

Universidad De Costa Rica
Facultad De Ingeniería
Escuela De Ingeniería Química

Determinación de la propiedad de adhesión de asfaltos modificados con distintos tipos de polímeros en diferentes agregados y acondicionamientos, utilizando las técnicas de ensayo de Adherencia de Bitumen y Goniometría

Informe de Proyecto de Graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química.

Liyao Chen Tan
cc Marco Liyao Chen Tan

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José, Costa Rica
2018

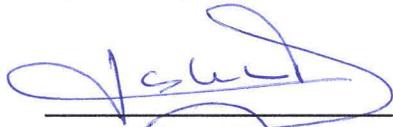
Tribunal Examinador

Proyecto de Graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química.

Sustentante:

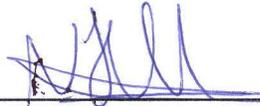
Liyao Chen Tan / cc Marco Liyao Chen Tan

Aprobado por:



Ing. Esteban Durán Herrera, PhD
Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.

Presidente del Tribunal



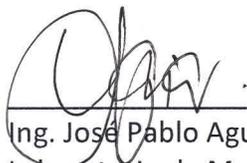
Ing. Natalia Hernández Montero, PhD
Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.

Director del proyecto



Ing. Ellen Rodríguez Castro, Lic.
Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales, U.C.R.

Miembro Lector



Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD
Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales, U.C.R.

Miembro Lector

Ing. Jenny Calderón Castro, Lic.
Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.

Miembro Lector Invitado

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes
2018

“In battle, discipline beats numbers nine times of every ten”

-Jon Snow

“Once you’ve accepted your flaws, no one can use them against you”

-Tyrion Lannister

“When the snows fall and the white wind blow, the lone wolf dies, but the pack survives”

-George RR Martin

Dedicatoria

Este trabajo final de graduación va dedicado en honor a mi madre, quien logró sacarme adelante en los momentos más difíciles. A mis hermanos que siempre fueron un apoyo y a mis amigos y amigas quienes estuvieron conmigo en todo el proceso

Agradecimiento

Quiero dar gracias primeramente a Dios, quien hizo que todo esto fuera posible, quien me dio fuerzas desde el momento que comencé esta aventura y que pronto terminará. No fue un recorrido fácil, pero siempre tuve la mentalidad de que todo iba a salir bien y así resultó ser.

Seguidamente le doy gracias a mi madre, que me sacó adelante a pesar de todas las adversidades y mi hermano y mi hermana, a quienes tengo que responder de la mejor manera porque soy su modelo a seguir y por cómo me han ayudado.

Agradezco a la directora de mi proyecto, la Dra. Natalia Hernández quien ha sido extremadamente paciente conmigo y me ha ayudado bastante, así como a mis lectores la Ingeniera Ellen Rodríguez y al Dr. Jose Pablo Aguiar.

Doy gracias a mis amigos, tanto los que están dentro como fuera de la Universidad debido a todos los buenos consejos. Quiero agradecer especialmente a Ana Gabriela Morales, doctora en Farmacia de la Universidad de Costa Rica por su sabiduría, por sus enseñanzas, por los viajes, por todo lo que pude aprender y compartir con ella, una personal muy especial. A María José Sossa, quien es colega por todas las estudiadas, las buenas tardes de café, por los consejos y las conversaciones. A otro colega, Javier Moya Bejarano quien fue un excelente compañero y amigo en toda la carrera, gracias por la ayuda y las estudiadas, por el mejor proyecto de Expo IQ con el Bioreactor. A Isaac Franco Villalobos y Kevin Morales por los excelentes momentos y conversaciones llenos de sabiduría.

A la mayoría de profesores de todos los cursos, tanto los de carrera como los de servicio ya que de ellos aprendí mucho, no sólo como docentes sino como personas.

Resumen

En el presente trabajo se estudió la propiedad de adhesión de asfaltos modificados sobre diferentes agregados tanto en acondicionamiento seco y húmedo. El ligante se modificó con los polímeros estireno-butadieno-caucho (SBR), el estireno-butadieno-estireno (SBS) y el terpolímero elastomérico reactivo (TER). Como primer paso se hizo la modificación del asfalto utilizando los tres polímeros mencionados anteriormente. Cada polímero tiene sus propias condiciones de modificación: dosificaciones, temperatura y tiempo de mezclado, así como tiempos de reacción en algunos casos.

Una vez terminada la modificación, se envejece el asfalto a corto plazo mediante el uso de RTFO que simula el endurecimiento durante el mezclado con agregados y la colocación de la mezcla asfáltica en campo. También se envejece en el PAV que simula el envejecimiento después de años de servicio en pavimento. Se caracteriza mediante grado de desempeño (PG), el cual utiliza el reómetro de corte dinámico para el asfalto original, el envejecido por RTFO y el envejecido por PAV y reómetro de vigas de flexión, además de la caracterización por viscosidad dinámica a 135 °C. Se obtuvo un valor de PG 76-22 para todos los asfaltos modificados mientras que el asfalto sin modificar el valor de PG obtenido es de 70-22, lo cual implica que los asfaltos modificados se desempeñan mejor que el asfalto no modificado a temperaturas por encima de 70 °C. El asfalto modificado más viscoso es el modificado con TER con un valor de 1,866 Pa·s y el menos viscosos es el modificado con SBR con un valor de 1,185 Pa·s.

La propiedad de adhesión se determinó por medio del ensayo de Adherencia de Bitumen y Goniometría. El primer ensayo consiste en medir el valor de POTS por medio del equipo de PATTI. Los ligantes modificados con TER fueron los que obtuvieron mayor valor de POTS. El segundo ensayo mide el ángulo de contacto entre el asfalto y los agregados. El menor ángulo de contacto fue para el asfalto modificado con TER. El asfalto modificado con el

polímero TER tiene mejor adhesión y afinidad con respecto a los demás asfaltos en todas las condiciones evaluadas mientras que el que tuvo peor adhesión y afinidad fue el asfalto sin modificar. Las mejores condiciones donde se obtuvieron los mayores valores de POTS y menores ángulos de contacto para todos los asfaltos modificados y sin modificar fueron en el agregado calizo y en el acondicionamiento seco. A pesar de que el polímero TER es mejor con respecto a los demás es importante realizar un estudio de prefactibilidad y evaluar los costos de producción para determinar si es rentable o no utilizar ese polímero.

Índice General

	Página
Tribunal Examinador	i
<i>Dedicatoria</i>	iii
Agradecimiento	iv
Resumen	v
Índice General	vii
Índice de Cuadros	x
Índice de Figuras	xvii
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Asfaltos	3
2.1 El asfalto y su composición	3
2.2 Propiedades del Asfalto	4
2.3 Efecto del daño por humedad en la adhesión de los ligantes asfálticos	6
Capítulo 3. El uso de polímeros en la modificación de asfaltos	11
3.1 Polímeros	11
3.2 Tipos de polímeros utilizados como modificadores de asfalto	12
3.3.1 Estireno-Butadieno-Caucho/SBR	13
3.3.2 Estireno-Butadieno-Estireno/SBS	14
3.3.3 Terpolímero-Elastomérico-Reactivo/TER	15
Capítulo 4. Asfaltos Modificados	17
4.1 ¿Qué es un asfalto modificado?	17
4.2 Proceso de modificación del asfalto	17
4.3 Condiciones de modificación del asfalto	19
4.5 Caracterización de los asfaltos	20
4.5.1 Grado de Viscosidad	20

4.5.2 Grado de Desempeño	22
4.6 Propiedades de los asfaltos modificados	23
4.7 Determinación de la propiedad de adhesión en asfaltos	24
4.7.1 Ensayo Bitumen (ABS)	24
4.7.2 Ensayo por Goniometría.....	25
Capítulo 5. Metodología Experimental	26
5.1 Materiales.....	27
5.2 Equipos	28
5.3 Modificación del asfalto original	29
5.4 Caracterización de los asfaltos modificados	30
5.4.1 Viscosidad dinámica rotacional a 135 °C – ASTM D4402.....	30
5.4.2 Módulo de deformidad con reómetro de corte dinámico DSR – ASTM D7175.	32
5.4.3 Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada rotativa RTFO – ASTM D2872	32
5.4.4 Módulo de deformidad con reómetro de corte dinámico al residuo de RTFO – ASTM D7175	33
5.4.5 Efecto de envejecimiento acelerado a presión (PAV) – ASTM D6521	34
5.4.6 Módulo de fatiga con reómetro de corte dinámico al residuo de PAV – ASTM D7175	34
5.4.7 Módulo de rigidez con reómetro de vigas de flexión al residuo de PAV – ASTM D6648	35
5.5 Diseño estadístico.....	36
5.6 Ensayo de Adherencia de Bitumen (ABS) – AASHTO TP91-11	37
5.7 Ángulo de contacto por Goniometría.....	41
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	44
6.1 Modificación del asfalto con los polímeros SBS, SBR y TER	44
6.2 Caracterización de los asfaltos modificados	45
6.3 Diseño del análisis estadístico MANOVA.....	53

6.4 Ejecución del análisis estadístico MANOVA	65
Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones	79
7.1 Conclusiones.....	79
7.2 Recomendaciones	82
Nomenclatura.....	83
Referencias Bibliográficas	85
Apéndices	90
Apéndice A. Datos Experimentales	90
Apéndice B. Datos Intermedios.....	117
Apéndice C. Muestra de Cálculo	122
Apéndice D. Procedimiento Experimental	128
D.1 Modificación del Asfalto	128
D.2 Ensayo de Adherencia de Bitumen.....	128
D.3 Ensayo por Goniometría	129

Índice de Cuadros

	Página
Cuadro 4.1 Especificaciones de cementos asfálticos clasificados por grado viscosidad	22
Cuadro 5.1 Propiedades físico-químicas de las sustancias utilizadas.....	27
Cuadro 5.2 Propiedades toxicológicas y de seguridad de las sustancias utilizadas.	28
Cuadro 5.4 Datos básicos de asfalto - polímero y condiciones de modificación	30
Cuadro 5.5 Matriz del diseño estadístico con todas las combinaciones de las variables polímero, agregado y acondicionamiento para la evaluación de la resistencia a la separación y ángulo de contacto	37
Cuadro 5.6 Clasificación de las variables tipo de polímero, agregados y acondicionamiento con sus notaciones respectivas	37
Cuadro 6.1 Resultados de RTFO obtenidos para los asfaltos modificados.....	46
Cuadro 6.2 Resultados de viscosidad dinámica promedio obtenidos a 135 °C para los asfaltos modificados con diferentes polímeros	46
Cuadro 6.3 Resultados obtenidos del módulo de deformabilidad por DSR para el asfalto modificado con SBR.....	47
Cuadro 6.4 Resultados obtenidos del módulo de deformabilidad al residuo RTFO por DSR para el asfalto modificado con SBR.....	48
Cuadro 6.5 Resultados obtenidos del módulo de fatiga al residuo PAV por DSR para el asfalto modificado con SBR.....	48
Cuadro 6.6 Resultados obtenidos del módulo de rigidez al residuo PAV por BBR para el asfalto modificado con SBR.....	49
Cuadro 6.7 Resultados obtenidos del módulo de deformabilidad por DSR para el asfalto modificado con SBS.....	49
Cuadro 6.8 Resultados obtenidos del módulo de deformabilidad al residuo RTFO por DSR para el asfalto modificado con SBS	50
Cuadro 6.9 Resultados obtenidos del módulo de fatiga al residuo PAV por DSR para el asfalto modificado con SBS	50
Cuadro 6.10 Resultados obtenidos del módulo de rigidez al residuo PAV por BBR para el asfalto modificado con SBS	51
Cuadro 6.11 Resultados obtenidos del módulo de deformabilidad por DSR para el asfalto modificado con TER.....	51
Cuadro 6.12 Resultados obtenidos del módulo de deformabilidad al residuo RTFO por DSR para el asfalto modificado con TER.....	51
Cuadro 6.13 Resultados obtenidos del módulo de fatiga al residuo PAV por DSR para el asfalto modificado con TER.....	52

Cuadro 6.14 Resultados obtenidos del módulo de rigidez al residuo PAV por BBR para el asfalto modificado con TER.....	52
Cuadro 6.15 Resultados recopilados de diferentes temperaturas para la obtención del grado de desempeño PG del asfalto sin modificar	53
Cuadro 6.16 Resumen de datos obtenidos de grado de desempeño PG para los asfaltos modificados	53
Cuadro 6.17 Valores de POTS promedio obtenidos para el asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado silíceo en condición seca.....	56
Cuadro 6.18 Valor de POTS promedio obtenidos para el asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado calizo en condición seca	56
Cuadro 6.19 Valores de POTS promedio obtenidos para el asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado silíceo en condición húmeda	58
Cuadro 6.20 Valores de POTS promedio obtenidos para el asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado calizo en condición húmeda	59
Cuadro 6.21 Ángulos de contacto promedio obtenido para el asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado silíceo en condición seca	61
Cuadro 6.22 Medición del ángulo de contacto promedio del asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado calizo en condición seca	61
Cuadro 6.23 Medición del ángulo de contacto promedio del asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado silíceo en condición húmeda	63
Cuadro 6.24 Medición del ángulo de contacto promedio del asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado calizo en condición húmeda.....	63
Cuadro 6.25 Matriz de variables experimentales para el análisis multivariable de varianza de los resultados obtenidos de la resistencia a la separación y ángulo de contacto	65
Cuadro A.1 Datos obtenidos del cambio de masa del asfalto M-1468-13 modificado con el polímero SBR en horno rotatorio de película delgada rotativa (RTFO).	90
Cuadro A.2 Datos obtenidos del cambio de masa del asfalto M-1468-13 modificado con el polímero SBS en horno rotatorio de película delgada (RTFO).	90
Cuadro A.3 Datos obtenidos del cambio de masa del asfalto M-1468-13 modificado con el polímero TER en horno rotatorio de película delgada (RTFO).	90
Cuadro A.4 Datos de viscosidad obtenidos por duplicado del viscosímetro dinámico rotacional a 135 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con el polímero SBR.	91
Cuadro A.5 Datos de viscosidad obtenidos por duplicado del viscosímetro dinámico rotacional a 135 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con el polímero SBS.	91
Cuadro A.6 Datos de viscosidad obtenidos por duplicado del viscosímetro dinámico rotacional a 135 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con el polímero TER.	91
Cuadro A.7 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.	92
Cuadro A.8 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.	92

Cuadro A.9 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 82 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.....	93
Cuadro A.10 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 64 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS.	93
Cuadro A.11 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS.	94
Cuadro A.12 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS.	94
Cuadro A.13 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con TER.	95
Cuadro A.14 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con TER.	95
Cuadro A.15 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 82 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con TER.	96
Cuadro A.16 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.....	96
Cuadro A.17 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.....	97
Cuadro A.18 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 82 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.....	97
Cuadro A.19 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 64 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS.....	98
Cuadro A.20 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS.....	98
Cuadro A.21 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS.....	99
Cuadro A.22 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con TER.....	99
Cuadro A.23 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con TER.....	100
Cuadro A.24 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 82 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con TER.....	100
Cuadro A.25 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 22 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.....	101
Cuadro A.26 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 25 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.....	101
Cuadro A.27 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 25 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.....	102
Cuadro A.28 Datos obtenidos del reómetro de corte dinámico a 28 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.....	102

Cuadro A.29 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 22 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS	102
Cuadro A.30 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 25 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS	103
Cuadro A.31 Datos obtenidos del reómetro de corte dinámico a 28 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS.....	103
Cuadro A.32 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 22 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con TER.....	104
Cuadro A.33 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 25 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con TER.....	104
Cuadro A.34 Datos obtenidos del reómetro de corte dinámico a 28 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con TER	105
Cuadro A.35 Datos obtenidos del reómetro de vigas de flexión BBR para la muestra de asfalto M-1468-13 modificado con SBR.....	105
Cuadro A.36 Datos obtenidos del reómetro de vigas de flexión BBR para la muestra de asfalto M-1468-13 modificado con SBS	105
Cuadro A.37 Datos obtenidos del reómetro de vigas de flexión BBR para la muestra de asfalto M-1468-13 modificado con TER.....	106
Cuadro A.38 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado silíceo en condición seca.....	106
Cuadro A.39 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado silíceo en condición seca	106
Cuadro A.40 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado silíceo en condición seca.....	106
Cuadro A.41 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 en el agregado silíceo en condición seca	107
Cuadro A.42 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado calizo en condición seca	107
Cuadro A.43 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado calizo en condición seca.....	107
Cuadro A.44 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado calizo en condición seca	107
Cuadro A.45 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 en el agregado calizo en condición seca	107
Cuadro A.46 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado silíceo en condición húmedo	108
Cuadro A.47 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado silíceo en condición húmedo.....	108
Cuadro A.48 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado silíceo en condición húmedo	108

Cuadro A.49 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 en el agregado silícico en condición húmedo	108
Cuadro A.50 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado calizo en condición húmedo	109
Cuadro A.51 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado calizo en condición húmedo	109
Cuadro A.52 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado calizo en condición húmedo	109
Cuadro A.53 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 en el agregado calizo en condición húmedo.....	109
Cuadro A.54 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado silícico en condición seco	110
Cuadro A.55 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado silícico en condición seco.....	110
Cuadro A.56 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado silícico en condición seco	110
Cuadro A.57 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 en el agregado silícico en condición seco	111
Cuadro A.58 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado calizo en condición seco	111
Cuadro A.59 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado calizo en condición seco	112
Cuadro A.60 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado calizo en condición seco	112
Cuadro A.61 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 en el agregado calizo en condición seco	112
Cuadro A.62 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado silícico en condición húmedo	113
Cuadro A.63 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado silícico en condición húmedo	113
Cuadro A.64 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado silícico en condición húmedo	114
Cuadro A.65 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 en el agregado silícico en condición húmedo	114
Cuadro A.66 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado calizo en condición húmedo.....	114
Cuadro A.67 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado calizo en condición seco	115
Cuadro A.68 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado calizo en condición seco	115

Cuadro A.69 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 en el agregado calizo en condición seco	116
Cuadro B.1 Porcentaje de cambio de masa del asfalto M-1468-13 modificado con SBR en horno rotatorio de película delgada	117
Cuadro B.2 Porcentaje de cambio de masa del asfalto M-1468-13 modificado con SBS en horno rotatorio de película delgada	117
Cuadro B.3 Porcentaje de cambio de masa del asfalto M-1468-13 modificado con TER en horno rotatorio de película delgada	117
Cuadro B.4 Porcentaje de pérdida de adhesión del asfalto M-1468-13 modificado con los diferentes polímeros y el original sin modificar en el agregado silícico y calizo	118
Cuadro B.5 Datos de los grados de libertad obtenidos del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS	118
Cuadro B.6 Datos del promedio global y la suma de cuadrados obtenidos del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS	118
Cuadro B.7 Datos de las medias cuadradas y los valores F y P del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS	118
Cuadro B.8 Datos obtenidos de los rangos estudentizados de la interacción de los polímeros para la prueba de Tukey en los valores de POTS	118
Cuadro B.9 Datos obtenidos de los rangos estudentizados de la interacción de los agregados para la prueba de Tukey en los valores de POTS.....	119
Cuadro B.10 Datos obtenidos de los rangos estudentizados de la interacción de los acondicionamientos para la prueba de Tukey en los valores de POTS.....	119
Cuadro B.11 Datos de los promedios, desviaciones estándar y varianza de los diferentes tipos de polímero del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS	119
Cuadro B.12 Datos de los promedios, desviaciones estándar y varianza de los diferentes tipos de agregado del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS.....	119
Cuadro B.13 Datos de los promedios, desviaciones estándar y varianza de los diferentes tipos de acondicionamiento del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS..	119
Cuadro B.14 Datos de los grados de libertad obtenidos del análisis de varianza múltiple para el ángulo de contacto.....	120
Cuadro B.15 Datos del promedio global y la suma de cuadrados obtenidos del análisis de varianza múltiple para el ángulo de contacto.....	120
Cuadro B.16 Datos de las medias cuadradas y los valores F y P del análisis de varianza múltiple para el ángulo de contacto	120
Cuadro B.17 Datos obtenidos de los rangos estudentizados de la interacción de los polímeros para la prueba de Tukey en los ángulos de contacto	120
Cuadro B.18 Datos obtenidos de los rangos estudentizados de la interacción de los agregados para la prueba de Tukey en los ángulos de contacto	120
Cuadro B.19 Datos obtenidos de los rangos estudentizados de la interacción de los acondicionamientos para la prueba de Tukey en los ángulos de contacto	121

Cuadro B.20 Datos de los promedios, desviaciones estándar y varianza de los diferentes tipos de polímero del análisis de varianza múltiple para ángulos de contacto	121
Cuadro B.21 Datos de los promedios, desviaciones estándar y varianza de los diferentes tipos de agregado del análisis de varianza múltiple para ángulos de contacto	121
Cuadro B.22 Datos de los promedios, desviaciones estándar y varianza de los diferentes tipos de acondicionamiento del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS..	121

Índice de Figuras

	Página
Figura 2.1 Estructuras moleculares propuestos de asfaltenos.....	3
Figura 2.2 Estructuras moleculares propuestos de los maltenos	4
Figura 2.3 Equipo de Wilhelmy (a) placa de vidrio recubierto con mezcla asfáltica y	8
Figura 3.1 Cadenas de Homopolímero y Heteropolímero.....	11
Figura 3.2 Estructura de (a) Estireno y (b) Butadieno.....	13
Figura 3.3 Estructura del polímero SBR formado a partir del Estireno y Butadieno respectivamente.....	14
Figura 3.4 Estructura del polímero de SBS a partir de las cadenas de poliestireno y polibutadieno	15
Figura 3.5 Estructura molecular del TER formado a partir del Acrilato de Butilo y Glicidil Metacrilato respectivamente.....	16
Figura 4.1 Diagrama de dispersión de fases polímero-asfalto	19
Figura 4.2 Medición de diferentes ángulos de contacto de una gota líquida sobre una superficie sólida.....	25
Figura 5.1 Procedimiento experimental.	27
Figura 5.2 Sistema para la modificación de asfalto.	29
Figura 5.3 Muestra de asfalto modificado para viscosímetro.	31
Figura 5.4 Viscosímetro rotacional y la cámara térmica de temperatura controlada.....	31
Figura 5.5 Muestras de asfalto para RTFO.....	32
Figura 5.6 Horno de película delgada rotativa horizontal – RTFO.....	33
Figura 5.7 Horno de envejecimiento acelerado a presión – PAV.	34
Figura 5.8 Reómetro de corte dinámico.	35
Figura 5.9 Reómetro de vigas de flexión.....	36
Figura 5.10 Equipo PATTI para medir el valor de POTS.	38
Figura 5.11 Agregado de piedra tipo caliza y silícica.	38
Figura 5.12 Muestras de asfalto en tornillos metálicos.....	39
Figura 5.13 Muestras de asfalto sobre agregados silicio y calizo.	39
Figura 5.14 Gráfica de calibración para el equipo PATTI (Propio, 2018)	40
Figura 5.15 Sistema de acondicionamiento húmedo para ensayo PATTI	41
Figura 5.16 Sistema agregado-asfalto para la medición del ángulo de contacto por goniometría.	42
Figura 5.17 Sistema de medición de ángulo de contacto Goniómetro	42
Figura 5.18 Calibración del Goniómetro en DROPimage Advanced.....	43
Figura 5.19 Sistema de acondicionamiento húmedo para Goniometría.....	43

Figura 6.1 Muestra de asfalto modificado con TER sobre papel toalla	45
Figura 6.2 Curva de la fuerza de tensión en función del tiempo.....	54
Figura 6.3 Desprendimiento de tornillos en los agregados (a) silíceo y (b) calizo	55
Figura 6.4 Agregados (a) silíceo y (b) calizo posterior al ensayo.....	55
Figura 6.5 Interacción entre el polímero TER y el asfalteno (Du Pont, 2018)	57
Figura 6.6 Valores de POTS obtenidos para los dos tipos de agregado en condición seca	58
Figura 6.7 Valores de POTS obtenidos para los tipos de agregado en condición húmedo	60
Figura 6.8 Valores de pérdida de fuerza de adhesión para los tipos de agregado utilizados	60
Figura 6.9 Ángulos de contacto obtenidos para los tipos de agregado en condición seca	62
Figura 6.10 Ángulos de contacto obtenidos para los dos tipos de agregados en condición húmeda.....	64
Figura 6.11 Gráfica de distribución normal de residuos del (a) valor de POTS y	66
Figura 6.12 Gráfica de ajuste residual contra el valor ajustado del (a) valor de POTS y	66
Figura 6.13 Gráfica de ajuste residual contra orden observado del (a) valor de POTS y ..	67
Figura 6.14 Análisis de varianza múltiple para las variables (a) valor de POTS y	67
Figura 6.15 Gráfica de intervalos de confianza del factor polímero al 95 % de Tukey para las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente.....	68
Figura 6.16 Gráfica de intervalos de confianza del factor agregado al 95 % de Tukey para las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente.....	69
Figura 6.17 Gráfica de intervalos de confianza del factor acondicionamiento al 95 % de Tukey para las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente .	70
Figura 6.18 Desviaciones estándar de los datos promedios de valor de POTS en el factor polímero.	71
Figura 6.19 Desviaciones estándar de los datos promedios de valor de POTS en el factor agregado.....	71
Figura 6.20 Desviaciones estándar de los datos promedios de valor de POTS en el factor acondicionamiento.....	71
Figura 6.21 Desviaciones estándar de los datos promedios de ángulo de contacto en el factor polímero.....	72
Figura 6.22 Desviaciones estándar de los datos promedios de ángulo de contacto en el factor agregado.	73
Figura 6.23 Desviaciones estándar de los datos promedios de ángulo de contacto en el factor acondicionamiento.	73
Figura 6.24 Gráfica de interacción entre los factores polímero y agregado sobre las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente	74
Figura 6.25 Gráfica de interacción entre los factores polímero y acondicionamiento sobre las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente.....	75
Figura 6.26 Gráfica de interacción entre los factores agregado y acondicionamiento sobre las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente	76

Figura 6.27 Gráfica de efectos principales de los factores sobre las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente 76

Capítulo 1. Introducción

La infraestructura vial en Costa Rica ha tenido una inversión importante a través de los años debido a la gran contribución que tiene las carreteras en el desarrollo del país, por lo que es necesario darles un mantenimiento adecuado para alargar su vida útil. Algunos de los deterioros más comunes en las carreteras son la deformación permanente, fractura por agrietamiento térmico, daño por humedad (Cremades, 2008). Costa Rica dada su ubicación geográfica se ve sometido a muy altos niveles de precipitación por lo que es de esperarse que el daño por humedad sea el modo de falla más común en el país (Aguiar, Loría, Jiménez, & Salazar, 2014).

Desde hace varios años, se han desarrollado estudios acerca del uso de asfaltos modificados, los cuales consisten en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales para mejorar sus características físico-mecánicas. En países de la región como Guatemala se han hecho modificaciones de asfaltos utilizando elastómeros y plastómeros con el fin de mejorar la resistencia a las deformaciones permanentes, reducir el agrietamiento, incrementar la adherencia en la interfase entre el material asfáltico y los agregados pétreos (Avellan, 2007).

En Costa Rica el estudio de asfaltos modificados desde la óptica de la propiedad de adhesión usando polímeros es escaso. El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) realizó una investigación acerca de la afinidad de un agregado al asfalto utilizando Estireno-Butadieno-Caucho (SBR) como modificante en agregados pétreos para evaluar la adhesión mediante ensayos de Adherencia de Bitumen (ABS) y Goniometría (Aguiar, et al., 2014). Este proyecto de investigación pretende profundizar más el tema de los asfaltos modificados por medio del estudio de una serie de factores que pueden alterar dicha propiedad y de esta forma

adquirir un mayor conocimiento del comportamiento de los ligantes asfálticos en las condiciones establecidas ya que mediante el estudio de dicha propiedad se puede corroborar un mejoramiento de los asfaltos debido a que entre mejor sea la adhesión del ligante y el agregado, mayor va a ser la energía superficial requerida para separarlos, tratando de esta forma problemas como el daño por humedad y agrietamiento

Se va a trabajar con tres tipos de polímero en la modificación del asfalto bajo condiciones establecidas por el LanammeUCR. Al mismo tiempo se va a tomar en cuenta los tipos de agregado y su acondicionamiento para luego realizar los ensayos ABS para determinar la adhesión y Goniometría para el ángulo de contacto. Se propone un diseño estadístico mediante un análisis multivariado de variancia MANOVA para determinar si existen diferencias significativas entre los factores propuestos a través de la variable. Una vez que se determina cuál de los asfaltos modificados tiene mejor adhesión, se va a comparar dicha propiedad con el de un asfalto sin modificar a las mismas condiciones de tal forma que al final se pueda hacer una propuesta para el uso del ligante modificado en las carreteras a nivel nacional.

Capítulo 2. Asfaltos

2.1 El asfalto y su composición

El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites. Es sólido a temperatura ambiente, sin embargo, al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida (Wulf, 2008). Se compone principalmente de moléculas polares y no polares, donde predominan los hidrocarburos. Su estructura es considerada como un sistema coloidal donde componentes de alto peso molecular son disueltos en una matriz aceitosa de menor peso molecular y está constituido por dos grupos básicos: asfaltenos y maltenos los cuales se detallan a continuación (Calabi, 2012):

- **Asfaltenos:** Corresponden a moléculas de alta masa molecular, formadas por hidrocarburos con pocas ramificaciones en los cuales se distingue un núcleo aromático fusionado con grupos funcionales polares como nitrógeno, azufre y oxígeno (Calabi, 2012). Los asfaltenos le dan la característica de dureza al asfalto (Wulf, 2008). En la Figura 1.1 se muestra la estructura del asfalteno.

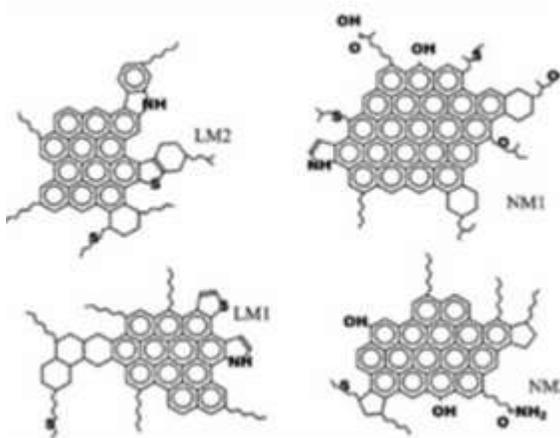


Figura 2.1 Estructuras moleculares propuestos de asfaltenos (Suárez, et al., 2013)

- **Maltenos:** Estos se dividen en compuestos saturados y aromáticos. Los compuestos aromáticos corresponden a la fracción de mayor proporción entre un 35 % hasta un 50 % del total del ligante asfáltico y constituyen el medio de dispersión de los asfaltenos mientras que los compuestos saturados, representan entre un 5 % y un 20 % del total del ligante asfáltico correspondientes a compuestos no polares (Fernández & Rondón, 2011). Las moléculas de los maltenos presentan bajo peso molecular y grandes ramificaciones en las cadenas (Wulf, 2008). Son de alta adhesividad, presentan un aspecto sólido a temperatura ambiente y color negro. Representan entre un 30 % y un 45 % en peso del total del ligante asfáltico y actúan como agentes dispersantes (Lesueur, 2009). En la Figura 1.2 se muestra la estructura propuesta de los maltenos.

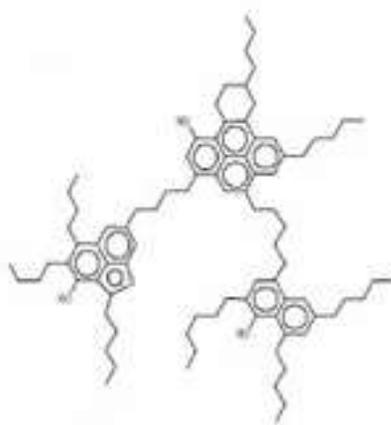


Figura 2.2 Estructuras moleculares propuestos de los maltenos (Navarro, Álvarez, Grosso, & Navarro, 2004)

2.2 Propiedades del Asfalto

A la hora de realizar el diseño y construcción de carreteras, es de suma importancia tomar en cuenta las propiedades físicas del asfalto. A continuación, se presenta algunas de las propiedades a considerar en la pavimentación de carreteras (Cruz, 2007):

- **Adhesión:** Es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación.
- **Susceptibilidad térmica:** Se define como el comportamiento del asfalto conforme varía su temperatura, de modo que a temperaturas bajas este se vuelve más viscoso mientras que al aumentar su temperatura la viscosidad disminuye. La susceptibilidad térmica puede variar entre asfaltos de diferente origen aún si estos tienen el mismo grado de clasificación. El asfalto debe tener suficiente fluidez a temperaturas altas para que pueda cubrir las partículas del agregado durante el mezclado y así permitir que estas se desplacen unas con respecto de otras durante la compactación. Luego al disminuir la temperatura (temperatura ambiente) este deberá volverse lo suficientemente viscoso para mantener unidas las partículas del agregado
- **Durabilidad:** Es la medida de la retención de las características originales de un asfalto cuando es expuesto a procesos de degradación y envejecimiento. Se determina a través del comportamiento del pavimento, el cual es afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado.

El asfalto al presentar buenas propiedades como las mencionadas anteriormente, se podrá utilizar de manera adecuada sobre los pavimentos. Las principales funciones del ligante asfáltico en las carreteras son el de aglomerante e impermeabilizante. Como **aglomerante**, proporciona la unión entre los agregados de la mezcla asfáltica con el fin de generar resistencia contra las cargas mecánicas ejercidas por los flujos vehiculares, mientras que como **impermeabilizante**, evita la penetración del agua tanto de las precipitaciones como por acción capilar (Wulf, 2008).

Para corroborar que el asfalto cumpla de manera correcta su función como aglomerante e impermeabilizante, es necesario que una de las propiedades fundamentales como lo es la adhesión sea buena, de forma que exista una alta adhesividad y afinidad entre el sistema asfalto y los agregados. No obstante, la calidad de la adhesión se puede ver afectada por la presencia de agua en el sistema asfalto-agregado, ocasionando el daño por humedad (Alvarez & Ovalles, 2012).

2.3 Efecto del daño por humedad en la adhesión de los ligantes asfálticos

El daño por humedad es el resultado de una reducción en la adhesión del asfalto y la superficie del agregado por falla cohesiva en la estructura interna de la mezcla asfáltica y relleno mineral. Este depende de varias variables como el tipo de mezcla asfáltica, propiedades del asfalto y el agregado, características del tráfico y el ambiente, no obstante, se ha reportado también que un incremento en el pH del agua en el interfaz asfalto-agregado genera un efecto importante en la reducción del enlace de adhesión entre los dos materiales (Aguiar, et al., 2014).

Algunas fallas asociadas al daño por humedad y desnudamiento son: desprendimiento, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión de poro y socavación hidráulica. El desprendimiento ocurre cuando una capa delgada de agua desplaza completamente la película de asfalto de la superficie del agregado el cual se debe a que el agua tiene menor energía superficial en comparación con el asfalto, lo que resulta en mayor humectabilidad del agregado (Aguiar, Loría, Jiménez, & Salazar, 2014).

Existe varias técnicas para determinar la susceptibilidad del daño por humedad de las mezclas asfálticas como el MIST (Moisture Induced Sensitivity Test) que consiste en utilizar un equipo de acondicionamiento acelerado que funciona a mayores temperaturas que las normales, creando presiones dentro de los poros de la mezcla y logrando una aceleración de los efectos que experimenta una mezcla en condiciones normales de tráfico y de

temperaturas, el TSR (Tensile Strength Ratio) que determina la resistencia a la tensión del asfalto sometidas a carga centrales y paralelas, ensayo de Ahuellamiento, Fatiga y Módulos Dinámicos (Plaza & Rincón, 2014). Una de las técnicas más utilizadas para cuantificar el daño por humedad es por medio de la energía superficial libre (ESL) presente en el asfalto. Esta tiene como principio el uso del método de la Placa de Wilhelmy (MPW) y de una Máquina de Adsorción Universal (USD) (Alvarez & Ovalles, 2012).

El método de Wilhelmy consiste en obtener el ángulo de contacto de un líquido sobre la superficie del cemento o mezcla asfáltica, ya que, de esta forma junto con los componentes ESL de los líquidos a utilizar, se puede calcular los componentes ESL de dicha mezcla. El ángulo se obtiene mediante el empleo de placas de vidrio delgadas, recubiertas con una capa delgada y uniforme de mezcla asfáltica. Este recubrimiento se obtiene al sumergir las placas de vidrio en la mezcla asfáltica precalentada. Seguidamente, estas placas se mantienen en un desecador por 24 h antes de ser sometidas al ensayo con los líquidos de prueba. Durante el ensayo, cada placa recubierta se sumerge y retira lentamente del líquido de prueba mientras se encuentra suspendida en una balanza de precisión que registra la fuerza del sistema durante el proceso de hundimiento y de retiro de la placa (Alvarez & Spinel, 2009)

Mediante equilibrio de fuerzas del sistema placa-líquido durante el ensayo permite obtener el ángulo de contacto (θ) que genera el líquido de prueba sobre la superficie de la mezcla asfáltica tal y como se muestra en la siguiente ecuación (Alvarez & Spinel, 2009):

$$\cos(\theta) = \frac{\Delta F + V_{im} \cdot (\rho_L - \rho_{aire})g}{P_t \cdot \Gamma_L} \quad (2.1)$$

Donde:

θ = ángulo de contacto, grados

ΔF = fuerza medida, N

V_{im} = volumen de placa sumergida, l

ρ_L = densidad del líquido de prueba, g/l

ρ_{aire} = densidad del aire, g/l

g = gravedad, m/s^2

P_t = perímetro de la placa recubierta, m

Γ_t = energía superficial libre total del líquido, J/m^2

En la Figura 2.3, se muestra el equipo de Wilhelmy con los diferentes equipos.

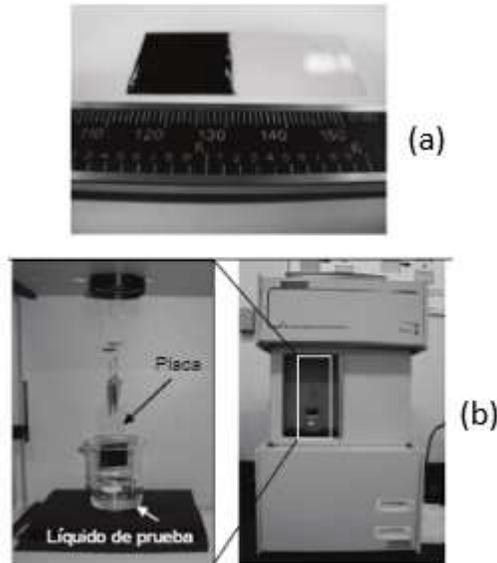


Figura 2.3 Equipo de Wilhelmy (a) placa de vidrio recubierto con mezcla asfáltica y (b) balanza de precisión (Alvarez & Spinel, 2009)

El método utilizando la Máquina de Adsorción Universal consiste en determinar la isoterma de adsorción a temperatura ambiente de un gas de prueba, con componentes de ESL conocidas sobre el agregado (Alvarez & Spinel, 2010), a diferencia del método de Wilhelmy que usa líquidos. Esta isoterma relaciona la cantidad de gas de prueba adsorbido en función

de la presión de vapor a la cual es sometido dicho gas y se puede emplear para calcular el trabajo de adhesión entre el agregado y el gas (Alvarez & Spinel, 2010). La ecuación que relaciona el trabajo de adhesión con la superficie del agregado, así como con la ESL total del gas de prueba se muestra a continuación:

$$W_a = \pi_e + 2\Gamma_g \quad (2.2)$$

Donde:

W_a = trabajo de adhesión entre el agregado y los gases, J

π_e = presión de equilibrio del gas sobre el agregado, Pa

Γ_g = energía superficial libre del gas, J/m²

La presión de equilibrio π_e se define a partir de la ecuación (1.3), que se muestra a continuación:

$$\pi_e = \frac{RT}{MA} \int_0^{p_{m\acute{a}x}} \frac{n}{p} dp \quad (2.3)$$

Donde:

R = constante universal de gases, kg·m²/s·K·mol

T = temperatura de ensayo, K

M = masa molecular del gas, g/mol

A = área específica superficial, m²

n = masa de gas absorbida, g

p = presión de vapor de gas, Pa

$p_{m\acute{a}x}$ = máxima presión de vapor de saturación para la generación de gases, Pa

El área específica superficial se define a continuación:

$$A = \left(\frac{n_m N_0}{M} \right) \alpha \quad (2.4)$$

Donde:

n_m = capacidad de la superficie del agregado, g

N_0 = número de Avogadro, mol⁻¹

α = área proyectada de una molécula de gas, m²

Con el fin de contrarrestar el daño por humedad, se ha implementado la modificación de asfaltos como una alternativa para mejorar la adhesión del ligante y aprovechar su uso de forma más efectiva (Jiménez & Reyes, 2012). No obstante, es importante entender los conceptos, propiedades, así como los diferentes tipos de polímeros que se utilizan en la modificación de asfaltos por lo que el siguiente capítulo se entra en detalle con dichos temas sobre los polímeros

Capítulo 3. El uso de polímeros en la modificación de asfaltos

3.1 Polímeros

Un polímero es una sustancia que consiste en grandes moléculas formadas por muchas unidades pequeñas llamados monómeros (Wulf, 2008). Los polímeros se obtienen a partir de la polimerización, proceso por el cual una gran cantidad de monómeros se agrupan para formar dicha molécula. Los polímeros se pueden clasificar según su conformación, ya que una cadena que presente solo una clase de monómero se denomina **homopolímero**, mientras que si la cadena está compuesta por dos o más clases de polímero se denomina **heteropolímero** o **copolímero** (Avellan, 2007). En la siguiente Figura se muestra la agrupación de monómeros para la formación tanto de una cadena de homopolímero como de heteropolímero.

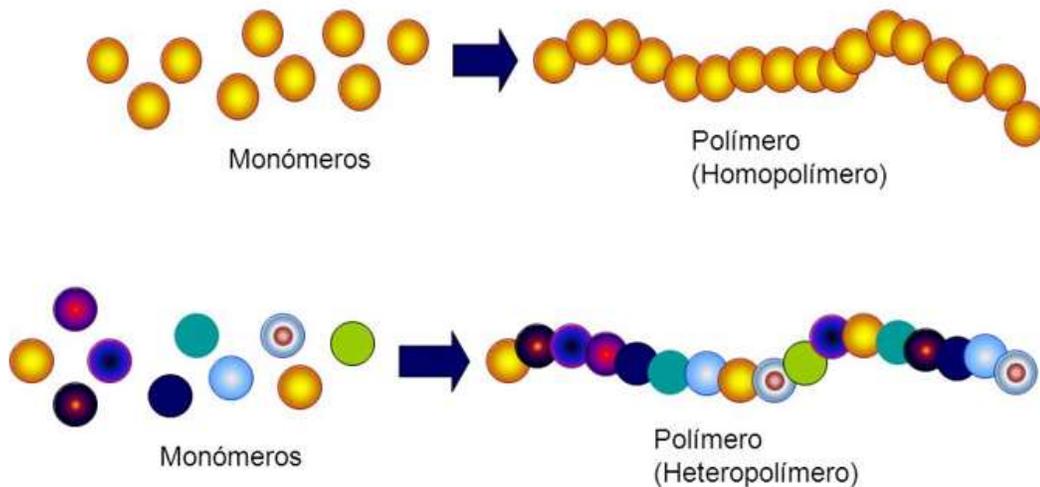


Figura 3.1 Cadenas de Homopolímero y Heteropolímero (Albarracín, 2015)

Los polímeros pueden ser clasificados por su comportamiento mecánico en elastómeros y plastómeros. Los **elastómeros** son deformables a temperatura ambiente al aplicarle un

esfuerzo, pero mantienen su módulo de elasticidad y resistencia mecánica. Pueden volver a su forma original una vez que se haya retirado el esfuerzo. Los **plastómeros** permanecen en estado sólido a temperatura ambiente clasificándose como termoplásticos y termorígidos (Wulf, 2008).

A lo largo de los años, se han desarrollado investigaciones donde se utilizan distintos polímeros para modificar el asfalto con el objetivo de aumentar la resistencia a la deformación permanente, disminuir la susceptibilidad térmica y mejorar la adhesión a los agregados. Algunos polímeros en estudio son los elastómeros como el Estireno-Butadieno-Caucho (SBR) y Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) y elastómeros/termoplásticos como el Terpolímero-Elastomérico-Reactivo (Avellan, 2007).

3.2 Tipos de polímeros utilizados como modificadores de asfalto

Para la modificación de asfaltos, se ha implementado el uso de polímeros comerciales (Wulf, 2008). A continuación, se muestra tres categorías de polímeros que se utiliza en dicha modificación:

- **Polímero Tipo I:** Estos polímeros tienen como objetivo mejorar el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en de estireno mediante configuraciones de SBS, entre otras. Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas de pavimentos con elevados índices de tránsito y carga vehicular, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.
- **Polímero Tipo II:** Este tipo de modificador mejora el comportamiento de mezclas asfálticas, pero solo a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastómeros lineales, mediante una configuración de caucho de SBR o Neopreno-

Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento, en climas fríos y templados

- **Polímero Tipo III:** Tiene como función mejorar la resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas, disminuir la susceptibilidad de la mezcla y mejorar su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo elastómero/termoplástico mediante configuraciones de Etileno-Vinil-Acetato (EVA) o TER. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

De las categorías anteriores, algunos de los polímeros más utilizados en la modificación de asfaltos son SBR, SBS y TER. A continuación, se detalla más acerca de cada uno de estos polímeros.

3.3.1 Estireno-Butadieno-Caucho/SBR

El caucho de estireno butadieno (SBR), es un polímero formado por la polimerización de una mezcla de dos o más moléculas del estireno y el 1,3-butadieno (Juárez, et al., 2013) . En la Figura 2.2 se observa las estructuras de los dos reactivos que se utilizan para formar el SBR.

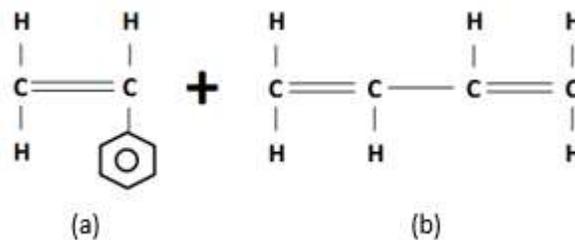


Figura 3.2 Estructura de (a) Estireno y (b) Butadieno (Juárez, et al., 2013)

Una vez que se da el proceso de polimerización se forma el polímero SBR que se muestra a continuación

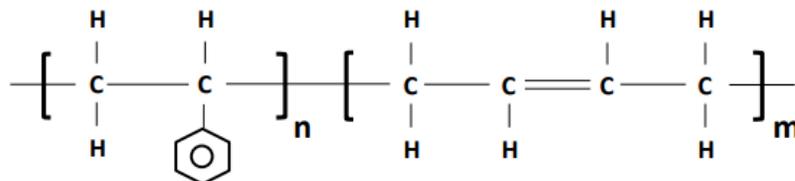


Figura 3.3 Estructura del polímero SBR formado a partir del Estireno y Butadieno respectivamente (Juárez, et al., 2013)

Este es de los cauchos sintéticos más utilizados, con alrededor del 60% de la producción total de cauchos sintéticos del mundo, siendo la industria del neumático la mayor demandante de este caucho (Juárez, et al., 2013).

El uso del SBR mejora la ductilidad a bajas temperaturas, aumenta la viscosidad, mejora las propiedades de recuperación elástica relacionada con la fatiga, así como las propiedades de adhesión y cohesión del asfalto. El beneficio del uso del SBR se debe a que las partículas son muy pequeñas y regulares, por esta razón, cuando se mezclan con el ligante, se dispersan rápida y uniformemente (Palma, et al., 2015).

3.3.2 Estireno-Butadieno-Estireno/SBS

El estireno-butadieno-estireno es un polímero que está constituido por una corta cadena de poliestireno, seguida por otra larga cadena de polibutadieno y finalmente por otra corta cadena de poliestireno (Juárez, et al., 2013). En la Figura 2.4 se muestra la estructura de la cadena de estireno-butadieno-estireno.

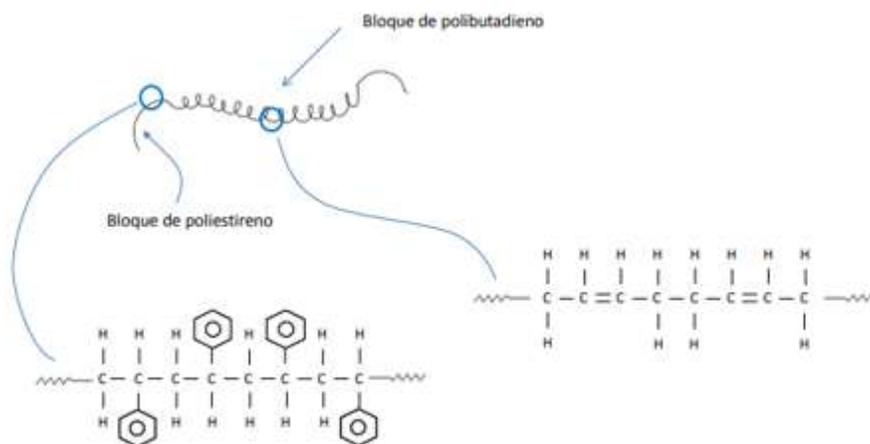


Figura 3.4 Estructura del polímero de SBS a partir de las cadenas de poliestireno y polibutadieno (Juárez, et al., 2013)

Es un caucho duro, que se usa para hacer objetos donde la durabilidad es un factor importante. Esta familia de elastómeros ha tenido una gran participación en el mercado de los asfaltos modificados durante los últimos años. Con la adición de estos polímeros al asfalto se aumenta el intervalo de plasticidad y se disminuye la susceptibilidad térmica, además de mejorar la adhesión (Palma, et al., 2015)

3.3.3 Terpolímero-Elastomérico-Reactivo/TER

El TER es un polímero que se acerca a los elastómeros en cuanto a la suavidad y flexibilidad, sin embargo, puede ser considerado como termoplásticos de acuerdo a sus propiedades, por lo que este tipo de material recibe el nombre de elastómero/termoplástico (Kar, Pandey, & Rana, 2014). Su composición está conformada por una columna de estireno que incorpora dos polímeros: Acrilato de Butilo y el Glicidil Metacrilato (Du Pont, 2018). En la Figura 2.5 se muestra la estructura del TER.

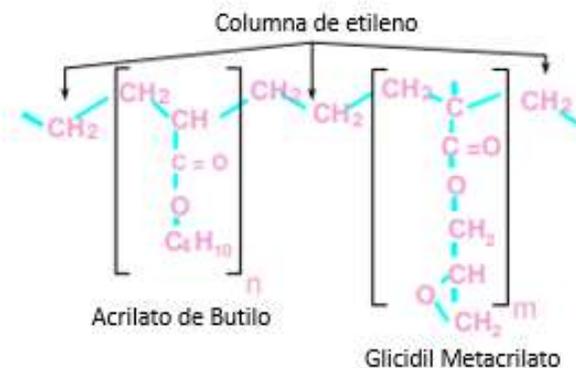


Figura 3.5 Estructura molecular del TER formado a partir del Acrilato de Butilo y Glicidil Metacrilato respectivamente (Du Pont, 2018).

En el proceso de modificación de asfalto utilizando este polímero, se utiliza el ácido fosfórico (PPA) como catalizador para acelerar la reacción y favorecer la dispersión en el mezclado (Du Pont, 2018). Los polímeros TER son muy compatibles con los asfaltos y son frecuentemente usados como agentes modificadores (Avellan, 2007). Algunas ventajas que brinda el uso del TER son:

- Poseen una buena estabilidad térmica.
- Los asfaltos modificados con este polímero tienen una excelente resistencia a la fatiga provocada por cargas repetidas.
- Aumentan la adhesión de las mezclas a medida que se aumenta el contenido de polímero.
- Mejora el desempeño de la mezcla asfáltica a temperaturas altas
- La reacción química del polímero en el asfalto permite el almacenamiento y envío a largas distancias aún a bajas temperaturas con excelente compatibilidad.
- Es un producto diseñado específicamente para la modificación del asfalto.

Capítulo 4. Asfaltos Modificados

4.1 ¿Qué es un asfalto modificado?

Los ligantes asfálticos modificados son el producto de la incorporación de un polímero a un asfalto. Dichos polímeros son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como al envejecimiento. Los polímeros producen una actividad superficial iónica que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia de agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura (Avellan, 2007).

La obtención de un buen mezclado entre el asfalto y polímero dependerá de la estructura química del polímero que le permita una buena dispersión. El grado de modificación en la elasticidad dependerá del tipo de polímero empleado y su concentración. Los nuevos procesos en los cuales el polímero se asocia con el asfalto a través de una reacción química, incrementan notablemente las propiedades reológicas del asfalto (Wulf, 2008).

4.2 Proceso de modificación del asfalto

El efecto principal de añadir polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación entre viscosidad y temperatura, de modo que permite mejorar el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas (Múnera, 2012).

Para que la modificación de asfalto se realice de forma adecuada y eficiente se debe tomar en cuenta los siguientes factores: tipo de polímero, dosificación, elaboración y las

condiciones de almacenamiento. Durante el proceso de modificación, el polímero debe crear una red continua de trabajo en el asfalto. Los polímeros que son compatibles con el ligante producen rápidamente un asfalto estable, aplicando las técnicas convencionales de preparación. Los sistemas convencionales de preparación de asfaltos modificados con polímeros consisten en recipientes de mezclado con paletas agitadoras a velocidades lentas, o recipientes especiales que favorecen la recirculación con agitadores mecánicos de corte de gran velocidad (Robinson, 2005).

Una vez terminado el proceso, el asfalto modificado es una mezcla con una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero, esto a bajas concentraciones. No obstante, si la concentración de polímero es alta se presentan dos fases: una fase formada por pequeñas partículas de polímero y la otra por asfalto. (Salcedo & Gallardo, 2008).

Las propiedades físicas del asfalto están estrictamente relacionadas con la adsorción del ligante con el medio de dispersión, por lo que la interacción con los polímeros genera un efecto sobre el asfalto. Cuando un polímero elastomérico o elastomérico/termoplástico se agrega al ligante, este empieza a penetrar las partículas del polímero. Bajo este fenómeno, el polímero empieza a hincharse y a solventarse en el ligante, convirtiéndose en una fase móvil que comienza a dispersarse en el asfalto por lo que se presenta una combinación de dos fases, por lo que se considera un sistema bifásico (Mcnally, 2011).

Este sistema de dos fases consiste en: una fase rica en polímero PRP (Polymer Rich Phase) y una rica en asfalto ARP (Asphalt Rich Phase). Primeramente, cuando el polímero es incorporado al asfalto, este empieza a introducirse en las partículas del polímero por medio de la interacción de los grupos polares de los asfaltenos con otros grupos del polímero como los aromáticos o grupos polares. En esta etapa la fase predominante es la ARP, la cual es una fase continua. Seguidamente el polímero al aumentar su tamaño (hincharse) este se acopla a la red asfáltica y empieza a dispersarse de manera uniforme. En este punto, el polímero empieza a predominar sobre el asfalto por lo que la fase PRP se vuelve la fase

continúa de modo que el asfalto adapta las propiedades de dicho polímero (Polacco, Filippi, Merussi, & Stasna, 2015). En la Figura 4.1 se muestra un diagrama donde se muestra el comportamiento del polímero en el asfalto, así como sus respectivas fases.

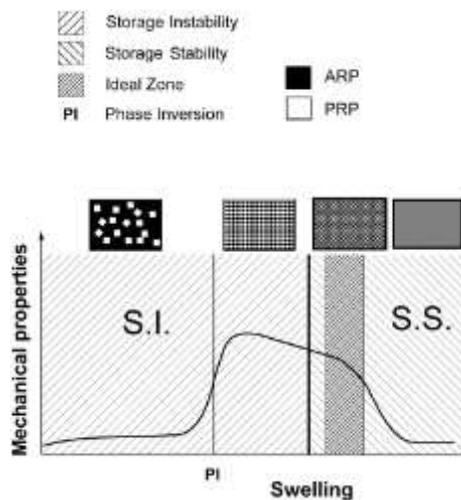


Figura 4.1 Diagrama de dispersión de fases polímero-asfalto (Polacco, Filippi, Merussi, & Stasna, 2015)

4.3 Condiciones de modificación del asfalto

El proceso de modificación puede variar según el tipo de polímero. Algunos requieren etapas de molienda, diferentes temperaturas de mezclado, proceso de curado y otros que solo requieren de una agitación. De forma general, se mencionan ciertas condiciones para la modificación de algunos tipos de polímero (Wulf, 2008).

- **Modificación con SBR:** La temperatura de modificación utilizando este polímero generalmente es de 160 a 170 °C. El tiempo de mezclado normalmente oscila entre 1,5 a 2 horas.

- **Modificación con SBS:** Las temperaturas de mezclado son de 180 a 190 °C mientras que la agitación tiene un tiempo aproximadamente de 2 horas.
- **Modificación con TER:** Para la incorporación de este polímero al asfalto, el mezclado se realiza a temperaturas entre 180 y 190 °C a un tiempo aproximadamente de 2 – 2,5 horas.

Es importante indicar que las condiciones pueden variar según el proveedor del polímero.

4.5 Caracterización de los asfaltos

Tanto los asfaltos modificados como los asfaltos sin modificar se pueden caracterizar por grado de viscosidad ASTM D 3381 y grado de desempeño AASHTO M320 y AASHTO M332 los cuales se encuentran en la guía para emulsiones asfálticos, la realización de ensayos y clasificación de asfaltos del Reglamento Técnico Centroamericano (Salazar, 2011).

4.5.1 Grado de Viscosidad

Esta caracterización consiste en determinar la viscosidad absoluta a 60 °C y asignar el grado de viscosidad (AC). A continuación se detalla los ensayos para esta caracterización (Salazar, 2011).

- **Viscosidad a 60 °C:** Esta prueba se realiza para cuantificar la consistencia del asfalto a una temperatura de 60 °C. Esta prueba se realiza al asfalto original y el que se ha sometido al envejecimiento por RTFO (ASTM D2171, 2010).
- **Viscosidad Cinemática a 135 °C:** Determina el comportamiento del material a una temperatura de 135 °C que son las condiciones usuales de almacenamiento, transporte y bombeo de asfalto. Este parámetro junto con la viscosidad absoluta a

60 °C se utiliza en el cálculo de temperaturas de mezclado y compactación (ASTM 2170, 2010)

- **Penetración a 25 °C:** Cuantifica la consistencia del asfalto y se utiliza como guía y para la caracterización por grado de penetración (ASTM D5, 2013)
- **Punto de inflamación con copa abierta Cleveland:** Este parámetro indica la temperatura mínima a la cual el asfalto empieza a generar vapores potencialmente inflamables por lo que es importante para considerar el almacenaje y transporte (ASTM D92, 2013)
- **Solubilidad en tricloroetileno:** Esto indica el porcentaje de contaminantes en el asfalto. La porción de asfalto soluble en tricloroetileno está constituida por los elementos aglomerantes activos, la parte insoluble es considerada materia inerte (ASTM D70, 2010)
- **Cambio de masa en horno de película delgada TFO/RTFO:** Consiste en evaluar la susceptibilidad al endurecimiento o envejecimiento de tendría el asfalto durante el mezclado. El resultado obtenido se expresa como pérdida de masa o ganancia de masa. Esta tendencia al envejecimiento se mide por un cambio de masa comparando la masa original respecto a la masa luego del calentamiento en el horno RTFO (ASTM International, 2014).
- **Ductilidad a 25 °C (al residuo RTFO):** Mide la capacidad del asfalto a la elongación antes de romperse, bajo condiciones controladas. Los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente susceptibles a los cambios de temperatura y por lo tanto a la deformación (ASTM D113, 2013)

En el Cuadro 4.1 se muestra las especificaciones para cementos asfálticos clasificados por grado de viscosidad según el RTCA 75.01.22:04 Decreto Ejecutivo N°32812 COMEX-MINAE-MEIC, La Gaceta N°245 del 20 de diciembre de 2005 (Salazar, 2011)

Cuadro 4.1 Especificaciones para cementos asfálticos clasificados por grado de viscosidad (Salazar, 2011)

Ensayo	Unidades	ASTM	Grado de viscosidad					
			AC-25	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad a 60 °C	N·s/m ²	D2170	250 ± 50	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ± 400	3000 ± 600	4000 ± 800
Viscosidad a 135 °C	mm ² /s	D2170	125	175	250	300	350	400
Penetración 25 °C	1/10 mm	D5	220	140	80	60	50	40
Punto de inflamación	°C	D92	163	177	219	232	232	232
Solubilidad en tricoetileno								
Residuo RTFO	-	D1754	-	-	-	-	-	-
Viscosidad a 60 °C envejecido	N·s/m ²	D2171	1250	2500	5000	10000	15000	20000
Ductilidad a 25 °C	Cm	D113	100	100	75	50	40	25

4.5.2 Grado de Desempeño

El grado de desempeño consiste en medir propiedades mecánicas y físicas, además trata de simular el ciclo de vida útil del asfalto desde el asfalto original hasta la operación en el pavimento a partir de la medición de diversos parámetros con el fin de prevenir los deterioros. El proceso de caracterización consiste en realizar los envejecimientos en el horno de película delgada rotacional (RTFO) y en el recipiente de envejecimiento presurizado (RTFO+PAV) para medir las propiedades reológicas de la muestra en condición original, la muestra acondicionada RTFO y la muestra acondicionada RTFO+PAV. A continuación, se detalla los diferentes ensayos de esta caracterización (Salazar, 2011).

- **Viscosidad Dinámica a 135 °C:** El ensayo se realiza con un viscosímetro rotacional, el cual caracteriza la rigidez del asfalto a 135 °C. Este equipo consiste en un cilindro rotacional que mide la viscosidad por medio del torque. La especificación limita un valor menor a 3 Pa·s para garantizar un bombeo manejable del asfalto durante la producción de mezcla asfáltica (ASTM D4402, 2015)
- **Efecto del calor y el aire en una película delgada de asfalto en RTFO:** Este ensayo consiste en simular el endurecimiento por la oxidación que ocurre durante el mezclado en caliente y la colocación (ASTM D2872, 2012).
- **Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos utilizando PAV:** Este ensayo es otra etapa de envejecimiento que se mide posterior al envejecimiento por RTFO, donde se simula el endurecimiento por oxidación a largo plazo que sufre el ligante después de varios años de servicio en un pavimento (ASTM D6521, 2013).
- **Determinación de propiedades reológicas de materiales bituminosos:** Se utiliza el Reómetro de Corte Dinámico (DSR) para caracterizar las propiedades visco-elásticas del asfalto original, el envejecido por RTFO y envejecido por PAV. Los parámetros a medir son el complejo en corte (G^*) y el ángulo de fase (δ). El valor de G^* y δ se obtienen a partir de la deformación de corte específica del espécimen sometido a un torque (ASTM D7175, 2015).

4.6 Propiedades de los asfaltos modificados

El objetivo de la adición de polímeros en el asfalto es modificar tanto las propiedades físicas como reológicas, buscando mejorar el ligante de la siguiente forma (Robinson, 2005):

- aumento en la viscosidad para evitar efectos del envejecimiento y la acción del agua contra el pavimento.
- aumento en la recuperación elástica para disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga.
- mejora en las propiedades de adhesión y cohesión para que haya una mayor interacción entre el asfalto y el agregado de modo que sea difícil de romper ya que de esta forma se tendría mejores propiedades en contra del deterioro por humedad, agrietamiento y envejecimiento

4.7 Determinación de la propiedad de adhesión en asfaltos

Una de las propuestas para medir la adhesión por tracción es mediante el Ensayo de Adherencia de Bitumen. Se puede complementar el ensayo por goniometría para medir el ángulo de contacto entre el asfalto y el agregado, que es utilizado para estudiar la adhesión (Aguiar, et al., 2014). A continuación, se detallan ambos ensayos

4.7.1 Ensayo Bitumen (ABS)

En este ensayo se utiliza un instrumento neumático para medir la adhesión por tracción. El equipo que se utiliza es el PATTI, que es típicamente utilizado en la industria de pinturas. Para la medición primero se preparan las muestras de agregado, los cuales deben ser pulidas inicialmente y limpiadas en un baño ultrasónico de manera que no exista entrapamiento mecánico entre las superficies. Posteriormente, una muestra de asfalto se coloca en tornillos metálicos de diámetro conocido y estos son posteriormente presionados contra la superficie del agregado. Este tipo de análisis intenta predecir si el material va a fallar en la adhesión entre el agregado y el asfalto, o por la resistencia cohesiva del asfalto (Aguiar, et al., 2014)

4.7.2 Ensayo por Goniometría

El ensayo tiene como objetivo medir la adhesión y afinidad del asfalto por medio de la caracterización de la humedad en la superficie de agregado por parte del ligante. Se cuantifica que la fuerza entre interacción entre el asfalto y el agregado en relación a la interacción molecular de los materiales. Para realizar este ensayo, se utiliza el Goniómetro, el cual es un equipo que logra capturar el perfil del asfalto sobre un sustrato sólido. El ángulo de contacto es el que se forma entre el interfaz líquido/sólido, que en este caso sería asfalto/agregado y está basado bajo el método de Sésil (Aguiar, et al., 2014). Este método consiste en determinar la energía superficial de un sólido por medio de una gota de líquido con una energía superficial conocida y su ángulo de contacto formado en el sistema líquido/sólido (Shuster, Rosenberger, & Schvezov, 2014). En la Figura 4.2 se observa el ángulo de contacto formado entre la gota y una superficie.

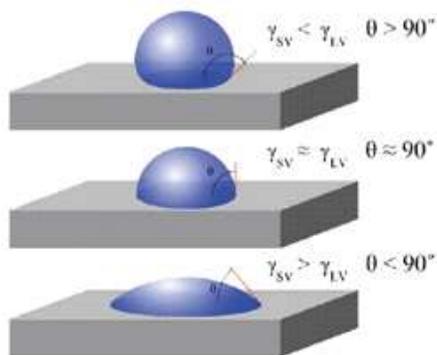


Figura 4.2 Medición de diferentes ángulos de contacto de una gota líquida sobre una superficie sólida (Ramírez, 2011)

El Goniómetro, mediante una cámara de alta resolución y software de procesamiento de imágenes captura y analiza el ángulo de contacto. Las muestras se preparan de una manera muy similar a las del ensayo de Bitumen, sin embargo, la muestra de asfalto se aplica directamente a la superficie del agregado (Aguiar, et al., 2014).

Capítulo 5. Metodología Experimental

Para este proyecto de investigación se tiene como objetivo principal determinar la propiedad de adhesión de los asfaltos modificados con distintos tipos de agregado de pavimentos asfálticos bajo las condiciones de acondicionamientos establecidas.

Con el fin de cumplir dicho objetivo se estableció una metodología de trabajo la cual se presenta a continuación:

1. Modificación del asfalto M - 1468 - 13 con los polímeros SBR, SBS y TER
2. Caracterización de los asfaltos modificados
3. Diseño del análisis multivariable de varianza MANOVA
4. Ejecución del diseño MANOVA a partir de la medición de la resistencia a la separación (valor de POTS) y el ángulo de contacto de los asfaltos modificados para determinar su adhesión estableciendo como factores el tipo de polímero utilizado para la modificación, tipo de agregado y el acondicionamiento
5. Comparación de los resultados de los asfaltos modificados con asfalto sin modificar

Para la modificación de los asfaltos es de suma importancia tener claro todas las condiciones de modificación como la agitación, temperatura de operación, tiempo de mezclado y la dosificación. Por otro lado, la caracterización debe llevarse a cabo con los procedimientos establecidos en las normas respectivas de cada ensayo. En la siguiente Figura se muestra un diagrama de proceso donde incluye todos los pasos a seguir de la metodología experimental.

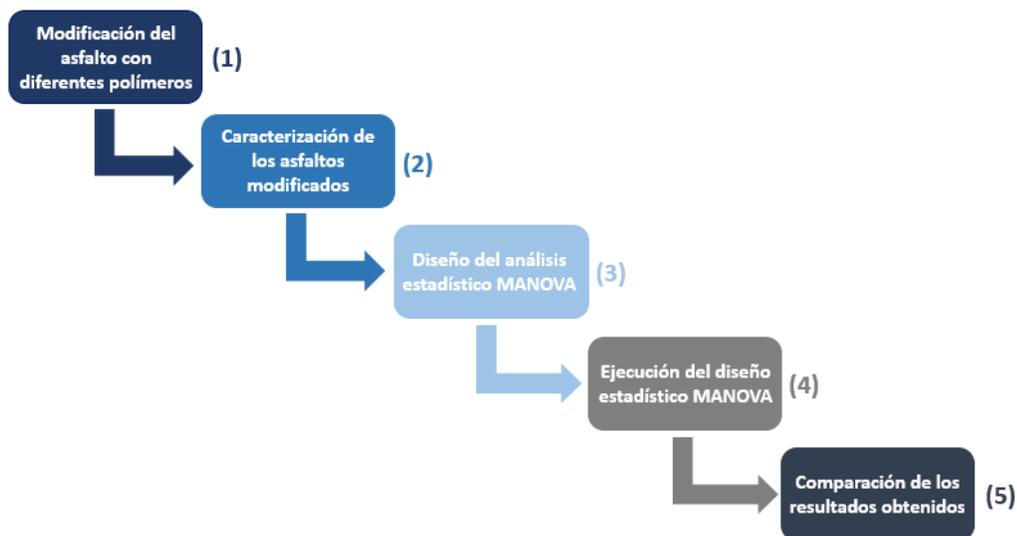


Figura 5.1 Procedimiento experimental.

5.1 Materiales

Se trabajó con la muestra de asfalto M-1468-13 grado AC-30 para realizar las modificaciones con los polímeros SBR, SBS y TER, los cuales fueron suministrados por el LANAMME. A continuación, en el Cuadro 5.1 y Cuadro 5.2 se presenta tanto las propiedades físico-químicas de las sustancias como los datos de toxicidad, seguridad y disposición de residuos respectivamente.

Cuadro 5.1 Propiedades físico-químicas de las sustancias utilizadas.

Nombre	Punto Fusión (°C)	Punto Ebullición (°C)	Punto Inflamación (°C)	Densidad a 25 °C (g/ml)
Agua	0	100	-	1
Asfalto	70-160	480	260	1
Ácido polifosfórico (PPA)	550	-	-	2,05
Estireno-Butadieno-Caucho (SBR)	150-180	-	410	0,92
Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)	160-200	-	430	0,94
Terpolimero Elastomérico Reactivo (TER)	70-130	-	340	0,92

Cuadro 5.2 Propiedades toxicológicas y de seguridad de las sustancias utilizadas.

Sustancia	Peligrosidad	Disposición de residuos
Agua	-	-
Asfalto	Inflamable	Recipiente correspondiente para incineración
Ácido polifosfórico (PPA)	Irritante, corrosivo	Neutralización, desecho por la pila
Estireno-Butadieno-Caucho (SBR)	-	Contenedor respectivo
Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)	-	Contenedor respectivo
Terpolimero Elastomérico Reactivo (TER)	-	Contenedor respectivo

5.2 Equipos

Todos los equipos utilizados en el proyecto se presentan en el Cuadro 5.3

Cuadro 5.3 Equipos utilizados para el proyecto de graduación

Equipo	Fabricante	Placa	Incertidumbre
Balanza granataria	Ohaus	348678	$\pm 0,2$ g
Horno de convección	Humboldt	294186	± 2 °C
Agitador	IKA EUROSTAR 60	367868	± 3 rpm
Balanza de analítica	Ohaus	175286	$\pm 0,0001$ g
Controlador de temperatura	OGDEN	-	± 2 °C
Horno rotatorio de película delgada (RTFO)	James Cox & Sons Inc.	170233	± 1 °C
Horno envejecimiento acelerado a presión (PAV)	ATS	181176	$\pm 0,5$ °C / $\pm 0,05$ MPa
Agitador programable para viscosidad dinámica	BROOKFIELD	283100	± 2 rpm / ± 2 %
Controlador de temperatura programable	BROOKFIELD	-	± 2 °C
Reómetro de corte dinámico (DSR)	TA Instruments	238722	-

Cuadro 5.3 (Continuación) Equipos utilizados para el proyecto de graduación

Equipo	Fabricante	Placa	Incertidumbre
Reómetro de vigas de flexión (BBR)	ATS	294188	-
Baño ultrasónico 028	BRANSON 5510	282437	-
Baño ultrasónico	PolyScience	348602	-
Pistón de presión PATTI	QUANTUM GOLD	-	-
Cámara de video	ramé-hart	348603	-
Iluminador de fibra óptica	ramé-hart	348604	-
Regulado de temperatura	ramé-hart	348605	-

5.3 Modificación del asfalto original

Para modificar el asfalto original se utiliza los polímeros SBR, SBS y TER. La modificación se realiza en un recipiente con calentamiento, un panel para regular la temperatura y un agitador de dispersión. La adición del polímero se realiza lentamente a la temperatura establecida y manteniendo la agitación constante. En la Figura 5.2 se muestra el sistema utilizado para la modificación de asfaltos y en el Cuadro 5.4 la masa de asfalto, las dosis de polímero y las condiciones de modificación.



Figura 5.2 Sistema para la modificación de asfalto.

Cuadro 5.3 Datos básicos de asfalto - polímero y condiciones de modificación

Masa asfalto (g)	Polímero	Porcentaje polímero (%)	Porcentaje PPA (%)	Tiempo mezclado 1 (min)	Tiempo mezclado 2 (min)	Temperatura de trabajo (°C)
801	SBR	2	-	180	-	170
766,4	SBS	2,5	-	240	-	180
921,4	TER	1	0,2	90	30	185

5.4 Caracterización de los asfaltos modificados

El asfalto original y modificado se caracteriza según la Clasificación de Grado de Desempeño, que incluye los siguientes ensayos:

- Viscosidad dinámica rotacional a 135 °C – ASTM D4402
- Módulo de deformidad con reómetro de corte dinámico DSR – ASTM D7175
- Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada rotativa RTFO – ASTM D2872
- Módulo de deformidad con reómetro de corte dinámico al residuo de RTFO – ASTM D7175
- Efecto de envejecimiento acelerado a presión PAV – ASTM D6521
- Módulo de fatiga con reómetro de corte dinámico al residuo de PAV – ASTM D7175
- Módulo de rigidez con reómetro de vigas de flexión a residuo de PAV (BBR) – ASTM D6648

5.4.1 Viscosidad dinámica rotacional a 135 °C – ASTM D4402

Este método consiste en determinar la viscosidad del asfalto a diferentes temperaturas mediante un viscosímetro rotacional y una cámara térmica de temperatura controlada. Se trasvasa 13,1 g de asfalto a unos contenedores cilíndricos metálicos como se muestra en la Figura 5.3 y luego son colocados en la cámara.



Figura 5.3 Muestra de asfalto modificado para viscosímetro.

Se programa la temperatura a 135 °C y se deja la muestra por un tiempo de 30 min para su fluidización. Una vez transcurrido el tiempo se coloca la muestra en el viscosímetro. Por medio del torque del viscosímetro se mide la resistencia relativa rotacional del asfalto modificado a diferentes velocidades. Este ensayo se realiza por duplicado para cada asfalto modificado. El equipo se muestra en la Figura 5.7.



Figura 5.4 Viscosímetro rotacional y la cámara térmica de temperatura controlada.

5.4.2 Módulo de deformidad con reómetro de corte dinámico DSR – ASTM D7175

El ensayo consiste en medir el módulo complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) de los ligantes asfálticos modificados por medio de un reómetro de corte dinámico para determinar la temperatura superior la cual el asfalto no es susceptible a la deformación permanente. Las muestras de asfalto se vierten en moldes con diámetro de 25 mm de espesor. Las mediciones se hacen a tres temperaturas: A la temperatura a la que se espera que la muestra cumpla con el requisito de la especificación, un grado PG anterior, y un grado PG posterior. Los grados PG corresponden a saltos de 6 °C.

Se obtiene la relación de módulo complejo con respecto al seno del ángulo de fase a las diferentes temperaturas ($G^*/\sin(\delta)$) y se establece como temperatura superior aquella a la cual el valor de la relación $G^*/\sin(\delta)$ que es mayor a 1,00 kPa.

5.4.3 Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada rotativa RTFO – ASTM D2872

En este ensayo se trabaja con una muestra de asfalto de $(35 \pm 0,5)$ g. La masa se trasvasa a unos recipientes de forma cilíndrica previamente pesados en una balanza analítica o semi-analítica y seguidamente se colocan en el portamuestras del horno de película delgada rotatorio. Se trabajó con 6 cilindros, 2 por cada asfalto modificado y se muestra en la siguiente Figura.



Figura 5.5 Muestras de asfalto para RTFO

La muestra se mantiene durante 85 min en el horno a una temperatura de 163 °C. Al mismo tiempo el flujo de aire se mantuvo a 4 L/min. Una vez finalizado el tiempo, los cilindros se enfrían a temperatura ambiente para luego volver a pesarlos y determinar la masa final de las muestras. Según la especificación, el cambio de masa no debe exceder el 1%. El equipo RTFO se muestra en la Figura 5.6.



Figura 5.6 Horno de película delgada rotativa horizontal – RTFO.

5.4.4 Módulo de deformidad con reómetro de corte dinámico al residuo de RTFO – ASTM D7175

Este ensayo mide el módulo complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) de los ligantes asfálticos modificados pero envejecidos en el RTFO para corroborar la temperatura superior. El propósito es determinar el efecto del envejecimiento en el RTFO en la susceptibilidad del asfalto a la deformación permanente. Se utilizan también los moldes que son de 25 mm y se trabaja a tres temperaturas también. En este caso se establece como temperatura superior aquella a la cual el valor de la relación $G^*/\sin(\delta)$ que es mayor a 2,20 kPa. Se define como temperatura superior la más crítica entre el asfalto antes y después del acondicionamiento en el RTFO.

5.4.5 Efecto de envejecimiento acelerado a presión (PAV) – ASTM D6521

Se utiliza muestras de $(50 \pm 0,5)$ g de asfalto envejecidos en el RTFO. El ensayo se hace por duplicado para cada asfalto modificado, en discos metálicos previamente pesados. Las muestras se mantienen en el acondicionamiento durante 20 horas a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a $2,1\text{ MPa}$, como lo establece la especificación. En la Figura 5.7 se puede observar el recipiente de envejecimiento acelerado a presión (PAV)



Figura 5.7 Horno de envejecimiento acelerado a presión – PAV.

5.4.6 Módulo de fatiga con reómetro de corte dinámico al residuo de PAV – ASTM D7175

El ensayo tiene como propósito evaluar la susceptibilidad del asfalto al agrietamiento por fatiga. Para este ensayo los moldes que se utilizan son de 8 mm. Se sigue el mismo procedimiento de los ensayos por módulo de deformabilidad con el reómetro de corte dinámico, pero a temperaturas intermedias. En este caso los grados PG corresponde a saltos de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se establece como temperatura intermedia aquella a la cual el valor de la relación $(G^* \cdot \sin(\delta))$ sea inferior o igual a $5,00\text{ MPa}$. En la Figura 5.8 se muestra el reómetro.



Figura 5.8 Reómetro de corte dinámico.

5.4.7 Módulo de rigidez con reómetro de vigas de flexión al residuo de PAV – ASTM D6648

Este ensayo se utiliza para determinar la temperatura inferior a la cual el asfalto es susceptible al agrietamiento por temperatura. El asfalto se vierte en moldes de 125 mm x 12,5 mm x 6,25 mm para formar las vigas que son acondicionadas a la temperatura de ensayo por un tiempo de 60 minutos. Las mediciones se hacen a tres temperaturas, aplicando el mismo criterio de las mediciones reológicas. Los saltos de grado PG también son de 6 °C, pero por debajo de la temperatura de congelación del agua: -6 °C, -12 °C, -18 °C y -24 °C. Se reporta como temperatura de PG la temperatura de ensayo más -10 °C.

Una vez acondicionadas las muestras se aplica una carga de 980 mN por 240 segundos. El sensor registra la deflexión y se grafica con respecto al tiempo. A partir de estos datos se reporta la rigidez a la fluencia (S) y la pendiente (m) a los 60 s. La temperatura inferior es aquella a la cual el valor de S no sobrepase los 300 MPa y m sea 0,300 como mínimo. En la Figura 5.9 se puede observar el reómetro de vigas de flexión



Figura 5.9 Reómetro de vigas de flexión.

5.5 Diseño estadístico

Con el fin de evaluar la propiedad de adhesión a partir de la resistencia a la separación y el ángulo de contacto (variables respuesta o dependientes) de los asfaltos modificados con los polímeros SBS, SBR y TER en los diferentes agregados y acondicionamientos (variables independientes), se procedió a realizar un análisis multivariable de varianza con correlaciones y así determinar si las variables independientes tienen efectos significativos sobre las variables respuestas. Al mismo tiempo identificar las posibles interacciones entre las variables polímero, agregado y acondicionamiento y su grado de asociación con respecto a la resistencia a la separación y el ángulo de contacto. A continuación, en el Cuadro 5.5 se muestra una matriz con todas las combinaciones de las variables a estudiar, así como el número de corridas para evaluar tanto la resistencia a la separación como el ángulo de contacto.

Cuadro 5.4 Matriz del diseño estadístico con todas las combinaciones de las variables polímero, agregado y acondicionamiento para la evaluación de la resistencia a la separación y ángulo de contacto

# de corrida	Polímero	Agregado	Acondicionamiento
1	P1	A1	C1
2	P2	A2	C1
3	P3	A1	C2
4	P1	A2	C2
5	P2	A1	C1
6	P3	A2	C1
7	P1	A1	C2
8	P2	A2	C2
9	P3	A1	C1
10	P1	A2	C1
11	P2	A1	C2
12	P3	A2	C2

En el Cuadro 5.6 se muestra los tipos polímeros, los agregados y los acondicionamientos a utilizar para el experimento con su notación correspondiente.

Cuadro 5.5 Clasificación de las variables tipo de polímero, agregados y acondicionamiento con sus notaciones respectivas

Variable	Clasificación	Notación
Polímero	SBR	P1
	SBS	P2
	TER	P3
Agregado	Silícica	A1
	Caliza	A2
Acondicionamiento	Seco	C1
	Húmedo	C2

5.6 Ensayo de Adherencia de Bitumen (ABS) – AASHTO TP91-11

Este ensayo se utiliza para medir la resistencia requerida para separar el asfalto del agregado a partir de un valor de POTS (Pull-Out Tension Strenght) que se reporta en MPa.

Para ello se utiliza el equipo de PATTI (ASTM D4541) que en principio fue empleado en la industria de pinturas y de sellado. En la Figura 5.10 se puede observar el equipo.



Figura 5.10 Equipo PATTI para medir el valor de POTS.

Se trabaja con muestra de agregados previamente pulidos para minimizar el entramamiento mecánico entre el asfalto y el agregado y de esta forma asegurar una rugosidad uniforme y consistente. Seguidamente las piedras se colocan en un baño ultrasónico por 1 hora para limpiar cualquier residuo que haya quedado en la superficie. En la Figura 5.11 se pueden observar los dos tipos de agregados utilizados.



Figura 5.11 Agregado de piedra tipo caliza y silícica.

Para reducir las variables que pueden afectar el resultado, se decide usar una masa constante en todas las mediciones de $(0,40 \pm 0,05)$ g. El asfalto se coloca en tornillos metálicos de 20 mm diámetro con una geometría establecida con sobre bordes como se presenta en la Figura 5.12.



Figura 5.12 Muestras de asfalto en tornillos metálicos

Posteriormente los tornillos son presionados contra la superficie de los agregados por medio de un pistón F2. Los agregados a utilizar son de tipo calizo y silíceo debido a que son los más utilizados en el país a la hora de realizar mezclas asfálticas para la pavimentación. En la Figura 5.13 se puede observar los tornillos con las muestras de asfalto sobre los agregados.



Figura 5.13 Muestras de asfalto sobre agregados silicio y calizo.

Se debe realizar una calibración del equipo PATTI antes de ejecutar el ensayo, la cual consiste en cargar el medidor neumático con aire a una presión de 100 psi. La presión de tracción es ejercida sobre el pistón y la placa de reacción, ajustados por medio de una prensa. El software PQ QUANTUM GOLD reporta los datos a partir de una gráfica de presión en función del tiempo. No obstante, el software no muestra el valor de la pendiente por lo que se debe elaborar una gráfica para obtener dicho valor.

El proceso se debe realizar variando la cantidad de aire que pasa por el medidor neumático hasta que la pendiente de la gráfica tenga un valor de $100 \pm 0,02$ como se muestra en la Figura 5.14

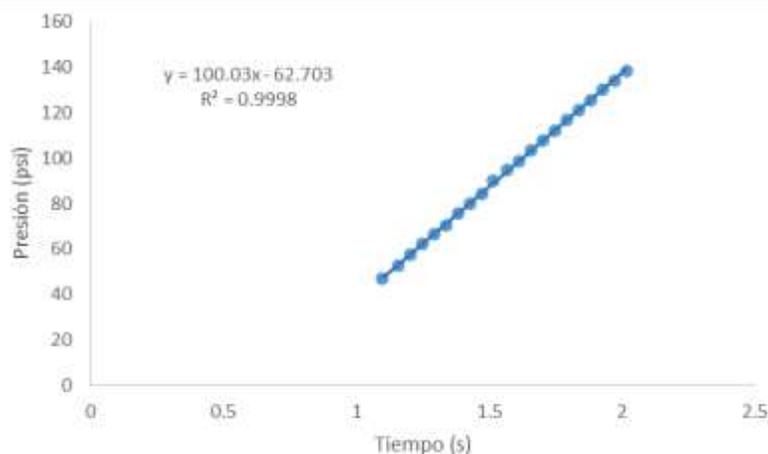


Figura 5.14 Gráfica de calibración para el equipo PATTI (Propio, 2018)

Para el ensayo en acondicionamiento seco se debe esperar un período de 24 h. Posterior a ese tiempo y ya con el equipo calibrado, se somete cada uno de los tornillos a una tasa de carga de 100 psi/s para medir la resistencia a la separación a partir del valor de POTS y este se reporta a través del software QUANTUM GOLD.

Se hacen mediciones adicionales para el análisis en acondicionamiento húmedo, el cual consiste en dejar los agregados junto con los tornillos en un baño de agua a 60 °C por un periodo de 24 h adicionales con respecto a la condición seca. En la Figura 5.15 se presenta el sistema para el acondicionamiento húmedo



Figura 5.15 Sistema de acondicionamiento húmedo para ensayo PATTI

5.7 Ángulo de contacto por Goniometría

Para complementar el ensayo de Adherencia de Bitumen se realizaron adicionalmente ensayos de medición del ángulo de contacto (θ_c) con el propósito de usar una medición directa para predecir la interacción intermolecular entre el asfalto y los agregados. Este ángulo es el que se forma entre el interfaz liquido/sólido.

El método de medición consiste en aplicar una gota de asfalto directamente a la superficie del agregado a una temperatura de 20 °C por medio de una aguja metálica. Los agregados deben estar pulidos con superficie lisa para el ensayo. En la Figura 5.16 se muestra los agregados con las gotas de asfalto



Figura 5.16 Sistema agregado-asfalto para la medición del ángulo de contacto por goniometría.

El goniómetro es un equipo óptico que se utiliza para capturar el perfil de un líquido, en este caso asfalto, sobre un sustrato sólido, el agregado (Aguilar, et al., 2014). Este equipo consiste en una aguja metálica para preparar las muestras de asfalto, una cámara de alta resolución para tomar la imagen, un foco para la iluminación de muestras y un sistema de calentamiento de temperatura controlado para fluidizar las muestras de asfalto.



Figura 5.17 Sistema de medición de ángulo de contacto Goniómetro

Antes de realizar las mediciones se debe calibrar el equipo mediante el software DROPIimage Advanced. Se utiliza una esfera de referencia que es proyectada a través de la cámara y se obtiene una imagen de referencia como se muestra en la Figura 5.18

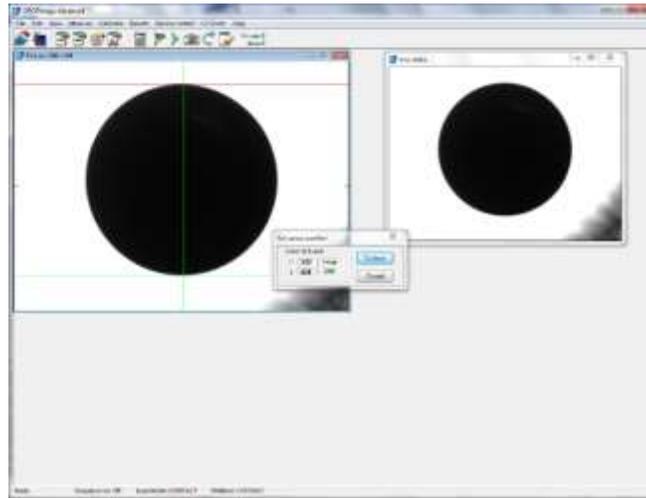


Figura 5.18 Calibración del Goniómetro en DROPIimage Advanced.

Adicionalmente se decide realizar las mediciones con un acondicionamiento húmedo para evaluar el daño por humedad, el cual consiste en dejar las muestras con las gotas de asfalto y sumergirlas en un baño de agua a temperatura ambiente por un periodo de 4 horas y después se le mide el ángulo de contacto. En la Figura 5.19 se presenta el sistema de acondicionamiento húmedo para el ensayo por goniómetro.



Figura 5.19 Sistema de acondicionamiento húmedo para Goniometría

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se muestra a continuación los resultados de la modificación y caracterización del ligante asfáltico, la evaluación de las variables polímero, agregado y acondicionamiento a partir del valor de POTS y el ángulo de contacto, el análisis de datos obtenidos por parte del MANOVA y finalmente la comparación de los asfaltos modificados con respecto al asfalto sin modificar

6.1 Modificación del asfalto con los polímeros SBS, SBR y TER

Uno de los objetivos de la modificación del asfalto es lograr una buena incorporación del polímero en el ligante asfáltico con el fin de obtener una mezcla homogénea. Para ello es importante tomar en cuenta factores como la temperatura, tiempo de mezclado y la cantidad de polímero a utilizar. En los procesos de modificación se trabaja a temperaturas por encima de los 160 °C debido a que se logra una mejor dispersión del polímero en el asfalto favoreciendo de esta manera la interacción entre estos (Chen, Wang, & Cheng-Te, 2017). Es importante considerar que el ligante asfáltico se vuelve completamente líquido a 160 °C y los polímeros SBS, SBR y TER se empiezan a fundir por encima de 130 °C por lo que al trabajar a temperaturas que sobrepasen los 160 °C permite lograr una buena mezcla entre el ligante y el polímero. Se debe además trabajar con tiempos de mezclado que garanticen una distribución homogénea del polímero en la matriz asfáltica. Sin embargo, es importante evitar tiempos de mezcla prolongados, que junto a la exposición de altas temperaturas de operación se podría producir envejecimiento y degradación del asfalto

Para la modificación de la muestra de asfalto M-1468-13 con los tres tipos de polímero, se utilizaron las condiciones de operación y cantidades de polímero recomendados por el personal del LANAMME.

Durante el proceso se debía controlar la temperatura, el tiempo de agitación, la velocidad de adición del polímero para lograr una buena incorporación de forma que no haya problemas de aglomeración ni presencia de grumos de los polímeros. Una manera empírica de corroborar la homogeneidad es colocar una pequeña muestra de asfalto modificado sobre papel toalla como se muestra en la Figura 6.1



Figura 6.1 Muestra de asfalto modificado con TER sobre papel toalla

Se puede observar que la capa de asfalto es uniforme, sin presencia de ningún sólido en el ligante lo cual indica una buena incorporación del polímero, además presenta una buena elasticidad debido a que el ligante no se separa fácilmente. Lo mismo sucedió en la modificación con los polímeros SBR y SBS por lo que la modificación se realizó de forma correcta.

6.2 Caracterización de los asfaltos modificados

Una vez terminada la modificación se tomaron las muestras de los asfaltos modificados para su caracterización. Como primer punto se midió el cambio de masa de los asfaltos

envejecidos en el RTFO. En el Cuadro 6.1 se presentan los resultados obtenidos para los asfaltos modificados.

Cuadro 6.1 Resultados de RTFO obtenidos para los asfaltos modificados

Ensayo	Asfalto	Resultado (%)
Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada rotativa (RTFO)	Modificado con SBR	-0,259
	Modificado con SBS	-0,136
	Modificado con TER	-0,135

En esta prueba se presenta una pérdida de masa de 0,259 % para el asfalto modificado con SBR mientras que para el modificado con los polímeros SBS y el TER se tiene una pérdida de -0,136 % y -0,135 % respectivamente. Esta disminución es debido a la pérdida de compuestos volátiles de la muestra durante el proceso de envejecimiento (ASTM D2872, 2012).

La caracterización de la viscosidad de los ligantes asfálticos modificados se realizó por medio de un viscosímetro rotacional (ASTM D4402, 2015). Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Cuadro 6.2 Resultados de viscosidad dinámica promedio obtenidos a 135 °C para los asfaltos modificados con diferentes polímeros

Ensayo	Asfalto	Viscosidad	
		(mPa·s)	(Pa·s)
Viscosidad dinámica rotacional a 135 °C	Modificado con SBR	1185	1,185
	Modificado con SBS	1379	1,379
	Modificado con TER	1866	1,866

El asfalto con mayor viscosidad es el modificado con el polímero TER y luego le sigue el modificado con SBS y por último el SBR. Esto es debido a que el polímero TER tiene muy

buenas propiedades que mejoran los enlaces internos y además la capacidad de recuperación del asfalto (Avellan, 2007). La viscosidad de la muestra de asfalto M-1468-13 es de 0,531 Pa·s (Jiménez M. , 2016). Este valor es el menor en comparación con los asfaltos modificados. Dicho parámetro también indica la dificultad con se manipula el asfalto ya que entre mayor será, más difícil es de trasvasar

La caracterización por grado de desempeño se realizó a partir de las muestras originales de asfaltos modificados, los envejecidos en el RTFO y PAV mediante un reómetro de corte dinámico (DSR) y el reómetro de vigas de flexión (BBR). En el Cuadro 6.3 se muestra los resultados del ensayo de deformabilidad por reómetro de corte dinámico para el asfalto modificado con SBR.

Cuadro 6.3 Resultados obtenidos del módulo de deformabilidad por DSR para el asfalto modificado con SBR

Temperatura (°C)	Módulo complejo, G^*	Ángulo de fase, δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)
70	2,02	76,87	2,07
76	1,02	78,45	1,04
82	0,55	79,93	0,56

A partir de la relación del módulo complejo y el seno del ángulo de fase se puede determinar susceptibilidad a la deformación permanente del asfalto modificado. Se reporta la temperatura la cual $G^*/\text{sen}(\delta)$ cuyo valor es superior o igual a 1,00 kPa. En este caso se toma la temperatura de 76 °C debido a que la relación del módulo de complejo y el seno del ángulo de fase es de 1,04 kPa (ASTM D7175, 2015). Seguidamente en el Cuadro 6.4 se tiene los resultados de ensayo para el residuo de RTFO por reómetro de corte dinámico del asfalto con SBR.

Cuadro 6.4 Resultados obtenidos del módulo de deformabilidad al residuo RTFO por DSR para el asfalto modificado con SBR

Temperatura (°C)	Módulo complejo, G^*	Ángulo de fase, δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)
70	4,22	73,8	4,4
76	2,13	75,5	2,2
82	1,07	77,0	1,1

Al ligante asfáltico modificado envejecido por RTFO también se le mide la relación del módulo de complejo con respecto al seno del ángulo de fase. En este caso se reporta la temperatura a la cual $G^*/\text{sen}(\delta)$ que sea superior o igual a 2,20 kPa, en este caso es de un valor de 76 °C (ASTM International, 2015).

A partir de la temperatura reportada del asfalto modificado original y el envejecido en el RTFO se determina la temperatura superior para el grado de desempeño del ligante. En este caso la temperatura superior del asfalto modificado con SBR es de 76 °C (ASTM D7175, 2015).

La temperatura intermedia del asfalto modificado con SBR se determinará al residuo PAV por reómetro de corte dinámico. A continuación, en el Cuadro 6.5 se presenta los resultados de dicho ensayo

Cuadro 6.5 Resultados obtenidos del módulo de fatiga al residuo PAV por DSR para el asfalto modificado con SBR

Temperatura (°C)	Módulo complejo, G^*	Ángulo de fase, δ (°)	$G^*\cdot\text{sen}(\delta)$ (kPa)
22	3666,20	39,3	5788,3
25	2780,37	41,1	4229,5
28	2062,45	42,3	3064,5

La temperatura intermedia se reporta a la cual $G^* \cdot \sin(\delta)$ inferior o igual a 5000 kPa por lo que en este caso el valor es de 25 °C (ASTM D7175, 2015).

Por último, se obtiene la temperatura inferior la cual se determina mediante el ensayo con reómetro de vigas de flexión utilizando el asfalto modificado envejecido por PAV. En el Cuadro 6.6 se tiene los resultados de dicho método.

Cuadro 6.6 Resultados obtenidos del módulo de rigidez al residuo PAV por BBR para el asfalto modificado con SBR

Temperatura de ensayo (°C)	Rigidez, S (MPa)	Pendiente, m	Temperatura (°C)
-16	71,816	0,354	-16
-22	139,497	0,321	-22
-28	260,490	0,230	-28

En este caso se debe tomar en cuenta dos valores: la rigidez y la pendiente. Se reporta la temperatura a la cual la rigidez es mayor o igual a 300 MPa y una pendiente que tenga un valor mayor o igual a 0,300 (ASTM D6521, 2013). El valor de la temperatura inferior correspondiente es -22 °C. De esta forma, a partir de la temperatura superior e inferior se tiene que el asfalto modificado con SBR recibe una clasificación PG 76-22.

Para el asfalto modificado con SBS, los resultados de los módulos del ligante modificado original, al residuo de RTFO y al residuo de PAV por reómetro de corte dinámico para el asfalto con SBR se presenta a continuación.

Cuadro 6.7 Resultados obtenidos del módulo de deformabilidad por DSR para el asfalto modificado con SBS

Temperatura (°C)	Módulo complejo, G^*	Ángulo de fase, δ (°)	$G^*/\sin(\delta)$ (kPa)
64	4,42	79,2	4,5

Cuadro 6.7 (Continuación) Resultados obtenidos del módulo de deformabilidad por DSR para el asfalto modificado con SBS

Temperatura (°C)	Módulo complejo, G^*	Ángulo de fase, δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)
70	1,01	82,2	2,0
76	0,99	84,2	1,0

Cuadro 6.8 Resultados obtenidos del módulo de deformabilidad al residuo RTFO por DSR para el asfalto modificado con SBS

Temperatura (°C)	Módulo complejo, G^*	Ángulo de fase, δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)
64	9,98	74,16	10,37
70	4,69	77,80	4,80
76	2,28	80,89	2,31

Cuadro 6.9 Resultados obtenidos del módulo de fatiga al residuo PAV por DSR para el asfalto modificado con SBS

Temperatura (°C)	Módulo complejo, G^*	Ángulo de fase, δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)
22	3664,87	38,53	5883,33
25	2815,64	40,46	4338,98
28	2135,37	42,44	3164,36

La temperatura superior del grado de desempeño se determina a partir del valor de $G^*/\text{sen}(\delta)$ para el asfalto modificado con SBS es de 76 °C y la temperatura intermedia determinada mediante el valor de $G^*\cdot\text{sen}(\delta)$ es de 25 °C. En el caso de la temperatura inferior se debe hacer el análisis respectivo a los resultados que se presentan a continuación

Cuadro 6.10 Resultados obtenidos del módulo de rigidez al residuo PAV por BBR para el asfalto modificado con SBS

Temperatura de ensayo (°C)	Rigidez, S (MPa)	Pendiente, m	Temperatura (°C)
-16	84,231	0,341	-16
-22	193,389	0,299	-22

Tomando en cuenta una pendiente mayor a 0,300 y una rigidez no mayor a 300 MPa la temperatura inferior para este asfalto es de -22 °C. Por lo tanto, el asfalto modificado con SBS tiene un grado de desempeño de PG 76-22.

Finalmente, los resultados para determinar el grado de desempeño del asfalto modificado con TER se presentan en los siguientes Cuadros.

Cuadro 6.11 Resultados obtenidos del módulo de deformabilidad por DSR para el asfalto modificado con TER

Temperatura (°C)	Módulo complejo, G*	Ángulo de fase, δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
70	2,75	66,24	3,00
76	1,52	67,19	1,65
82	0,87	68,85	0,93

Cuadro 6.12 Resultados obtenidos del módulo de deformabilidad al residuo RTFO por DSR para el asfalto modificado con TER

Temperatura (°C)	Módulo complejo, G*	Ángulo de fase, δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
70	6,29	61,88	7,13
76	3,49	62,46	3,94
82	1,99	63,63	2,23

Cuadro 6.13 Resultados obtenidos del módulo de fatiga al residuo PAV por DSR para el asfalto modificado con TER

Temperatura (°C)	Módulo complejo, G^*	Ángulo de fase, δ (°)	$G^* \cdot \text{sen}(\delta)$ (kPa)
22	3344,58	40,03	5200,00
25	2519,64	41,73	3785,40
28	1915,30	43,39	2788,08

Cuadro 6.14 Resultados obtenidos del módulo de rigidez al residuo PAV por BBR para el asfalto modificado con TER

Temperatura de ensayo (°C)	Rigidez, S (MPa)	Pendiente, m	Temperatura (°C)
-16	77,459	0,376	-16
-22	171,235	0,326	-22
-28	309,643	0,288	-28

Para la temperatura superior se le realiza el análisis de los valores de $G^*/\text{sen}(\delta)$ del asfalto modificado original y el envejecido por RTFO. La temperatura superior es de 76 °C. La temperatura intermedia en este caso es de 22 °C. Por último, la temperatura inferior reportada es de -22 °C. De esta forma el asfalto modificado con TER presenta una caracterización por grado de desempeño de PG 76-22.

Con respecto al grado de desempeño del asfalto sin modificar se realizó una recopilación de resultados de los ensayos correspondientes efectuados por el LANAMME. Dichos resultados se presentan a continuación.

Cuadro 6.15 Resultados recopilados de diferentes temperaturas para la obtención del grado de desempeño PG del asfalto sin modificar

Caracterización	Asfalto	Temperatura medida	Valor obtenido (°C)
Grado de desempeño – PG	Sin modificar	Superior	70
		Intermedia	22
		Inferior	-22

A partir de los datos anteriores se determina que el grado de desempeño del asfalto sin modificar es de PG 70-22.

Todos los resultados obtenidos de la caracterización por grado de desempeño se muestran a continuación en el Cuadro 6.16.

Cuadro 6.16 Resumen de datos obtenidos de grado de desempeño PG para los asfaltos modificados

Caracterización	Asfalto	Grado de desempeño PG
Grado de desempeño – PG	Modificación con SBR	PG 76-22
	Modificación con SBS	PG 76-22
	Modificación con TER	PG 76-22
	Sin modificar	PG 70-22

6.3 Diseño del análisis estadístico MANOVA

Para realizar la ejecución del diseño estadístico MANOVA se seleccionaron como variables los polímeros utilizados para la modificación de asfaltos, el tipo de agregado y su acondicionamiento. Se pretende evaluar el efecto de dichas variables sobre la propiedad de adhesión por medio del ensayo de adherencia de Bitumen y de la medición del ángulo de contacto.

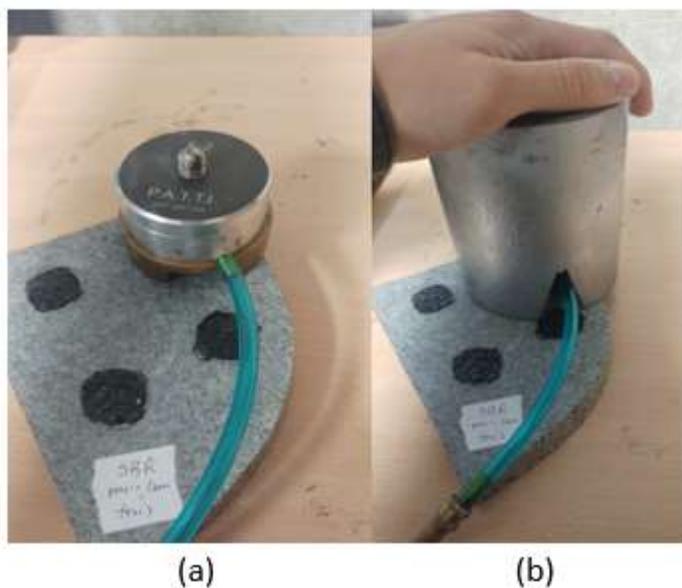


Figura 6.3 Desprendimiento de tornillos en los agregados (a) silíceo y (b) calizo

Seguidamente, en la Figura 6.4 se muestra los agregados después del desprendimiento de los tornillos en acondicionamiento seco

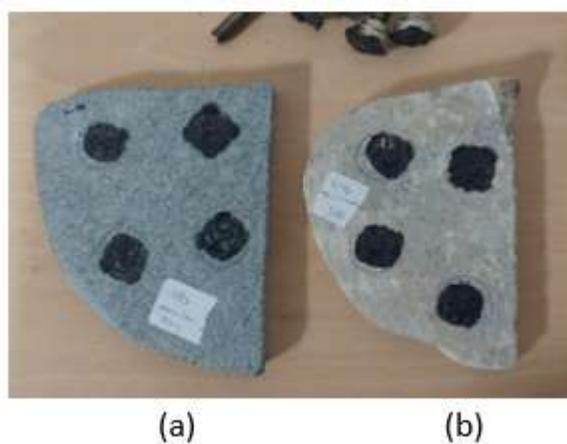


Figura 6.4 Agregados (a) silíceo y (b) calizo posterior al ensayo

El modo de falla mostrado por la huella de asfalto sobre las rocas después de ser arrancados los tornillos indica si es por cohesión o por adhesión. Tanto el agregado silíceo como el calizo presentaron fallos por cohesión debido a la presencia de las huellas asfálticas en la

pedra y en los tornillos. Esto indica que las fuerzas de adhesión de la interface entre el sistema asfalto-agregado fueron mayores en comparación con las fuerzas internas de cohesión de los ligantes asfálticos (Reyes, Cely, & Figueroa, 2017). Visualmente no se aprecia una diferencia significativa; sin embargo, a partir de los valores de POTS se realiza un análisis de carácter cuantitativo para ver el comportamiento del sistema asfalto-agregado. Estos resultados se presentan a continuación en el Cuadro 6.16 y 6.17 para ambos agregados en acondicionamiento seco.

Cuadro 6.17 Valores de POTS promedio obtenidos para el asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado silíceo en condición seca

Ensayo	Agregado	Asfalto	Valor promedio de POTS (kPa)
Fuerza Adherencia de Bitumen (ABS)	Silíceo	Modificado con SBR	234,032
		Modificado con SBS	262,261
		Modificado con TER	287,389
		Sin modificar	211,963

Cuadro 6.18 Valor de POTS promedio obtenidos para el asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado calizo en condición seca

Ensayo	Agregado	Asfalto	Valor promedio de POTS (kPa)
Fuerza Adherencia de Bitumen (ABS)	Calizo	Modificado con SBR	227,492
		Modificado con SBS	253,788
		Modificado con TER	270,779
		Sin modificar	205,474

Los resultados indican que para el asfalto modificado con TER tanto en el agregado silíceo como en el calizo y en condición seca, obtuvo los valores de POTS más altos en comparación con los demás asfaltos. Esto es debido a que este polímero presenta una distribución química que le permite reaccionar con los asfaltenos del ligante, generando un sistema de uniforme de polímero – asfalto. El grupo epóxico del glicidil metacrilato tiene la capacidad de unirse con varios grupos funcionales del asfalteno, los cuales pueden tener un radical

funcional de ácido carboxílico, el cual interacciona con el anillo epóxico formando un éster aromático el cual es un compuesto muy estable de forma que el polímero se incorpora de manera adecuada formando una fase uniforme y homogénea (Du Pont, 2018). En la Figura 6.5 se muestra la forma de interacción del polímero TER con uno de los grupos del asfalteno

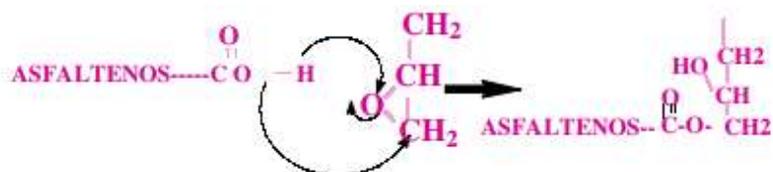


Figura 6.5 Interacción entre el polímero TER y el asfalteno (Du Pont, 2018)

Por esta razón, la modificación con TER aumenta las fuerzas de cohesión de las mezclas asfálticas con los agregados (Avellan, 2007). Además, al incorporarle el PPA, mejora la reactividad del TER en el asfalto por lo que el efecto del ligante tiende a mejorar. Por otro lado, el asfalto sin modificar en ambos agregados fue el que requirió de menor fuerza para producir la falla obteniendo los valores de POTS más bajos con respecto a los demás asfaltos. Adicionalmente, de los tres asfaltos modificados el que presenta los valores de POTS más bajos fue el modificado con el polímero SBR. Esto se debe a que el SBR presenta menores grupos aromáticos (benceno) en comparación con el SBS lo cual hace que este polímero al incorporarse al asfalto tenga una estabilidad menor en comparación con el SBS y TER por lo que las propiedades del asfalto no se acoplan de manera tan significativa con este polímero. Por lo tanto, los grupos polares y aromáticos favorecen la interacción entre los polímeros y el asfalto mientras que las parte no polares de los polímeros no presentan una interacción con respecto al asfalto.

Se puede observar que la fuerza de adhesión de los ligantes asfálticos es mayor en los agregados silícicos que en los calizos. Esto se relaciona con que los agregados silícicos poseen aluminosilicatos con altos niveles de basicidad por lo que presentan buenas propiedades de adhesión con el ligante asfáltico de modo que hay un aumento en las

interacciones por las moléculas polares. Al mismo tiempo estos agregados tienen buenas características tanto mecánicas como friccionantes lo que proporciona una buena estructura mineral para ser utilizado en mezclas asfálticas (Aguiar, Miranda, Vargas, & Salazar, 2017). En la Figura 6.6 se muestra una comparación de los valores de POTS necesarios para desprender los tornillos de los diferentes agregados en condición seca.

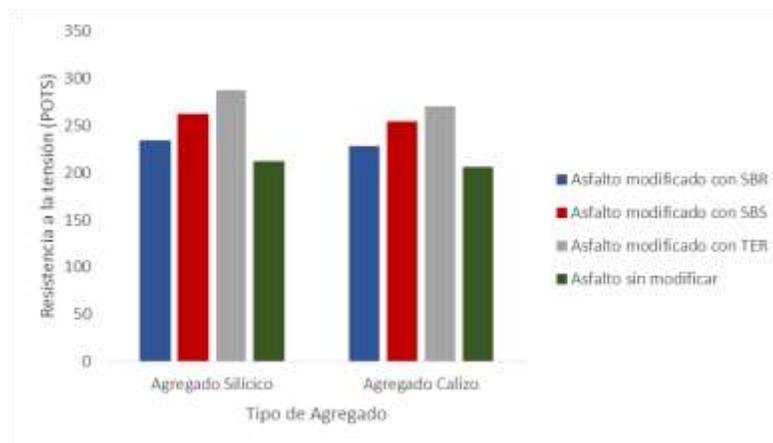


Figura 6.6 Valores de POTS obtenidos para los dos tipos de agregado en condición seca

Una vez terminadas las pruebas en condición seca se procedió a realizar los ensayos en condición húmeda. Como se mencionó anteriormente, los sistemas tornillo-agregado fueron acondicionados en un baño de agua a 60 °C por 24 horas para después realizar las mediciones con el equipo del PATTI. Los resultados obtenidos para ambos agregados, los asfaltos modificados y el asfalto original se presentan a continuación

Cuadro 6.19 Valores de POTS promedio obtenidos para el asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado silícico en condición húmeda

Ensayo	Agregado	Asfalto	Valor promedio de POTS (kPa)
Adherencia de Bitumen (ABS)	Silícico	Modificado con SBR	218,009
		Modificado con SBS	242,305
		Modificado con TER	272,307
		Sin modificar	170,721

Cuadro 6.20 Valores de POTS promedio obtenidos para el asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado calizo en condición húmeda

Ensayo	Agregado	Asfalto	Valor promedio de POTS (kPa)
Adherencia de Bitumen (ABS)	Calizo	Modificado con SBR	210,832
		Modificado con SBS	230,784
		Modificado con TER	252,636
		Sin modificar	174,855

El asfalto con mayor valor de POTS fue el modificado con TER, tanto en el agregado silíceo como en el calizo por sus buenas propiedades adhesivas al ser modificado con este polímero (Cremades, 2008). De los asfaltos modificados el que presentó el menor valor de POTS fue el modificado con SBR en ambos agregados. Por último, de los cuatro asfaltos el que obtuvo menor valor de POTS fue el asfalto sin modificar. En general, los valores de POTS fueron mayores en el agregado silíceo que en el calizo.

Los valores de POTS obtenidos con el acondicionamiento seco fueron mayores en comparación con los de acondicionamiento húmedo. Esto indica que el agua fue un factor que influyó en la adhesión de los ligantes asfálticos sobre los agregados causando un daño por humedad. De acuerdo con los resultados, la resistencia a la separación se vio reducida cuando el agregado estuvo sometido al acondicionamiento húmedo, no obstante, la unión creada en la interface entre el ligante asfáltico y la piedra fue lo suficientemente resistente para no ser desplazado totalmente por el agua. El fallo al igual que en la condición seca fue cohesiva como lo evidencia la huella de asfalto (no se desprendió por completo), indicando una buena interacción entre los diferentes asfaltos y los agregados a pesar de la presencia de humedad. En la Figura 6.7 se puede observar una comparación de los valores de POTS obtenidos en condición húmeda

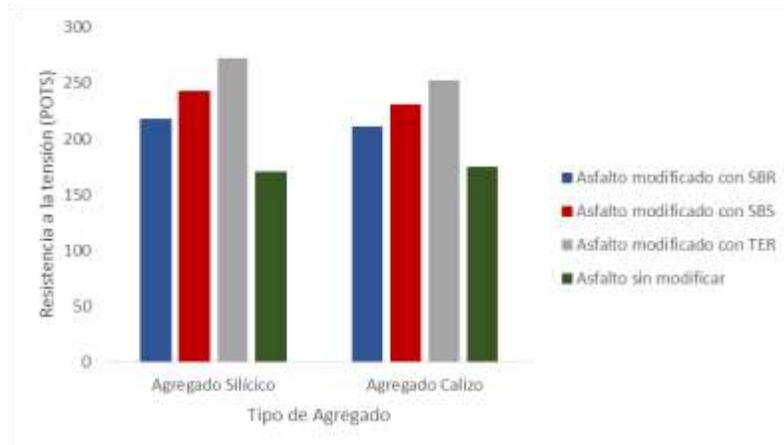


Figura 6.7 Valores de POTS obtenidos para los tipos de agregado en condición húmedo

Una vez obtenidos los valores de POTS en ambos acondicionamientos se puede medir la resistencia retenida al daño por humedad mediante la pérdida en fuerza de adhesión, la cual se define como la razón entre la diferencia de los valores de POTS en acondicionamiento seco y húmedo y la resistencia a la separación del primero (Aguar, et al., 2012). En la Figura 6.8 se muestra de manera gráfica la comparación de la pérdida de adhesión en ambos agregados.

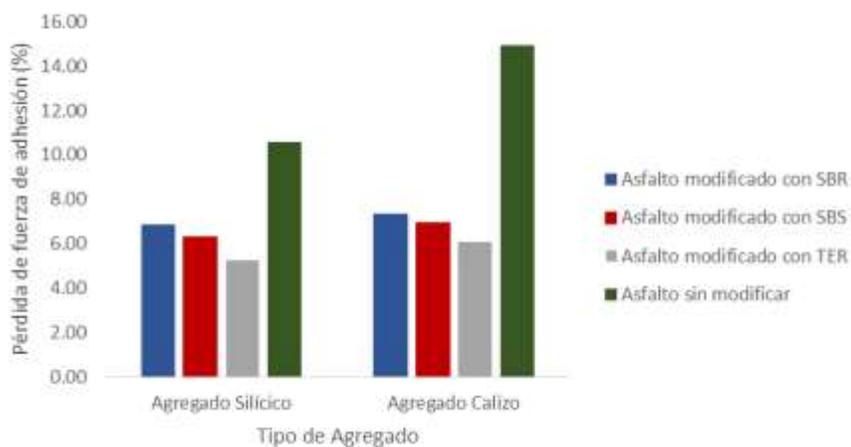


Figura 6.8 Valores de pérdida de fuerza de adhesión para los tipos de agregado utilizados

Al evaluar la pérdida en fuerza de adhesión entre el ligante asfáltico y los agregados se puede observar que el asfalto modificado con TER es el que tiene menor pérdida de fuerza de adhesión mientras que el que presentó mayor pérdida fue el asfalto sin modificar. Esta tendencia se presenta en ambos agregados. Los asfaltos modificados en general presentan muy bajas pérdidas en resistencia tras estar en contacto con el agua en comparación con el asfalto sin modificar lo cual indica que estos primero presentan una buena adhesión.

Para complementar los resultados de la resistencia a la separación, se realizaron ensayos de medición del ángulo de contacto por medio del Goniómetro. La medición se hizo sobre una gota de asfalto colocada en la superficie de los agregados. Se trabajó con 10 gotas y a cada una se le realizó la medición del ángulo de contacto 1 minuto después de ser colocado y a temperatura ambiente. A continuación, en el Cuadro 6.21 se presentan los resultados obtenidos del ángulo de contacto de los diferentes asfaltos en los agregados utilizados bajo la condición seca.

Cuadro 6.21 Ángulos de contacto promedio obtenido para el asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado silíceo en condición seca

Ensayo	Agregado	Asfalto	Ángulo de contacto promedio
Goniometría	Silíceo	Modificado con SBR	107,4
		Modificado con SBS	101,3
		Modificado con TER	94,2
		Sin modificar	121,5

Cuadro 6.22 Medición del ángulo de contacto promedio del asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado calizo en condición seca

Ensayo	Agregado	Asfalto	Ángulo de contacto promedio
Goniometría	Calizo	Modificado con SBR	109,3
		Modificado con SBS	103,3
		Modificado con TER	98,3
		Sin modificar	123,7

Se puede observar que el ángulo de contacto es menor cuando se utiliza un asfalto modificado tanto en el agregado silíceo como en el calizo. De los asfaltos modificados el que obtuvo menor ángulo de contacto fue el modificado con TER mientras que el modificado con SBR tuvo el mayor valor. Esto es debido a que el asfalto adquiere un excelente poder adherente al ser modificado con el polímero TER (Cremades, 2008). Por lo tanto, este ligante asfáltico presenta una buena adhesión con los agregados. En general los asfaltos modificados presentaron menor ángulo de contacto que el ligante sin modificar. En la Figura 6.9 se muestra una comparación de los resultados obtenidos en condición seca.

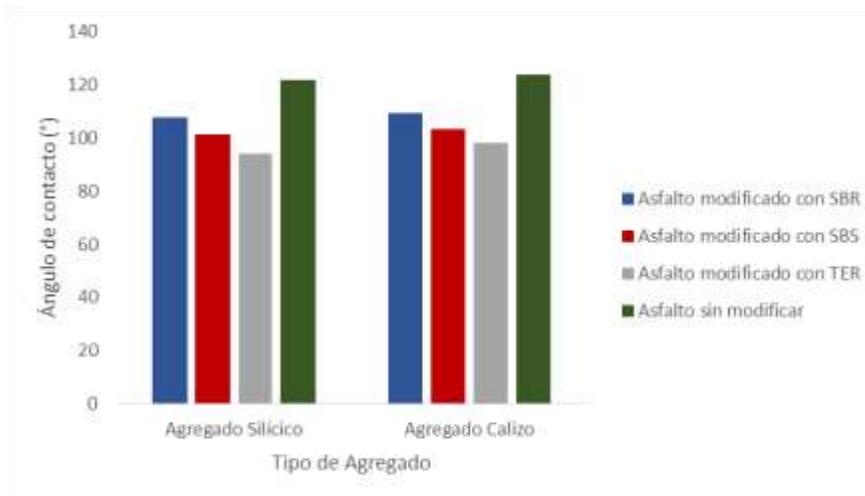


Figura 6.9 Ángulos de contacto obtenidos para los tipos de agregado en condición seca

Al mismo tiempo, se realizó el estudio en condición húmeda. Es importante indicar que este estudio no se ha implementado anteriormente por lo que aún no existe un procedimiento estandarizada. Este proceso se realizó a temperatura ambiente en un baño con agua por 4 horas. Una vez finalizado se esperó un periodo de 30 minutos y se realizaron las mediciones, los cuales se presentan a continuación.

Cuadro 6.23 Medición del ángulo de contacto promedio del asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado silícico en condición húmeda

Ensayo	Agregado	Asfalto	Ángulo de contacto promedio
Goniometría	Silícico	Modificado con SBR	113,6
		Modificado con SBS	107,4
		Modificado con TER	99,4
		Sin modificar	126,0

Cuadro 6.24 Medición del ángulo de contacto promedio del asfalto M-1468-13 sin modificar y modificado sobre el agregado calizo en condición húmeda

Ensayo	Agregado	Asfalto	Ángulo de contacto promedio
Goniometría	Calizo	Modificado con SBR	115,6
		Modificado con SBS	110,4
		Modificado con TER	102,4
		Sin modificar	127,9

Se puede observar que el ángulo de contacto para todas las muestras de asfalto aumentó en comparación con aquellos medidos en condición seca. Esto es debido a la afectación de la humedad sobre la interface de los dos materiales donde hay un mayor desplazamiento de la unión de las gotas de asfalto y el agregado. Por lo tanto, el aumento del ángulo de contacto en los diferentes agregados es un indicador de la susceptibilidad a la humedad causada por el agua al entrar en contacto con el sistema agregado-asfalto reduciendo la capacidad adhesiva del ligante. En la Figura 6.10 se muestra una comparación de los resultados obtenidos en condición húmeda.

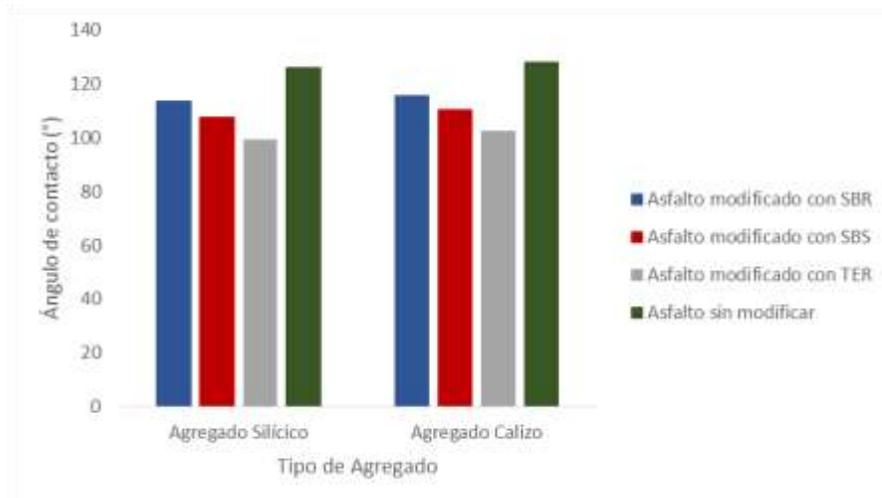


Figura 6.10 Ángulos de contacto obtenidos para los dos tipos de agregados en condición húmeda

Tanto en el acondicionamiento seco como en el húmedo, los asfaltos obtuvieron ángulos de contacto menores en el agregado silíceo que en el calizo. Como se mencionó anteriormente esto es porque que el agregado silíceo presenta buenas propiedades de adhesión con el ligante debido a sus altos niveles de basicidad y características mecánicas mientras que el calizo es muy susceptible al pulimiento y presenta una menor afinidad lo que imposibilita un buen mezclado asfáltico.

La tendencia de los asfaltos presentado en el ensayo por Goniometría es opuesta al del ensayo por Adherencia de Bitumen. Esto es debido a que conforme disminuye el ángulo de contacto, este indica que hay una mayor adhesión y mejor afinidad entre el ligante y la piedra, mientras el valor de POTS al ser mayor la interacción del sistema asfalto - agregado es mucho mejor

6.4 Ejecución del análisis estadístico MANOVA

Mediante los valores obtenidos de POTS y de ángulo de contacto se procedió a realizar el análisis estadístico MANOVA. Para ello se diseña una matriz con la combinación de todas las variables a utilizar tal y como se muestra en el Cuadro 6.25.

Cuadro 6.25 Matriz de variables experimentales para el análisis multivariable de varianza de los resultados obtenidos de la resistencia a la separación y ángulo de contacto

Variables Dependientes		Variables Independientes		
Resistencia a la Separación (POTS)	Ángulo de Contacto (°)	Tipo de Polímero	Agregado	Acondicionamiento
234,020	107,5	SBR	Silícico	Seco
242,305	107,4	SBS	Silícico	Húmedo
270,779	98,3	TER	Calizo	Seco
210,832	115,6	SBR	Calizo	Húmedo
262,261	101,3	SBS	Silícico	Seco
272,307	99,4	TER	Silícico	Húmedo
227,492	109,3	SBR	Calizo	Seco
230,784	110,4	SBS	Calizo	Húmedo
287,389	94,2	TER	Silícico	Seco
218,009	113,6	SBR	Silícico	Húmedo
230,784	103,3	SBS	Calizo	Seco
252,636	102,4	TER	Calizo	Húmedo

El análisis estadístico MANOVA debe cumplir algunos supuestos importantes para interpretar los resultados y obtener conclusiones válidas. Estos supuestos consisten en una distribución normal por parte de las variables, además de tener varianza constante. Las corridas se hicieron de forma aleatoria y son independientes entre sí.

Para verificar el supuesto de la distribución normal en los resultados se realiza un estudio de gráficas de residuos mediante el software Minitab 17. En la Figura 6.11 se observa una

tendencia lineal de los residuos ajustándose a una recta tanto para el valor de POTS como el ángulo de contacto, lo cual corresponde a una probabilidad normal.

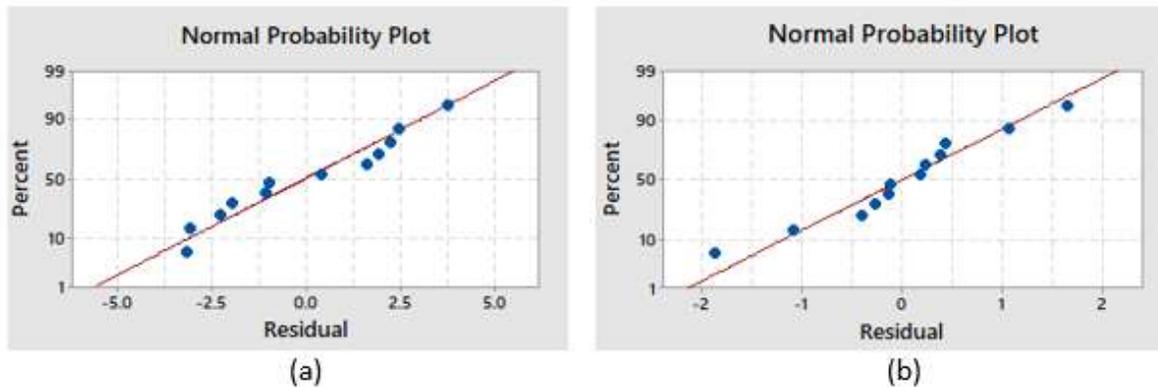


Figura 6.11 Gráfica de distribución normal de residuos del (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente

Seguidamente con el supuesto de la varianza constante, se realiza un análisis de una gráfica de ajuste residual en función de los valores ajustados del modelo. En la Figura 6.12 se observa una distribución aleatoria de los residuos, donde no muestra ningún patrón definido.

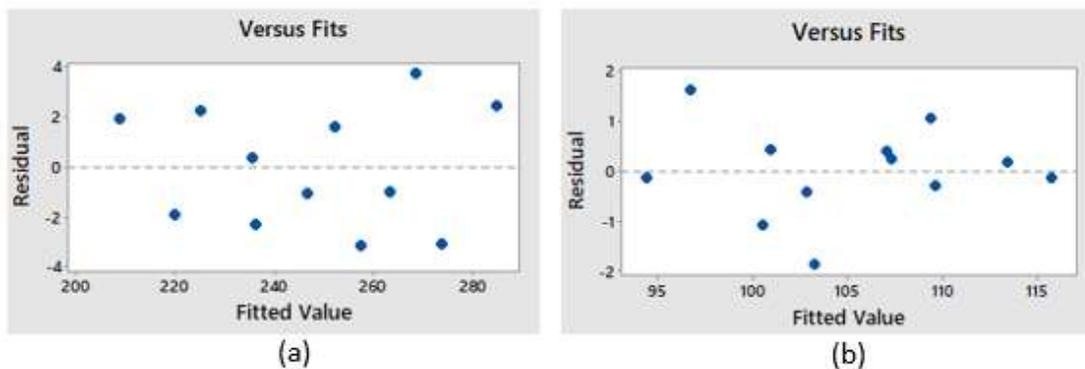


Figura 6.12 Gráfica de ajuste residual contra el valor ajustado del (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente

Por otro lado, en la Figura 6.13 se presenta la gráfica del orden observado en que se recolectaron los datos tanto de la resistencia a la separación por medio de los valores de POTS, así como del ángulo de contacto. Al no tener una tendencia definida se cumple el supuesto de la independencia entre los resultados

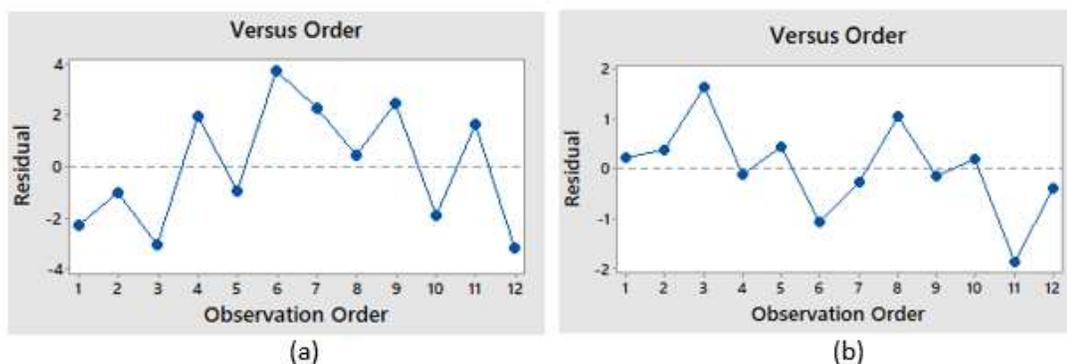


Figura 6.13 Gráfica de ajuste residual contra orden observado del (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente

Al comprobar el cumplimiento de los supuestos del modelo estadístico MANOVA se determina las interacciones y efectos significativos sobre los valores de POTS y los ángulos de contacto. Para ello se utilizó el software Minitab 17, donde se trabajó con un nivel de confianza del 95 %. En la Figura 6.14 se presenta los resultados de los efectos de los distintos factores sobre las variables respuesta, los cuales fueron obtenidos mediante el programa.

General Linear Model: Valor de POTS						General Linear Model: Ángulo de Contacto					
Analysis of Variance						Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tipo de Polimero	2	4743.96	2371.98	266.57	0.000	Tipo de Polimero	2	334.122	167.061	126.03	0.000
Agregado	1	367.31	367.31	41.28	0.000	Agregado	1	16.101	16.101	12.15	0.010
Acondicionamiento	1	804.34	804.34	90.39	0.000	Acondicionamiento	1	113.468	113.468	85.60	0.000
Error	7	62.29	8.90			Error	7	9.279	1.326		
Total	11	5977.90				Total	11	472.969			

Figura 6.14 Análisis de varianza múltiple para las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente

Se puede observar que, para todos los tratamientos, los efectos de los factores tipo de polímero, agregado y acondicionamiento sobre los valores de POTS y los ángulos de contacto presentaron un valor de P menor a 0,05 lo cual indica que la hipótesis nula es rechazada y por lo tanto si existen diferencias significativas entre los factores. Tras aplicar el análisis de varianza se comprueba la significancia de los factores. Se sabe que al menos uno de los promedios de la variable respuesta determinado, es diferente de los obtenidos para cada uno de los tratamientos de los distintos factores. Para identificar cuál o cuáles promedios son diferentes resulta necesario realizar pruebas adicionales debido a que se puede presentar varios escenarios. Por ejemplo, puede que todos los promedios sean diferentes entre sí, que solo dos grupos sean diferentes, o que solamente uno se diferencie de los demás (Wong, 2010).

Con el fin de comparar los resultados más a fondo, se aplica una prueba de comparaciones múltiples por medio de la prueba de Tukey. Esta prueba permite hacer todas las posibles comparaciones de factores de dos en dos para cada tratamiento (Wong, 2010). A continuación, se presenta el análisis Tukey para el tratamiento con los distintos tipos de polímeros

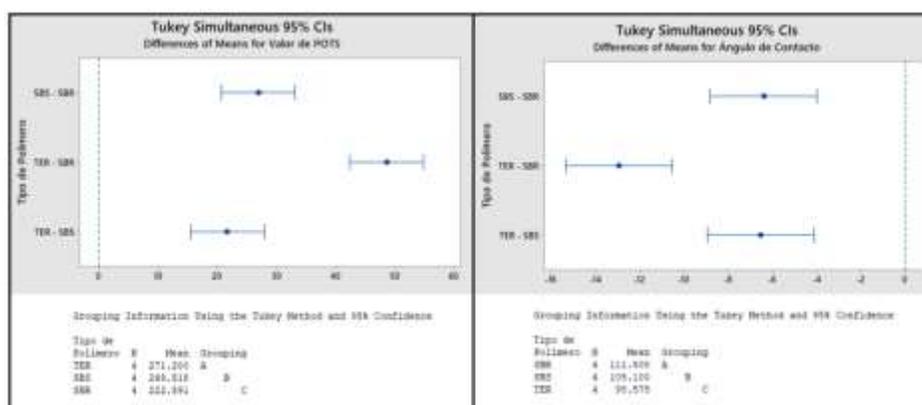


Figura 6.15 Gráfica de intervalos de confianza del factor polímero al 95 % de Tukey para las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente

En la Figura 6.15 se muestran los intervalos de confianza de cada agrupación de factores realizados en Minitab tanto para los valores de POTS como los ángulos de contacto. Se puede observar que si existe diferencias significativas entre los polímeros SBR-SBS, SBR-TER y TER-SBS debido a que ninguno de los intervalos presentados en la gráfica contiene un 0, sino que están bastante alejados. Al mismo tiempo, se muestra la prueba de las diferencias de promedio de Tukey, donde se puede observar que los promedios cuyas letras son diferentes entre sí presentan diferencias significativas, corroborando el análisis gráfico y, por lo tanto, los promedios correspondientes en estos tratamientos son todos significativos entre ellos

La prueba de Tukey también se realiza para el tratamiento con los agregados el cual se muestra en la siguiente Figura.

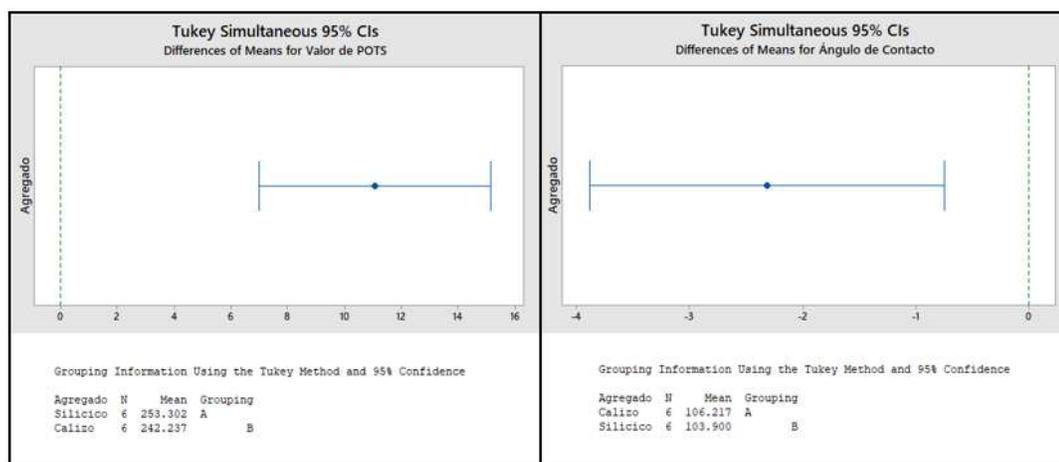


Figura 6.16 Gráfica de intervalos de confianza del factor agregado al 95 % de Tukey para las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente

Se muestra que en efecto si hay diferencias entre ambos agregados. Los intervalos de confianza no contienen ceros y los factores presentan letras diferentes entre ellos. En otras

palabras, los efectos de los factores agregados sobre el valor de POTS y el ángulo de contacto son significativamente diferentes.

Por último, se hace la prueba de Tukey para el factor acondicionamiento, la cual se muestra a continuación.

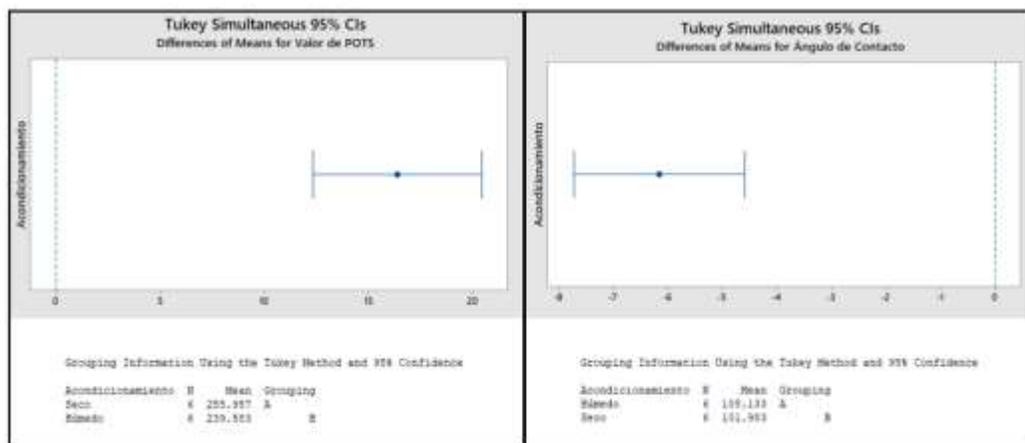


Figura 6.17 Gráfica de intervalos de confianza del factor acondicionamiento al 95 % de Tukey para las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente

Se comprueba la existencia de diferencias significativas de estos factores. Al igual que con los polímeros y los agregados, ninguno de los intervalos de confianza contiene el cero, además de que las letras de cada factor son diferentes entre sí. Del análisis de varianza múltiple se determina la existencia de diferencias significativas entre los factores y utilizando la prueba de Tukey como complemento se determina si en efecto hay diferencias significativas y entre cuáles grupos se presentan.

Al mismo tiempo, se puede determinar la dispersión de datos con respecto al promedio de cada uno de los factores mediante la desviación estándar. A continuación, en las siguientes Figuras se muestra las desviaciones estándar de los datos obtenidos de valores de POTS de los diferentes factores.

Tipo de				
Polímero	N	Mean	StDev	95% CI
SBR	4	222.59	10.23	(209.35, 235.84)
SBS	4	249.52	11.13	(236.27, 262.76)
TER	4	271.20	13.52	(257.96, 284.44)

Figura 6.18 Desviaciones estándar de los datos promedios de valor de POTS en el factor polímero.

Agregado	N	Mean	StDev	95% CI
Calizo	6	242.24	21.61	(220.69, 263.78)
Silicico	6	253.3	25.6	(231.8, 274.8)

Figura 6.19 Desviaciones estándar de los datos promedios de valor de POTS en el factor agregado.

Acondicionamiento	N	Mean	StDev	95% CI
Húmedo	6	239.58	22.94	(218.89, 260.27)
Seco	6	255.96	22.55	(235.27, 276.65)

Figura 6.20 Desviaciones estándar de los datos promedios de valor de POTS en el factor acondicionamiento.

Se puede observar que el polímero TER presenta una desviación estándar mayor con respecto al SBR y SBS lo cual indica que los datos obtenidos de POTS están más dispersos con respecto al promedio. Es evidente que tanto el TER como el SBS tienen un efecto mayor sobre los POTS que el SBR, debido a que el valor más alto que se puede obtener del intervalo de confianza del polímero SBR no se encuentra dentro del intervalo de los demás polímeros. Al utilizar el SBS se puede obtener valores de POTS que si están dentro del intervalo del TER. El intervalo de confianza al 95% para el polímero SBS está entre 236,27 – 262,76 POTS lo cual indica que es posible obtener POTS que tengan valores similares o iguales dentro del intervalo de confianza del TER que va de 257,96 hasta 284,44 POTS. No

obstante, no es posible obtener POTS cercanos al extremo superior del intervalo de confianza de TER lo cual indica que, al utilizar este polímero, se obtiene los valores más altos de POTS, aunque es posible que con el SBS puede llegar a valores similares por debajo del valor más alto. En otras palabras, el efecto del TER sobre el valor de POTS es significativo con respecto a los otros dos polímeros, sin embargo, su efecto es mayor en comparación con el SBR que con el SBS.

Con respecto a los agregados y acondicionamientos, los que presentan mayor dispersión de los datos con respecto a la media son el agregado silíceo y acondicionamiento seco. Existen diferencias significativas entre ambos agregados, pero es importante indicar que con la piedra caliza se es posible obtener POTS iguales a los del silíceo, pero no valores cercanos del extremo superior de modo que el agregado de tipo silíceo tiene un mejor efecto con respecto al calizo. Al comparar los dos acondicionamientos, hay una diferencia significativa de la condición seca con respecto a la húmeda, sin embargo, al utilizar el acondicionamiento húmedo es posible obtener valores del intervalo de confianza de la condición seca. Por lo tanto, el acondicionamiento seco es mejor que el húmedo a pesar de que exista la posibilidad de obtener valores iguales a los de la condición seca, pero menores al del extremo.

Seguidamente se tiene las desviaciones estándar de los datos de ángulo de contacto obtenidos de los diferentes factores, los cuales se presentan a continuación.

Tipo de Polimero	N	Mean	StDev	95% CI
SBR	4	111.50	3.74	(107.06, 115.94)
SBS	4	105.10	4.56	(100.66, 109.54)
TER	4	98.57	3.39	(94.13, 103.02)

Figura 6.21 Desviaciones estándar de los datos promedios de ángulo de contacto en el factor polímero.

Agregado	N	Mean	StDev	95% CI
Calizo	6	106.22	6.58	(100.07, 112.37)
Silicico	6	103.90	6.93	(97.75, 110.05)

Figura 6.22 Desviaciones estándar de los datos promedios de ángulo de contacto en el factor agregado.

Acondicionamiento	N	Mean	StDev	95% CI
Húmedo	6	108.13	6.33	(102.68, 113.59)
Seco	6	101.98	5.64	(96.53, 107.44)

Figura 6.23 Desviaciones estándar de los datos promedios de ángulo de contacto en el factor acondicionamiento.

El polímero TER presenta una desviación estándar menor con respecto al SBR y SBS. En otras palabras, los datos obtenidos de ángulo de contacto tienen una menor dispersión con respecto al promedio. Se puede observar que el polímero SBR presenta un intervalo de confianza al 95% de $107,06^{\circ} - 115,94^{\circ}$, lo cual indica que es posible obtener valores que vayan a estar dentro del intervalo del SBS que va de $100,66^{\circ}$ a $109,54^{\circ}$, sin embargo, estos valores no pueden llegar a ser iguales o cercanos al extremo inferior. Lo mismo sucede con el TER, existen valores que se pueden obtener para el SBS y que pueden estar dentro del intervalo de confianza, pero no iguales o cercanos al valor mínimo. Cabe destacar que, si se compara el TER con el SBR, este último no presenta ningún valor que vaya a estar cercano a los que presenta el polímero TER, por lo que su efecto sobre la variable respuesta es mucho mejor, pero si se compara con el SBS, el efecto del TER sigue siendo mejor pero no es tan significativo como si se compara con el SBS.

Con respecto a los agregados y a los acondicionamientos, los que presentan mayor dispersión de los datos con respecto a la media son el agregado silícico y acondicionamiento seco. De acuerdo con el intervalo de confianza del agregado calizo, el cual es de $100,07^{\circ} - 112,37^{\circ}$, existen valores que pueden llegar a ser parecidos o iguales a

los que presenta el intervalo de confianza del agrega silícico que va desde $97,75^\circ$ a $110,05^\circ$. Esto indica que, si existe una diferencia significativa entre los efectos ambos agregados sobre el ángulo de contacto, sin embargo, se puede obtener valores mediante el agregado calizo que sean muy similares a los del silícico, aunque no es posible que llegue a valores muy cercanos al extremo. Esto sucede con los acondicionamientos, donde el efecto de la condición seca sobre el ángulo de contacto es mejor que con el húmedo a pesar de que se puede obtener valores utilizando esta última condición que sean cercanos al seco pero que jamás van a ser iguales o cercanos al extremo inferior.

Adicionalmente se puede realizar una interpretación de los resultados a partir de las gráficas de interacción, los cuales muestran la media ajustada de las variables respuesta en función de las combinaciones de los factores

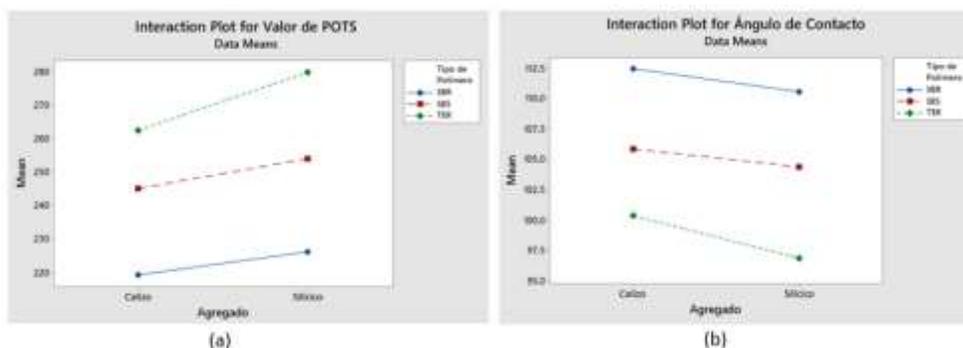


Figura 6.24 Gráfica de interacción entre los factores polímero y agregado sobre las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente

En ambas gráficas se puede observar que no hay una dependencia por parte del polímero con el tipo de agregado, es decir, el efecto que le genera el polímero al asfalto a la hora de medir tanto los valores de POTS como el ángulo de contacto no va a depender del nivel del factor agregado. En la primera gráfica muestras que el efecto de los tres polímeros sobre el valor de POTS es mayor cuando se utiliza el asfalto modificado con TER y menor con SBR.

Esta tendencia se conserva en ambos agregados. Al analizar los agregados se puede observar que cuando se utiliza el de tipo silíceo, el efecto sobre el valor de POTS es mayor en comparación con el calizo para los tres asfaltos. Con respecto al ángulo de contacto, el comportamiento es inverso mostrando de igual forma la independencia entre los factores.

En la Figura 6.25 se presenta otras gráficas donde la interacción es por parte del polímero con respecto al acondicionamiento.

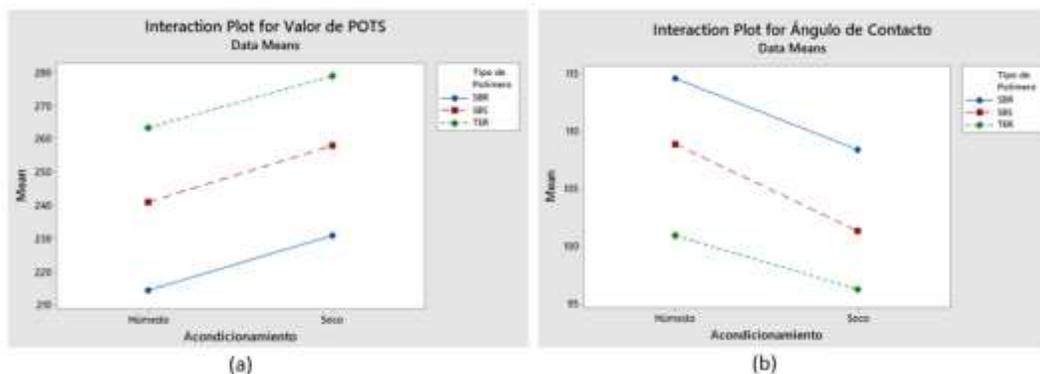


Figura 6.25 Gráfica de interacción entre los factores polímero y acondicionamiento sobre las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente

El efecto de los tres polímeros sobre el valor de POTS es mayor para el acondicionamiento seco que para el húmedo, mientras que con respecto al ángulo de contacto es lo opuesto. En este caso cuando la muestra se trabaja en acondicionamiento seco, el valor de POTS es mayor cuando se utiliza el asfalto modificado TER y menor para el SBR. Este comportamiento se mantiene en el acondicionamiento húmedo, donde el efecto generado sobre los POTS es mayor cuando se utiliza el polímero TER y menor con SBR. Mientras que el ángulo de contacto es mucho menor en un acondicionamiento seco cuando se utiliza el asfalto modificado con TER y mayor cuando se utiliza el modificado con SBR.

Por otra parte, se hace la interpretación de las gráficas de interacción entre el agregado y el acondicionamiento, los cuales se presentan a continuación.

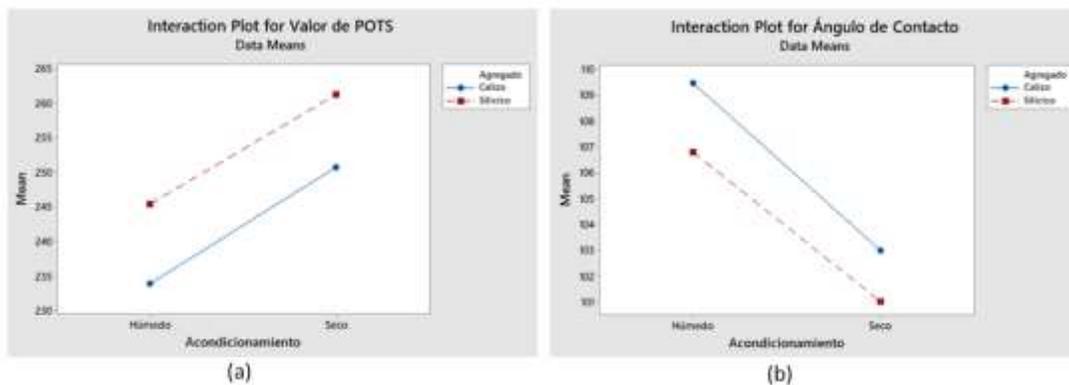


Figura 6.26 Gráfica de interacción entre los factores agregado y acondicionamiento sobre las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente

Se observa que tampoco existe una dependencia por parte del agregado con respecto al acondicionamiento. El efecto del agregado sobre los POTS es mayor cuando se usa el agregado sílico en ambos acondicionamientos, mientras que el efecto sobre el ángulo de contacto es menor. No obstante, con respecto a los acondicionamientos, el efecto que predomina mayoritariamente es en la condición seca.

Una vez analizado las gráficas de interacción, se procede a interpretar las gráficas de efectos principales los cuales se muestran en la Figura 6.27.

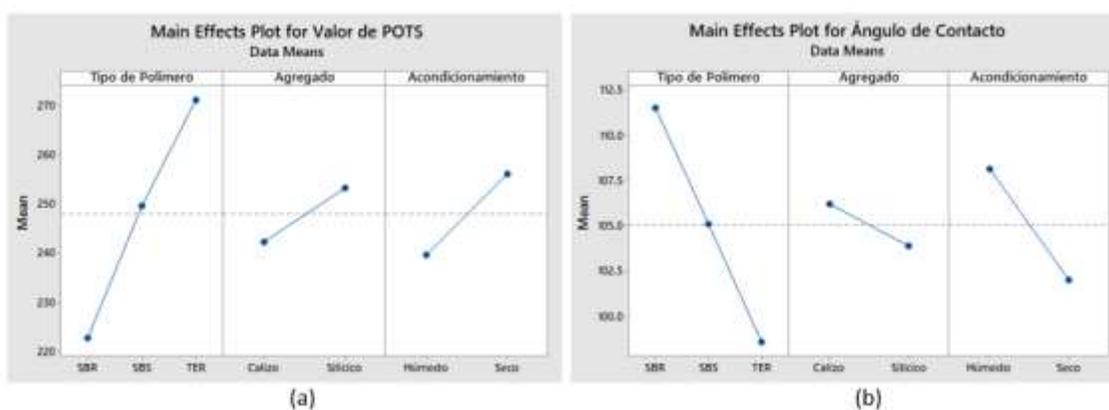


Figura 6.27 Gráfica de efectos principales de los factores sobre las variables (a) valor de POTS y (b) ángulo de contacto respectivamente

De acuerdo con las gráficas es claro la presencia de los efectos principales tanto para los POTS como para el ángulo de contacto. Esto es debido al comportamiento de las rectas de cada factor, ya que no hay ninguna horizontal, lo cual indica que la media de la respuesta no es igual en todos los niveles de los factores y existe un efecto predominante. Por ejemplo, el tipo de polímero es un factor que afecta de manera considerable a ambas variables respuesta. Cuando se utiliza el polímero TER, la resistencia a la separación es alta mientras que al utilizar el polímero SBR, esta baja de manera considerable pasando de un valor de POTS promedio mayor a 270 a un valor promedio muy cercano a 220, lo cual indica que esta variable respuesta sufre una gran variación. Los factores, agregado y acondicionamiento también afectan los valores de POTS de modo que, al utilizar el agregado calizo en vez silíceo, el valor de POTS aumenta, así como cuando el agregado pasa del acondicionamiento húmedo a seco. Este mismo comportamiento se presenta de forma inversa con el ángulo de contacto.

Los resultados experimentales indica que la mejor adhesión lo presenta el asfalto modificado con el polímero TER, partiendo del hecho que este asfalto modificado presentó los valores de POTS más altos, así como los ángulos de contacto más bajos. Al mismo tiempo, gracias al análisis estadístico MANOVA se evidencia que los resultados presentan diferencias significativas entre sí. Esto es debido a que como se explicó anteriormente, la estructura del polímero TER presenta gran cantidad de grupos polares, así como aromáticos, por lo que el polímero al ser incorporado al asfalto esta presenta una alta estabilidad. Una vez que la fase del polímero pasa a ser la predominante (fase continua), la estructura del asfalto se acopla de una manera estable. Desde el punto de vista química, las moléculas polares entre el asfalto y el polímero son atraídos por las interacciones dipolo-dipolo mientras que los aromáticos dan la estabilidad necesaria para la modificación. Es importante indicar que el TER presenta varios átomos de oxígeno, lo cual

es sumamente electronegativo de forma que la incorporación polimérica predomina (Polacco, Filippi, Merussi, & Stasna, 2015).

En el caso de los agregados, el agregado silícico al presentar aluminosilicatos como se explicó anteriormente, este da una mejor adhesión y mayor afinidad ya que el silicio presenta una electronegatividad mayor con respecto a los carbonatos del agregado calizo, lo cual mejora la interacción asfalto-agregado. Desde el punto de vista físico, esto se evidencia en los fallos generados en estos agregados. Con los asfaltos modificados los fallos fueron de tipo cohesivo, indicando que las fuerzas de adhesión entre el ligante y el agregado fueron mayores en comparación con las fuerzas internas de cohesión, debido a las interacciones presentadas (Reyes, Cely, & Figueroa, 2017). El asfalto modificado con TER se ve favorecido gracias a sus moléculas polares presentes en su estructura, así como una buena incorporación en el asfalto (Polacco, Filippi, Merussi, & Stasna, 2015).

Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

- 1- Los tres asfaltos modificados se desempeñan de buena manera en temperaturas por debajo 76 °C y por encima de -22 °C debido a que se obtuvo un PG de 76-22 para los tres, mientras que el asfalto sin modificar tiene un PG de 70-22 el cual no presenta un buen desempeño a temperaturas por encima de 70 °C en comparación con el PG de los asfaltos modificados.
- 2- El asfalto que tiene mejor adhesión es el asfalto modificado con el polímero TER debido a que presenta mayor valor de POTS con respecto a los demás asfaltos en todas las condiciones evaluadas.
- 3- Al mismo tiempo, el asfalto modificado con TER presenta una mayor afinidad en comparación con los demás asfaltos debido a que los valores de ángulo de contacto obtenidos fueron los más bajos.
- 4- Los asfaltos obtuvieron valores de POTS más altos y ángulos de contacto más bajos cuando se utilizó el agregado silícico, por lo tanto, este agregado tiene un efecto mucho más favorable en la adhesión y en la afinidad de los asfaltos que el agregado silícico.
- 5- El acondicionamiento seco favoreció la adhesión y la afinidad de los asfaltos tanto en el agregado silícico como en el calizo debido a que, en esta condición, se presentó los valores más altos de POTS y más bajos del ángulo de contacto.

- 6- El asfalto con menor adhesión es el asfalto sin modificar debido a que presentó los valores de POTS más bajos y ángulos de contactos más altos con respecto a los demás asfaltos en las condiciones evaluadas.
- 7- De los tres asfaltos modificados, el ligante modificado con SBR fue el que presentó menor adhesión ya que sus valores de POTS estuvieron por debajo de los asfaltos modificados con SBS y TER además de presentar los ángulos de contacto más altos en comparación con los otros dos ligantes modificados.
- 8- Utilizando el asfalto modificado con el polímero TER sobre el agregado silíceo en un acondicionamiento seco, se presentan los valores de POTS más altos y los ángulos de contacto más bajos, por lo que, bajo estas condiciones, se tiene mejor adhesión y la afinidad con respecto a las otras combinaciones.
- 9- Por medio del análisis de varianza múltiple, se determinó que si existen diferencias significativas entre los efectos generados por los factores polímero, agregado y acondicionamiento sobre las variables POTS y ángulo de contacto.
- 10- Mediante la prueba de Tukey, se comprobó la existencia de diferencias significativas entre los tres polímeros, además de corroborar que los efectos entre los dos agregados y los dos acondicionamientos son significativos.
- 11- Las mediciones tanto de POTS, así como de los ángulos de contacto fueron bastante precisos debido a que, a pesar de existir diferencias entre las desviaciones estándar, éstas son relativamente pequeñas al compararse entre sí por lo que la dispersión de datos con respecto a la media no es tan grande.

- 12- La mejora que genera el efecto del polímero TER sobre las variables respuesta es mucho más significativa que el generado por el polímero SBR pero no es tan significativo con respecto al SBS debido a que se puede obtener valores por medio de este polímero que son similares o iguales a los que presenta el polímero TER en el intervalo de confianza a un 95 %, sin embargo, no es posible obtener valores cercanos a los del extremo superior (para el caso de los POTS) ni del extremo inferior (para el caso del ángulo de contacto) por lo tanto el efecto del polímero TER es mucho mejor en comparación con los otros dos
- 13- El efecto que genera el agregado silícico sobre las variables respuesta tiene una mejora significativa con respecto al agregado calizo.
- 14- El acondicionamiento seco tiene un efecto de mejora significativo sobre las variables respuesta en comparación con el húmedo.
- 15- De acuerdo con las gráficas de interacción, los efectos de los factores son independientes entre sí, es decir, que el efecto generado por el polímero no va a depender del agregado ni el acondicionamiento de modo que el polímero TER es mejor con respecto al SBR y SBS sin importar el agregado o acondicionamiento. Lo mismo sucede con el agregado silícico y el acondicionamiento seco, los cuales predominan con respecto a la piedra caliza y condición húmeda respectivamente.
- 16- Por medio de las gráficas de los efectos principales, se puede observar que el polímero TER, el agregado silícico y el acondicionamiento seco son los factores predominantes de cada tratamiento.

7.2 Recomendaciones

- 1- Evaluar otras condiciones para el acondicionamiento húmedo de las muestras de asfalto sobre los agregados como la temperatura del agua y el tiempo de acondicionamiento, con el fin de obtener más información del comportamiento del ligante en el ensayo por Goniometría.
- 2- Considerar el uso del PPA en los asfaltos modificados con SBR y SBS para determinar si de alguna forma éste ayuda a generar un efecto de mejora en la adhesión y en la afinidad.
- 3- Elaborar la mezcla asfáltica entre los ligantes modificados y los agregados para estudiar algunas variables que puedan ser correlacionadas con los ensayos al asfalto
- 4- Evaluar la mezcla asfáltica en el pavimento de forma que se pueda estudiar las propiedades de estabilidad, resistencia en la carretera.
- 5- Determinar la rentabilidad y viabilidad económica de utilizar asfalto modificado con los diferentes polímeros mediante un estudio de prefactibilidad.

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	unidad
A	Área específica superficial	m ²
AC	Asphalt Cement	adimensional
F	Fuerza medida	N
F _{crítico}	Distribución crítica	-
F _{tratamiento}	Distribución por tratamiento	-
G*	Módulo complejo de corte	KPa
M	Masa molecular	g/mol
MS	Cuadrado medio	-
N	Número total de datos	adimensional
N ₀	Número de Avogadro	mol ⁻¹
P	Perímetro	m
R	Constante universal de gases	kg·m ² /s·K·mol
S	Rigidez	
SS	Suma de cuadrados	-
SBR	Estireno-Butadieno-Caucho	-
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno	-
T	Temperatura	°C
TER	Terpolímero-Elastomérico-Reactivo	-
V	Volumen	m ³
W	Trabajo de adhesión	J
X	Promedio	-
\bar{X}	Promedio global	
g	Gravedad	m/s ²
k	Número de tratamientos	-
m	Masa	kg
m _p	Pendiente	-
n	Número de bloques	-
n _m	Capacidad de la superficie del agregado	g
q	Distribución estudentizada	-
p	Presión	Pa
θ	Ángulo de Contacto	°
δ	Ángulo de Fase	°
ρ	Densidad	g/l

π_e	Presión de equilibrio del gas sobre el agregado	Pa
Γ	Energía Superficial Libre	J/m ²
Δ	Cambio	-

Subíndice	Descripción
a	Temperatura
aire	Aire
c	Contacto
e	Equilibrio
g	Energía superficial libre
i	Dato
im	Volumen de placa sumergida
L	Líquido
máx	Máxima
r	Residuo
t	Total
α	Nivel de confianza

Referencias Bibliográficas

- Aguiar, J. P., Loría, G., Jiménez, M., & Salazar, J. (2014). Caracterización del daño por humedad en mezclas asfálticas. *Construyendo Caminos Boletín Técnico Volumen N°5*, 54-56.
- Aguiar, J. P., Salazar, J., Villegas, R., Loría, L., Hajj, E., & Navas, A. (2014). *Evaluación de Adhesión de mezclas asfálticas en Costa Rica mediante ensayos BBS y de Ángulo de Contacto*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.
- Aguiar, J., Leiva, F., Salazar, J., Baldi, A., Villegas, E., & Loria, L. (2012). *Estudio físico-químico de adhesión asfalto-agregado*. San José, Universidad de Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR.
- Aguiar, J., Miranda, F., Vargas, A., & Salazar, J. (2017). Resistencia al daño por humedad en mezclas asfálticas. *Boletín Técnico - PITRA LanammeUCR*, 2-9.
- Albarracín, P. (2015). *Polímeros*. Bolivia: Universidad de Nacional de Jujuy, Facultad de Ingeniería.
- Alvarez, A., & Ovalles, E. (2012). *Análisis de sistemas asfalto-agregado a partir de mediciones de Energía Superficial Libre*. Santa Marta, Colombia: Universidad de Magdalena.
- Alvarez, A., & Spinel, S. (2009). *Determinación de la energía superficial libre de cementos asfálticos colombianos*. Bogotá, Colombia: Ingenieria e Investigacion, ResearchGate.
- Alvarez, E., & Spinel, C. (2010). *Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas*. Bogota, Colombia: Universidad Antioquia.
- ASTM 2170. (2010). *ASTM D2170: Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens)*. Recuperado el 18 de Enero de 2016, de <http://compass.astm.org/download/D2170D2170M.6845.pdf>

- ASTM D113. (2013). *ASTM D113: Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials*. Obtenido de <http://compass.astm.org/download/E2105.39993.pdf>
- ASTM D2171. (2010). *ASTM D2171: Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer*. Recuperado el 18 de Enero de 2016, de <http://compass.astm.org/download/D2171D2171M.21795.pdf>
- ASTM D2872. (2012). *ASTM D2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. Recuperado el 9 de Octubre de 2015, de <http://compass.astm.org/download/D2872.7479.pdf>
- ASTM D4402. (2015). *ASTM D4402: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. Recuperado el 9 de Octubre de 2015, de <http://compass.astm.org/download/D4402D4402M.20029.pdf>
- ASTM D5. (2013). *ASTM D5: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. Recuperado el 18 de Enero de 2016, de <http://compass.astm.org/download/E2105.39993.pdf>
- ASTM D6521. (2013). *ASTM D6521: Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*. Recuperado el 9 de Octubre de 2015, de <http://compass.astm.org/download/D6521.18885.pdf>
- ASTM D70. (2010). *Standard Test Method for Density of Semi-Solid Asphalt Binder*. Obtenido de <http://compass.astm.org/download/D92.2773.pdf>
- ASTM D7175. (2015). *ASTM D7175: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. Recuperado el 15 de Octubre de 2015, de <http://compass.astm.org/download/D7175.12575.pdf>
- ASTM D92. (2013). *ASTM D92: Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*. Recuperado el 9 de Octubre de 2015, de <http://compass.astm.org/download/D92.2773.pdf>

- ASTM International. (2014). *ASTM D1754: Standard Test Method for Effects of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test)*. Recuperado el 6 de Marzo de 2017, de <http://compass.astm.org/download/D1754D1754M.25817.pdf>
- ASTM International. (2015). *ASTM D7405: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. Recuperado el 9 de Octubre de 2015, de <http://compass.astm.org/download/D7405.660.pdf>
- Avellan, M. (2007). *Asfaltos modificados con polímeros*. Guatemala: Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil.
- Calabi, A. (2012). *Control del envejecimiento del asfalto através de la adición de polvo deshidratado de orujo*. Santiago de Chile: Universidad Católica de Chile.
- Chen, J.-S., Wang, T.-J., & Cheng-Te, L. (2017). Evaluation of a highly - modified asphalt binder for held performance. En *Construction and Building Materials* (págs. 539-545). Taiwan: Elsevier.
- Cremades, I. (2008). *Asfaltos Modificados*. Colombia: Surfax S.A.
- Dougherty, C. (2002). *Introduction to Economics - Statistical Table*. Oxford: Oxford University.
- Du Pont, D. (8 de 6 de 2018). *Terpolímero Elastomérico Reactivo de Etileno*. Obtenido de Du Pont: http://artemisa.unicauca.edu.co/~sicolpav/PonenciasPDF/G_Terpolimero_Felipe.PDF
- Fernández, W., & Rondón, H. (2011). In *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas .
- Hildebrand, D. (2002). *Statistical Tables*.
- Jiménez, G., & Reyes, F. (2012). *Mejoramiento del asfalto 60/70 y la mezcla asfáltica MDC-2 con nanotubos de carbono obtenidos a partir de metano vía catalítica*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad de Javeriana, Departamento de Ingeniería Civil, Infraestructura Vial.

- Jiménez, M. (2016). *Informe: I-0642-14*. Costa Rica, San José: LanammeUCR.
- Juárez, D., Balart, R., Ferrándiz, S., García, D., Balart, D., & Ferrandiz, S. (2013). Estudio y análisis de los polímeros derivados del estireno-butadieno. *3C Tecnología – Nº 4*, 2-17.
- Kar, K., Pandey, J., & Rana, S. (2014). Handbook of Polymer Nanocomposites. Processing, Performance and Application: Volume B: Carbon Nanotube Based Polymer Composites. *Springer*, 247-248.
- Lesueur, D. (2009). En *The colloidal structure of bitumen: consequences on the reology and on the mechanisms of bitumen modification* (págs. 82-85). Advances in Colloid and interface Science.
- Mcnally, T. (2011). *Polymer modified bitumen: Properties and Characterization*. Oxford, Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.
- Múnera, J. (2012). *Modificación Polimérica de Asfaltos*. Medellín, Colombia: Universidad EAFIT.
- Navarro, L., Álvarez, M., Grosso, J. L., & Navarro, U. (2004). Separación y caracterización de resinas y asfaltos provenientes del crudo castilla. Evaluación de su interacción molecular. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 31-34.
- Palma, C., Ortiz, J., Ávalos, F., Palma, C., Ortiz, J., & Ávalos, F. (2015). *Modificación de asfalto con elastómeros para uso en pavimentos*. Mexico: Universidad Coahuilla.
- Plaza, S., & Rincón, T. (2014). *Estudio de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura utilizando asfalto 80-100 y su relación con el desempeño de campo*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Polacco, G., Filippi, S., Merussi, F., & Stasna, G. (2015). A review of fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Elsevier*, 74-98.
- Ramírez, C. (2011). *Angulo de contacto en nanopartículas*. Guadalajara: Centro de Investigación de Biomateriales, Universidad de Guadalajara.

- Reyes, F., Cely, N., & Figueroa, A. (2017). *Estudio de la adhesión y cohesión por medio de Energía Superficial libre de tres tipos de agregados pétreos utilizados en mezclas asfálticas con asfalt penetración 60-70*. Cancún, México: Congreso Mexicano del Asfalto - Expo Asfalto.
- Robinson, H. (2005). *Polymers in Asphalt*. London: Rapra Technology Limited.
- Salazar, J. (2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones, asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047). *Métodos y Materiales, Año 1, Volumen 1*, 3-38.
- Salcedo, M., & Gallardo, G. (2008). *Experiencia de Modificación de Cemento Asfáltico con Polímeros SBS en Obra*. Lima, Perú: Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería.
- Shuster, J., Rosenberger, M., & Schvezov, C. (2014). *Evaporación de gotas sésiles en superficies sólidas*. Santa Fe, Argentina: Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales SAM-CONAMET/IBEROMAT/MATERIA.
- Suárez, E., Betancourt, J., Llanos, J., Nieto, J., Palacio, A., & Izquierdo, E. (2013). Dimensión fractal de asfaltenos en capa delgada en presencia de un estabilizante. *Mexican Institute of Complex Systems, Revista QUIMICA*, 311-315.
- Wong, E. (2010). *¿Después de un Análisis de Variancia...qué? Ejemplos en ciencia de alimentos*. San Jose Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Escuela de Tecnología de Alimentos.
- Wulf, F. A. (2008). *Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería.

Apéndices

Apéndice A. Datos Experimentales

Cuadro A.1 Datos obtenidos del cambio de masa del asfalto M-1468-13 modificado con el polímero SBR en horno rotatorio de película delgada rotativa (RTFO).

Cilindro	masa cilindro (g)	masa cilindro + muestra inicial (g)	masa cilindro + muestra final (g)
1	170,658	205,728	205,637
2	171,799	206,824	206,731
3	171,734	207,242	207,148
4	168,784	204,103	204,012
5	168,964	204,197	204,108
6	174,061	209,522	209,431

Cuadro A.2 Datos obtenidos del cambio de masa del asfalto M-1468-13 modificado con el polímero SBS en horno rotatorio de película delgada (RTFO).

Cilindro	masa cilindro (g)	masa cilindro + muestra inicial (g)	masa cilindro + muestra final (g)
1	166,268	200,851	200,803
2	169,047	203,817	203,768
3	174,059	200,219	200,180
4	171,301	206,358	206,314
5	168,959	204,098	204,055
6	164,595	200,039	199,990

Cuadro A.3 Datos obtenidos del cambio de masa del asfalto M-1468-13 modificado con el polímero TER en horno rotatorio de película delgada (RTFO).

Cilindro	masa cilindro (g)	masa cilindro + muestra inicial (g)	masa cilindro + muestra final (g)
1	169,043	205,124	205,063
2	168,666	203,414	200,848
3	170,720	205,439	203,566
4	171,297	206,363	206,313
5	171,249	206,828	204,511
6	169,527	204,447	204,414

Cuadro A.4 Datos de viscosidad obtenidos por duplicado del viscosímetro dinámico rotacional a 135 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con el polímero SBR.

velocidad (rpm)	Corrida 1			Corrida 2		
	Viscosidad (mPa·s)	Torque (%)	Temperatura (°C)	Viscosidad (mPa*s)	Torque (%)	Temperatura (°C)
20	1388	11,1	134,7	1402	12,5	134,9
40	1325	21,2	134,9	1356	22,7	135
60	1279	30,7	134,5	1268	29,4	135,1
80	1244	39,8	134,9	1239	38,2	134,8
100	1215	48,5	135	1211	48,1	134,9
110	1190	52,4	134,9	1189	52,3	135
120	1188	57	135	1182	58,3	135
130	1179	61,1	134,9	1176	60,9	135,1

Cuadro A.5 Datos de viscosidad obtenidos por duplicado del viscosímetro dinámico rotacional a 135 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con el polímero SBS.

velocidad (rpm)	Corrida 1			Corrida 2		
	Viscosidad (mPa·s)	Torque (%)	Temperatura (°C)	Viscosidad (mPa*s)	Torque (%)	Temperatura (°C)
20	1455	13,2	134,9	1480	13,8	135
40	1440	20,4	135	1455	21	135
60	1410	26,8	135,1	1415	27,1	135,1
80	1400	31,7	134,8	1398	31,4	134,9
100	1390	39,4	135	1395	40,2	135,1
110	1387	56,3	135	1381	56,5	135
120	1380	62,5	135,1	1373	62,2	134,8
130	1371	67,4	134,9	1368	66,9	135

Cuadro A.6 Datos de viscosidad obtenidos por duplicado del viscosímetro dinámico rotacional a 135 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con el polímero TER.

velocidad (rpm)	Corrida 1			Corrida 2		
	Viscosidad (mPa·s)	Torque (%)	Temperatura (°C)	Viscosidad (mPa*s)	Torque (%)	Temperatura (°C)
20	1938	15,6	135	1965	16,3	135
40	1913	30,7	134,9	1920	31,4	135

Cuadro A.6 (Continuación) Datos de viscosidad obtenidos por duplicado del viscosímetro dinámico rotacional a 135 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con el polímero SBS.

velocidad (rpm)	Corrida 1			Corrida 2		
	Viscosidad (mPa·s)	Torque (%)	Temperatura (°C)	Viscosidad (mPa*s)	Torque (%)	Temperatura (°C)
60	1904	45,8	135	1897	46,2	135
80	1894	60,5	134,8	1887	60,1	134,9
100	1880	75,2	135	1882	75,4	134,9
110	1873	82,5	135	1877	82,7	135
120	1865	89,5	134,9	1862	89,3	135
130	1860	96,7	135	1855	96,1	134,9

Cuadro A.7 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	76,7053	2,08763	76,9794	2,04992
2	76,7195	2,08719	76,9913	2,05279
3	76,7261	2,08673	77,0088	2,05162
4	76,7145	2,08165	77,0157	2,05031
5	76,7360	2,08453	77,0223	2,04908
6	76,7403	2,08456	77,0257	2,04838
7	76,7385	2,08427	77,0300	2,04744
8	76,7388	2,08402	77,0307	2,04641
9	76,7405	2,08365	77,0328	2,04591
10	76,7397	2,08304	77,0303	2,04509

Cuadro A.8 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	78,1489	1,05719	76,9794	1,02487
2	78,1951	1,05869	76,9913	1,02559
3	78,2002	1,05845	77,0088	1,02381
4	78,2086	1,05827	77,0157	1,02480

Cuadro A.8 (Continuación) Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
5	78,2123	1,05802	77,0223	1,02460
6	78,2238	1,05756	77,0257	1,02413
7	78,2274	1,05722	77,0300	1,02541
8	78,2310	1,05755	77,0307	1,02437
9	78,2361	1,05680	77,0328	1,02363
10	78,2267	1,05665	77,0303	1,02092

Cuadro A.9 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 82 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR.

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	79,4977	0,567557	80,2262	0,551077
2	79,5312	0,568103	80,2432	0,550244
3	79,5458	0,567862	80,2691	0,550003
4	79,5482	0,567861	80,2952	0,549865
5	79,5619	0,567598	80,2933	0,549845
6	79,5708	0,567479	80,3132	0,549867
7	79,5833	0,567314	80,3119	0,549865
8	79,5891	0,567083	80,3199	0,549806
9	79,6027	0,567182	80,3299	0,549605
10	79,5971	0,566985	80,3348	0,549726

Cuadro A.10 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 64 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS.

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	79,0981	4,53956	4,54841	80,3161
2	79,1319	4,53371	4,53814	80,3238
3	79,1649	4,52814	4,53468	80,3599
4	79,1818	4,52468	4,53010	80,3653

Cuadro A.10 (Continuación) Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 64 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS.

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
5	79,2002	4,52011	4,53747	80,3434
6	79,2117	4,51723	4,52744	80,4234
7	79,2183	4,51601	4,52133	80,4318
8	79,2206	4,51333	4,51292	80,4396
9	79,2261	4,51297	4,51431	80,4494
10	79,2277	4,51143	4,51875	80,4841

Cuadro A.11 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS.

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	82,1980	2,04349	76,9794	2.05347
2	82,2180	2,04329	76,9913	2.05195
3	82,2415	2,03996	77,0088	2.04974
4	82,2554	2,03755	77,0157	2.04844
5	82,2699	2,03483	77,0223	2.04710
6	82,2802	2,03292	77,0257	2.04557
7	82,2874	2,03118	77,0300	2.04427
8	82,2931	2,03045	77,0307	2.04233
9	82,2987	2,02858	77,0328	2.04131
10	82,3025	2,02700	77,0303	2.04066

Cuadro A.12 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS.

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	84,2450	0,567557	80,2262	84,1212
2	84,2630	0,568103	80,2432	84,1411
3	84,2854	0,567862	80,2691	84,1626
4	84,2907	0,567861	80,2952	84,1701

Cuadro A.12 (Continuación) Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS.

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
5	84,2994	0,567598	80,2933	84,1829
6	84,3065	0,567479	80,3132	84,1882
7	84,3078	0,567314	80,3119	84,1935
8	84,3144	0,567083	80,3199	84,1956
9	84,3172	0,567182	80,3299	84,2000
10	84,3176	0,566985	80,3348	84,2037

Cuadro A.13 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con TER.

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	66,3402	2,97024	66,1353	3,02581
2	66,3337	2,96858	66,1536	3,02345
3	66,3393	2,96831	66,1336	3,02557
4	66,2510	2,96897	66,1375	3,02350
5	66,3332	2,96756	66,1299	3,02411
6	66,3263	2,96668	66,1076	3,02623
7	66,4018	2,96416	66,2112	3,02051
8	66,3177	2,96437	66,1253	3,02215
9	66,3211	2,96693	66,2080	3,02286
10	66,3130	2,96610	66,0989	3,01624

Cuadro A.14 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con TER.

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	67,2714	1.63840	67,1213	1,65550
2	67,3661	1.63990	67,1917	1,65703
3	67,2860	1.64122	67,1160	1,65580
4	67,2857	1.64097	67,1136	1,65871

Cuadro A.14 (Continuación) Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con TER.

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
5	67,2815	1.64115	67,1132	1,65847
6	67,2680	1.64148	67,0719	1,65772
7	67,2715	1.64109	67,0983	1,66132
8	67,2650	1.64154	67,0840	1,65946
9	67,2631	1.64172	67,0840	1,65763
10	67,2562	1.64163	66.9859	1,65819

Cuadro A.15 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 82 °C para el asfalto M-1468-13 modificado con TER.

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	68,9668	0,932659	68,7899	0,934039
2	68,9675	0,932421	68,7709	0,935054
3	68,9612	0,932377	68,7881	0,934509
4	68,9603	0,932413	68,7848	0,934422
5	68,9534	0,932301	68,7755	0,934488
6	68,9446	0,932251	68,7148	0,936690
7	68,9393	0,932373	68,7631	0,934258
8	68,9348	0,932097	68,7593	0,934254
9	68,9302	0,932082	68,7573	0,934191
10	68,9250	0,932178	68,6721	0,935364

Cuadro A.16 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	73,9460	4,44890	73,7487	4,42012
2	73,9363	4,43402	73,7517	4,41858
3	73,9405	4,43233	73,7494	4,41780
4	73,9370	4,43093	73,7477	4,41822

Cuadro A.16 (Continuación) Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
5	73,9367	4,42778	73,7473	4,41910
6	73,9350	4,42737	73,6963	4,42058
7	74,0073	4,42438	73,7536	4,42479
8	73,9360	4,42613	73,7122	4,41748
9	73,9329	4,42469	73,7381	4,41557
10	73,9314	4,42432	73,7349	4,41549

Cuadro A.17 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	75,6683	2,15121	75,3916	2,16451
2	75,6650	2,15052	75,4022	2,16541
3	75,6682	2,14972	75,3952	2,16493
4	75,6675	2,14946	75,4000	2,16461
5	75,6701	2,14897	75,3949	2,16420
6	75,6677	2,14874	75,3941	2,16375
7	75,6694	2,14789	75,3940	2,16384
8	75,6648	2,14778	75,3919	2,16369
9	75,6648	2,14665	75,3913	2,16391
10	75,6633	2,14661	75,3882	2,16342

Cuadro A.18 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 82 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	77,2062	1,10375	76,8694	1,12198
2	77,2161	1,10423	76,8789	1,12178
3	77,2151	1,10404	76,8745	1,12210
4	77,2183	1,10411	76,8753	1,12186

Cuadro A.18 (Continuación) Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 82 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
5	77,2152	1,10389	76,8820	1,12136
6	77,2165	1,10370	76,8786	1,12172
7	77,2092	1,10373	76,8744	1,12158
8	77,2183	1,10379	76,8796	1,12111
9	77,2172	1,10340	76,8746	1,12133
10	77,2137	1,10349	76,8766	1,12142

Cuadro A.19 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 64 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	74,2590	10,2597	73,9650	10,5348
2	74,2739	10,2473	73,9797	10,5226
3	74,2848	10,2427	73,9883	10,5181
4	74,2987	10,2410	74,0106	10,4946
5	74,3004	10,2497	74,0186	10,4885
6	74,3097	10,2530	74,0335	10,4779
7	74,3166	10,2473	74,0393	10,4736
8	74,3201	10,2473	74,0439	10,4686
9	74,3269	10,2480	74,0437	10,4816
10	74,3355	10,2351	74,0474	10,4793

Cuadro A.20 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	77,9128	4.75361	77,6557	4,86013
2	77,9188	4.7516	77,6634	4,85697
3	77,9256	4.74714	77,6639	4,85850
4	77,9340	4.74374	77,6650	4,86463

Cuadro A.20 (Continuación) Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
5	77,9337	4.74653	77,6661	4,86453
6	77,9341	4.74956	77,6738	4,86129
7	77,9383	4.74679	77,6818	4,85326
8	77,9430	4.74343	77,6924	4,84428
9	77,9456	4.7433	77,7002	4,84004
10	77,9459	4.74425	77,7040	4.83700

Cuadro A.21 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	80,9455	2,3045	80,8182	2,31777
2	80,9492	2,30357	80,8159	2,31974
3	80,9479	2,30486	80,8147	2,32225
4	80,9546	2,30171	80,8238	2,31812
5	80,9593	2,29990	80,8311	2,31511
6	80,9570	2,30185	80,8262	2,31854
7	80,9598	2,30047	80,8233	2,32091
8	80,9621	2,29947	80,8244	2,32121
9	80,9655	2,29865	80,8354	2,31538
10	80,9650	2,29885	80,8335	2,31673

Cuadro A.22 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con TER

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	61,7925	7,00451	62,0461	7,20460
2	61,7921	7,00960	62,0401	7,23410
3	61,7917	7,01292	61,9935	7,24331
4	61,7870	7,01575	61,9996	7,24383

Cuadro A.22 (Continuación) Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 70 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con TER

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
5	61,7798	7,02125	61,9432	7,25041
6	61,7742	7,02516	61,9894	7,25403
7	61,7704	7,02593	61,9567	7,25141
8	61,7645	7,02714	61,9492	7,25264
9	61,7605	7,03124	61,9476	7,25878
10	61,7542	7,03473	61,9646	7,26305

Cuadro A.23 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 76 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con TER

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	62,3970	3,89284	62,5663	3,98468
2	62,3953	3,89569	62,4986	3,99033
3	62,5094	3,89131	62,5594	3,98638
4	62,3922	3,89728	62,5597	3,98755
5	62,3831	3,89883	62,5526	3,98717
6	62,3827	3,89903	62,5216	3,98591
7	62,3766	3,90003	62,4526	3,99220
8	62,3750	3,90119	62,5377	3,98976
9	62,3700	3,90101	62,5339	3,99066
10	62,3638	3,90191	62,5278	3,99075

Cuadro A.24 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 82 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con TER

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	63,5714	2,20800	63,7054	2,24867
2	63,5762	2,21194	63,7106	2,25340
3	63,5733	2,21137	63,7076	2,25296
4	63,5718	2,21265	63,7010	2,25275

Cuadro A.24 (Continuación) Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 82 °C envejecido en el RTFO para el asfalto M-1468-13 modificado con TER

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
5	63,5661	2,21222	63,6959	2,25379
6	63,5584	2,21285	63,6896	2,25375
7	63,5572	2,21264	63,6834	2,25376
8	63,5515	2,21180	63,6784	2,25434
9	63,5483	2,21182	63,6712	2,25471
10	63,5517	2,21190	63,6838	2,25576

Cuadro A.25 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 22 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	39,4131	5855,94	38,693	5823,09
2	39,6422	5797,02	38,8617	5782,86
3	39,7187	5782,13	38,9214	5775,12
4	39,7334	5805,78	38,9283	5805,37
5	39,7649	5785,71	38,9730	5785,56
6	39,7671	5780,36	39,0044	5767,66
7	39,8228	5767,82	39,0223	5762,47
8	39,8041	5789,51	39,0026	5801,68
9	39,8246	5776,05	39,0222	5787,10
10	39,8466	5762,53	39,0440	5773,20

Cuadro A.26 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 25 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	41,3043	4266,94	40,2995	4275,46
2	41,4738	4233,87	40,4900	4251,32
3	41,5306	4220,22	40,5414	4257,20
4	41,5842	4216,98	40,5914	4242,92

Cuadro A.27 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 25 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*·sen(δ) (kPa)
5	41,5989	4210,00	40,6246	4233,63
6	41,6164	4203,09	40,6477	4227,23
7	41,6346	4200,75	40,6568	4232,57
8	41,6275	4212,82	40,6586	4240,67
9	41,6429	4206,55	40,6800	4230,55
10	41,6520	4202,34	40,6941	4225,26

Cuadro A.28 Datos obtenidos del reómetro de corte dinámico a 28 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR

Ciclo	Ángulo de Fase / δ (°)	G*·sen(δ) (kPa)
1	42,0449	3092,70
2	42,2049	3075,72
3	42,2653	3069,19
4	42,2991	3065,04
5	42,3253	3061,52
6	42,3407	3059,23
7	42,3550	3057,52
8	42,3658	3056,13
9	42,3755	3054,99
10	42,3841	3053,20

Cuadro A.29 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 22 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*·sen(δ) (kPa)
1	38,3153	5920,91	38,3808	5896,27
2	38,4539	5890,42	38,4486	5881,14
3	38,4939	5892,05	38,5106	5871,50
4	38,4983	5911,13	38,5245	5885,61
5	38,5449	5886,39	38,5306	5896,27
6	38,5737	5871,95	38,5561	5882,87

Cuadro A.29 (Continuación) Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 22 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*·sen(δ) (kPa)
7	38,5852	5869,89	38,5791	5870,64
8	38,5564	5907,44	38,5985	5860,35
9	38,5795	5888,62	38,6153	5850,58
10	38,5981	5877,15	38,6163	5855,33

Cuadro A.30 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 25 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*·sen(δ) (kPa)
1	40,2248	4366,12	40,2165	4383,10
2	40,3717	4356,06	40,3372	4366,82
3	40,4276	4348,39	40,4026	4353,14
4	40,4721	4336,04	40,4426	4345,69
5	40,4988	4329,47	40,4696	4339,11
6	40,5132	4328,78	40,4928	4332,59
7	40,5320	4322,90	40,5109	4327,16
8	40,5452	4322,37	40,5269	4323,53
9	40,5329	4335,97	40,5401	4319,87
10	40,5499	4325,58	40,5498	4316,88

Cuadro A.31 Datos obtenidos del reómetro de corte dinámico a 28 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS

Ciclo	Ángulo de Fase / δ (°)	G*·sen(δ) (kPa)
1	42,2383	3177,47
2	42,3804	3162,79
3	42,4305	3155,41
4	42,4625	3151,49
5	42,4826	3148,56
6	42,4955	3147,28
7	42,5077	3145,42

Cuadro A.31 (Continuación) Datos obtenidos del reómetro de corte dinámico a 28 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS

Ciclo	Ángulo de Fase / δ (°)	$G^* \cdot \text{sen}(\delta)$ (kPa)
8	42,5164	3144,72
9	42,5243	3143,08
10	42,5301	3142,36

Cuadro A.32 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 22 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con TER

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	$G^* \cdot \text{sen}(\delta)$ (kPa)
1	39,7617	5146,81	39,9035	5294,22
2	39,9200	5122,54	39,9912	5300,65
3	39,9801	5109,91	40,0397	5285,50
4	40,0052	5112,65	40,0723	5274,70
5	40,0130	5121,88	40,0977	5268,68
6	40,0363	5109,38	40,0852	5291,40
7	40,0551	5102,46	40,0897	5292,84
8	40,0678	5098,50	40,1112	5278,39
9	40,0617	5112,33	40,1196	5274,91
10	40,0651	5113,54	40,1091	5288,66

Cuadro A.33 Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 25 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con TER

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	$G^* \cdot \text{sen}(\delta)$ (kPa)
1	41,5383	3731,77	41,5115	3889,03
2	41,6725	3717,35	41,6509	3871,86
3	41,7205	3710,66	41,6989	3866,12
4	41,7493	3706,25	41,7255	3863,22
5	41,7674	3704,34	41,7440	3860,29
6	41,7798	3703,03	41,7546	3858,48
7	41,7897	3701,52	41,7651	3857,55
8	41,7962	3701,40	41,7731	3855,75

Cuadro A.33 (Continuación) Datos obtenidos por duplicado del reómetro de corte dinámico a 25 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con TER

Ciclo	Corrida 1		Corrida 2	
	Ángulo de Fase / δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de Fase / δ (°)	G*·sen(δ) (kPa)
9	41,8044	3700,17	41,7796	3855,49
10	41,8092	3699,42	41,7841	3854,27

Cuadro A.34 Datos obtenidos del reómetro de corte dinámico a 28 °C envejecido en el PAV para el asfalto M-1468-13 modificado con TER

Ciclo	Ángulo de Fase / δ (°)	G*·sen(δ) (kPa)
1	43,2166	2806,19
2	43,3319	2793,76
3	43,3731	2790,12
4	43,3953	2788,02
5	43,4108	2785,63
6	43,4204	2784,98
7	43,4291	2783,73
8	43,4345	2783,14
9	43,4400	2782,53
10	43,4426	2782,66

Cuadro A.35 Datos obtenidos del reómetro de vigas de flexión BBR para la muestra de asfalto M-1468-13 modificado con SBR

Temperatura de trabajo (°C)	Rigidez / S (MPa)		Pendiente / m
	Medido	Estimado	
-16	71,9686	71,8164	0,354231
-22	139,3919	139,497	0,321112
-28	260,8789	260,4898	0,229718

Cuadro A.36 Datos obtenidos del reómetro de vigas de flexión BBR para la muestra de asfalto M-1468-13 modificado con SBS

Temperatura de trabajo (°C)	Rigidez / S (MPa)		Pendiente / m
	Medido	Estimado	
-16	84,2402	84,2307	0,341033
-22	193,4757	193,3891	0,29883

Cuadro A.37 Datos obtenidos del reómetro de vigas de flexión BBR para la muestra de asfalto M-1468-13 modificado con TER

Temperatura de trabajo (°C)	Rigidez / S (MPa)		Pendiente / m
	Medido	Estimado	
-16	77,4964	77,4592	0,376173
-22	171,2953	171,2347	0,325574
-28	309,6599	309,6427	0,288325

Cuadro A.38 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado silíceo en condición seca

Réplica	Valor de POTS
1	236,456
2	234,898
3	231,933
4	232,842

Cuadro A.39 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado silíceo en condición seca

Réplica	Valor de POTS
1	262,261
2	264,392
3	260,453
4	261,938

Cuadro A.40 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado silíceo en condición seca

Réplica	Valor de POTS
1	290,471
2	291,527
3	288,348
4	279,211

Cuadro A.41 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 en el agregado silíceo en condición seca

Réplica	Valor de POTS
1	211,211
2	215,328
3	210,430
4	210,882

Cuadro A.42 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado calizo en condición seca

Réplica	Valor de POTS
1	230,768
2	226,453
3	231,134
4	221,612

Cuadro A.43 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado calizo en condición seca

Réplica	Valor de POTS
1	258,093
2	258,845
3	250,428
4	247,786

Cuadro A.44 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado calizo en condición seca

Réplica	Valor de POTS
1	272,441
2	268,887
3	270,132
4	271,654

Cuadro A.45 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 en el agregado calizo en condición seca

Réplica	Valor de POTS
1	208,456
2	201,765

Cuadro A.45 (Continuación) Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 en el agregado calizo en condición seco

Réplica	Valor de POTS
3	207,687
4	203,987

Cuadro A.46 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado silíceo en condición húmedo

Réplica	Valor de POTS
1	214,213
2	217,654
3	218,981
4	221,187

Cuadro A.47 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado silíceo en condición húmedo

Réplica	Valor de POTS
1	246,254
2	247,899
3	244,546
4	244,564

Cuadro A.48 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado silíceo en condición húmedo

Réplica	Valor de POTS
1	274,543
2	268,988
3	267,583
4	278,112

Cuadro A.49 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 en el agregado silíceo en condición húmedo

Réplica	Valor de POTS
1	182,873
2	192,836
3	186,987
4	195,678

Cuadro A.50 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado calizo en condición húmedo

Réplica	Valor de POTS
1	209,134
2	209,813
3	211,492
4	212,887

Cuadro A.51 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado calizo en condición húmedo

Réplica	Valor de POTS
1	236,215
2	236,498
3	235,991
4	236,123

Cuadro A.52 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado calizo en condición húmedo

Réplica	Valor de POTS
1	255,899
2	253,877
3	253,378
4	254,144

Cuadro A.53 Datos de POTS obtenidos del PATTI para el asfalto M-1468-13 en el agregado calizo en condición húmedo

Réplica	Valor de POTS
1	180,135
2	177,603
3	168,936
4	170,356

Cuadro A.54 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado silíceo en condición seco

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	107,7
2	107,9
3	107,8
4	107,8
5	107,2
6	107,3
7	107,5
8	107,4
9	107,6
10	107,4

Cuadro A.55 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado silíceo en condición seco

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	101,2
2	101
3	101,2
4	101,2
5	101,4
6	101,1
7	101,3
8	101,3
9	101,3
10	101,4

Cuadro A.56 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado silíceo en condición seco

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	94,6
2	94,8
3	94,8
4	94,2
5	94,1
6	94,2
7	94,3

Cuadro A.56 (Continuación) Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado silíceo en condición seco

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
8	94,3
9	94,1
10	94,2

Cuadro A.57 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 en el agregado silíceo en condición seco

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	121,2
2	121,1
3	121,5
4	121,6
5	121,3
6	121,2
7	121,4
8	121,3
9	121,5
10	121,6

Cuadro A.58 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado calizo en condición seco

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	109,5
2	109,7
3	109,3
4	109,4
5	109,1
6	109,4
7	109,1
8	109,2
9	109,3
10	109,6

Cuadro A.59 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado calizo en condición seco

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	103,4
2	103,5
3	103,6
4	103,4
5	103,5
6	103,5
7	103,3
8	103,1
9	103,4
10	103,4

Cuadro A.60 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado calizo en condición seco

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	98,2
2	98,5
3	98,3
4	98,1
5	98,1
6	98,2
7	98,4
8	98,3
9	98,2
10	98,4

Cuadro A.61 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 en el agregado calizo en condición seco

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	123,7
2	123,8
3	123,8
4	123,8
5	123,8
6	123,4
7	123,6

Cuadro A.61 (Continuación) Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 en el agregado calizo en condición seco

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
8	123,7
9	123,5
10	123,8

Cuadro A.62 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado silíceo en condición húmedo

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	113,8
2	113,4
3	113,2
4	113,3
5	113,5
6	113,3
7	113,9
8	113,4
9	113,5
10	113,4

Cuadro A.63 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado silíceo en condición húmedo

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	107,1
2	107,5
3	107,4
4	107,6
5	107,7
6	107,3
7	107,5
8	107,4
9	107,3
10	107,4

Cuadro A.64 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado silíceo en condición húmedo

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	99,1
2	99,2
3	99,8
4	99,9
5	99,4
6	99,4
7	99,3
8	99,8
9	99,1
10	99,2

Cuadro A.65 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 en el agregado silíceo en condición húmedo

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	125,3
2	126
3	125,8
4	125,9
5	126
6	126
7	126
8	126
9	126
10	125,9

Cuadro A.66 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado calizo en condición húmedo

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	115,5
2	115,7
3	115,3
4	115,4
5	115,5
6	115,6
7	115,6

Cuadro A.66 (Continuación) Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBR en el agregado calizo en condición húmedo

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
8	115,7
9	115,6
10	115,6

Cuadro A.67 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con SBS en el agregado calizo en condición seco

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	110,9
2	110,6
3	110,2
4	110,4
5	110,6
6	110,7
7	110,2
8	110,5
9	110,3
10	110,4

Cuadro A.68 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 modificado con TER en el agregado calizo en condición seco

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	102,2
2	102,1
3	102,1
4	102,8
5	102,1
6	102,2
7	102,2
8	102,3
9	102,4
10	102,6

Cuadro A.69 Datos de los ángulos de contacto obtenidos del Goniómetro para el asfalto M-1468-13 en el agregado calizo en condición seco

Réplica	Ángulo de Contacto (°)
1	127,7
2	127,8
3	127,8
4	127,8
5	127,8
6	127,9
7	127,8
8	127,9
9	127,8
10	127,9

Apéndice B. Datos Intermedios

Cuadro B.1 Porcentaje de cambio de masa del asfalto M-1468-13 modificado con SBR en horno rotatorio de película delgada

Cilindro	Masa asfalto (g)	Masa de residuo (g)	Porcentaje cambio de masa (%)
1	35,07	34,979	0,2595
2	35,025	34,932	0,2655
3	35,508	35,414	0,2647
4	35,319	35,228	0,2577
5	35,233	35,144	0,2526
6	35,461	35,37	0,2566

Cuadro B.2 Porcentaje de cambio de masa del asfalto M-1468-13 modificado con SBS en horno rotatorio de película delgada

Cilindro	Masa asfalto (g)	Masa de residuo (g)	Porcentaje cambio de masa (%)
1	34,583	34,535	0,1388
2	34,77	34,721	0,1409
3	26,16	26,121	0,1491
4	35,057	35,013	0,1255
5	35,139	35,096	0,1224
6	35,444	35,395	0,1382

Cuadro B.3 Porcentaje de cambio de masa del asfalto M-1468-13 modificado con TER en horno rotatorio de película delgada

Cilindro	Masa asfalto (g)	Masa de residuo (g)	Porcentaje cambio de masa (%)
1	36,081	36,02	0,1691
2	34,748	32,182	7,3846
3	34,719	32,846	5,3947
4	35,066	35,016	0,1426
5	35,579	33,262	6,5123
6	34,92	34,887	0,0945

Cuadro B.4 Porcentaje de pérdida de adhesión del asfalto M-1468-13 modificado con los diferentes polímeros y el original sin modificar en el agregado silíceo y calizo

Asfalto	Pérdida de fuerza en agregado silíceo (%)	Pérdida de fuerza en agregado calizo (%)
SBR	6,85	7,32
SBS	6,27	6,93
TER	5,25	6,08
Sin modificar	10,55	14,90

Cuadro B.5 Datos de los grados de libertad obtenidos del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS

Fuente	k-1	N-k	N+k	F _{crítico}
Tipo de polímero	2	9	11	3,98
Agregado	1	9	10	4,96
Acondicionamiento	1	9	10	4,96

Cuadro B.6 Datos del promedio global y la suma de cuadrados obtenidos del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS

Fuente	\bar{X}_{global}	SS _{totales}	SS _{tratamiento}	SS _{aleatorio}
Tipo de polímero	247,77	5978,36	1233,68	4744,68
Agregado	247,75	5978,36	5611,08	367,28
Acondicionamiento	247,77	5978,36	5174,02	804,34

Cuadro B.7 Datos de las medias cuadradas y los valores F y P del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS

Fuente	MS _{tratamiento}	MS _{aleatorio}	F _{tratamiento}	Valor P
Tipo de polímero	137,08	2372,34	263,59	0,00001
Agregado	561,108	367,28	40,81	0,00003
Acondicionamiento	517,04	804,34	90,39	0,00001

Cuadro B.8 Datos obtenidos de los rangos estudentizados de la interacción de los polímeros para la prueba de Tukey en los valores de POTS

Interacción	Δ	q _{0,05}	T _{0,5}
SBR-SBS	26,93	3,95	13,35
SBR-TER	48,61	3,95	13,35
SBS-TER	21,68	3,95	13,35

Cuadro B.9 Datos obtenidos de los rangos estudentizados de la interacción de los agregados para la prueba de Tukey en los valores de POTS

Interacción	Δ	$q_{0,05}$	$T_{0,5}$
Silícico-Calizo	11,06	3,20	9,18

Cuadro B.10 Datos obtenidos de los rangos estudentizados de la interacción de los acondicionamientos para la prueba de Tukey en los valores de POTS

Interacción	Δ	$q_{0,05}$	$T_{0,5}$
Seco-Húmedo	16,38	3,20	9,18

Cuadro B.11 Datos de los promedios, desviaciones estándar y varianza de los diferentes tipos de polímero del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS

Tipo de polímero	\bar{X}	σ^2	σ
SBR	222,59	104,65	10,23
SBS	249,52	123,88	11,13
TER	271,20	182,79	13,52

Cuadro B.12 Datos de los promedios, desviaciones estándar y varianza de los diferentes tipos de agregado del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS

Tipo de agregado	\bar{X}	σ^2	σ
Silícico	253,30	655,36	25,60
Calizo	242,24	466,99	21,61

Cuadro B.13 Datos de los promedios, desviaciones estándar y varianza de los diferentes tipos de acondicionamiento del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS

Tipo de acondicionamiento	\bar{X}	σ^2	σ
Seco	255,96	508,50	22,55
Húmedo	239,58	526,24	22,94

Cuadro B.14 Datos de los grados de libertad obtenidos del análisis de varianza múltiple para el ángulo de contacto

Fuente	k-1	N-k	N+k	F _{crítico}
Tipo de polímero	2	9	11	3,98
Agregado	1	9	10	4,96
Acondicionamiento	1	9	10	4,96

Cuadro B.15 Datos del promedio global y la suma de cuadrados obtenidos del análisis de varianza múltiple para el ángulo de contacto

Fuente	\bar{X}_{global}	SS _{totales}	SS _{tratamiento}	SS _{aleatorio}
Tipo de polímero	105,06	461,60	126,64	334,12
Agregado	105,06	461,60	445,50	16,10
Acondicionamiento	105,06	461,60	348,13	113,47

Cuadro B.16 Datos de las medias cuadradas y los valores F y P del análisis de varianza múltiple para el ángulo de contacto

Fuente	MS _{tratamiento}	MS _{aleatorio}	F _{tratamiento}	Valor P
Tipo de polímero	14,07	167,48	126,03	0,00001
Agregado	21,06	16,10	12,15	0,00001
Acondicionamiento	36,00	113,46	85,60	0,00001

Cuadro B.17 Datos obtenidos de los rangos estudentizados de la interacción de los polímeros para la prueba de Tukey en los ángulos de contacto

Interacción	Δ	q _{0,05}	T _{0,5}
SBR-SBS	6,4	3,95	4,63
SBR-TER	12,93	3,95	4,63
SBS-TER	6,53	3,95	4,63

Cuadro B.18 Datos obtenidos de los rangos estudentizados de la interacción de los agregados para la prueba de Tukey en los ángulos de contacto

Interacción	Δ	q _{0,05}	T _{0,5}
Silícico-Calizo	5,32	3,95	4,25

Cuadro B.19 Datos obtenidos de los rangos estudentizados de la interacción de los acondicionamientos para la prueba de Tukey en los ángulos de contacto

Interacción	Δ	$q_{0,05}$	$T_{0,5}$
Seco-Húmedo	6,15	3,95	4,25

Cuadro B.20 Datos de los promedios, desviaciones estándar y varianza de los diferentes tipos de polímero del análisis de varianza múltiple para ángulos de contacto

Tipo de polímero	\bar{X}	σ^2	σ
SBR	111,50	13,99	3,74
SBS	105,10	20,79	4,56
TER	98,57	11,49	3,39

Cuadro B.21 Datos de los promedios, desviaciones estándar y varianza de los diferentes tipos de agregado del análisis de varianza múltiple para ángulos de contacto

Tipo de agregado	\bar{X}	σ^2	Σ
Silícico	103,90	43,30	6,58
Calizo	106,22	48,02	6,93

Cuadro B.22 Datos de los promedios, desviaciones estándar y varianza de los diferentes tipos de acondicionamiento del análisis de varianza múltiple para el valor de POTS

Tipo de acondicionamiento	\bar{X}	σ^2	Σ
Seco	5,64	40,07	6,33
Húmedo	6,33	31,81	5,64

Apéndice C. Muestra de Cálculo

C.1 Masa de residuo del asfalto

Para obtener la masa de residuo del asfalto después del proceso de envejecimiento se utiliza la siguiente fórmula:

$$m_r = m_{cilindro+asfalto} - m_{cilindro} \quad (C.1)$$

Tomando los datos de la muestra del cilindro 1, los cuales se encuentran en el Cuadro A.1, en las columnas 1 y 3, fila 1 se tiene:

$$m_r = 205,637 - 170,658 = 34,979$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.1, columna 2 y fila 1.

C.2 Cambio de masa del asfalto envejecido

Para determinar el porcentaje de cambio de masa de una muestra de asfalto envejecido ya sea en un horno RTFO o PAV se utiliza la siguiente fórmula:

$$X_{\Delta m} = \left(\frac{m_i - m_r}{m_i} \right) \cdot 100 \quad (C.2)$$

Tomando los datos del Cuadro B.1, columnas 1 y 2, fila 1 se tiene:

$$X_{\Delta m} = \left(\frac{35,07 - 34,979}{35,07} \right) \cdot 100 = 0,2595$$

El valor se encuentra tabulado en el Cuadro B.1, columna 3, fila 1.

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.1, columna 2 y fila 1.

C.3 Pérdida de fuerza de adhesión

Para determinar la pérdida de fuerza de adhesión de los asfaltos modificados y sin modificar se utiliza la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de pérdida de adhesión} = \left(\frac{POTS_s - POTS_H}{POTS_s} \right) \cdot 100 \quad (\text{C.4})$$

Tomando los datos para el asfalto modificado con SBR del Cuadro A.41, columna 2, fila 1 y el Cuadro A.45, columna 2 y fila 1 se presenta:

$$\% \text{ de pérdida de adhesión} = \left(\frac{230,768 - 214,213}{230,768} \right) \cdot 100 = 7,174$$

Este resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.4, columna 2, fila 1

C.4 Cálculo de promedios

Para el cálculo de los valores promedio tanto de los valores de POTS como de los ángulos de contacto, se usa la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \quad (\text{C.5})$$

Tomando los datos del Cuadro 6.25, columna 1, fila 1, 4, 7 y 10 se muestra un ejemplo de la muestra de cálculo con el polímero SBR

$$\bar{X} = \frac{234,20 + 210,832 + 227,492 + 218,009}{4} = 222,59$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.12, columna 2, fila 1

C.5 Análisis de varianza múltiple MANOVA

Promedio global

Para el cálculo de la suma de cuadrados totales se utiliza la siguiente fórmula:

$$\bar{X}_G = \frac{\sum \bar{X}}{k} \quad (\text{C.5})$$

Tomando los valores del Cuadro B.7, columna 2, de la fila 1 hasta la 3 se tiene

$$\bar{X}_G = \frac{222,59 + 249,52 + 271,20}{3} = 247,77$$

Suma de cuadrados totales

Para el cálculo de la suma de cuadrados totales se utiliza la siguiente fórmula:

$$SS_{\text{total}} = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_G)^2 \quad (\text{C.6})$$

Tomando los valores del Cuadro 6.25, columna 1, fila de la 1 a la 12 se tiene:

$$SS_{\text{total}} = (234,03 - 247,77)^2 + (210,83 - 247,77)^2 + (227,49 - 247,77)^2 + \\ (218,01 - 247,77)^2 + \dots + (245,82 - 247,77)^2 = 5978.36$$

El valor obtenido se encuentra en el Cuadro B.7, columna 3, fila 1

Suma de cuadrados por tratamiento

Para el cálculo de la suma de cuadrados totales se utiliza la siguiente fórmula:

$$SS_{\text{tratamiento}} = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_i)^2 \quad (\text{C.7})$$

Tomando los valores del Cuadro 6.25, columna 1, fila de la 1 a la 12 y del Cuadro B.12, columna 2 y de la fila 1 a la 3 se tiene:

$$\begin{aligned} SS_{\text{tratamiento}} = & (234,03 - 225,59)^2 + \dots + (218,009 - 247,77)^2 + \\ & (242,305 - 249,52)^2 + \dots + (245,82 - 247,77)^2 + \\ & (270,779 - 271,20)^2 + \dots + (252,636 - 271,20)^2 = 1233,68 \end{aligned}$$

El valor obtenido se encuentra en el Cuadro B.7, columna 4, fila 1

Suma de cuadrados aleatorio

Para el cálculo de la suma de cuadrados totales se utiliza la siguiente fórmula:

$$SS_{\text{aleatorio}} = SS_{\text{totales}} - SS_{\text{tratamiento}} \quad (\text{C.8})$$

Tomando los valores del Cuadro 6.25, columna 1, fila de la 1 a la 12 se tiene:

$$SS_{\text{tratamiento}} = 5978,36 - 1233,68 = 4744,68$$

El valor obtenido se encuentra en el Cuadro B.7, columna 5, fila 1

Cuadrado medio del tratamiento

Para el cálculo de la suma de cuadrados totales se utiliza la siguiente fórmula:

$$MS_{\text{tratamiento}} = \frac{SS_{\text{tratamiento}}}{(N-k)} \quad (\text{C.9})$$

Tomando los valores del Cuadro B.6 y Cuadro B.7, columnas 1, filas la 1 se tiene:

$$MS_{\text{tratamiento}} = \frac{1233,68}{9} = 137,08$$

El valor obtenido se encuentra en el Cuadro B.8, columna 3, fila 1

Cuadrado medio aleatorio

Para el cálculo de la suma de cuadrados totales se utiliza la siguiente fórmula:

$$MS_{\text{aleatorio}} = \frac{SS_{\text{aleatorio}}}{(k-1)} \quad (\text{C.10})$$

Tomando los valores del Cuadro B.6 y Cuadro B.7, columnas 2, filas la 2 se tiene:

$$MS_{\text{aleatorio}} = \frac{4744,68}{2} = 2372,4$$

El valor obtenido se encuentra en el Cuadro B.8, columna 3, fila 1

Valor F tratamiento

Para el cálculo de la suma de cuadrados totales se utiliza la siguiente fórmula:

$$F_{\text{tratamiento}} = \frac{MS_{\text{aleatorio}}}{(N-k)} \quad (\text{C.10})$$

Tomando los valores del Cuadro B.6 y Cuadro B.8, columnas 2, filas la 2 se tiene:

$$F_{\text{tratamiento}} = \frac{2372,4}{(12-3)} = 263,59$$

El valor obtenido se encuentra en el Cuadro B.8, columna 4, fila 1. Por otra parte, la $F_{\text{crítico}}$ se obtiene por medio de una tabla estadística de distribución F, Tabla A.3 (Hildebrand, 2002). Dicho valor se determina por medio de los grados de libertad totales que es 11 y el del numerador que es 2. El valor obtenido es de 3,98 para los polímeros y de 4,96 para los agregados y acondicionamientos.

C.6 Desviación Estándar

Para calcular la desviación estándar se utiliza la siguiente fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_i)^2}{n}} \quad (\text{C.11})$$

Tomando los valores del Cuadro 6.25, columna 1, fila de la 1, 4, 7, 10 y del Cuadro B.12, columna 2 y de la fila 1 se tiene para el polímero SBR:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(234,020 - 222,59)^2 + (210,832 - 222,59)^2 + (227,492 - 222,59)^2 + (218,009 - 222,59)^2}{4}} = 10,23$$

El valor se encuentra tabulado en el Cuadro B.12, columna 4, fila 1.

C.7 Prueba de Tukey

Para realizar la prueba de Tukey se utiliza la siguiente ecuación:

$$T_{\varepsilon} = q_{\varepsilon}(k, N - k) \sqrt{\frac{MS_{\text{tratamiento}}}{N}} \quad (\text{C.12})$$

Tomando en cuenta el número de tratamientos y los grados de libertad del denominador para encontrar el valor estudentizado a partir de las Tablas Estadísticas, tabla 10 (Dougherty, 2002), además del dato de cuadrado medio de tratamiento en el Cuadro B.8, fila 1, columna 2 así como el número de corridas experimentales para el factor tipo de polímero, se tiene:

$$T_{\varepsilon} = 3,95 \sqrt{\frac{137,08}{12}} = 13,351$$

El valor se encuentra en el Cuadro B.9, columna 4, fila 1.

Apéndice D. Procedimiento Experimental

D.1 Modificación del Asfalto

- 1- Medir la masa del asfalto.
- 2- Agregar la muestra de asfalto medida al envase para modificar
- 3- Seleccionar el polímero según corresponda (SBR, SBS, TER)
- 4- Dependiendo del tipo de polímero, establecer las condiciones de modificación: masa de polímero a utilizar, temperatura y tiempo de reacción.

D.2 Ensayo de Adherencia de Bitumen

Medición en acondicionamiento seco

- 1- Acondicionar los diferentes agregados a utilizar, lijar y limpiar en baño ultrasónico.
Secar y limpiar
- 2- Calibrar el equipo de PATTI mediante el sistema pistón – tornillo. Obtener una curva de calibración con pendiente de 100.
- 3- Preparar los tornillos con las muestras de asfalto a utilizar
- 4- Poner los tornillos sobre los diferentes agregados y presionar
- 5- Ejecutar el PATTI en cada uno de los tornillos y medir el valor de POTS

Medición en acondicionamiento húmedo

- 1- Acondicionar los diferentes agregados a utilizar, lijar y limpiar en baño ultrasónico.
Secar y limpiar
- 2- Calibrar el equipo de PATTI mediante el sistema pistón – tornillo. Obtener una curva de calibración con pendiente de 100.
- 3- Preparar los tornillos con las muestras de asfalto a utilizar
- 4- Poner los tornillos sobre los diferentes agregados y presionar
- 5- Sumergir los agregados junto con los tornillos en un baño de agua a 60 °C por un tiempo 24 h.

- 6- Posterior al tiempo de acondicionamiento, ejecutar el PATTI en cada uno de los tornillos y medir el valor de POTS

D.3 Ensayo por Goniometría

Medición en acondicionamiento seco

- 1- Acondicionar los diferentes agregados a utilizar, lijar y limpiar en baño ultrasónico. Secar y limpiar.
- 2- Calibrar el equipo mediante el software DropImage junto con el molde correspondiente.
- 3- Preparar unos capilares con la muestra de asfalto de interés.
- 4- Poner los capilares dentro de una aguja caliente para gotear el asfalto sobre el agregado.
- 5- Tomar una imagen para cada gota por medio del software y la cámara para luego medir el ángulo de contacto

Medición en acondicionamiento húmedo

- 1- Acondicionar los diferentes agregados a utilizar, lijar y limpiar en baño ultrasónico. Secar y limpiar.
- 2- Calibrar el equipo mediante el software DropImage junto con el molde correspondiente.
- 3- Preparar unos capilares con la muestra de asfalto de interés.
- 4- Poner los capilares dentro de una aguja caliente para gotear el asfalto sobre el agregado.
- 5- Sumergir el sistema de las gotas de asfalto sobre el agregado en un baño de agua a temperatura ambiente por un periodo de 4 horas para luego realizar la medición correspondiente
- 6- Tomar una imagen para cada gota por medio del software y la cámara para luego medir el ángulo de contacto