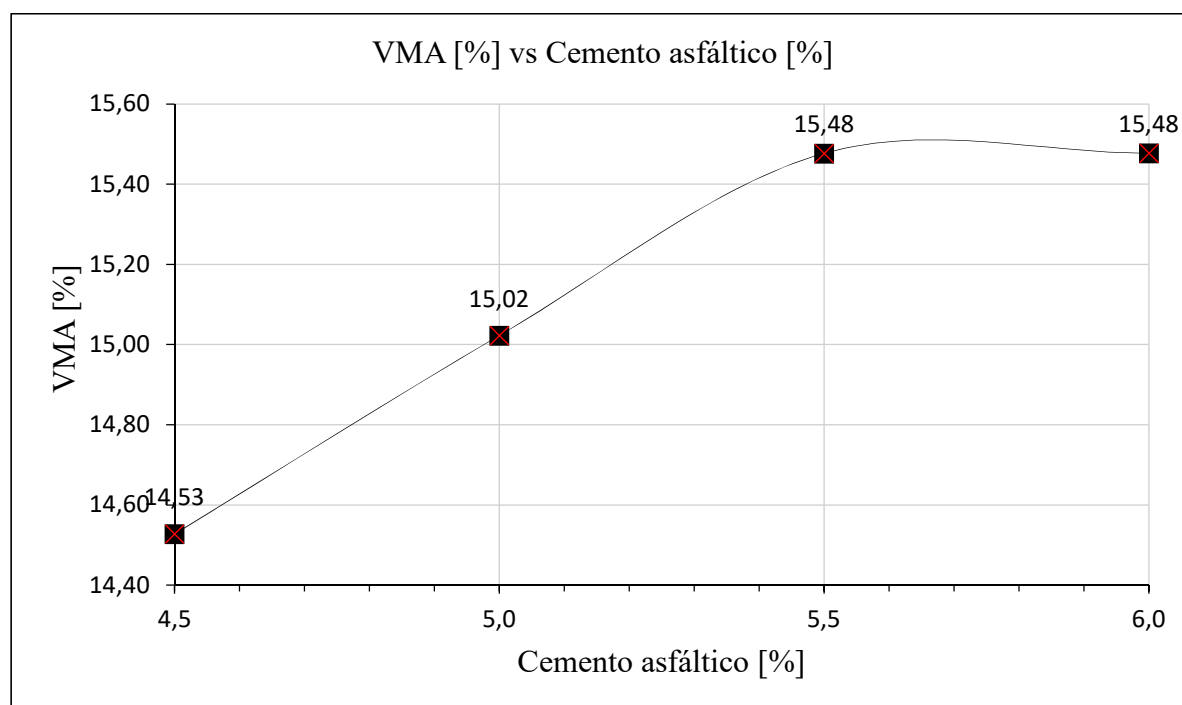
Fuente: Propia

Figura 11. Vacíos con aire – Va [%] vs Cemento asfáltico de control [%]



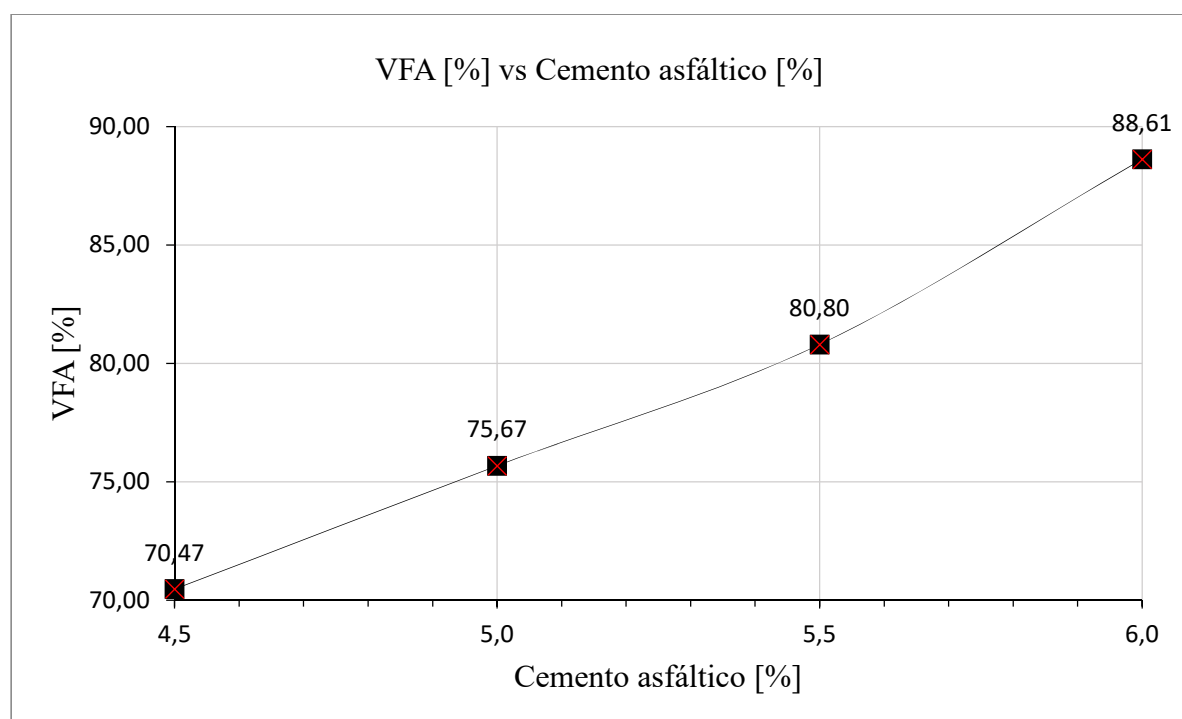
Fuente: Propia

Figura 12. Vacíos en agregados minerales – VMA [%] vs Cemento asfáltico de control [%]



Fuente: Propia

Figura 13. Vacíos llenos de asfalto – VFA [%] vs Cemento asfáltico de control [%]



Fuente: Propia

7.2.2 Mezcla asfáltica con asfaltos sometidos a tratamiento térmico

Con el contenido óptimo de asfalto 5.0%, se procede a realizar mezclas con cementos asfálticos expuesto a temperaturas y tiempo de mezclado establecidos, a los cuales se les calculó su composición volumétrica (Véase Tabla 29) y se determinó su estabilidad y su deformación (flujo) (Véase Tabla 30). Adicionalmente, se realiza mediante gráficos la comparación de los resultados obtenidos (Véase de la Figura 14 a la Figura 18).

Tabla 29. Resumen ensayo Marshall – Composición volumétrica mezcla tratadas térmicamente

Muestra	Características	Densidad Bulk [g/cm ³]	Vacíos con aire – Va (%)	VMA (%)	VFA (%)
1	MDC-19 Control	2,301	3,66	15,02	75,67
2	MDC-19 (40 Min – Temp 160 °C)	2,29	4,15	15,4	73,07
3	MDC-19 (40 Min – Temp 170 °C)	2,288	4,31	15,49	72,2
4	MDC-19 (40 Min – Temp 180 °C)	2,286	4,39	15,55	71,74
5	MDC-19 (60 Min – Temp 160 °C)	2,279	4,66	15,83	70,56
6	MDC-19 (60 Min – Temp 170 °C)	2,266	5,26	16,31	67,77
7	MDC-19 (60 Min – Temp 180 °C)	2,27	5,14	16,17	68,23
8	MDC-19 (90 Min – Temp 160 °C)	2,266	5,28	16,31	67,66
9	MDC-19 (90 Min – Temp 170 °C)	2,258	5,65	16,59	65,91
10	MDC-19 (90 Min – Temp 180 °C)	2,255	5,89	16,72	64,81

Fuente: Propia

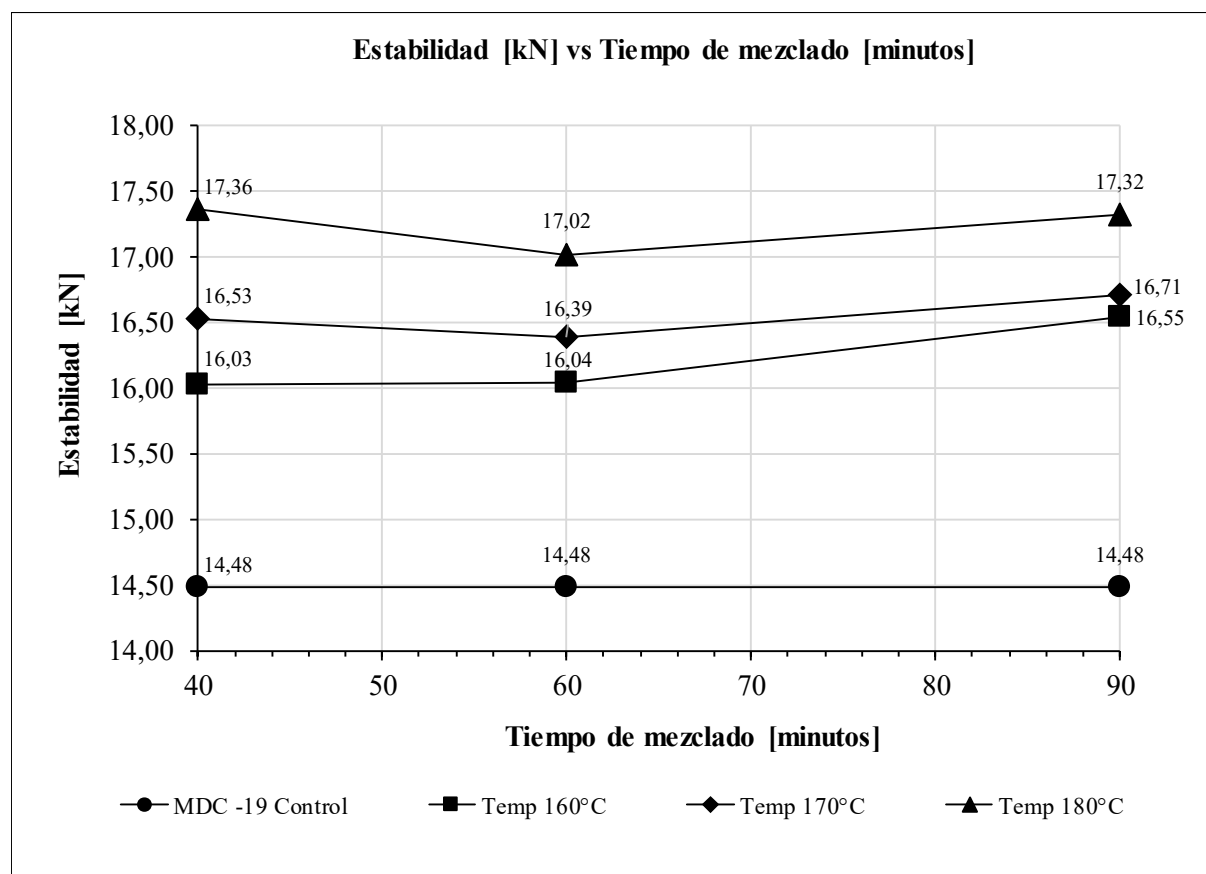
Tabla 30. Resumen ensayo Marshall MDC-19 – Carga monotónica

Muestra	Características	Estabilidad [kN]	Flujo [mm]	E/F [kN/mm]
1	MDC-19 Control	14,48	3,81	3,80
2	MDC-19 (40 Min – Temp 160 °C)	16,03	3,47	4,62
3	MDC-19 (40 Min – Temp 170 °C)	16,53	3,51	4,71
4	MDC-19 (40 Min – Temp 180 °C)	17,36	3,60	4,83
5	MDC-19 (60 Min – Temp 160 °C)	16,04	3,77	4,26
6	MDC-19 (60 Min – Temp 170 °C)	16,39	3,68	4,45
7	MDC-19 (60 Min – Temp 180 °C)	17,02	3,77	4,52
8	MDC-19 (90 Min – Temp 160 °C)	16,55	3,77	4,39
9	MDC-19 (90 Min – Temp 170 °C)	16,71	3,73	4,49
10	MDC-19 (90 Min – Temp 180 °C)	17,32	3,85	4,50

Fuente: Propia

De acuerdo con los datos obtenidos en la Figura 14, se puede apreciar que, al someter a temperaturas y tiempos de mezclado al cemento asfáltico, este proporciona en la mezcla densa un comportamiento mucho más rígido bajo cargas monotónicas comparadas con la mezcla de control. Era de esperarse dicho comportamiento, ya que, con los datos obtenidos del ensayo de penetración, punto de ablandamiento y gravedad específica sobre el cemento asfáltico, el someter el asfalto al tratamiento térmico, aumentó la rigidez del asfalto y esto generó el incremento en la resistencia bajo carga monotónica.

Figura 14. Estabilidad [kN] vs Tiempo de mezclado [minutos]

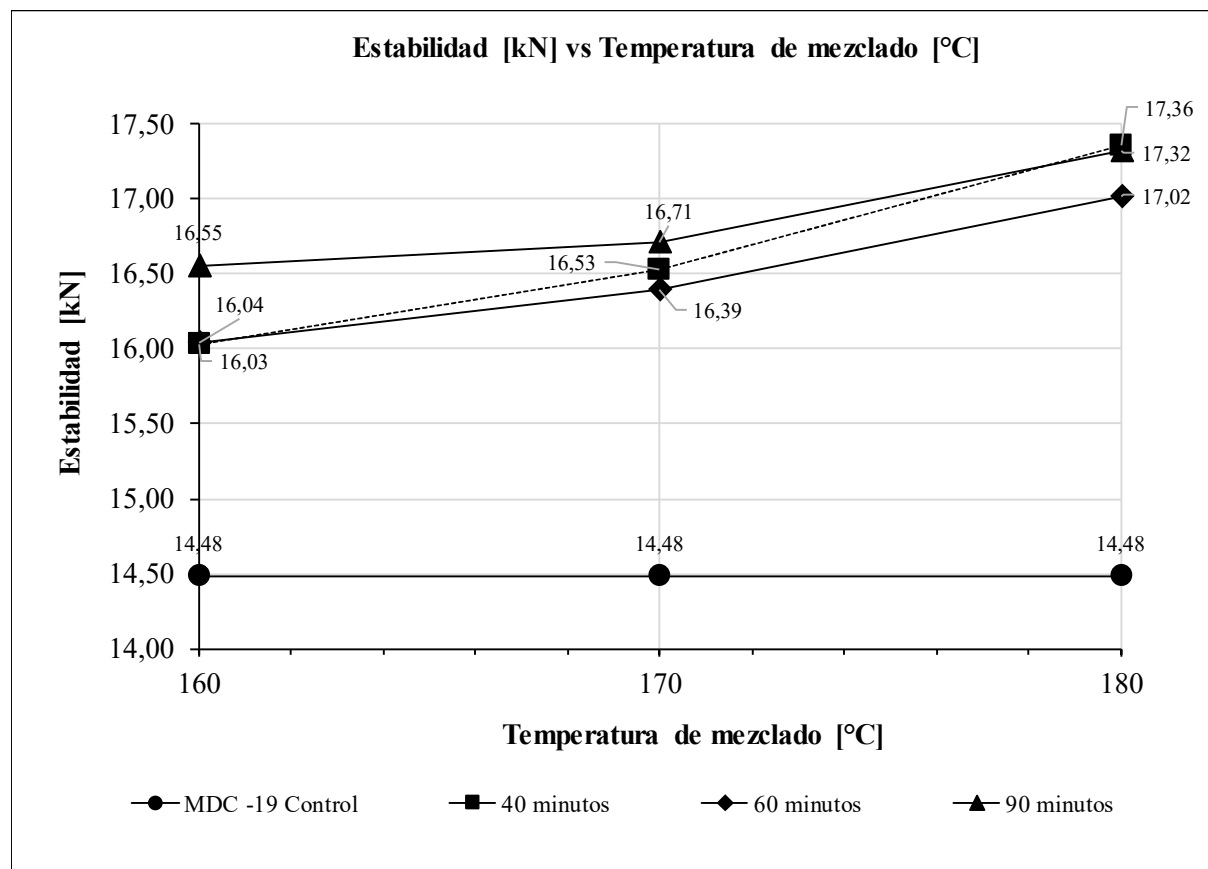


Fuente: propia

Así mismo, comparadas las mezclas sometidas al mismo tiempo de exposición al mezclado del asfalto, bajo condiciones de temperatura en aumento, se puede apreciar que, esta presenta una mayor estabilidad. Como se puede observar para tiempos de mezclado de 40 minutos a temperaturas de 160, 170 y 180 °C, aumenta la estabilidad promedio en 5.7% por cada 10° C de temperatura. Para tiempos de mezclado de 60 minutos a temperaturas de 160, 170 y 180 °C se

aprecia un aumento en la estabilidad promedio de 4.1% por cada 10° C de temperatura, y para tiempos de mezclado de 90 minutos a temperaturas de 160, 170 y 180 °C se aprecia un aumento en la estabilidad promedio de 2.8% por cada 10° C de temperatura.

Figura 15. Estabilidad [kN] vs Temperatura de mezclado [°C]

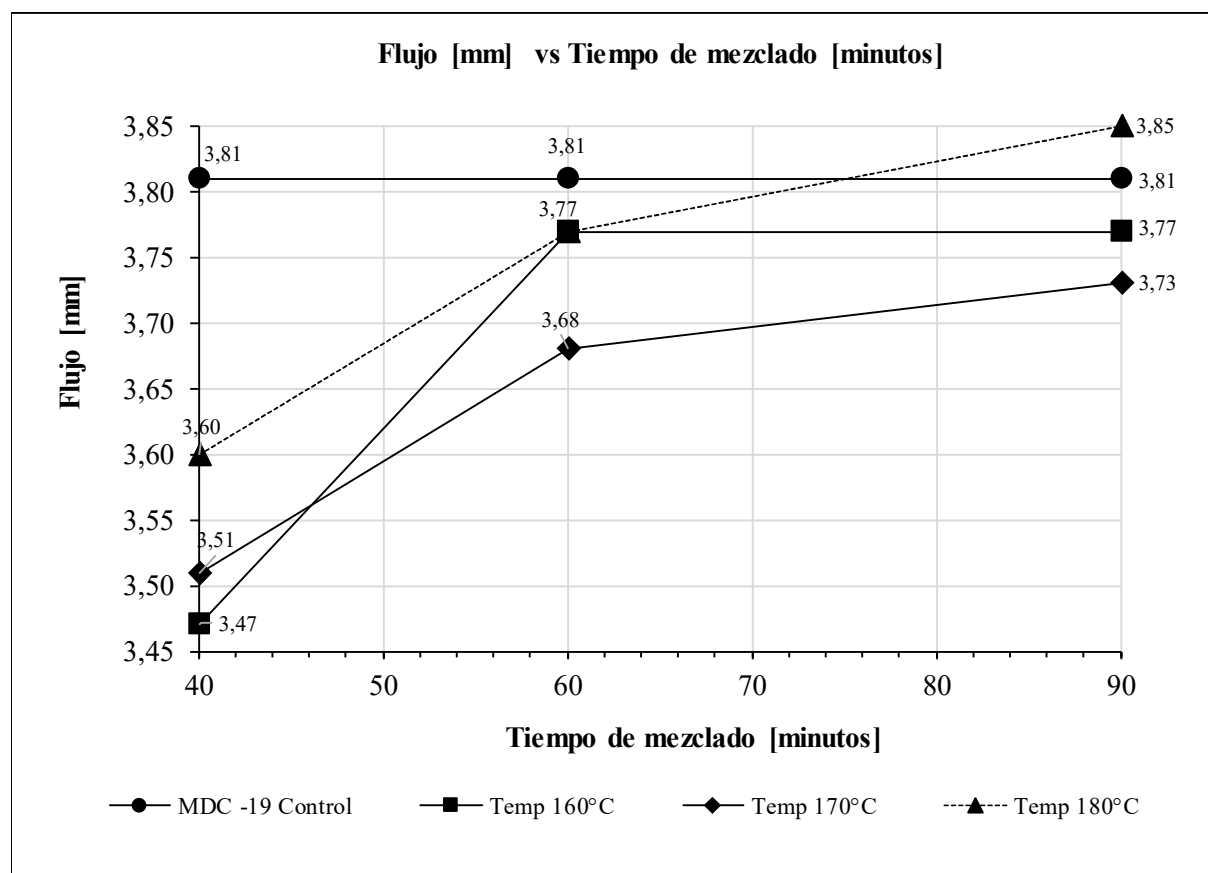


Fuente: propia

Por otra parte, comparadas las mezclas asfálticas sometidas a la misma temperatura de mezclado del asfalto, pero a los diferentes tiempos de exposición, se determinó que la mezcla a 160 °C bajo tiempos de mezclado de 40 minutos, 60 minutos y 90 minutos, experimenta un aumento en su estabilidad promedio de 1.6%, la mezcla a 170 °C bajo tiempos de mezclado de 40 minutos, 60 minutos y 90 minutos, experimenta un aumento en su estabilidad de 0.12% y la mezcla a 180 °C bajo tiempos de mezclado de 40 minutos, 60 minutos y 90 minutos, experimenta un disminución en su estabilidad de 1.0%. (Véase Figura 15). Adicionalmente, comparando la mezcla de control y la mezcla con mayor temperatura y tiempo de exposición al mezclado del asfalto (90 minutos – 180 °C) se presenta un aumento en la estabilidad de 19.6%.

Ahora bien, analizada la Figura 16 se aprecia que las mezclas fabricadas con asfaltos sometidos térmicamente tienden a presentar una deformación menor con respecto a la mezcla de control, lo cual se hace evidente, ya que las mezclas al rigidizarse el asfalto tienden a ser menos deformables bajo carga. No obstante, la mezcla que presenta menor deformación de forma ascendente, es la que fue tratada térmicamente a 40 minutos de mezclado a temperaturas de 160, 170 y 180 °C, con un promedio de deformación de 2.4% por cada 10 °C de temperatura. Comparada la mezcla de control con la mezcla de menor deformación (40 min – 160°C), se calcula una reducción de la deformación de un 8.9%. El aumento del flujo a medida que aumentó la temperatura de exposición del asfalto puede ser explicado con base en el incremento de vacíos con aire (Va) que experimentaron las mezclas que emplearon los asfaltos tratados térmicamente (Véase Figura 18).

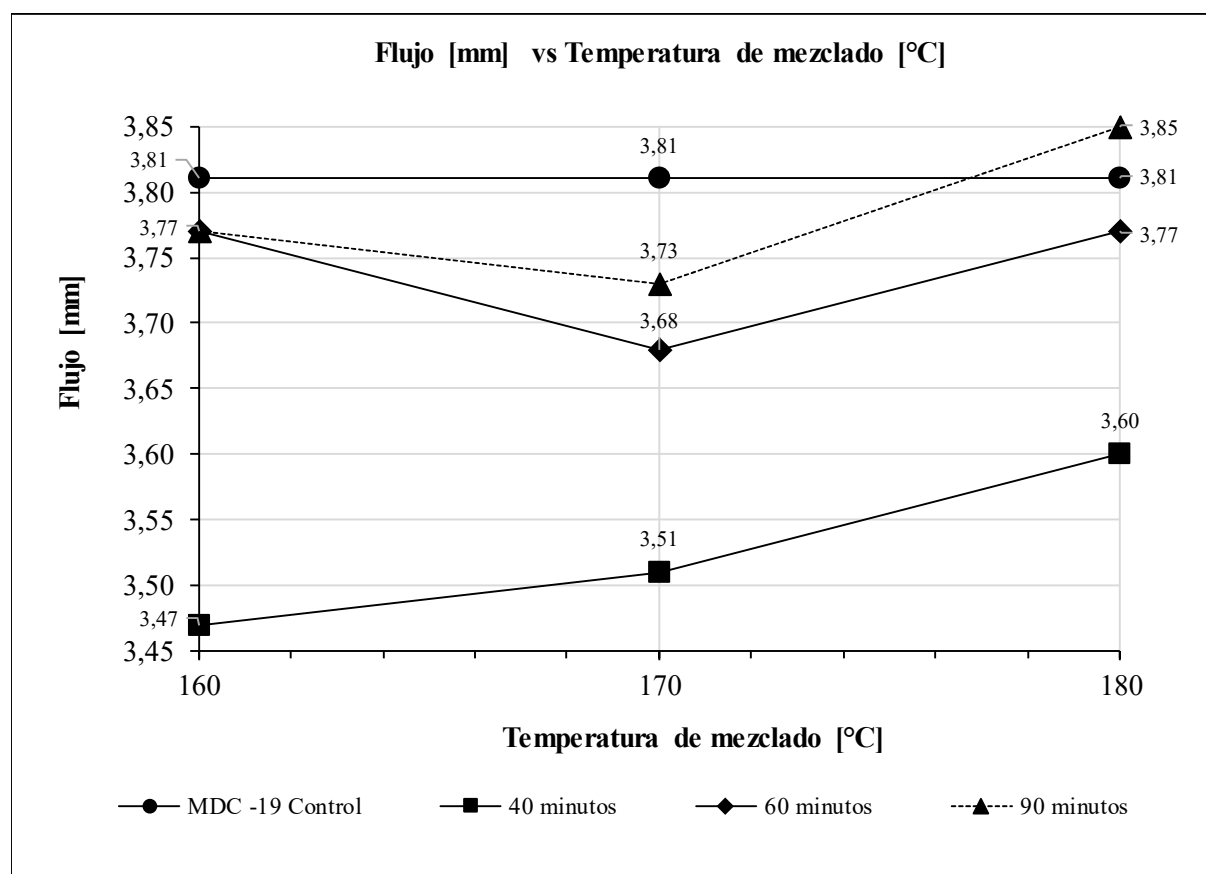
Figura 14. Flujo [mm] vs Tiempo de mezclado [minutos]



Fuente: propia

En la Figura 15 se observa un aumento en la relación Estabilidad/Flujo (E/F) en todas las mezclas fabricadas con cementos asfálticos sometidos a temperaturas y tiempos de mezclado con relación a la mezcla de control. Estos resultados son coherentes con los anteriormente descritos de E y F. Así mismo se puede establecer que la mezcla que presenta mayor relación E/F es la mezcla con una exposición a temperatura y tiempo de mezclado (180 °C – 40 minutos), la cual con relación a la mezcla de control presenta un aumento del 27.1%. Con base en los resultados obtenidos de E/F, la mezcla fabricada con cemento asfáltico sometida a 40 minutos de mezclado expuesta a temperaturas de 160, 170 y 180 °C, presenta un aumento en su relación E/F promedio de 3.2% por cada 10 °C de temperatura. Para la mezcla fabricada con cemento asfáltico sometida a 60 minutos de mezclado expuesta a temperaturas de 160, 170 y 180 °C, presenta un aumento en su relación E/F promedio de 5.2% por cada 10 °C de temperatura. Para la mezcla fabricada con cemento asfáltico sometida a 90 minutos de mezclado expuesta a temperaturas de 160, 170 y 180 °C, presenta un aumento en su relación E/F promedio de 2.3% por cada 10 °C de temperatura. Estos incrementos en relación E/F son debidos principalmente al fenómeno de rigidización que experimenta el CA 60-70 como producto del proceso de oxidación y envejecimiento al cual fue sometido cuando fue tratado térmicamente. Adicionalmente, es importante resaltar que, este aumento en la relación E/F se logra a pesar que las mezclas fabricadas con los asfaltos tratados térmicamente desarrollaron un mayor contenido de vacíos con aire (Véase Figura 16).

Figura 15. E/F [kN/mm] vs Temperatura de mezclado [°C]

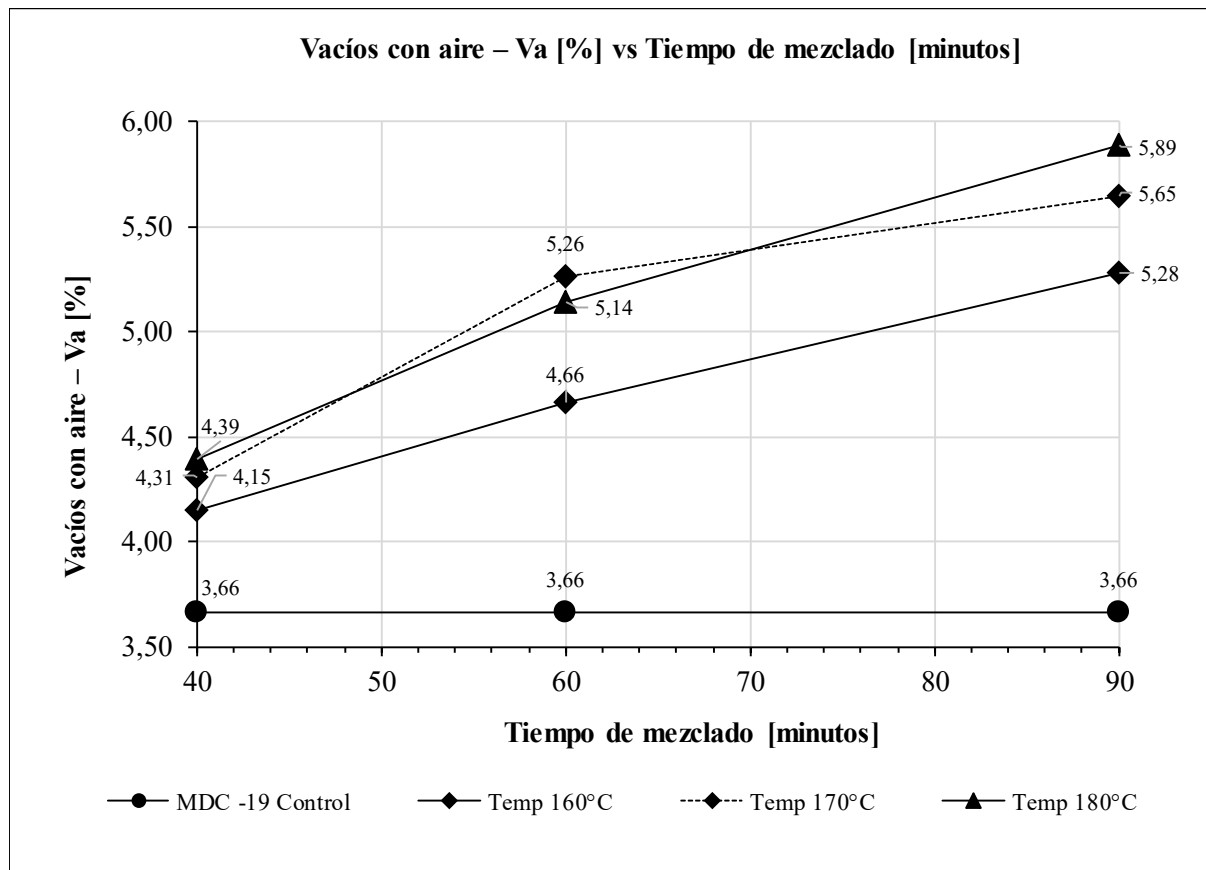


Fuente: propia

En la Figura 16 se presenta la evolución del contenido de vacíos de aire (V_a), expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla, el cual contempla el volumen de las bolsas pequeñas de aire que se encuentran en las partículas de agregado cubierto con asfalto. En ella se aprecia un aumento en la cantidad de vacíos en las mezclas fabricadas con asfaltos con mayor exposición a temperaturas y tiempos de mezclado comparadas con la mezcla de control. Así mismo, se puede establecer que la mezcla que presenta mayor cantidad de vacíos es la mezcla que empleó el asfalto con mayor exposición a temperatura y tiempo de mezclado (180 °C – 90 minutos), con un aumento del 60.9% respecto a la mezcla de control. Este aumento en la cantidad de vacíos es producto del aumento de la consistencia del cemento asfáltico sometido a tratamiento térmico, el cual presentó rigidización a mayor cantidad de tiempo y temperatura de exposición al calentamiento, de acuerdo con los resultados de los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y gravedad específica. Lo anterior generó un aumento de la viscosidad del CA 60-

70. Este aumento en la viscosidad dificultó los procesos de trabajabilidad (mezclado y compactación) de las mezclas, lo que generó el incremento de los vacíos con aire.

Figura 16. Vacíos con aire – Va [%] vs Tiempo de mezclado [minutos]

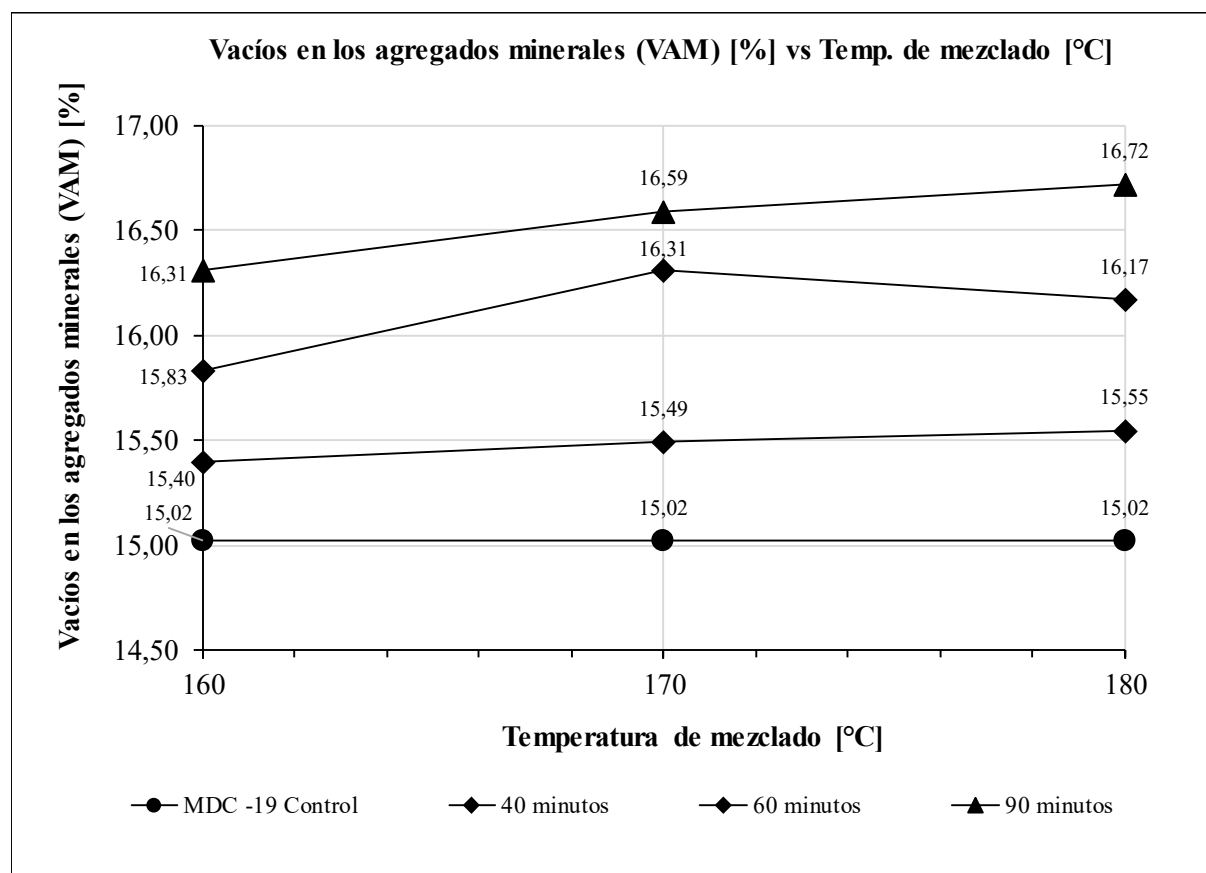


Fuente: propia

Con base en los resultados obtenidos de Va, la mezcla fabricada con cemento asfáltico sometida a 40 minutos de mezclado expuesta a temperaturas de 160, 170 y 180 °C, presenta un aumento en su volumen de vacíos promedio de 4.8% por cada 10 °C de temperatura. Para la mezcla fabricada con cemento asfáltico sometida a 60 minutos de mezclado expuesta a temperaturas de 160, 170 y 180 °C, presenta un aumento en su volumen de vacíos promedio de 11.5% por cada 10 °C de temperatura. Para la mezcla fabricada con cemento asfáltico sometida a 90 minutos de mezclado expuesta a temperaturas de 160, 170 y 180 °C, presenta un aumento en su volumen de vacíos promedio de 9.2% por cada 10 °C de temperatura.

En la Figura 17 se aprecia el volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA), el cual considera los espacios vacíos inter-granulares entre las partículas del agregado de la mezcla asfáltica compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado en un porcentaje total de la muestra. En esta se observa que, a mayor tiempo y temperatura de exposición del cemento asfáltico al tratamiento térmico, aumenta el porcentaje de vacíos en el agregado mineral. Así mismo, se aprecia que todas las mezclas tratadas térmicamente presentan una mayor cantidad de vacíos en el agregado mineral comparadas con la mezcla de control. Por otra parte, se puede establecer que la mezcla que presenta mayor cantidad de vacíos en el agregado mineral, es la fabricada con asfalto sometido a la mayor exposición a temperatura y tiempo de mezclado (180 °C – 90 minutos), con un aumento del 11.3% respecto a la mezcla de control.

Figura 17. Vacíos en los agregados minerales (VAM) [%] vs Temperatura de mezclado [°C]

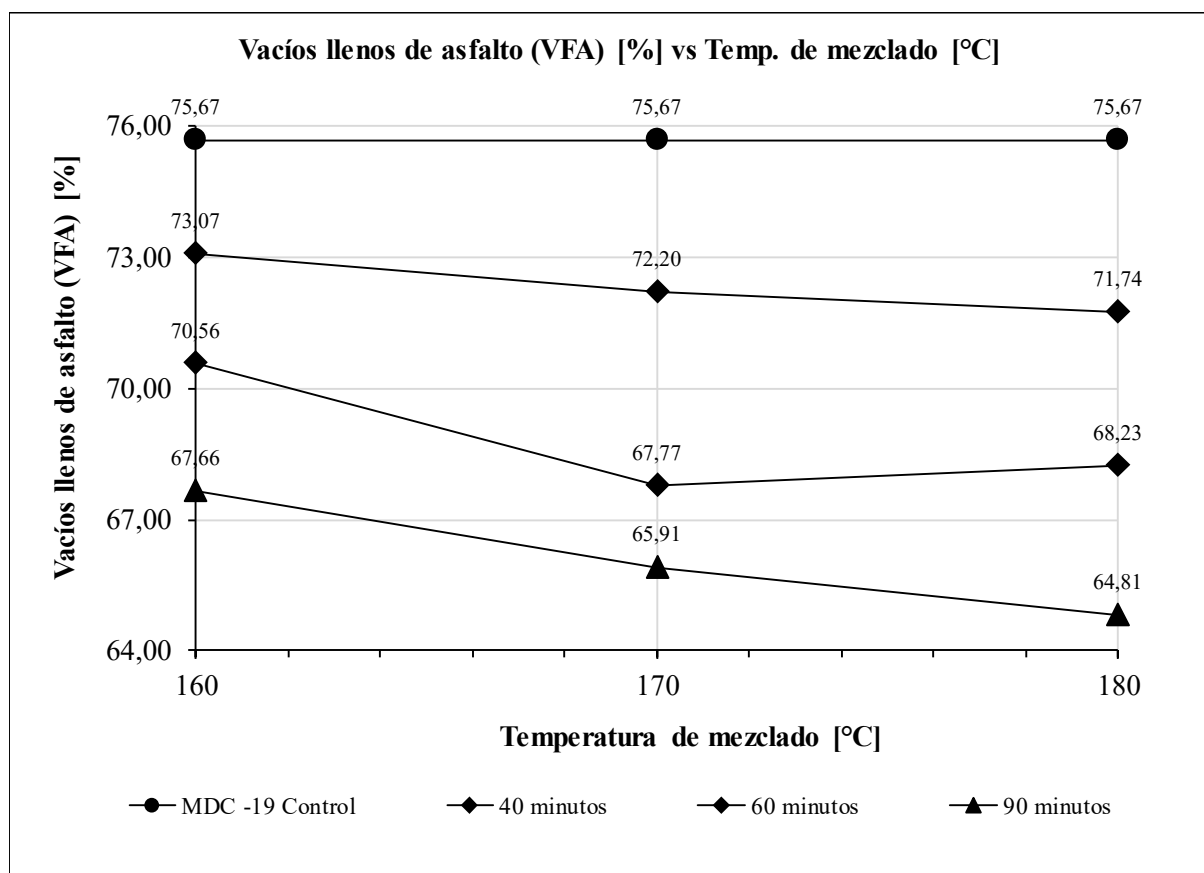


Fuente: propia

En la Figura 18 se aprecia la evolución de los vacíos llenos de asfalto (VFA), el cual es la fracción de los vacíos en el agregado mineral que contiene ligante asfáltico. Estos representan el

volumen de asfalto efectivo que llena la totalidad de los vacíos con aire presente en la mezcla. En esta figura se observa que, a mayor tiempo y temperatura de exposición del cemento asfáltico al tratamiento térmico, disminuye el porcentaje de VFA. Así mismo, se aprecia que todas las mezclas tratadas térmicamente presentan una menor cantidad de VFA comparadas con la mezcla de control. Lo anterior es debido al aumento en el contenido de Va reportado con anterioridad. Por otra parte, se puede establecer que la mezcla que presenta menor magnitud de VFA, es la fabricada con asfalto sometido a la mayor exposición a temperatura y tiempo de mezclado (180 °C – 90 minutos), con una disminución del 14.3% respecto a la mezcla de control. En este punto es importante resaltar, que una disminución del VFA puede generar en la mezcla problemas asociados al daño por humedad y pérdida de adherencia.

Figura 18. Vacíos llenos de asfalto (VFA) [%] vs Temperatura de mezclado [°C]



Fuente: propia

7.3 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA (INV. E-725-13)

El ensayo de tracción indirecta (INV. E-725) se destaca por ser un método simple y representativo, que permite obtener la carga máxima que soporta una mezcla antes de romper, cuando intenta simular el estado de tensiones en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción. Adicionalmente permite evaluar la susceptibilidad a la humedad en la mezcla.

En la Tabla 31 se presenta la composición volumétrica de las probetas fabricadas para determinar la resistencia máxima a tracción indirecta en esta seco (Véase Tabla 32). Así mismo se presentan gráficamente los resultados de dicho ensayo en la Figura 19 y la Figura 20.

Tabla 31. Ensayo tracción indirecta MDC-19 - Composición volumétrica probetas en seco

Muestra	Mezcla	SECO (RTS)			
		Densidad [g/cm ³]	Vacíos [%]	VMA [%]	VFA [%]
1	MDC-19 Control	2,315	3,06	14,50	79,02
2	MDC-19 (40 Min – Temp 160 °C)	2,301	3,71	15,01	75,29
3	MDC-19 (40 Min – Temp 170 °C)	2,296	3,96	15,18	73,94
4	MDC-19 (40 Min – Temp 180 °C)	2,297	3,96	15,17	73,88
5	MDC-19 (60 Min – Temp 160 °C)	2,275	4,80	15,96	69,92
6	MDC-19 (60 Min – Temp 170 °C)	2,274	4,93	16,02	69,24
7	MDC-19 (60 Min – Temp 180 °C)	2,280	4,72	15,80	70,11
8	MDC-19 (90 Min – Temp 160 °C)	2,265	5,31	16,34	67,49
9	MDC-19 (90 Min – Temp 170 °C)	2,267	5,28	16,25	67,52
10	MDC-19 (90 Min – Temp 180 °C)	2,263	5,52	16,40	66,38

Fuente: Propia

Tabla 32. Resumen Resistencia promedio a la Tensión – Probetas en Seco

Muestra	Características de la mezcla	RTS [kPa]
1	MDC-19 Control	938,02
2	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 160 °C)	976,08
3	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 170 °C)	959,99
4	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 180 °C)	919,07
5	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 160 °C)	929,85
6	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 170 °C)	926,28
7	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 180 °C)	897,48

Muestra	Características de la mezcla	RTS [kPa]
8	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 160 °C)	890,70
9	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 170 °C)	817,22
10	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 180 °C)	791,84

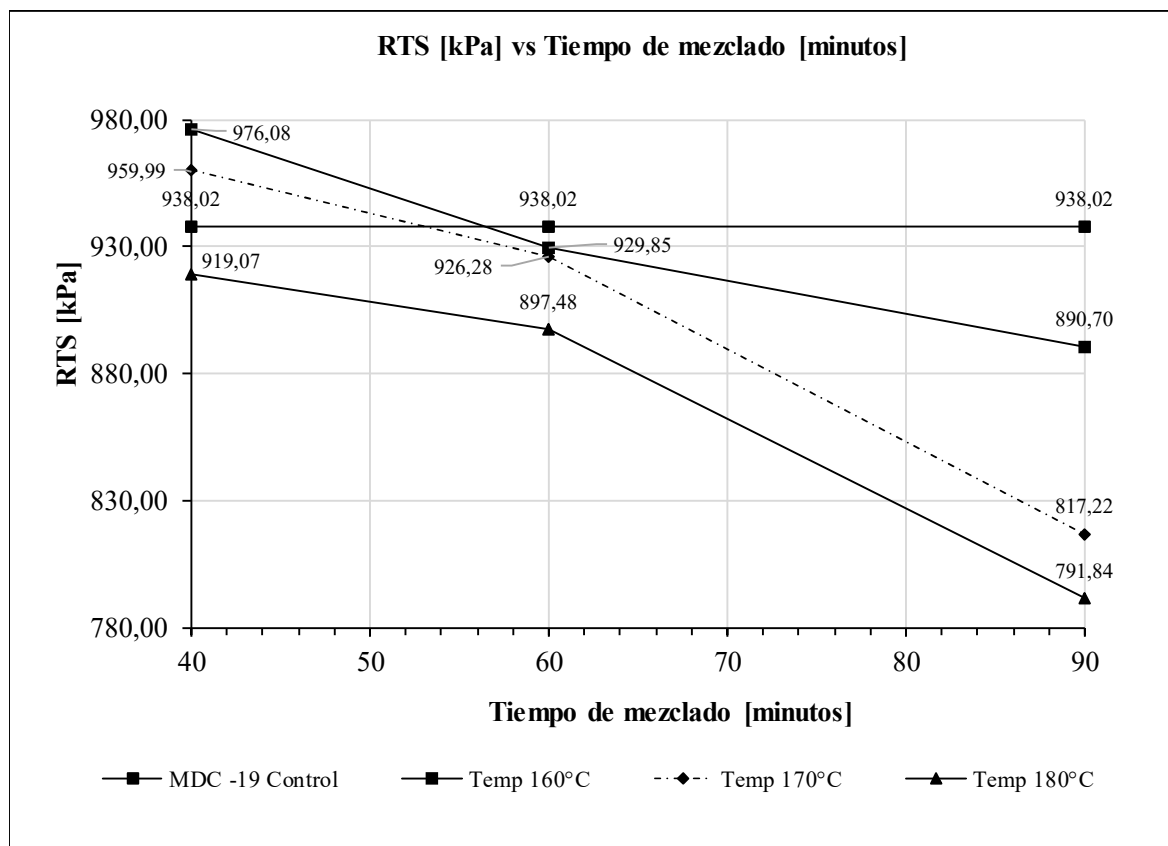
Fuente: Propia

En la Figura 19 se presentan los datos obtenidos del ensayo de resistencia a la tensión en seco, en la cual se evidencia que la mezcla con asfaltos sometidas a temperaturas y tiempos de mezclado de (40 Minutos – 160 °C) presento la mayor resistencia, obteniendo un aumento del 4.0% con relación a la mezcla de control. Así mismo, la mezcla con asfalto sometidas a temperaturas y tiempos de mezclado de (40 Minutos – 170 °C) presenta un aumento en la resistencia del 2.3% con relación a la mezcla de control.

Por otra parte, la resistencia más baja a tensión en seco la obtuvo la mezcla con mayor exposición al tiempo y a la temperatura de mezclado (90 minutos - 180°C), la cual comparada con la mezcla de control presenta una disminución del 15.58%.

El comportamiento general de las mezclas sometidas a temperaturas y tiempos de mezclado, fue la disminución de la resistencia a la tensión conforme más se expone el cemento asfáltico a tratamientos térmicos. Es así que, para la mezcla sometida a 40 minutos de mezclado a temperaturas de 160, 170 y 180° se produce una disminución promedio de 3.7% por cada 10 °C de temperatura. Para la mezcla sometida a 60 minutos de mezclado a temperaturas de 160, 170 y 180° se produce una disminución promedio de 1.9% por cada 10 °C de temperatura. Para la mezcla sometida a 90 minutos de mezclado a temperaturas de 160, 170 y 180° se produce una disminución promedio de 9.6% por cada 10 °C de temperatura.

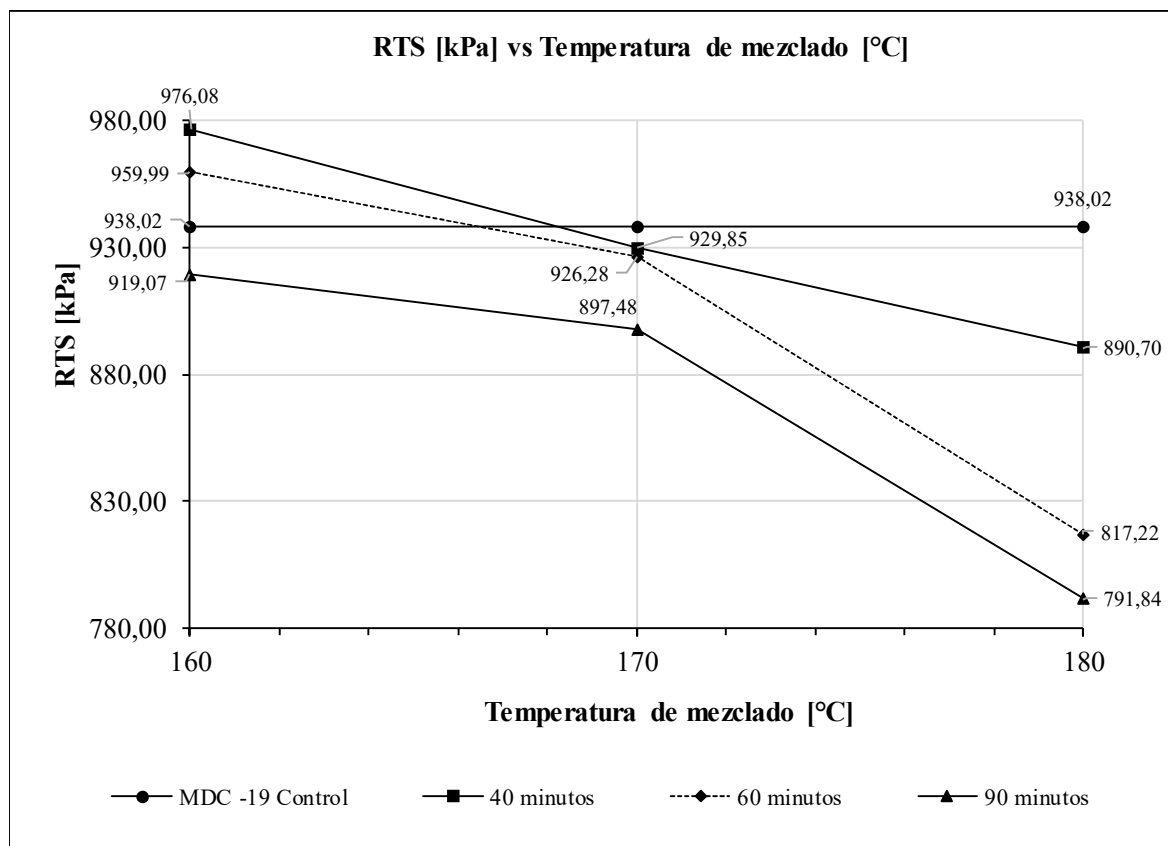
Figura 19. RTS [kPa] vs Tiempo de mezclado [minutos]



Fuente: Propia

Esta reducción en la resistencia a la tensión se puede entender mucho mejor, con los resultados obtenidos del ensayo de penetración y punto de ablandamiento realizados al cemento asfáltico, los cuales, a mayor exposición a temperaturas y tiempos de mezclado, el asfalto presentó una mayor rigidez. A esta mayor rigidez, producto del cambio físico del asfalto, se culpa de la reducción de la resistencia a la tensión, condición la cual, durante el mezclado de los agregados con el cemento asfáltico, se observa una condición más viscosa, lo cual generó un esfuerzo mayor para mezclar y compactar las mezclas asfálticas, aumentando los vacíos con aire. Cabe precisar que la temperatura de mezclado del agregado y el cemento asfáltico fue de 150 °C para todas las probetas. A esto se debe sumar, el envejecimiento producido por los tratamientos térmicos a los cuales está siendo sometido el cemento asfáltico, ya que, durante el proceso de calentamiento en laboratorio, es evidente la evaporación de componentes volátiles, los cuales hacen parte de la fracción liviana del asfalto, en especial los componentes aromáticos tiendan a decrecer, lo que podría generar pérdida de adherencia entre el asfalto y el agregado (Siddiqui & Ali, 1999).

Figura 20. RTS [kPa] vs Temperatura de mezclado [°C]



Fuente: Propia

Por otra parte, observada la Figura 20 se puede establecer que, el someter el cemento asfáltico a temperaturas mayores de 170 °C durante más de 40 minutos de mezclado, producirá una pérdida de resistencia a la tensión de la mezcla. Adicionalmente, se puede apreciar que, la mezcla fabricada con cemento asfáltico a temperatura de 160°C durante tiempos de exposición al mezclado de 40, 60 y 90 minutos, presenta una pérdida de resistencia a la tensión promedio de 6.7%. Para la mezcla fabricada con cemento asfáltico a temperatura de 170°C durante tiempos de exposición al mezclado de 40, 60 y 90 minutos, presenta una pérdida de resistencia a la tensión promedio de 9.1%. Para la mezcla fabricada con cemento asfáltico a temperatura de 180°C durante tiempos de exposición al mezclado de 40, 60 y 90 minutos, presenta una pérdida de resistencia a la tensión promedio de 8.0%.

En la Tabla 33 se presenta la composición volumétrica de las probetas fabricadas y acondicionadas en agua las cuales fueron sometidas a ensayo a tracción indirecta (Véase Tabla

34). Así mismo se presentan gráficamente los resultados de dicho ensayo en la Figura 21 y la Figura 22.

Tabla 33. Ensayo tracción indirecta MDC-19 - Composición volumétrica al agua

SATURADO (RTH)					
Muestra	Mezcla	Densidad [g/cm ³]	Vacíos [%]	VMA [%]	VFA [%]
1	MDC-19 Control	2,316	3,00	14,44	79,26
2	MDC-19 (40 Min – Temp 160 °C)	2,304	3,57	14,88	76,06
3	MDC-19 (40 Min – Temp 170 °C)	2,294	4,07	15,28	73,39
4	MDC-19 (40 Min – Temp 180 °C)	2,294	4,09	15,28	73,26
5	MDC-19 (60 Min – Temp 160 °C)	2,274	4,87	16,01	69,62
6	MDC-19 (60 Min – Temp 170 °C)	2,272	5,02	16,10	68,86
7	MDC-19 (60 Min – Temp 180 °C)	2,265	5,35	16,35	67,30
8	MDC-19 (90 Min – Temp 160 °C)	2,273	5,00	16,06	68,91
9	MDC-19 (90 Min – Temp 170 °C)	2,275	4,95	15,96	69,00
10	MDC-19 (90 Min – Temp 180 °C)	2,262	5,57	16,44	66,15

Fuente: Propia

Tabla 34. Resumen Resistencia promedio a la Tensión – Probetas acondicionadas al agua

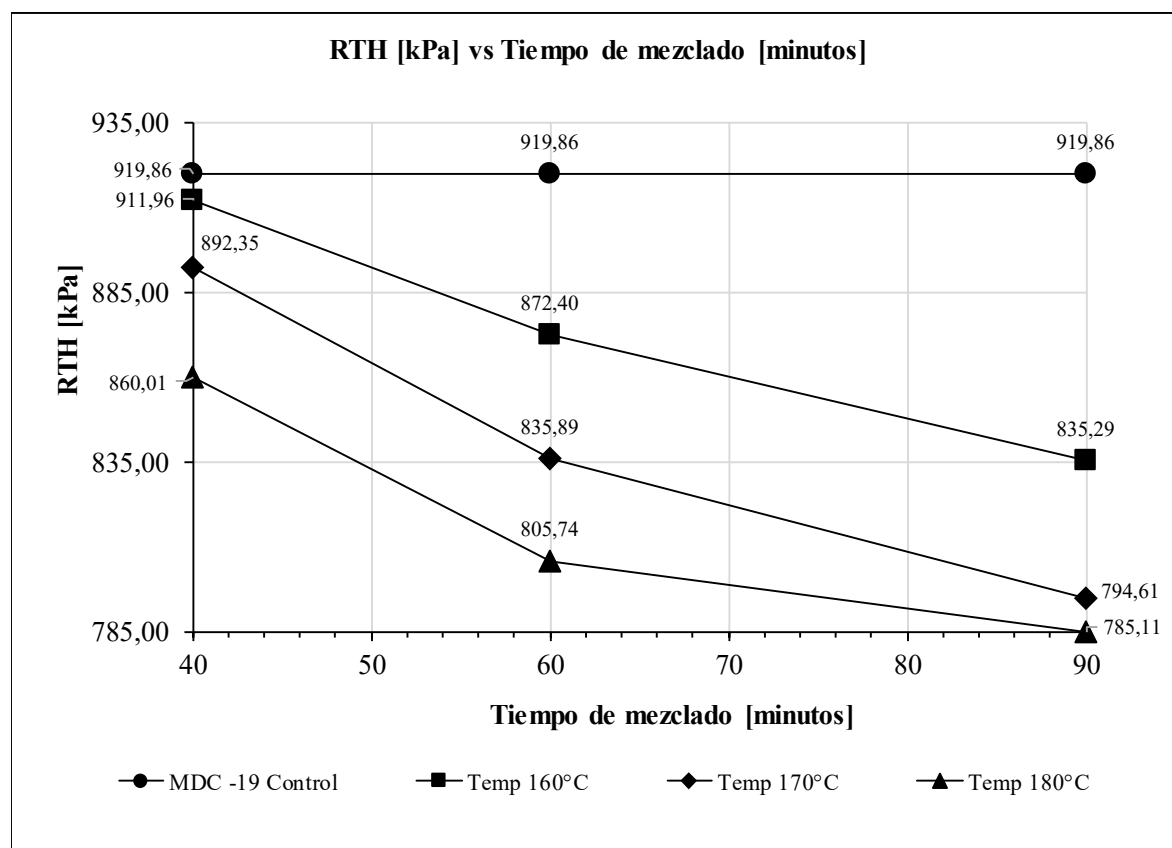
Muestra	Características de la mezcla	RTH [kPa]
1	MDC-19 Control	919,86
2	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 160 °C)	911,96
3	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 170 °C)	892,35
4	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 180 °C)	860,01
5	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 160 °C)	872,40
6	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 170 °C)	835,89
7	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 180 °C)	805,74
8	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 160 °C)	835,29
9	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 170 °C)	794,61
10	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 180 °C)	785,11

Fuente: Propia

Realizado el ensayo a tensión indirecta con las probetas acondicionadas en agua, se estableció según la Figura 21 que, la mezcla de control tuvo la mejor resistencia a la tensión saturada parcialmente con agua. La mezcla con menor resistencia a la tensión fue la fabricada con el cemento asfáltico con mayor exposición a la temperatura y al tiempo de mezclado (180°C – 90

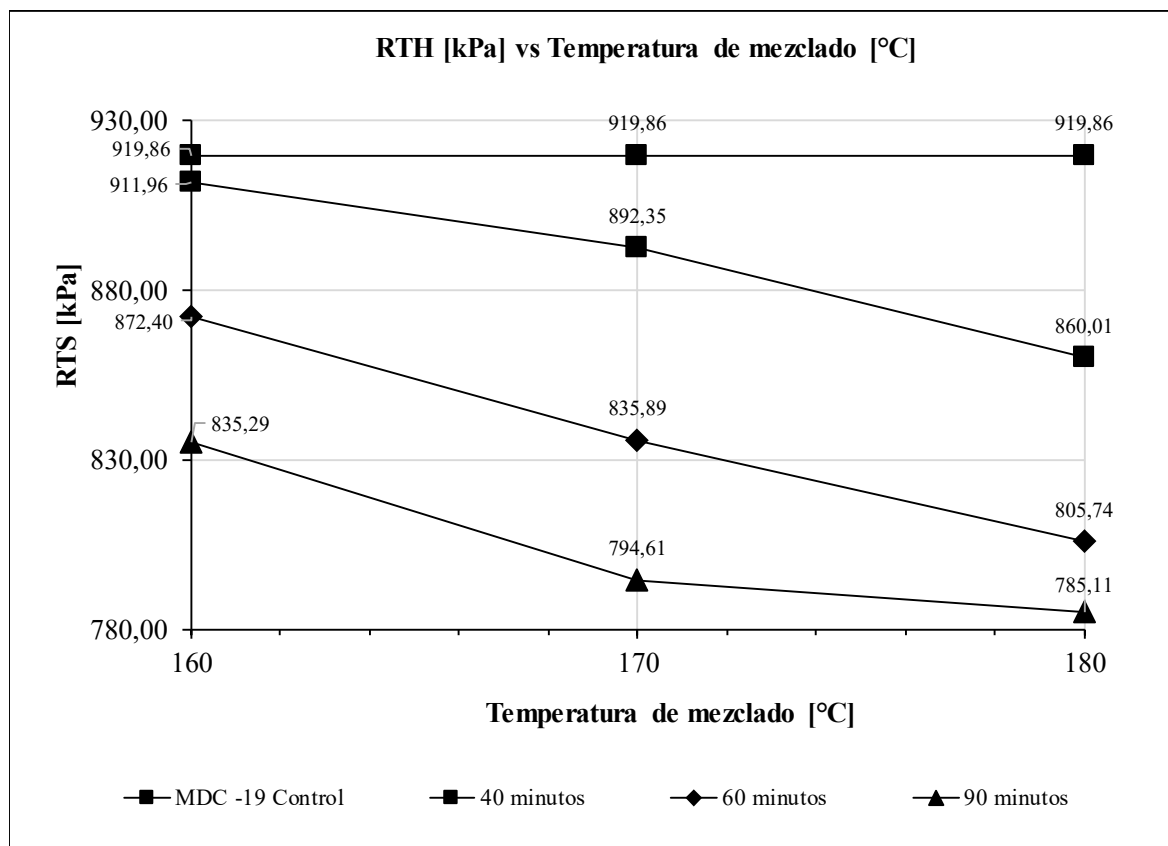
minutos) la cual disminuye un 14.6% su resistencia respecto a la mezcla de control. Tal y como sucedió en las probetas falladas en seco, el comportamiento general de las mezclas fabricadas con cementos asfálticos sometidas a temperaturas y tiempos de mezclado, pero ahora saturadas, disminuye la resistencia a la tensión conforme más se exponga el cemento asfáltico a tratamientos térmicos. Es así que, para la mezcla sometida a 40 minutos de mezclado a temperaturas de 160, 170 y 180° se produce una disminución promedio de 3.9% por cada 10 °C de temperatura. Para la mezcla sometida a 60 minutos de mezclado a temperaturas de 160, 170 y 180° se produce una disminución promedio de 5.9% por cada 10 °C de temperatura. Para la mezcla sometida a 90 minutos de mezclado a temperaturas de 160, 170 y 180° se produce una disminución promedio de 5.4% por cada 10 °C de temperatura. Lo anterior es un indicador de disminución de resistencia al daño por humedad cuando las mezclas emplean como ligante el CA 60-70 sometido a tratamientos térmicos.

Figura 21. RTH [kPa] vs Tiempo de mezclado [minutos]



Fuente: Propia

Figura 22. RTH [kPa] vs Temperatura de mezclado [°C]



Fuente: Propia

Adicionalmente, se puede apreciar que, la mezcla fabricada con cemento asfáltico a temperatura de 160°C durante tiempos de exposición al mezclado de 40, 60 y 90 minutos, presenta una pérdida de resistencia a la tensión promedio de 6.3%. Para la mezcla fabricada con cemento asfáltico a temperatura de 170°C durante tiempos de exposición al mezclado de 40, 60 y 90 minutos, presenta una pérdida de resistencia a la tensión promedio de 8.6%. Para la mezcla fabricada con cemento asfáltico a temperatura de 180°C durante tiempos de exposición al mezclado de 40, 60 y 90 minutos, presenta una pérdida de resistencia a la tensión promedio de 7.5%.

Tabla 35. Resultados de la prueba de Tracción Indirecta

Muestra	Características de la mezcla	Condición	
		RTS (kPa)	RTH (kPa)
1	MDC-19 Control	938,02	919,86
2	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 160 °C)	976,08	911,96
3	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 170 °C)	959,99	892,35
4	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 180 °C)	919,07	860,01
5	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 160 °C)	929,85	872,40
6	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 170 °C)	926,28	835,89
7	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 180 °C)	897,48	805,74
8	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 160 °C)	890,70	835,29
9	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 170 °C)	817,22	794,61
10	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 180 °C)	791,84	785,11

Fuente: Propia

7.4 ENSAYO CANTABRO (INV. E-760-13)

Sobre las mezclas MDC-19 fabricadas con los 10 cementos asfálticos (control y 9 tratados térmicamente), se realizaron ensayos de pérdida por desgaste, bajo una temperatura de 25 °C, introduciendo las probetas en el tambor de la máquina de los ángeles a una revolución de 188 a 208 rad/min (30 a 33 rpm), durante 500 vueltas (Véase Tabla 36). Cada ensayo Cantabro fue realizado sobre tres mezclas por contenido de asfalto. En total fueron fabricadas y ensayadas 30 muestras (10 asfaltos cada uno con 3 muestras).

El resultado del ensayo de pérdida por desgaste para cada probeta ensayada, se realizó mediante la Ecuación 3, donde P es el valor de la pérdida por desgaste de la probeta en %, P1 es la masa inicial de la probeta en gramos y P2 es la masa final de la probeta en gramos. Se calculó el valor medio de pérdida por desgaste para cada contenido de cemento asfáltico de las probetas ensayadas. (Véase Tabla 37).

Ecuación 3. Desgaste Cantabro

$$P = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

Fuente: (INVÍAS, 2013)

Tabla 36. Resultados ensayo cántabro

Muestra	Características de la mezcla	Pérdida de masa (%)		
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
1	MDC-19 Control	10,13	9,81	10,12
2	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 160 °C)	8,86	9,50	9,02
3	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 170 °C)	9,69	9,54	9,92
4	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 180 °C)	10,11	10,15	9,70
5	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 160 °C)	9,17	9,20	9,98
6	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 170 °C)	9,56	9,40	9,58
7	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 180 °C)	9,54	9,68	9,74
8	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 160 °C)	8,96	8,03	9,02
9	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 170 °C)	8,82	8,77	8,93
10	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 180 °C)	9,53	9,43	9,12

Fuente: Propia

Tabla 37. Resultados promedio ensayo cántabro

Muestra	Características de la mezcla	Ensayo Cantabro Pérdida por desgaste promedio (%)
1	MDC-19 Control	10,02
2	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 160 °C)	9,13
3	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 170 °C)	9,72
4	MDC-19 (40 Min Mezclado – Temp 180 °C)	9,98
5	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 160 °C)	9,45
6	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 170 °C)	9,52
7	MDC-19 (60 Min Mezclado – Temp 180 °C)	9,65
8	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 160 °C)	8,67
9	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 170 °C)	8,84
10	MDC-19 (90 Min Mezclado – Temp 180 °C)	9,36

Fuente: Propia

En la Figura 23 se observa que, todas las mezclas fabricadas con cementos asfálticos sometidos a temperaturas y tiempos de mezclado, disminuyó la pérdida por desgaste comparadas con la mezcla de control. Así mismo, el comparar la mezcla de control con la mezcla que obtuvo la menor pérdida por desgaste (90 minutos – 160 °C), arrojó una disminución en el desgaste del 13.4%.

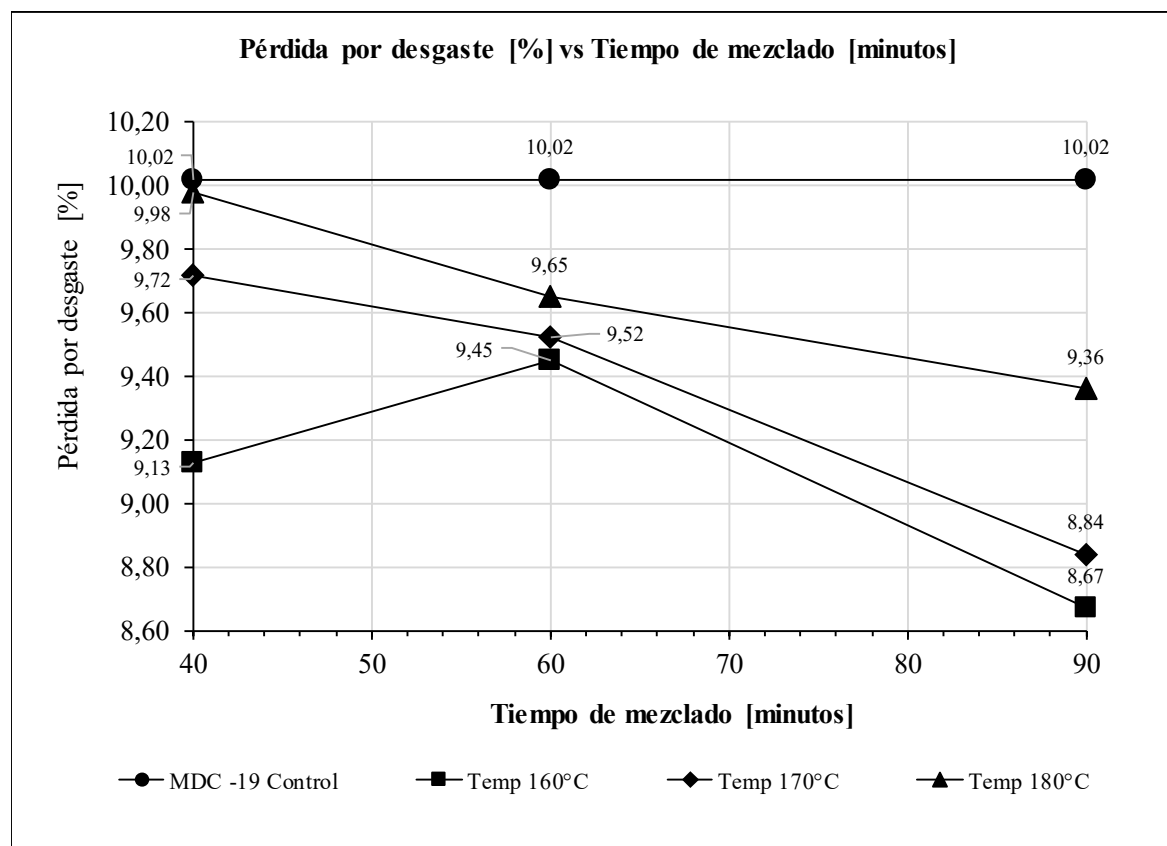
En la Figura 23 se presentan las pérdidas por desgaste obtenidas para cada uno de los cementos tratados térmicamente en función de la temperatura respectivamente. En ella se observa que, a mayor exposición del cemento asfáltico a la temperatura de mezclado, aumentó la pérdida por desgaste. Sin embargo, un aumento en los tiempos de mezclado, tiende a disminuir dicha pérdida en el ensayo Cantabro.

El comportamiento general de las mezclas sometidas a temperaturas y tiempos de mezclado, fue el aumento del porcentaje de desgaste conforme más se expone el cemento asfáltico a tratamientos térmicos. Es así que, para la mezcla sometida a 40 minutos de mezclado a temperaturas de 160, 170 y 180° se produce aumento promedio de 7.8% por cada 10 °C de temperatura. Para la mezcla sometida a 60 minutos de mezclado a temperaturas de 160, 170 y 180° se produce un aumento en el porcentaje de pérdidas promedio de 1.4% por cada 10 °C de

temperatura. Para la mezcla sometida a 90 minutos de mezclado a temperaturas de 160, 170 y 180° se produce un aumento promedio de 4.9% por cada 10 °C de temperatura.

Por otra parte, comparadas las mezclas asfálticas sometidas a la misma temperatura de mezclado del asfalto, pero a los diferentes tiempos de exposición, se determinó que la mezcla a 160 °C bajo tiempos de mezclado de 40 minutos, 60 minutos y 90 minutos, experimenta una disminución al desgaste promedio de 0.7%, la mezcla a 170 °C bajo tiempos de mezclado de 40 minutos, 60 minutos y 90 minutos, experimenta un disminución en su desgaste promedio de 5.5% y la mezcla a 180 °C bajo tiempos de mezclado de 40 minutos, 60 minutos y 90 minutos, experimenta un disminución en su perdida por desgaste de 4.7%. Adicionalmente, comparando la mezcla de control y la mezcla con mayor temperatura y tiempo de exposición al mezclado del asfalto (90 minutos – 180 °C) se presenta una disminución en el porcentaje de desgaste de 6.5%.

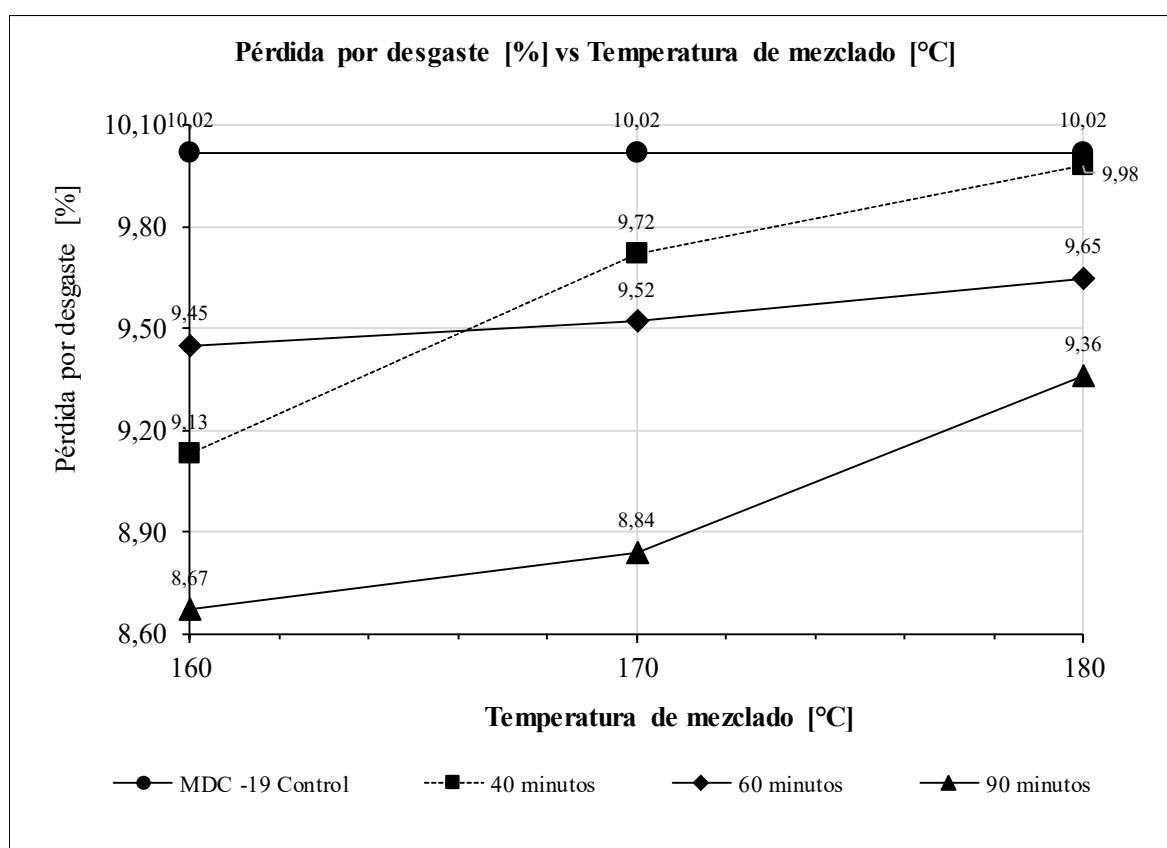
Figura 23. Pérdida por desgaste [%] vs Tiempo de mezclado [Minutos]



Fuente: Propia

El ensayo cantabro de pérdida por desgaste fue desarrollado, como un procedimiento para valorar en laboratorio la cohesión de las mezclas asfálticas. Esta cohesión es proporcionada a la mezcla fundamentalmente por la capa continua de asfalto que envuelve todas y cada una de las partículas. Después de realizado el ensayo Cantabro, y comparado con los resultados reportados del ensayo de resistencia Marshall (E, F y E/F), se evidencia la correlación existente entre ambos ensayos, ya que un incremento en la relación E/F es visto como un indicador de aumento de la cohesión de la mezcla.

Figura 24. Pérdida por desgaste [%] vs Temperatura de mezclado [°C]



Fuente: Propia

8. CONCLUSIONES

En este estudio se analizó el efecto de la temperatura y el tiempo de mezclado que se utiliza frecuentemente en la manipulación de asfaltos modificados por vía húmeda, para lo cual se intentó reproducir las condiciones de exposición del asfalto durante la modificación a tres temperaturas y tres tiempos de mezclado diferentes, con el fin de evaluar el desempeño de mezclas a cargas monotónicas mediante el ensayo Marshall, máxima carga a tensión mediante el ensayo a tracción indirecta y pérdida por desgaste mediante el ensayo a cantabro, para lograr establecer el aporte que pudiese llegar a brindar el cemento asfáltico por efecto del tratamiento térmico durante la modificación por vía húmeda en la mezcla asfáltica.

Adicionalmente, se realizó una evaluación de las características físicas (penetración, punto de ablandamiento y gravedad específica) del cemento asfáltico tratado bajo la exposición de dichas temperaturas y tiempos de mezclado, esto con el fin de ser comparada con la consistencia inicial del asfalto base.

De acuerdo a lo anterior, las conclusiones más relevantes son:

- La exposición del cemento asfáltico a altas temperaturas favorece la pérdida de volátiles, lo cual provoca en la mezcla rigidización. Se debe contemplar el endurecimiento del asfalto causado por el tratamiento térmico en la tecnología de asfaltos modificados por vía húmeda, ya que este mejorara mecánicamente el comportamiento de la mezcla asfáltica y se puede llegar a pensar que es el aditivo utilizado, el que aporta todos los beneficios cuantitativos.
- Altas temperaturas utilizadas para mezclar el asfalto, genera un incremento notable en la consistencia del asfalto, expresado a través de la disminución de la penetración y el incremento en el punto de ablandamiento y la gravedad específica, no obstante, el manipular este material en la mezcla con los agregados se hace complejo, toda vez a que el material pierde condiciones de aglutinante y su cohesión con los agregados disminuye.

- Los resultados de los laboratorios realizados en el presente estudio permiten concluir que, existe una influencia directa del asfalto sobre las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas como lo son cargas monotónicas y las pérdidas por desgaste, los cuales mejoraron sus condiciones con tan solo someter el asfalto a temperaturas y tiempos normalmente utilizadas para mezclar los aditivos en un asfalto modificado. Bajo estos parámetros se debe buscar cual es el aporte real de dichos productos al combinarse con los asfaltos y cuál es el aporte por tratamiento térmico del asfalto.
- El fenómeno de envejecimiento sobre el cemento asfáltico producto del tratamiento térmico generó un cambio en su composición y su comportamiento reológico. Este como se pudo apreciar se caracteriza por un endurecimiento del asfalto y tuvo dos efectos en la mezcla: primera, incrementar la capacidad de soporte de cargas generadas, y segundo, aumentar la resistencia a la deformación de la mezcla, producto de un aumento en la rigidez. No obstante, esta manipulación del cemento asfáltico reduce la flexibilidad de la mezcla por pérdida de ductilidad, conllevando a que la mezcla sea propensa a daños por fatiga y pérdida de potencial de recuperación.
- Aunque la deformación del material sometido a temperaturas y tiempos de mezclado es más pequeña con respecto a la mezcla de control, los concretos asfálticos envejecidos generalmente fallan más rápido como resultado de la fisuración por fatiga.
- Conocer el efecto de la temperatura y el tiempo de mezclado en un cemento asfáltico, nos brinda un conocimiento muy importante de como este influye en el comportamiento de los concretos asfálticos, toda vez a que la mezcla no es solo diseñada y construida para soportar cargas producto del tránsito, si no que esta debe resistir los efectos de la acción del envejecimiento durante su periodo de diseño, por consiguiente, si esta presenta un grado de envejecimiento prematuro, el material es frágil y presenta mayor probabilidad a fisurarse.
- La resistencia al envejecimiento del cemento asfáltico, es una propiedad de los ligantes relacionado directamente con su durabilidad. Cuanto más rápido sea su envejecimiento,

mayor será la rapidez con la que el ligante se volverá frágil, disminuyendo su resistencia a la acción abrasiva del tránsito.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuras investigaciones, cuantificar la composición química de los cementos asfálticos sometidos a temperaturas y tiempos de mezclado, mediante la determinación de las fracciones SARA, esto con el fin de establecer los compuestos que se pierden durante el calentamiento al cual están sometidos los asfaltos modificados por vía húmeda.

Adicionalmente, es importante determinar el efecto de la exposición del cemento asfáltico a la temperatura y al tiempo de mezclado en los procesos de oxidación, por lo que se recomienda realizar ensayos más avanzados como el FTIR (Análisis Infrarrojo con Transformada de Fourier) para medir y cuantificar grupos funcionales que denoten oxidación asfáltica.

Las fases futuras del presente proyecto deben medir propiedades físicas y reológicas, así como el envejecimiento a corto y largo plazo de los asfaltos, esto con el fin de entender lo que ocurre en las propiedades mecánicas de las mezclas modificadas, evaluando los cambios que experimentan las propiedades químicas de las mismas.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Abdulruhman Saleh, H., & Musbah Al Allam, A. (2019). Evaluation of the Mechanical Properties of Asphalt Mixture Modified with RPET. *Universal Journal of Engineering Science*, Vol. 7(2). Pag: 27-31.
- Abu Al-Rub, R., Darabi, M., Kim, S., Little, D., & Glover, C. (2013). Mechanistic-based constitutive modeling of oxidative aging in aging susceptible materials and its effect on the damage potential of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 41, 439-454.
- Abubeker, W. A., Safwat, F. S., Xiaohu, L., & Håkan, C. (2018). Pavement performance follow-up and evaluation of polymer-modified test sections. *International Journal of Pavement Engineering*.
- Aguiar-Moya, J. P.-D.-S.-V. (2015). Effect of aging on adhesion properties of asphalt mixtures using bitumen bond strength and surface energy measurement tests. *TRB*.
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M., & Ahmadinia, E. (2012). Performance evaluation of utilization of waste polyethylene terephthalate (PET) in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, Vol. 36, 984–989.
- Al-Hadidy, A. (2018). Engineering behavior of aged polypropylene-modified asphalt pavements. *Construction and Building Materials*. Vol. 191, 187-192.
- Al-Jaberi, Y., Sultan, A. W., & Ateeq, A. A. (2013). The Effects of Classifying CRM Sources on the Asphalt Cement Modification for Paving Roads. *Journal of Environment and Ecology*. Vol. 4, , 27.
- Ameri, M., & Nasr, D. (2016). Performance properties of devulcanized waste PET modified asphalt mixtures. *Petroleum Science and Technology*. Vol 35 (1) , 99-104.
- Amin, I., El-Badawy, S. M., Breakah, T., H.Z., & Ibrahim, M. (2016). Laboratory evaluation of asphalt binder modified with carbon nanotubes for Egyptian climate. *Construction and Building Materials*, Vol. 121. Pag: 361-372.
- Arabani, M., & Faramarzi, M. (2015). Characterization of CNTs-modified HMA's mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 83, 207-2015.

- Arabani, M., & Shabani, A. (2019). Evaluation of the ceramic fiber modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*. Vol 205, 377-386.
- Araújo, M., Lins, V., & Pasa, V. (2011). Effect of Ageing on Porosity of Hot Mix Asphalt. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, 5(1), 11-18.
- Arenas, H. (2006). *Tecnología del cemento asfáltico*. Quinta edición. Popayán. Colombia.
- Arenas, H. L. (2000). Tecnología del cemento asfáltico. *Fundación para Actividades de Investigación y Desarrollo*.
- ASOPAC. (2004). *Cartilla del Pavimento Asfáltico*. Bogotá D.C.
- Asphalt Institute. (1983). Principles of Construction of Hot Mix Asphalt Pavements. *Manual Series N° 22*.
- Bansal, S., Kumar Misra, A., & Bajpai, P. (2017). Evaluation of modified bituminous concrete mix developed using rubber and plastic waste materials. *International Journal of Sustainable Built Environment*, Vol. 6, Issue 2, Pages 442-448.
- Bell, C. (1989). SHRP-A/IR-89-004: Summary report on ageing of asphalt-aggregate systems. *Strategic Highway Research Program (National Research Council, Washington, D.C.)*.
- Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., & Little, D. (2008). Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 9, 81-98.
- Castro, W. A., Rondón, H. A., & Barrero, J. C. (2016). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *Revista Ingeniería Vol. 21 N° 1*.
- Chávez Valencia, L., & Hernández Barriga, C. (2009). Estado del arte y perspectivas del envejecimiento de los pavimentos. *Acta Universitaria*, 19 (1).
- Christensen, D., & Anderson, D. (1992). Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cements. *Proc. Assn. Asphalt Paving Technol*, 61, 67-116.
- Corbett, L. (1970). Relationship between composition and physical properties of asphalt. *Proc. Assn. Asphalt Paving Technol*. Vol 39, 481.
- Cortes, C., Perez, A., Feroso, J., Costa, A., Guisado, F., Esquena, J., & Potti, J. (2010). Envejecimiento Foto-Oxidativo De Betunes Asfálticos. *Presented at the ASEFMA*, 12.
- D.Casey, C., & McNally, A. (2008). Gibneya and M. Gilchrist, "Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt". *Journal of Resources, Conservation and Recycling*, Volume 52, Number 10, 1167-1174.

- Diab, A., Enieb, M. E., & Singh, D. (2019). Influence of aging on properties of polymer-modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 54-65.
- Farcas, F. (1996). Etude d'une Méthode de Simulation du Vieillissement sur Route des Bitumes. *Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI*.
- Fernández, W. D., Rondón, H. A., & Reyes, F. (2011). Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas: estado del conocimiento.
- Fernández, W. D., Rondón, H., & Reyes, F. (2013). A review of asphalt and asphalt mixture aging. *Ingeniería e Investigación*, Vol. 1, No. 33, pp.5-12.
- Figuroa Infante, A. S., Reyes Lozano, F. A., Hernández Barrera, D., Jiménez, C., & Bohórquez, N. (2007). Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. *Ingeniería e Investigación*, 27.
- García, M., Partal, P., Navarro, F. J., R., M. M., & Gallegos, C. (2004). The rheology of recycled EVA/LDPE modified bitumen. *Rheologica Acta*. 43, 482-490.
- Gibreil, H. A., & Feng, C. P. (2017). Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, Vol 142. Pag: 101-108.
- Glotova, N., Gorshkov, V., Kats, B., Shapiro, T., & Yureva, G. (1980). Changes in rheological properties and chemical-composition of asphalts upon aging. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 16 (3-4), 47-49.
- Hainin, M. R., J., R. P., Awang, H., Khairil Azman, M., Intan Suhana, M. R., Nordiana, M., . . . Che Ros, I. (2019). Marshall stability properties of asphaltic concrete with kaolin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 220.
- Hasaninia, M., & Haddadi, F. (2017). The characteristics of hot mixed asphalt modified by nanosilica. *Petroleum Science and Technology*, Vol. 35 (4). Pag: 351-359.
- Hofko, B., Cannone Falchetto, A., Grenfell, J., Huber, L., Lu, X., Porot, L., . . . You, Z. (2017). Effect of short-term ageing temperature on bitumen properties. *Road Materials and Pavement Design*, 18, 108-117. Obtenido de 10.1080 / 14680629.2017.1304268
- Huang, S.-C., & Grimes, W. (2010). Influence of Aging Temperature on Rheological and Chemical Properties of Asphalt Binders. *Transportation Research Record*.
- INVÍAS. (2013). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras*.
- INVÍAS. (2013). *Norma de ensayo de materiales para carreteras*.

- INVÍAS. (2013). Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cantabro de pérdida por desgaste. *Normas de ensayo de materiales para carreteras*, INV E - 760 - 13.
- INVÍAS. (2013). Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall. *Norma de ensayo de materiales para carreteras*, I.N.V. E - 748.
- INVÍAS. (2013). Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta. *Norma de ensayo de materiales para carretera*, I.N.V. E - 725.
- INVÍAS. (2013). Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Concreto asfáltico). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras*, Artículo 450-13.
- INVÍAS. (2013). Suministro de cemento asfáltico. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras*, Artículo 410-13.
- Jahanian, H. R., Shafabakhsh, G., & Divandari, H. (2017). Performance evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite. *Construction and Building Materials*, Vol. 131. Pag: 156-164.
- Kanabar, A. (2010). Physical and chemical aging behavior of asphalt cements from two Northern Ontario pavement trials. *Thesis submitted to degree of Master of Science, Queen's University*.
- Kandhal, P. S. (1992). Moisture susceptibility of HMA mixes: identification of problem and recommended solutions. *National Asphalt Pavement Association*.
- Kiggundu, B. M., & Roberts, F. L. (1988). Stripping in HMA mixtures: State-of-the-art and critical review of test methods. *National Center for Asphalt Technology*.
- Koole, R., & Thagesen, B. (2004). *Road Engineering for Development*. Spon Press, London, UK, 2nd edition.
- Kwabena Appiah, J., Berko-Boateng, V. N., & Ama Tagbor, T. (2017). Use of waste plastic materials for road construction in Ghana. *Case Studies in Construction Materials Volumen 6*, Pages 1-7.
- Lesueur, D. (2008). The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Adv. Colloid Interface Sci.*, Vol. 145, 42-82.
- López, T., & Miró, R. (2015). *El envejecimiento en mezclas asfálticas. N°5 / Cuadernos tecnológicos de la PTC*. Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech.

- Malarvizhi, G., Sabermathi, R., & Kamaraj, C. (2015). Laboratory Study on Nano Clay Modified Asphalt Pavement. *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 10. Number 8. Pag. 20175-20190.
- Martínez, A., Martín, N. G., & Páez, A. (2003). Betunes asfálticos: materiales muy utilizados y poco conocidos químicamente. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 43-52.
- Padilla, A. R. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. Barcelona: UPCommons. Portal de acceso abierto al conocimiento de la UPC. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/page/about>
- Petersen, J. (1984). Chemical composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability - State of the art. *Transp. Res. Rec. 999 (Transportation Research Board, Washington D.C.)*, 13-30.
- Petersen, J. (2009). A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation: chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships. *Transp. Res. E-Circular. Transport Res Board, 1*.
- Polacco, G., Filippi, S., Mesuri, F., & Stastna, G. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science Vol. 224*, 72-112.
- Qadir, A. (2013). Rutting performance of polypropylene modified asphalt concrete. *INternational Journal of Civil Engineering*.
- Qi, Y., & Wang, F. (2003). Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. I. *Oxygen absorption behaviors and kinetics. J. Pet. Sci. Technol.*, 21(1), 283-299.
- Qi, Y., & Wang, F. (2004). Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. II. *Chemical group composition and structure changes. J. Pet. Sci. Technol.*, 22(3), 263-274.
- Qi, Y., & Wang, F. (2004). Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. III. *Average molecular structure parameter changes. J. Pet. Sci. Technol.*, 22(3), 275-286.
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The shell bitumen handbook*. Thomas Telford.
- Renken, P. (2013). Aging of high polymer modified bitumens (40/100-65 A) - assessment of the susceptibility to aging and optimisation of an aging procedure for binder with aggregate.

- 5th EATA conference proceedings. *European Asphalt Technology Association. Braunschweig, Germany.*
- Reyes, F. A., Figueroa, A. S., & Fonseca, E. B. (2010). Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con materiales reciclados. *Ingeniería y Universidad, Vol. 13. (1).*
- Rodríguez, E., Aguiar, J., Salazar, J., Zúñiga, C., & Loría, L. G. (2017). *Determinación del efecto de la temperatura y el tiempo de calentamiento en las características del asfalto.* Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales - UCR.
- Rondón Q., H. A., Zafra, C. A., & Chaves, S. B. (2018). Behavior of a Hot Mix Asphalt using Blast Furnace Slag and Gilsonite. *International Journal of Applied Engineering Research* 13(22).
- Rondón Quintana, H. A. (2009). *Serie de guías: Fundamentos 1.1 Unversidad Católica de Colombia* . 45.
- Rondón Quintana., H. A., Fernández, W., & Castro, W. (2010). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). *Revista Ingeniería de Construcción Vol. 25 No. 1*, 83-94.
- Rondón, H. A., & Reyes, F. A. (2015). *Pavimentos: Materiales, Construcción y Diseño.* ECOE Ediciones.
- Rondon, H. A., Hernández, J. A., & Urazán, C. F. (2016). Behavior of Gilsonite-Modified Hot Mix Asphalt by Wet and Dry Processes. *Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 28, Issue 2.*
- Sahu, A. K., & Singh, R. K. (2016). Application of waste plastic materials in road construction. *2nd International Seminar On—Utilization of Non-Conventional Energy Sources for Sustainable Development of Rural Areas ISNCESR '16 17th & 18th March. Chhattisgarh, India.*
- Said, S. F. (2005). Aging effect on mechanical characteristics of bituminous mixtures. Bituminous Binders 2005. *Transportation Research Record*, 1-9.
- Sánchez Sabogal, F., & Campagnoli Martínez, S. X. (2016). *Pavimentos Asfálticos de Carreteras: Guía Práctica para estudios y diseños.* Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Sengoz, B., Topal, A., & Isikyakar, G. (2009). Morphology and image analysis of polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials. Vol 23*, 1986-1992.

- Shafabakhsh, G. H., & Jafari Ani, O. (2015). Experimental investigation of effect of Nano TiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol. 98. Pag: 692-702.
- Siddiqui, M., & Ali, M. (1999). Investigation of chemical transformations by NMR and GPC during the laboratory aging of Arabian asphalt. *Fuel*, 78(12), 1407-1416.
- Siddiqui, M., & Ali, M. (1999). Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts. *Fuel*, 78(9), 1005-1015.
- Swiertz, D. (2010). Asphalt aging characteristics, Rheological implications and laboratory techniques. . *University of Wisconsin. Madison*.
- Tahami, S. A., & Arabani, M. (2017). Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. Vol. 149, 350-358.
- Traxler, R. (1963). Durability of asphalt cements. *Proc. Assn. Asphalt Paving Technol.*, 32, 44-58.
- Vallerga, B. (1981). Pavement deficiencies related to asphalt durability. *Proc. Assn. Asphalt Paving Technol.*, 50, 481-491.
- Van der Bergh, W. (2011). The Effect of Ageing on the Fatigue and Healing Properties of Bituminous Mortars. *The Netherlands*.
- Vargas, X., & Reyes, F. (2010). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería E Investigación*. Vol. 30 No. 3, 27-44.
- Villegas, R. E., Aguiar, J. P., & Loria, L. G. (2015). Estudio del envejecimiento y oxidación de asfaltos con FTIR y su relación con los parámetros reológicos. *Memorias XVIII CILA* .
- Wong, S. F. (2018). Use of Recycled Polymers in Asphalt Concrete for Infrastructural Applications. *International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2018)*, 437-442.
- Wu, J., & Airey, G. (2009). The Influence of Aggregate Interaction and Aging Procedure on Bitumen Aging. . *Journal of testing and evaluation*.
- Wulandari, P. S., & Tjandra, D. (2017). Use of Crumb Rubber as an Additive in Asphalt Concrete Mixture. *Procedia Engineering* Vol. 171, 1384-1389.
- Yilmaz, M., & Yalcin, E. (2015). The effects of using different bitumen modifiers and hydrated lime together on the properties of hot mix asphalts. *Road Materials and Pavement Design* , 17 (2), 499-511.

- Yu, B., Jiao, L., Ni, F., & Yang, J. (2014). Evaluation of plastic-rubber asphalt: Engineering property and environmental concern. *Construction and Building Materials*, 71, 416–424.
- Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal Volu. 54*, 18-38.