



FACULTAD DE INGENIERÍA  
Carrera de **INGENIERÍA CIVIL**

“ANÁLISIS DEL PUNTO DE ABLANDAMIENTO Y  
EL GRADO DE PENETRACIÓN DEL ASFALTO  
MODIFICADO CON POLÍMERO SBS PARA  
PAVIMENTOS FLEXIBLES, MUNDO, 2021”

Tesis para optar al título profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

**Autores:**

Tania Chavarria Villarreal  
Jose Miguel Marreros Riveros

**Asesor:**

Mg. Ing. Josualdo Carlos Villar Quiroz  
<https://orcid.org/0000-0003-3392-9580>

Trujillo - Perú

**JURADO EVALUADOR**

Jurado 1 Presidente(a)	SHEYLA YULIANA CORNEJO RODRIGUEZ	41639360
	Nombre y Apellidos	N.º DNI

Jurado 2	WISTON HENRY AZAÑEDO MEDINA	41526075
	Nombre y Apellidos	N.º DNI

Jurado 3	GONZALO HUGO DIAZ GARCIA	40539624
	Nombre y Apellidos	N.º DNI

## DEDICATORIA

En primer lugar, dedico este trabajo de investigación a mi Padre Celestial por las incontables bendiciones en mi vida, la salud y la oportunidad de desarrollarme académica y profesionalmente. A mis padres: CESAR ANDRES CHAVARRIA MERCADO y MARLINA EUGENIA VILLARREAL AGUIRRE, y a mis abuelitas por el ánimo y educación brindados, y por su apoyo en todos los aspectos que hacen posible mi crecimiento personal.

CHAVARRIA VILLARREAL, TANIA

En primer lugar, quiero dedicar este trabajo de investigación a Dios, por darme las fuerzas para superarme cada día en mi formación profesional. A mis padres: VICTOR MARREROS FLORIAN y REGINA RIVEROS OBANDO y a mi hermana: DIANA MARREROS RIVEROS, por su apoyo incondicional, por darme ánimos y fortaleza en los momentos difíciles y por formarme con valores y en un ambiente de respeto y armonía.

MARREROS RIVEROS, JOSÉ MIGUEL

## AGRADECIMIENTO

Gracias Dios por brindarnos fortaleza y perseverancia en nuestra formación profesional.

A nuestros padres y hermanos por el apoyo incondicional y por brindarnos los recursos económicos y facilidades para lograr nuestras metas.

A los docentes y amigos que contribuyeron con sus conocimientos para nuestra formación y crecimiento como estudiantes.

Al Mg. Ing. Josualdo Carlos Villar Quiroz por el asesoramiento y apoyo en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>JURADO EVALUADOR</b>	<b>2</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>3</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>4</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>9</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>12</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>14</b>
<b>CAPITULO I: INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Realidad problemática</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Antecedentes de la investigación</b>	<b>21</b>
<i>1.2.1 Antecedente n.º 1</i>	<i>21</i>
<i>1.2.2 Antecedente n.º 2</i>	<i>23</i>
<i>1.2.3 Antecedente n.º 3</i>	<i>24</i>
<i>1.2.4 Antecedente n.º 4</i>	<i>26</i>
<i>1.2.5 Antecedente n.º 5</i>	<i>27</i>
<i>1.2.6 Antecedente n.º 6</i>	<i>28</i>
<b>1.3 Bases teóricas</b>	<b>29</b>
<i>1.3.1 Definición de variables</i>	<i>29</i>
<i>1.3.2 Pavimentos Flexibles</i>	<i>33</i>
<i>1.3.3 Asfalto</i>	<i>57</i>
<i>1.3.4 Polímeros</i>	<i>75</i>
<i>1.3.5 Polímero SBS (Styrene – Butadiene – Styrene)</i>	<i>79</i>
<b>1.4 Justificación</b>	<b>79</b>

1.4.1	<i>Justificación general</i>	79
1.4.2	<i>Justificación teórica</i>	80
1.4.3	<i>Justificación práctica</i>	80
1.4.4	<i>Justificación metodológica</i>	81
1.5	<b>Formulación del problema</b>	81
1.6	<b>Objetivos</b>	81
1.6.1	<i>Objetivo general</i>	81
1.6.2	<i>Objetivos específicos</i>	81
1.7	<b>Hipótesis</b>	82
<b>CAPITULO II: METODOLOGÍA</b>		83
2.1	<b>Enfoque de la investigación</b>	83
2.2	<b>Tipo de Investigación</b>	83
2.2.1	<i>Por el propósito</i>	83
2.2.2	<i>Según el diseño de investigación</i>	83
2.2.3	<i>Según el nivel de investigación</i>	83
2.3	<b>Diseño de investigación</b>	84
2.4	<b>VARIABLES</b>	85
2.4.1	<i>Definición de variables</i>	85
2.4.2	<i>Clasificación de variables</i>	85
2.4.3	<i>Matriz de operacionalización de variables</i>	86
2.5	<b>Población y muestra</b>	88
2.5.1	<i>Población</i>	88
2.5.2	<i>Muestra</i>	88
2.5.3	<i>Materiales</i>	95

<b>2.6</b>	<b>Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos</b>	<b>95</b>
2.6.1	<i>Técnica de recolección de datos</i>	95
2.6.2	<i>Instrumento de recolección de datos</i>	96
2.6.3	<i>Validación del instrumento de recolección de datos</i>	96
2.6.4	<i>Análisis de datos</i>	97
<b>2.7</b>	<b>Procedimientos</b>	<b>99</b>
2.7.1	<i>Búsqueda de información</i>	100
2.7.2	<i>Análisis documentario y recolección de datos</i>	101
2.7.3	<i>Análisis de datos</i>	103
2.7.4	<i>Desarrollo de objetivos</i>	103
2.7.5	<i>Aspectos éticos</i>	104
<b>2.8</b>	<b>Desarrollo de tesis</b>	<b>105</b>
2.8.1	<i>Búsqueda de información</i>	105
2.8.2	<i>Análisis documentario y recolección de datos</i>	106
2.8.3	<i>Análisis de datos</i>	113
2.8.4	<i>Desarrollo de los objetivos</i>	123
<b>CAPITULO III: RESULTADOS</b>		<b>124</b>
<b>3.1</b>	<b>Comportamiento del punto de ablandamiento (°C)</b>	<b>124</b>
<b>3.2</b>	<b>Impacto causado por la variación del punto de ablandamiento</b>	<b>128</b>
<b>3.3</b>	<b>Comportamiento del grado de penetración</b>	<b>140</b>
<b>3.4</b>	<b>Impacto causado por la variación del grado de penetración</b>	<b>144</b>
<b>CAPITULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b>		<b>152</b>
<b>4.1</b>	<b>Discusión</b>	<b>152</b>
4.1.1	<i>Respuesta a la pregunta de investigación</i>	152

<i>4.1.2 Interpretación de cada resultado mostrado</i>	<i>153</i>
<i>4.1.3 Comparación de antecedentes</i>	<i>161</i>
<i>4.1.4 Limitaciones de la investigación y aportes del estudio</i>	<i>168</i>
<i>4.1.5 Ubicar resultados en la unidad de estudio</i>	<i>169</i>
<i>4.1.6 Breve resumen o conclusión de los hallazgos</i>	<i>169</i>
<b>4.2 Conclusiones</b>	<b>170</b>
<b>4.3 Recomendaciones</b>	<b>171</b>
<b>CAPITULO V: REFERENCIAS</b>	<b>173</b>
<b>CAPITULO VI: ANEXOS</b>	<b>188</b>
<b>6.1 Anexo n.º 1</b>	<b>188</b>
<b>6.2 Anexo n.º 2</b>	<b>189</b>
<b>6.3 Anexo n.º 3</b>	<b>190</b>
<b>6.4 Anexo n.º 4</b>	<b>193</b>
<b>6.5 Anexo n.º 5</b>	<b>194</b>
<b>6.6 Anexo n.º 6</b>	<b>195</b>
<b>6.7 Anexo n.º 7</b>	<b>196</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Termómetros para el ensayo de punto de ablandamiento .....	30
<b>Tabla 2.</b> Dimensiones del recipiente de prueba para el ensayo de penetración .....	32
<b>Tabla 3.</b> Esquema de diseño no experimental.....	84
<b>Tabla 4.</b> Matriz de clasificación de variables.....	85
<b>Tabla 5.</b> Matriz de operacionalización de variables.....	86
<b>Tabla 6.</b> Muestra de la investigación .....	89
<b>Tabla 7.</b> Tipo de aporte extraído de los estudios consultados.....	107
<b>Tabla 8.</b> Matriz de datos general.....	109
<b>Tabla 9.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E01.....	111
<b>Tabla 10.</b> Aportes numéricos para el punto de ablandamiento (°C) .....	114
<b>Tabla 11.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E06.....	116
<b>Tabla 12.</b> Aportes numéricos para la penetración (dmm).....	119
<b>Tabla 13.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E22.....	121
<b>Tabla 14.</b> Variación del punto de ablandamiento (°C) en los asfaltos modificados con SBS.....	124
<b>Tabla 15.</b> Parámetros estadísticos de la variable punto de ablandamiento .....	126
<b>Tabla 16.</b> Impacto de la variación del punto de ablandamiento (°C) en los asfaltos modificados con polímero SBS.....	128
<b>Tabla 17.</b> Variación del grado de penetración (dmm) en los asfaltos modificados con SBS.....	140
<b>Tabla 18.</b> Parámetros estadísticos de la variable grado de penetración .....	142
<b>Tabla 19.</b> Impacto de la variación del grado de penetración (dmm) en los asfaltos modificados con polímero SBS.....	144

<b>Tabla 20.</b> Matriz de datos.....	188
<b>Tabla 21.</b> Ficha resumen .....	189
<b>Tabla 22.</b> Tabla de orden y análisis de datos .....	193
<b>Tabla 23.</b> Matriz de categorización de aportes teóricos de los estudios citados .....	194
<b>Tabla 24.</b> Tabla de resultados de la variación de las propiedades estudiadas.....	195
<b>Tabla 25.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E05.....	196
<b>Tabla 26.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E06.....	198
<b>Tabla 27.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E07.....	200
<b>Tabla 28.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E08.....	202
<b>Tabla 29.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E09.....	206
<b>Tabla 30.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E10.....	208
<b>Tabla 31.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E11 .....	210
<b>Tabla 32.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E13.....	213
<b>Tabla 33.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E15.....	215
<b>Tabla 34.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E16.....	218
<b>Tabla 35.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E18.....	221
<b>Tabla 36.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E19.....	223
<b>Tabla 37.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E21.....	225
<b>Tabla 38.</b> Fichas resumen correspondiente al estudio E22 .....	227
<b>Tabla 39.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E23.....	229
<b>Tabla 40.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E25.....	232
<b>Tabla 41.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E26.....	234
<b>Tabla 42.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E27.....	237
<b>Tabla 43.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E28.....	240

<b>Tabla 44.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E29.....	243
<b>Tabla 45.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E30.....	245
<b>Tabla 46.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E31.....	246
<b>Tabla 47.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E33.....	248
<b>Tabla 48.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E35.....	250
<b>Tabla 49.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E36.....	253
<b>Tabla 50.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E38.....	256
<b>Tabla 51.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E42.....	259
<b>Tabla 52.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E43.....	261
<b>Tabla 53.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E44.....	263
<b>Tabla 54.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E46.....	266
<b>Tabla 55.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E47.....	270
<b>Tabla 56.</b> Ficha resumen correspondiente al estudio E48.....	273
<b>Tabla 57.</b> Fichas resumen correspondiente al estudio E50.....	276

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Compactación en pavimentos flexibles.....	34
<b>Figura 2.</b> Estructura de los pavimentos flexibles.....	35
<b>Figura 3.</b> Ahuellamiento en los pavimentos flexibles.....	38
<b>Figura 4.</b> Hundimiento en los pavimentos flexibles .....	39
<b>Figura 5.</b> Corrugación en los pavimentos flexibles .....	40
<b>Figura 6.</b> Corrimiento en los pavimentos flexibles.....	41
<b>Figura 7.</b> Hinchamiento en los pavimentos flexibles.....	42
<b>Figura 8.</b> Fisuras longitudinales y transversales en los pavimentos flexibles .....	44
<b>Figura 9.</b> Fisuramiento en bloque en los pavimentos flexibles.....	45
<b>Figura 10.</b> Piel de cocodrilo en los pavimentos flexibles .....	46
<b>Figura 11.</b> Fisura refleja en pavimentos flexibles.....	47
<b>Figura 12.</b> Fisuras de arco en los pavimentos flexibles .....	48
<b>Figura 13.</b> Desprendimiento de agregados en los pavimentos flexibles.....	49
<b>Figura 14.</b> Peladuras en los pavimentos flexibles.....	50
<b>Figura 15.</b> Estrías longitudinales en los pavimentos flexibles.....	51
<b>Figura 16.</b> Baches en los pavimentos flexibles.....	52
<b>Figura 17.</b> Rotura de bordes en pavimentos flexibles.....	53
<b>Figura 18.</b> Exudación de asfalto en los pavimentos flexibles.....	54
<b>Figura 19.</b> Exudación de agua en pavimentos flexibles.....	55
<b>Figura 20.</b> Baches/ reparación en los pavimentos flexibles.....	56
<b>Figura 21.</b> Estructura fisicoquímica del asfalto .....	59
<b>Figura 22.</b> Esquema de fabricación de los productos asfálticos .....	60
<b>Figura 23.</b> Planta de destilación atmosférica .....	63

<b>Figura 24.</b> Planta de destilación de alto vacío .....	64
<b>Figura 25.</b> Ensayos para caracterización de asfaltos.....	65
<b>Figura 26.</b> Selección del tipo de cemento asfaltico .....	66
<b>Figura 27.</b> Clasificación de los asfaltos por penetración .....	67
<b>Figura 28.</b> Clasificación de los asfaltos por viscosidad .....	68
<b>Figura 29.</b> Equivalencia entre la penetración y el grado de viscosidad.....	69
<b>Figura 30.</b> Ruta de diseño de investigación .....	84
<b>Figura 31.</b> Histograma de frecuencia.....	97
<b>Figura 32.</b> Diagrama de dispersión.....	98
<b>Figura 33.</b> Etapas de la investigación .....	99
<b>Figura 34.</b> Fases del análisis documental.....	102
<b>Figura 35.</b> Relación porcentual de tipos de estudio citados.....	106
<b>Figura 36.</b> Histograma correspondiente a la variación del punto de ablandamiento	126
<b>Figura 37.</b> Diagrama de dispersión correspondiente a la variación del punto de ablandamiento .....	127
<b>Figura 38.</b> Histograma correspondiente a la variación del grado de penetración.....	142
<b>Figura 39.</b> Diagrama de dispersión correspondiente a la variación del grado de penetración .....	143
<b>Figura 40.</b> Matriz de datos aprobada por experto .....	190
<b>Figura 41.</b> Fichas resumen aprobada por experto .....	191
<b>Figura 42.</b> Matriz de evaluación de experto aprobada.....	192

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación fue analizar el punto de ablandamiento y el grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS en pavimentos flexibles en el mundo, 2021. Se analizaron diversos artículos de investigación publicados a nivel mundial desde el año 2015 hasta el 2021, los cuales presentaron datos como el tipo de asfalto ensayado, el porcentaje de polímero SBS utilizado en betún modificado, los valores de las propiedades físicas de grado de penetración y punto de ablandamiento, tanto de la mezcla asfáltica base como de la mezcla modificada; así como las relaciones existentes entre las variables y las condiciones de exposición del pavimento. Estos datos fueron extraídos y ordenados en instrumentos que permitieron su recolección y clasificación, a fin de determinar el comportamiento de dichas variables. Como resultado del análisis se obtuvo que los asfaltos modificados con polímero SBS presentaron variaciones negativas de hasta -60,57 % en el grado de penetración y positivas de entre 5,34 % y 107,75 % en el punto de ablandamiento, respecto a lo conseguido en el betún base; además, se identificaron algunos casos aislados que no obedecieron a estas tendencias de comportamiento, debido a lo expuesto en las limitaciones del estudio. Las variaciones en los valores de grado de penetración y punto de ablandamiento experimentadas a causa de la adición de polímero SBS al asfalto, permitirán que se tenga un mejor comportamiento del pavimento flexible frente a las condiciones ambientales y de carga a las que será expuesto, haciéndolo más duradero.

**PALABRAS CLAVES:** Polímero, punto de ablandamiento, grado de penetración.

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Realidad problemática

La población mundial se encuentra en constante crecimiento, originando así la expansión y creación de nuevas ciudades; y, por consiguiente, se produce un incremento en la demanda de obras de ingeniería civil. Estas construcciones son indispensables para satisfacer las necesidades poblacionales, generar ingresos económicos y modernización; por lo cual, el sector de la construcción es considerado como uno de los principales indicadores de desarrollo de un país.

En cuanto al desarrollo económico de la población, los proyectos de obras viales son esenciales, ya que permiten una conexión entre pueblos, ciudades y países; haciendo posible el transporte de personas y materiales de diversa clase. Zambrano (2018) señala que en la actualidad, uno de los principales inconvenientes es el desgaste prematuro de las vías de transporte; que trae consigo una serie de problemas, tales como: gastos de reparación en periodos de tiempo más cortos, deterioro de vehículos, aumento de la contaminación ambiental, riesgo de sufrir accidentes de tránsito, entre otros.

Behnood y Modiri (2019), en EE. UU., manifiestan que existen tres tipos de fallas principales que pueden dañar los pavimentos: ahuellamiento, agrietamiento por fatiga y agrietamiento por temperatura; las cuales, se encuentran relacionadas con el soporte de cargas y las variaciones de temperatura, a veces extremas, a las que pueden estar expuestos los pavimentos. Frente a este problema, los investigadores dedicados al rubro han propuesto el uso de sustancias añadidas a la mezcla, con la finalidad de mejorar las propiedades del asfalto y reducir los efectos de las condiciones de servicio mencionadas, que permitan obtener obras viales más resistentes y duraderas.

De igual manera, Ortiz (2016) informa que en Ecuador existe un deteriorado estado de las vías de acceso y avenidas, debido a que fueron diseñadas y ejecutadas con asfalto convencional; por lo tanto, no son capaces de soportar el aumento poblacional, la cantidad de tráfico, el aumento del peso de los vehículos, etc. A pesar de que el cemento asfáltico ha sido el insumo principal en todas las tecnologías para la construcción de vías, este ya no tiene la capacidad de cumplir con las exigencias en la actualidad, siendo necesario utilizar materiales con mejores propiedades físico/mecánicas que permitan optimizar las propiedades del asfalto; estas sustancias se conocen como modificadores del asfalto.

Así mismo, en China, Zhang, Zhang y Shi (2017) sostienen que el asfalto se ve expuesto a diversos factores relacionados al cambio climático y de temperatura; los mismos que influyen en el comportamiento del asfalto, en su tiempo de vida útil y en el envejecimiento. Señalan también que la radiación ultravioleta (UV) daña el asfalto; por lo que, proponen la aplicación de polímeros en la mezcla asfáltica como alternativa de solución, para ello realizaron estudios sobre las propiedades básicas del asfalto, entre las que destacan el grado de penetración y el punto de ablandamiento.

En Perú, específicamente en Juliaca, Zambrano (2018) afirma que la tasa de deterioro de los pavimentos se ve afectada por diversos factores que actúan de forma individual o en conjunto. En Puno, el problema de la baja durabilidad de los pavimentos es causado por desabastecimiento de insumos o factores meteorológicos existentes, principalmente las radiaciones solares; las cuales generan fallas que se relacionan con la propiedad de punto de ablandamiento del asfalto. Algunas de estas fallas son: la pérdida de agregados finos, la reducción de impermeabilidad y la evaporación de las secciones plásticas del asfalto que conlleva a la oxidación y deterioro de este.



Por otro lado, Álvarez y Cabrera (2017) señalan que Trujillo, pese a que es una de las principales ciudades del Perú, con una población aproximada de 788 236 habitantes y una cantidad de 479 280 vehículos en circulación, posee una infraestructura vial en mal estado. Este problema es consecuencia de la humedad originada por el colapso continuo de las antiguas redes de abastecimiento; además del deficiente control en los procesos de construcción de pavimentos, pésima calidad de materiales, etc.

Las propiedades como penetración y punto de ablandamiento, presentes en los asfaltos empleados para la construcción de pavimentos flexibles, deben cumplir con los parámetros y procedimientos de ensayos establecidos por las siguientes normas y manuales: Norma Técnica Peruana, Manual de ensayo de Materiales (MTC E), Manual de carreteras – suelos – geología – geotecnia y pavimentos, ASTM (American Society for Testing and Materials) y AASHTO.

Zambrano (2018) habiendo ensayado las muestras de asfalto modificado con distintas dosificaciones de polímero, concluyó que el bitumen que contenía 3 % de modificador produjo un potenciamiento en las propiedades de los pavimentos flexibles. Algunas mejoras se vieron reflejadas en las pruebas de penetración y punto de ablandamiento; lo que evidenció un aumento en el tiempo de vida útil del pavimento flexible y en sus propiedades físico - mecánicas.

Así mismo, Estrella (2016) indicó que las propiedades mecánicas de los asfaltos modificados son superiores en un 31 % , a comparación de las de un asfalto convencional; sin embargo, su costo es más elevado. A su vez, señaló que el polímero SBS presenta mayores porcentajes de mejora en las propiedades y brinda mayor estabilidad a un menor precio, a diferencia de los otros polímeros ensayados (EVA, SBR y caucho).

De igual manera Gargate y Huamani (2018), ensayaron muestras de mezclas asfálticas con betún base PEN 60/70 y con asfalto modificado incluyendo polímero SBS con

dosificaciones de 4,4 % ; 4,9 % ; 5,4 % y 5,9 % . De estos ensayos obtuvieron que, el porcentaje óptimo de asfalto modificado con polímero SBS es de 5,1 % ; mientras que el de asfalto base es de 5,5 % . Las mezclas asfálticas modificadas presentaron una mejor resistencia al envejecimiento y mayor rigidez; la cual proporciona soporte sin producir deformaciones frente a los amplios tiempos de exposición a cargas verticales y un rango de recuperación elástica superior, alargando así el tiempo de vida útil del pavimento.

En base a los estudios citados con anterioridad, se puede afirmar que los polímeros influyen considerablemente en la composición de los asfaltos, mejorando su calidad; además de ser una opción ecológica y económica a largo plazo. Referente a las propiedades físicas de los asfaltos modificados con polímero SBS, las que se evaluarán son: el grado de penetración y punto de ablandamiento; que al ser optimizadas, causarán impactos positivos en las propiedades mecánicas y reológicas de los mismos. Tales impactos varían de acuerdo con el porcentaje de polímero adicionado y las condiciones a las que el pavimento estará sometido.

El uso de asfaltos modificados con polímeros se ha incrementado a lo largo de los años debido a las mejoras que presenta en sus propiedades; tal es así que, existen empresas especializadas a nivel nacional e internacional dedicadas a la fabricación y suministro de estos productos, que garantizan su calidad para ser empleados en obras de infraestructura vial y similares.

Productos Bituminosos de Argentina S.S (Probiar), es una empresa que comenzó sus actividades en el año 1995 y se dedica a la producción de emulsiones asfálticas y asfaltos modificados con polímeros, utilizados para ejecutar sus propias obras viales y/o para abastecer a otras empresas dedicadas al rubro. Probiar cuenta con una gran variedad de equipos y un plantel experimentado de profesionales para la ejecución de obras de este tipo y ha trabajado

con las principales empresas y concesionarios viales de Argentina, ejecutando más de 30 000 000 m<sup>2</sup> de pavimentación (Probiar, 2021).

De igual forma, Tecnología de Materiales Perú (TDM) es una empresa fundada en el año 1992, dedicada a brindar soluciones de ingeniería y al suministro de productos de construcción para proyectos de infraestructura, minería y otros sectores. Uno de sus principales trabajos fue el asesoramiento a la concesión “Rutas de Lima” en la operación y mantenimiento de tramos de la Panamericana Norte y Sur en Lima, en el cual recomendó y aplicó una mezcla tibia modificada con polímero (Warm Mix) y utilizó la metodología SUPERPAVE para mejorar la trabajabilidad, adherencia y resistencia a la fatiga de la mezcla, sin tener que alterar los equipos; reduciendo así la demanda de combustible, las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y el impacto medioambiental (TDM, 2014).

Las dos compañías mencionadas brindan soporte y credibilidad a la presente investigación, debido a que son empresas especializadas en el rubro de la construcción de pavimentos flexibles a base de asfalto modificado con polímeros, tanto a nivel nacional como internacional; que además, tienen un tiempo considerable en el mercado y han ejecutado diversos proyectos aplicando los productos estudiados en esta investigación. Si bien es cierto, el asfalto modificado con polímero SBS aún no es utilizado con tanta frecuencia en las obras de pavimentación, estas empresas son antecedentes que sirven como base para investigar más detalladamente el comportamiento y los beneficios de los polímeros en la modificación de betunes y en su futura aplicación en la construcción de obras viales.

Las exigencias y competencias en la industria de la construcción están en constante ascenso, debido a esto se busca implementar nuevas tecnologías que puedan satisfacer de forma eficiente y duradera las necesidades que demanda la población. Existen países que tienen como principal actividad económica la explotación de materia prima, la cual debe ser transportada

hacia otros lugares para que se realicen distintos procesos de tratamiento. Por lo tanto, para el traslado de materia prima, personal obrero, equipos y profesionales; es necesario poseer una infraestructura vial en óptimas condiciones.

Como toda construcción civil, las obras de infraestructura vial son diseñadas para un determinado tiempo de vida útil bajo servicio activo; sin embargo, hoy en día el incremento considerable de las exigencias vehiculares y condiciones climáticas ha originado daños en los pavimentos flexibles a edades tempranas, convirtiéndose así en un problema a nivel global. Debido a esta condición, se presentan dificultades como desperfectos vehiculares, accidentes de tránsito, polución del entorno, entre otros.

Con el pasar de los años han ido surgiendo nuevas tecnologías, materiales y técnicas a fin de lograr una mejora en la construcción vial y, es de conocimiento que a nivel mundial el asfalto es el material predominante en este tipo de obras; sin embargo, se ha observado que presenta deficiencias cuando es sometido a determinadas condiciones, que originan daños en la carpeta asfáltica de los pavimentos a través del tiempo. Además, factores como las inadecuadas prácticas constructivas, el deficiente estudio de suelos, el mal uso del presupuesto, entre otros; no contribuyen finalmente en la ejecución de pavimentos de calidad.

Frente a esto, se buscan diferentes alternativas que permitan potencializar las propiedades del asfalto, a través de la incorporación de sustancias en las mezclas bituminosas. Dentro de estos compuestos se encuentran los llamados polímeros, entre los que destaca por su gran contribución el polímero Estireno – Butadieno – Estireno (SBS), el cual produce diversas mejoras en propiedades asfálticas como el punto de ablandamiento y la penetración; las cuales son fundamentales de estudiar al momento de plantear el diseño de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles. Las nuevas tecnologías que son creadas y aplicadas en actividades

industriales y domésticas permiten incrementar la calidad de los productos y en la mayor parte de los casos, representan formas de mitigar el impacto ecológico y reducir costos.

El área de la industria de la construcción se encuentra constantemente incursionando e innovando en cuanto al uso y la aplicación de determinados materiales añadidos sobre otros; tal es el caso de los asfaltos modificados, que utilizan la incorporación de aditivos o sustancias en su estado de mezcla convencional, en particular mediante polímeros. Al tratarse de un tema de reciente investigación en el mundo, es necesario la realización de estudios que tengan la finalidad de analizar y compendiar los avances más importantes del mismo.

El presente estudio se planteó de manera específica, con el propósito de analizar el comportamiento de dos de las principales propiedades físicas, punto de ablandamiento y grado de penetración del asfalto modificado con SBS, utilizado en pavimentos flexibles en el mundo. La metodología empleada consistió en el análisis, síntesis y clasificación de la información recopilada; a fin de elaborar una base de datos que contengan resultados confiables y que se presenten de forma precisa, clara y detallada.

No llevar a cabo este trabajo impide aportar a la sociedad una serie de información adecuada, provechosa, clasificada y concreta, relacionada al tema de asfaltos modificados con SBS en el mundo; la cual puede ser beneficiosa al ser utilizada como sustento teórico referencial en la creación de nuevos diseños de asfalto modificado con SBS, conociendo el comportamiento de las propiedades de punto de ablandamiento y grado de penetración, a fin de decidir por la mejor opción a usar según las condiciones propias de cada proyecto.

## **1.2 Antecedentes de la investigación**

### **1.2.1 Antecedente n.º 1**

**“Caracterización de mezclas asfálticas en caliente, elaboradas con el uso de cemento asfáltico modificado con polímero SBR y SBS”**

Borja y Cárdenas (2019) tuvieron como objetivo, caracterizar mezclas asfálticas en caliente elaboradas utilizando cemento asfáltico modificado SBR y SBS; esto a partir de la determinación de parámetros de resistencia relacionados con la deformación plástica.

Se efectuaron diversos ensayos, los cuales permitieron conocer las propiedades físicas de los agregados pétreos, cemento asfáltico convencional y betunes modificados; para luego, calcular los porcentajes óptimos de asfalto y polímeros utilizados en la fabricación de las muestras (Diseño Marshall), obtener las propiedades físico – mecánicas de las mismas y evaluar su desempeño.

Como resultados, los autores obtuvieron que la mezcla asfáltica modificada con 2 % de SBS fue la que mejor se desempeñó, debido a que cumplió las especificaciones del método Marshall, con un valor de estabilidad de 2465,68 libras respecto a las 2044,78 libras obtenidas del resultado de la mezcla convencional; por consiguiente, se obtuvo un porcentaje de incremento de estabilidad del 20,58 % y un aumento del flujo del 11,11 % . El costo de producción del asfalto modificado con SBS se incrementó en un 25,36 % ; así mismo, se observó la mejora de sus propiedades físicas, tales como el grado de penetración y el punto de ablandamiento, dado que la primera disminuyó a medida que se incrementó el contenido de SBS y la segunda aumentó frente al mismo acontecimiento. El polímero SBR presentó un similar comportamiento, pero en porcentajes mayores; al 1 % de SBR los valores de penetración se encontraron por encima de los valores del asfalto base, lo cual no es ventajoso. Respecto al punto de ablandamiento, el polímero SBS fue superior al SBR como modificador, ya que permitió un mayor incremento en dicha propiedad.

Los autores concluyeron que la incorporación de polímeros SBS y SBR a la mezcla asfáltica influyó de manera positiva al optimizar las propiedades físico – mecánicas y reológicas; que a su vez, generó un mayor rango de estabilidad o máxima fuerza de soporte,

una adecuada deformación de la mezcla, un aumento progresivo de su resistencia ante el desgaste y un incremento en la resistencia lateral de la mezcla. Sin embargo, al comparar ambos polímeros, el SBS presentó mejoras más significativas en el asfalto relacionadas a sus propiedades físicas, reológicas, etc. (p. 201).

Debido a que se trata de un antecedente en el que se realizaron diseños de mezclas asfálticas y se necesitó caracterizar los materiales utilizados (incluyendo asfalto modificado con SBS), se pudo conocer la explicación e interpretación que le dieron los autores a sus resultados; posibilitando la recolección de amplios conocimientos referentes al impacto causado por la optimización del grado de penetración y el punto de ablandamiento, en el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas.

### ***1.2.2 Antecedente n.º 2***

#### **“Caracterización de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y RET, mediante determinación del módulo de rigidez”**

López y Puma (2017) tuvieron como objetivo, caracterizar mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y Reactive Elastomeric Terpolymer (RET), a través de la determinación del módulo de rigidez. Este estudio se basó en la caracterización de mezclas asfálticas en caliente convencionales y modificadas con polímeros, teniendo en cuenta parámetros como módulo de rigidez, estabilidad, tracción indirecta, entre otros y; elaborando ensayos pertinentes para precisar sus propiedades físico-mecánicas.

En lo que refiere a penetración, los autores encontraron que con 2 % de SBS se logró reducir 10 décimas de milímetro (dmm) con respecto a las 65 dmm del asfalto convencional; mientras que con el polímero RET al inicio incrementó este valor, para luego disminuir, pero

en menor cantidad en comparación con el SBS. Además, el punto de ablandamiento fue mayor a medida que aumentó el porcentaje de ambos polímeros en sus respectivas mezclas, aunque los valores de la mezcla modificada con SBS presentaron mejoras más relevantes en comparación con la de polímero RET.

Los resultados indicaron que el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS y RET fue mejor que el de las mezclas convencionales; lo cual se evidenció por la reducción de la susceptibilidad térmica frente a altas temperaturas y la disminución del riesgo de deformación permanente, mejorando así su elasticidad a temperaturas elevadas. Los autores concluyeron que el porcentaje óptimo de SBS fue de 3 % y el de RET fue de 1,3 % (p. 266).

Este estudio permitió aclarar conceptos fundamentales que sirvieron de base en la ejecución de la presente investigación, debido a que se evaluó la relación entre las variables punto de ablandamiento – grado de penetración y su comportamiento en el asfalto en condiciones reales; además, se mostraron los resultados de los ensayos que permitieron conocer la repercusión del uso de los polímeros en la modificación de la mezcla asfáltica base y hasta qué punto (análisis de costos) es conveniente utilizarlos, para evitar ir en contra del presupuesto disponible para su futura aplicación en proyectos viales

### **1.2.3 Antecedente n.º 3**

#### **“Temperature Sensitivity Characteristics of SBS/CRP-Modified Bitumen after Different Aging Processes.”**

He, Wu, Wang, Wang y Chen (2018) tuvieron como objetivo, estudiar y lograr una mejora en la propiedad que grafica la sensibilidad del asfalto a la temperatura, a través de la reducción de los daños causados por el calor; así como la influencia de los procesos de envejecimiento en la mezcla asfáltica.



Los autores ensayaron muestras asfálticas modificadas con polímero SBS y con polvo de caucho granulado (CRP); posteriormente, se evaluaron las propiedades físicas y reológicas de las mezclas y se analizó su rendimiento ante temperaturas inferiores. Los ensayos para las propiedades físicas fueron el test de punto de ablandamiento, grado de penetración a 25 °C , ductilidad a 15 °C y viscosidad a 135 °C .

Los resultados indicaron que se mejoró la sensibilidad a la temperatura en las mezclas modificadas con SBS, a comparación de la mezcla base. La muestra base tuvo un valor de 46,7 °C de punto de ablandamiento y 92,1 dmm de grado de penetración; mientras que la muestra modificada con SBS presentó valores de 73,9 °C y 74,2 dmm , respectivamente. Así mismo, se encontró que estas propiedades presentaron un mejor comportamiento cuando las mezclas modificadas con SBS también se modificaron con CRP y sufrieron procesos de envejecimiento, llegando a tener valores de hasta 75,2 °C en punto de ablandamiento y 21,4 dmm en grado de penetración.

Los autores concluyeron que las mezclas modificadas con polímero SBS evidenciaron mejoras en las propiedades físicas del asfalto, como el grado de penetración y punto de ablandamiento; además, los procesos de envejecimiento incrementaron el mejor desempeño de estas propiedades (p. 13).

Esta investigación proporcionó una base de datos sobre el comportamiento del asfalto bajo diversas condiciones, después de ser modificado con polímero SBS y adicionalmente con CRP; lo cual permitió conocer y analizar el asfalto modificado y la influencia del polímero SBS en su comportamiento. Esto reforzó la idea de realizar el presente estudio, con la finalidad de que se reúnan aportes (a nivel mundial) más concretos y fundamentados, a cerca de los beneficios y aplicación de los polímeros SBS como modificadores de asfalto y, sirvan como base para futuras investigaciones.

#### 1.2.4 Antecedente n.º 4

##### **“Comparison of the Polyethylene and SBS Polymer Modified Bitumen’s Effect – A Case Study”**

Kumar y Satyanarayana (2015) tuvieron como propósito, comparar el efecto de polímero SBS y el polietileno en las mezclas asfálticas modificadas y, conocer la variación de sus propiedades. Para ello, se utilizaron diferentes porcentajes de polímeros en las mezclas, al 0 % ; 1 % ; 2 % y 3 % , con el fin de conocer sus propiedades físicas, y porcentajes de 0 % ; 2 % ; 4 % y 6 % para el ensayo Marshall. Como resultado de la mezcla base se tuvieron valores de 94 dmm y 44,25 °C para el grado de penetración y punto de ablandamiento, respectivamente. Con el empleo de ambos polímeros en las mezclas asfálticas, se obtuvo una reducción en la penetración y un incremento en los valores punto de ablandamiento, respecto al asfalto base; sin embargo, el asfalto con polietileno (PE) presentó valores más bajos de penetración y punto de ablandamiento, a comparación del betún con SBS. Se concluyó afirmando que el polímero PE mejoró el comportamiento de penetración del asfalto, mientras que el polímero SBS mejoró la propiedad de punto de ablandamiento.; además, se encontró que, al analizar la propiedad de ductilidad y los resultados del test de Marshall, el polímero SBS incrementó más el buen desempeño de las propiedades de la mezcla asfáltica (p. 6).

Este estudio posibilitó conocer la influencia de dos polímeros modificadores (SBS y PE), sobre la composición y comportamiento de las mezclas asfálticas; así mismo, los autores realizaron una comparación entre ambas modificaciones, la cual amplía el conocimiento a cerca de estos productos, la variedad que existe y el desempeño que tienen sobre los ligantes y posteriores pavimentos flexibles. Además, fue una referencia más que informó acerca de la evaluación de punto de ablandamiento y grado de penetración, lo cual confirmó la importancia que tiene evaluar dichas propiedades.

### 1.2.5 Antecedente n.º 5

#### **“Understanding the low temperature properties of Terminal Blend hybrid asphalt through chemical and thermal analysis methods”**

Lin, Huang, Tang, Xiao y Li (2018) tuvieron como objetivo, realizar una revisión sobre la reología, morfología y propiedades mecánicas de los asfaltos modificados; así como estimar el comportamiento de la mezcla a bajas temperaturas. empleando la prueba Bending Beam Rheometer (BBR). De acuerdo con esto, hicieron uso de diversos modificadores tales como: SBS, ácido polifosfórico, grano de caucho y sulfuro; además, realizaron ensayos de punto de ablandamiento, estabilidad y la prueba BBR.

Como resultado de la investigación se obtuvo que el asfalto base presentó valores de punto de ablandamiento de 50,9 °C en la parte superior y 51,6 °C en la parte inferior de la probeta; mientras que la mezcla asfáltica con contenido de 3 % de SBS, tuvo cifras de 63,9 °C y 64,16 °C en la parte superior e inferior, respectivamente y la mezcla con 4,5 % de SBS, valores de 73,9 °C y 72,79 °C ; dichos valores permitieron calcular y comparar la estabilidad de las mezclas, así como su compatibilidad. Los autores afirmaron que la falta de estabilidad ocasiona segregación entre el asfalto y los modificadores agregados; de igual forma, mencionaron que para China, la diferencia entre los valores de punto ablandamiento en la parte superior e inferior de las probetas ensayadas debe ser menor a 2,5 °C , para considerarse como una mezcla estable. Por último, concluyeron que el polímero SBS tuvo un efecto positivo en las propiedades del asfalto a bajas temperaturas, evidenciado en el punto de ablandamiento; el cual fue considerablemente mejorado al emplearse polímero SBS en la mezcla asfáltica base (p. 9).

El presente estudio brindó información sobre una de las propiedades más importantes de los ligantes bases y modificados, la estabilidad; la cual es uno de los principales problemas

que experimentan los materiales bituminosos durante las distintas etapas que experimentan antes de su aplicación. Señaló también que dicha propiedad puede ser medida en función de la variación de los puntos de ablandamiento o los grados de penetración entre la parte superior e inferior de la muestra y brindó rangos máximos permisibles que permiten detectar este tipo de fenómeno. Así mismo, informó que no toda modificación de asfaltos es beneficiosa; ya que debe realizarse una serie de estudios que confirmen el buen comportamiento de la mezcla.

### **1.2.6 Antecedente n.º 6**

#### **“Comparación del Módulo de Rigidez por Tensión Indirecta utilizando el Método Marshall y Método Superpave de Mezclas Asfálticas con Polímeros SBS”**

Aguilar y Valdivieso (2019) tuvieron como finalidad realizar un análisis comparativo entre dos metodologías de diseño de mezclas asfálticas en caliente, por método Marshall y Superpave. Para esto utilizaron asfalto modificado con SBS en porcentaje de 2,5 % , encontrándose que el grado de penetración en el asfalto base fue de 80 dmm y en el asfalto modificado fue de 55 dmm ; por otro lado, los valores de punto de ablandamiento fueron de 49,5 °C en el asfalto base y 64,5 °C en el asfalto modificado.

Los autores concluyeron que el uso del polímero SBS, optimiza las propiedades físicas de la mezcla asfáltica en términos de penetración y punto de ablandamiento; así mismo afirmaron que la relación entre estas propiedades y sus valores influyen en la susceptibilidad térmica de la mezcla (p. 197).

Este antecedente otorgó más hallazgos respecto al tema en mención, los cuales pudieron ser utilizados como guía y ser contrastados con el resto de las investigaciones analizadas (en la presente revisión) para determinar una tendencia de comportamiento de las variables punto de ablandamiento y grado de penetración; en función del contenido de polímero, tipo de asfalto base, etc.

### 1.3 Bases teóricas

#### 1.3.1 Definición de variables

##### 1.3.1.1 Punto de ablandamiento.

El asfalto es un material viscoelástico que no cambia de estado sólido a líquido de manera instantánea, sino que, lo hace gradualmente conforme las condiciones de temperatura vayan aumentando. Bastidas y Rondón (2020) definen al punto de ablandamiento como la medida de la temperatura a la que el material bituminoso experimenta un estado de fluidez.

La American Society for Testing and Materials International (ASTM, 2020) en su normativa D36, señala que la unidad de medida que cuantifica el punto de ablandamiento es el grado Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), u otra similar. Así mismo, indica que el ensayo que determina este valor en los asfaltos se denomina “ensayo de anillo y bola”, el cual se realiza en el rango de temperatura de  $30^{\circ}\text{C}$  a  $157^{\circ}\text{C}$ , haciendo uso del aparato de anillo y bola, que puede estar sumergido en agua destilada, glicerina o etilenglicol, en intervalos de  $30^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ ;  $80^{\circ}\text{C}$  a  $157^{\circ}\text{C}$  y de  $30^{\circ}\text{C}$  a  $110^{\circ}\text{C}$  respectivamente.

Los equipos utilizados para la ejecución de la prueba antes mencionada son los siguientes:

- Anillos de bronce, de bordes cuadrados.
- Platos de base: Planos y de material no absorbente, con espesor y tamaño adecuados para evitar la deformación y mantener dos o más anillos.
- Bolas de acero: Dos de 9,5 mm de diámetro ( $3/8''$ ), con un peso de  $3,5\text{ g} \pm 0,05\text{ g}$  cada una.
- Guías de contacto de las bolas: Dos guías de bronce para centrar las bolas de acero, una para cada anillo.

- Baño: Recipiente de vidrio que soporta altas temperaturas, de diámetro interno no menor de 85 mm , y altura entre la base y el borde de 120 mm como mínimo, con capacidad de 800 ml .
- Soporte de anillos y montaje de bronce.
- Base de anillos colocada  $25 \text{ mm} \pm 0,8 \text{ mm}$  ( $1'' \pm 0,03''$ ) por encima de la superficie superior del plato de base. La superficie inferior de este último deberá estar  $16 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$  ( $5/8'' \pm 1/8''$ ) por encima del fondo del baño.
- Termómetros, de los tipos indicados en la tabla n.º 1. El termómetro por usar deberá ser colocado en el montaje.

**Tabla 1.**

*Termómetros para el ensayo de punto de ablandamiento*

<b>Termómetro</b>	<b>Intervalo de temperatura</b>
15 C	-2 °C a + 80 °C
16 C	30 °C a 200 °C

**Nota:** Esta tabla muestra las indicaciones sobre qué tipo de termómetro se debe utilizar para realizar el ensayo de punto de ablandamiento. Tomado de *ASTM D36: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*, por American Society for Testing and Materials, 2020, ([https://www.techstreet.com/standards/astm-d36-d36m-14-2020?product\\_id=2114022](https://www.techstreet.com/standards/astm-d36-d36m-14-2020?product_id=2114022))

De igual forma, los reactivos necesarios son:

- Agua destilada, recién hervida a fin de evitar la formación de burbujas.
- Glicerina USP
- Glicol etileno, con punto de ebullición entre 195 °C y 197 °C de temperatura.

- Agentes aislantes, ya sean aceites o grasas con siliconas que se usan para evitar la adherencia del asfalto sobre el plato de base.

### 1.3.1.2 Grado de penetración.

La ASTM (2020) en su normativa D5, indica que la penetración es la medida de consistencia de un material bituminoso expresada en la distancia en décimas de milímetro, a la que una aguja estándar penetra verticalmente una muestra de material en condiciones conocidas de carga, tiempo y temperatura; así pues, las cifras más altas de penetración evidencian una consistencia más suave. Además, estos valores siguen formando parte de una de las principales metodologías para la clasificación de asfaltos.

La unidad de medida que expresa la penetración es la décima de milímetro (dmm) y la prueba que la determina es el “ensayo de penetración de asfaltos”; la que se realiza haciendo uso de los siguientes equipos:

- Aparato de penetración: Se considera así a cualquier instrumento que permita que el soporte de la aguja se mueva de manera vertical y sin fricción, además de indicar la profundidad de penetración con una precisión de una décima de milímetro. El peso del vástago deber ser de  $47,5 \text{ g} \pm 0,05 \text{ g}$  y el de la aguja ensamblada en el vástago, de  $50 \text{ g} \pm 0,05 \text{ g}$ .
- Aguja de penetración: Es un instrumento fabricado de acero inoxidable templado y totalmente endurecido, sus dimensiones son de aproximadamente 50 mm de largo en la aguja estándar y 60 mm en la aguja larga, ambas con un diámetro que oscila entre 1 y 1,02 mm.
- Recipiente de prueba: Es un utensilio elaborado de metal o vidrio y que tiene forma cilíndrica con base plana. En la tabla n.º 2 se indican las dimensiones del recipiente de acuerdo con el rango de penetración.

**Tabla 2.**

*Dimensiones del recipiente de prueba para el ensayo de penetración*

	<b>Penetración &lt; 200</b>	<b>Penetración entre 200 y 350</b>	<b>Penetración de 350 a 500</b>
<b>Diámetro (mm)</b>	55	55 – 75	55
<b>Profundidad (mm)</b>	35	45 – 70	70

*Nota:* Esta tabla muestra las dimensiones que debe tener el recipiente de prueba para ejecutar el ensayo de penetración según rangos. Tomado de *ASTM D5: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*, por American Society for Testing and Materials, 2020, ([https://www.techstreet.com/standards/astm-d5-d5m-20?product\\_id=2113399](https://www.techstreet.com/standards/astm-d5-d5m-20?product_id=2113399))

- Baño de agua: Se refiere a un baño con volumen de por lo menos 10 L capacitado para mantener una temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Plato de transferencia: Es un utensilio de fondo plano, con lados rectos, las orejas de centrado metálicas y con imán en la base. Cuando se utilice, debe tener una capacidad de por lo menos 350 ml y de profundidad suficiente para que el agua cubra la superficie del recipiente de la muestra.
- Dispositivo de tiempo: Para penetrómetros de operación manual, se puede emplear cualquier dispositivo medidor de tiempo, tal como cronómetro eléctrico, un reloj de detención u otro dispositivo con tal de que esté graduado en 0,1 s o menos y con exactitud de  $\pm 0,1\text{ s}$  para intervalos de 60 s.
- Termómetro: Es un tubo de vidrio que contiene líquido, el cual se expande con el aumento de la temperatura, permitiendo así su medición sobre una escala graduada con subdivisiones y un error máximo de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



### 1.3.2 Pavimentos Flexibles

#### 1.3.2.1 Definición.

Rondón y Reyes (2015) definen a los pavimentos flexibles como estructuras viales conformadas por una capa asfáltica, la cual se apoya sobre capas compuestas por material granular (base, subbase, afirmado y en algunos casos subrasante mejoradas), que de igual forma reposan sobre el suelo natural o subrasante.

Así mismo, explican que el esfuerzo generado por cargas vehiculares se dispersa a cada una de las capas del pavimento y que cuando este llegue al terreno natural no se generen deformaciones que causen el desgaste funcional de la vía. Además, dicha estructura debe tener la capacidad de soportar la exposición al medio ambiente (p. XXIX).

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014), en su manual MC-05-14, menciona que el diseño de pavimentos flexibles es influenciado mayormente por dos factores principales: las propiedades de la subrasante sobre la que se apoya la estructura vial y las cargas de tráfico vehicular que soporta (ESALs) (p.128).

#### 1.3.2.2 Funciones de la capa asfáltica.

Rondón y Reyes (2015) afirman que la capa asfáltica en un pavimento flexible está conformada por la carpeta de rodadura, la base asfáltica y la base intermedia, pero cuando los niveles de tráfico son inferiores, solo la compone la carpeta de rodadura; además, señalan que las funciones de una capa asfáltica son:

- **Estructural:** Debe tener la capacidad de resistir a la fatiga, a los efectos climáticos y la acumulación de deformaciones permanentes causados por el tránsito vehicular a lo largo del tiempo.

- **Funcional:** Al ser la capa que absorbe de manera directa las cargas de circulación sobre el pavimento, debe estar diseñada para ofrecer una circulación vehicular cómoda y segura durante su periodo de vida útil.
- **Impermeabilización:** Debe impedir la filtración de agua a las capas subyacentes granulares (base, subbase y subrasante) que causen la pérdida de su resistencia al corte.

**Figura 1.**

*Compactación en pavimentos flexibles*

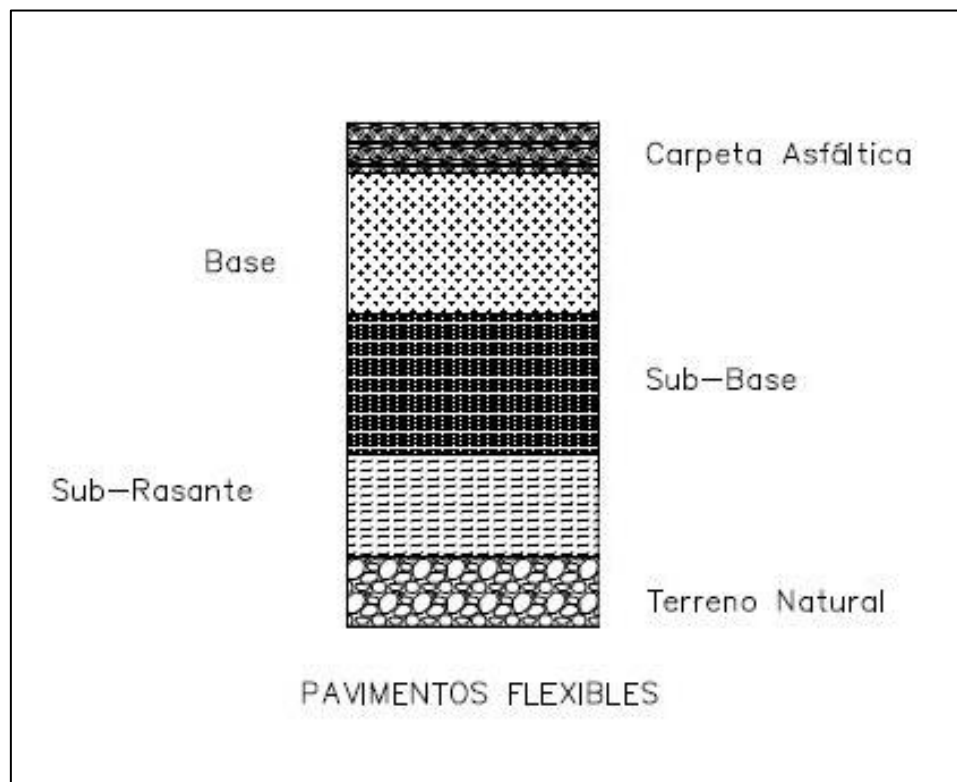


**Nota:** Esta figura muestra la compactación de materiales en la construcción de pavimentos flexibles. Tomado de *Compactadores compactos CB34 CB34 XW. Compactador mixto compacto CC34*, por Docplayer, s.f., (<https://docplayer.es/63067593-Compactadores-compactos-cb34-cb34-xw-compactador-mixto-compacto-cc34.html>).

### 1.3.2.3 Estructura de un pavimento flexible.

**Figura 2.**

*Estructura de los pavimentos flexibles*



*Nota:* Esta figura grafica las capas que componen a los pavimentos flexibles. Tomado de *Procedimiento de Diseño de Pavimento Flexible.*, por IngeCivil, 2018, (<https://www.ingecivil.net/2018/01/17/procedimiento-de-diseno-de-pavimento-flexible/>)

#### 1.3.2.3.1 Subrasante.

Rondón y Reyes (2015) definen a la subrasante como la capa que soporta al pavimento flexible y que debe resistir en última instancia las exigencias causadas por el tráfico vehicular, presentar un comportamiento óptimo frente a las condiciones ambientales y brindar sostén uniforme a la estructura vial. Tiene tres funciones principales como: sobrellevar el tránsito de un limitado número de vehículos durante el proceso constructivo, ofrecer una cimentación

adecuada para el proceso de compactación de las capas granulares que componen el pavimento y proporcionar un soporte idóneo frente a las exigencias vehiculares durante su periodo de vida útil (p. 348).

#### **1.3.2.3.2 Subbase.**

Es señalada por Rondón y Reyes (2015) como la capa de la estructura vial que sostiene a la base granular y que está conformada por materiales granulares sin tratar colocados usualmente encima de la subrasante, afirmado, subrasante mejorada o terraplén. Tiene como principal función transferir, de forma moderada y tolerable, los esfuerzos vehiculares hacia la subrasante; además, cumple funciones drenantes y facilita el proceso constructivo de los pavimentos flexibles (p. 341).

#### **1.3.2.3.3 Base.**

Rondón y Reyes (2015) mencionan que la base es la capa del pavimento flexible en la que, por lo general, descansa la carpeta de rodadura; está compuesta por material granular no tratado y se encuentra ubicada sobre la subbase, pero en algunas ocasiones puede ser elaborada sobre la subrasante, si es que esta última cuenta con propiedades mecánicas capaces de soportar las exigencias presentadas. Su principal función es transferir los esfuerzos, de forma que sean tolerables para las capas que se ubican debajo; así mismo, tiene funciones drenantes y de disminución de la dificultad en el proceso de construcción de los pavimentos flexibles (p. 339).

#### **1.3.2.3.4 Capa de desgaste o superficie de rodadura.**

Minaya y Ordoñez (2006) explican que la carpeta de rodadura es una superficie muy rígida, debido a que se trata de la capa más superficial de la estructura y debe resistir los efectos abrasivos causados por el tránsito, sumado a las condiciones meteorológicas que influyen en su deterioro; además, proporciona una superficie estable, uniforme y cómoda para transitar (p. 2).

### **1.3.2.4 Fallas en los pavimentos.**

#### *1.3.2.4.1 Deformaciones permanentes.*

##### *1.3.2.4.1.1 Ahuellamiento.*

Según el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de República Dominicana (MOPC, 2016), el ahuellamiento es una depresión longitudinal, de por lo menos 6 m de longitud, que se origina paralelamente a las huellas dejadas por los vehículos. Las repeticiones de las cargas generan una acumulación de las deformaciones permanentes en cualquiera de las capas de la vía o su fundación. Cuando el radio de influencia de la zona ahuellada es pequeño, las deformaciones ocurren en las capas superiores y suelen ser acompañadas de un deslizamiento y levantamiento lateral de la superficie del pavimento; pero cuando el radio de influencia es amplio, las deformaciones ocurren en las capas inferiores o en la fundación. Su unidad de medida es en metros cuadrados ( $m^2$ ), que se obtiene multiplicando la longitud por el ancho de la zona afectada.

Algunas de las causas que el autor citado menciona, son las repeticiones de carga cuando la mezcla asfáltica o las capas granulares del pavimento tienen una escasa estabilidad, que es causada por la dosificación inadecuada o problemas de compactación; de igual forma, otros factores influyentes son los insuficientes espesores de la estructura debido a un diseño deficiente o por las exageradas condiciones a las que es expuesto y para las que no fue construido un pavimento (p. 18).

**Figura 3.**

*Ahuellamiento en los pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “ahuellamiento” presentada en los pavimentos flexibles a causa de la elevada susceptibilidad del pavimento. Tomado de *Ahuellamiento en pavimentos asfálticos utilizando geosintéticos*, por H. Delbono y O. Rebollo, 2017, (<https://docplayer.es/199045068-Ahuellamiento-en-pavimentos-asfalticos-utilizando-geosinteticos.html>)

#### 1.3.2.4.1.2 *Hundimiento.*

Rondón y Reyes (2015) definen a los hundimientos como depresiones o descensos de la superficie original de los pavimentos en un área localizada, que pueden presentarse en la calzada o en los bordes y son generados principalmente por deficiencias en obras de drenaje, presencia de fallas en las capas granulares que sostienen a la carpeta asfáltica, mala compactación de las capas durante el proceso constructivo, sistema de alcantarillado defectuoso, etc. Además, clasifican la gravedad de los hundimientos mediante niveles como: “bajo”, con una profundidad menor de 2 cm ; “regular”, entre 2 cm y 4 cm y “alto”, mayor a 4 cm y son expresados en metros cuadrados ( $m^2$ ) (p. 275).

**Figura 4.**

*Hundimiento en los pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “hundimiento” presentada en los pavimentos flexibles a causa de la mala calidad del asfalto y las elevadas exigencias a las que es sometido. Tomado de *Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras - Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles*, por Universidad Nacional de Colombia, 2006, (<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles/file>)

#### 1.3.2.4.1.3 *Corrugación.*

El MOPC (2016) describe a la corrugación como la deformación plástica caracterizada por ondulaciones en la superficie del pavimento, formando valles y crestas de forma perpendicular al sentido del tránsito. La distancia entre crestas es generalmente entre 0,60 m y 0,90 m, con un límite de 3 m y es expresada en metros cuadrados (m<sup>2</sup>).

Así mismo, hace mención que este tipo de falla es originada cuando la carpeta asfáltica o base del pavimento tienen baja estabilidad, son muy deformables y adheridas a la capa de sostén subyacente principalmente en donde las fuerzas horizontales, generadas por el tránsito

vehicular, causan esfuerzos tangenciales mayores. Las corrugaciones son producidas por la exposición del pavimento a altas temperaturas de servicio que reducen su estabilidad; también por contaminación de las mezclas asfálticas, demasía de asfalto en su composición, exceso de humedad en la subrasante o capas granulares, entre otros (p. 25).

**Figura 5.**

*Corrugación en los pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “corrugación” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Corrugación*, por Diccionario geotecnia, 2021, (<https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/corrugacion/>)

**1.3.2.4.1.4** *Corrimientos.*

Los corrimientos son definidos por el MOPC (2016) como los movimientos plásticos caracterizados por el desplazamiento de la mezcla asfáltica en el pavimento, ocasionalmente acompañado del levantamiento del material y son identificados a través de la señalización horizontal, graficándose una serpenteante limitación de carriles.



**Figura 6.**

*Corrimiento en los pavimentos flexibles*



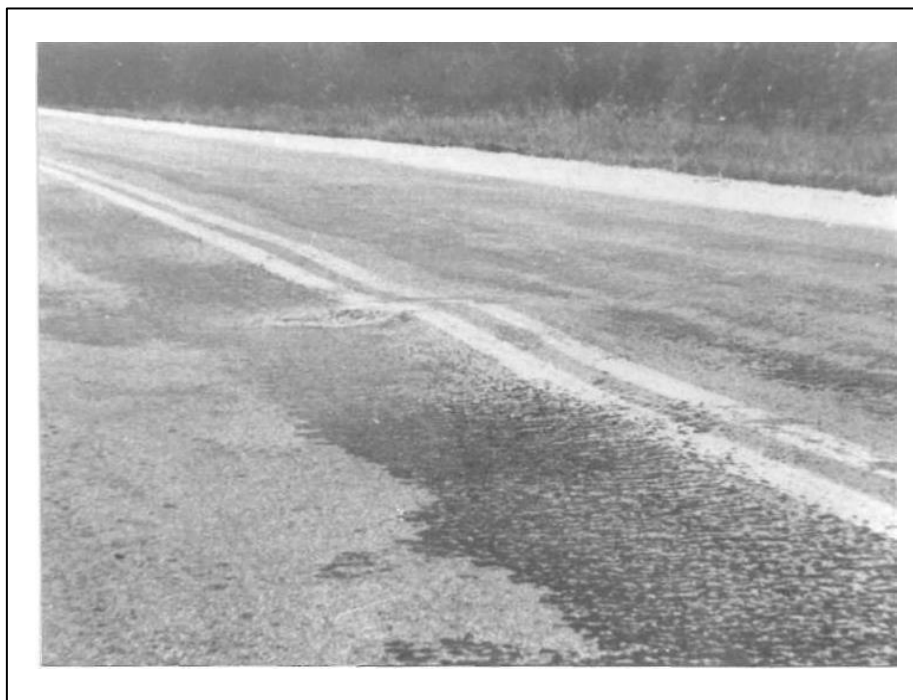
**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “corrimiento” presentada en los pavimentos flexibles a causa de la mala calidad del asfalto y las elevadas exigencias a las que es sometido. Tomado de *Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras - Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles*, por la Universidad Nacional de Colombia, 2006, (<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles/file>)

De igual forma, indica que esta deficiencia es generada por tener una capa asfáltica muy superficial, deforme y mal aglutinada a la capa de material sobre la que se apoya, por sobredosis de ligante, elevadas temperaturas de servicio, escasa adherencia entre capas, excesiva cantidad de ligante en el proceso de imprimación, fuerzas laterales provocadas por losas de concreto adyacentes, desplazamiento lateral de las estructuras de material granular, etc. Su unidad de medida es en metros cuadrados (m<sup>2</sup>) (p. 28).

#### 1.3.2.4.1.5 Hinchamiento.

#### Figura 7.

*Hinchamiento en los pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “hinchamiento” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (catálogos de fallas)*, por el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de República Dominicana, 2016, (<https://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identificaci%C3%B3n-fallas.pdf>)

De acuerdo con el MOPC (2016), el hinchamiento es el abultamiento de la superficie del pavimento, que puede suceder en forma de onda abrupta y pronunciada sobre un área reducida o de manera gradual, de longitud superior a los 3 m; en algunas ocasiones es acompañado de agrietamiento. Este desperfecto puede ser consecuencia de cambios de volumen en arcillas expansivas, pésimo tratamiento de suelos arcillosos durante el proceso de compactación, contaminación de materiales con partículas orgánicas, entre otros. Su unidad de medida es en metros cuadrados (m<sup>2</sup>) de superficie afectada (p. 31).

### **1.3.2.4.2** *Fisuramiento o agrietamiento.*

#### **1.3.2.4.2.1** *Fisuras longitudinales y transversales.*

Rondón y Reyes (2015) expresan que las fisuras longitudinales tienen origen en el paso constante de vehículos, que causa flexión en la carpeta de rodadura y genera esfuerzos de tensión en su extremo inferior. Dicha repetición de esfuerzos causa una pérdida de rigidez en la mezcla asfáltica, que a su vez conlleva a la formación de microfisuras y luego, debido a las repeticiones de carga y reducción de la dureza, se produce una macrofisura a nivel de la rasante. Este agrietamiento permite el envejecimiento de la carpeta de rodadura y la penetración de agua y aire; lo cual disminuye de forma exponencial, la vida útil del pavimento.

En cuanto a las fisuras transversales, los autores citados mencionan que son consecuencia de la reflexión de grietas de materiales estabilizados, riego de liga escaso, deficiencias en el diseño, fenómenos térmicos y/o envejecimiento de la mezcla asfáltica. Los gradientes de temperatura generan variaciones en los esfuerzos internos, que al ser superiores a la resistencia de la mezcla, generan agrietamiento. Estos fenómenos acontecen usualmente con temperaturas inferiores a  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la fatiga térmica se produce entre  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  (p. 266).

En cuanto al grado de severidad, lo clasifican en “bajo”, con una abertura inferior a 1 mm; “regular”, entre 1 y 3 mm y “alto”, superior a 3 mm . La unidad de medida que expresa estas deficiencias es el metro lineal (m) y, para evaluar una superficie afectada, esta longitud debe ser multiplicada por 0,6 m (ancho de referencia) (p. 267).

**Figura 8.**

*Fisuras longitudinales y transversales en los pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “fisuras” presentada en los pavimentos flexibles. Adaptado de “La fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro” (p. 33), por G. Valdés, F. Pérez y A. Calabi, 2012, *Revista Científico Tecnológica Departamento Ingeniería de Obras Civiles RIOC*, 1, 26 – 36. <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/article/view/1964/1754>

#### 1.3.2.4.2.2 *Fisuramiento en bloque.*

Respecto al fisuramiento en bloque, el MOPC (2016) explica que, son fisuras y grietas interconectadas que dividen al área afectada en polígonos casi rectangulares. Difieren de las fisuras tipo piel de cocodrilo, debido a que estas últimas son más pequeñas, irregulares y de ángulo agudo; además, se ubican en zonas de mayor tránsito.

Estas fallas son consecuencia de la excesiva contracción de la mezcla asfáltica a raíz de los cambios de temperatura y humedad, el endurecimiento del betún, la elevada rigidez y la reflexión de grietas. Su forma de medición es en metros cuadrados ( $m^2$ ); en caso se vean distintos niveles de severidad, deben ser registrados y evaluados por separado (pp. 44 - 45).

**Figura 9.**

*Fisuramiento en bloque en los pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “fisuramiento en bloque” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Identificación y Evaluación de las fallas superficiales en los pavimentos flexibles de algunas vías de la ciudad de Barranca –2017*, de R. Zeballos, 2018, (<https://docplayer.es/96887416-Identificacion-y-evaluacion-de-las-fallas-superficiales-en-los-pavimentos-flexibles-de-algunas-vias-de-la-ciudad-de-barranca-2017.html>)

#### *1.3.2.4.2.3 Piel de cocodrilo.*

Según Rondón y Reyes (2015), la “piel de cocodrilo” está compuesta por una serie de fisuras conectadas entre sí, que forman pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos y por lo general, viene acompañada con hundimiento de la zona afectada. Es recomendable realizar la evaluación de áreas afectadas en tramos de 100 m de longitud (p. 269).

Adicionalmente, el MOPC (2016) manifiesta que, este tipo de deficiencias se producen usualmente en zonas expuestas al tránsito y que su principal causa es la fatiga de la mezcla asfáltica bajo repetidas cargas. A esta se suman otras causales, como: los escasos espesores en la estructura del pavimento, que este sea exageradamente deformable, baja calidad de los

materiales, incorrecto proceso constructivo, drenajes superficiales inadecuados, etc. Para cuantificar la “piel de cocodrilo”, se toma el área de las zonas afectadas en metros cuadrados ( $m^2$ ) (pp. 48 – 49).

**Figura 10.**

*Piel de cocodrilo en los pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “piel de cocodrilo” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Tipos de Fallas en Pavimento Flexible*, por Blogger, 2014, (<http://fallasenpavimentoflexible.blogspot.com/2014/05/tipos-de-fallas-en-pavimento-flexible.html>)

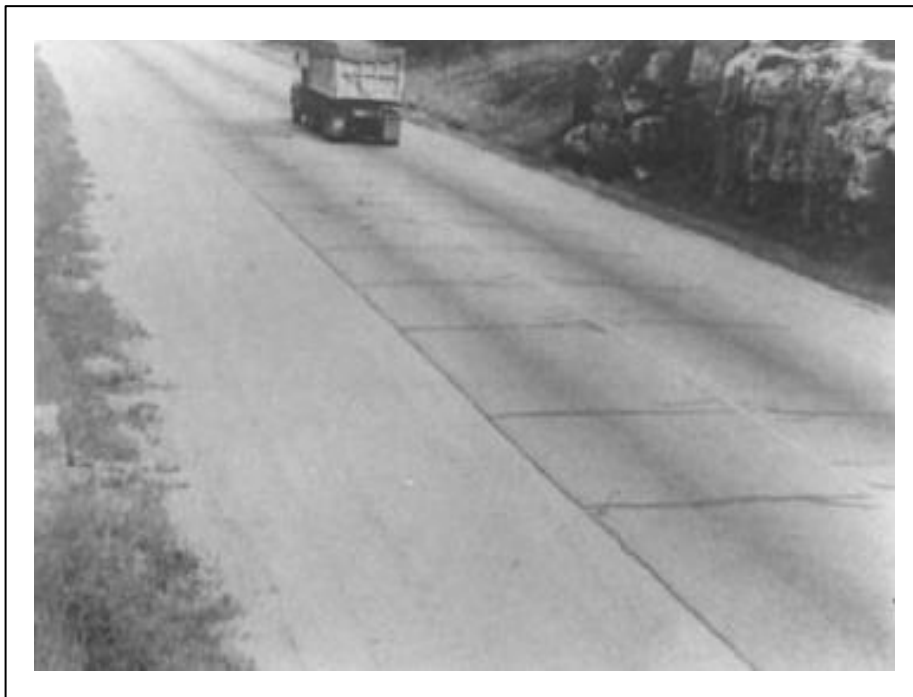
**1.3.2.4.2.4** *Fisuras por reflexión de juntas.*

El MOPC (2016) manifiesta que este tipo de daños solo se presentan en pavimentos mixtos formados por una superficie asfáltica ubicada sobre losas de hormigón. Esto sucede debido a factores como la exposición a cargas vehiculares que exceden la resistencia del pavimento y a la amplitud de los ciclos de apertura y cierre de las juntas de dilatación en el

concreto, que son proyectadas a la superficie de la carpeta asfáltica y producen grietas. Su unidad de medida es metros lineales (m) (pp. 54 – 55).

**Figura 11.**

*Fisura refleja en pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “fisura refleja” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (catálogos de fallas)*, por el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de República Dominicana, 2016, (<https://www.mopc.gov.do/media/2335/sistema-identificaci%C3%B3n-fallas.pdf>)

**1.3.2.4.2.5 Fisuras en arco.**

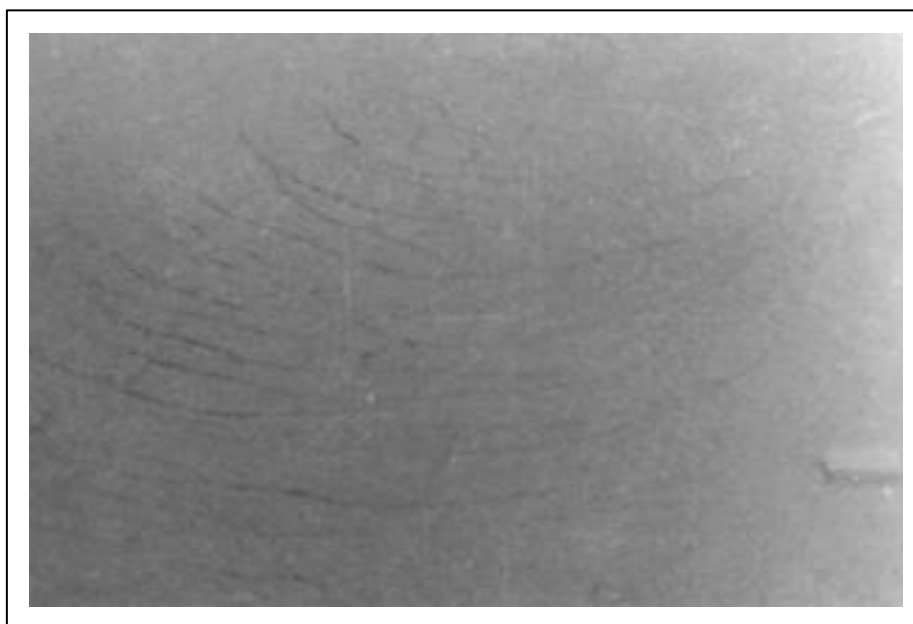
Son definidas por el MOPC (2016) como fisuras en forma de medialuna con sus dos extremos comúnmente apuntando hacia el sentido del tráfico; en general, se detectan en zonas de frenado o cambio de dirección y son denominadas fisuras por resbalamiento.

Las grietas antes mencionadas, son provocadas cuando las fuerzas horizontales que se generan al momento de que el vehículo frena o cambia de dirección, son suficientes para deformar la capa asfáltica superficial; esto es resultado de una mala adherencia entre la carpeta

de rodadura y su capa subyacente, del espesor reducido de la carpeta asfáltica o por ser colocado sobre superficies fácilmente degradables y/o muy lisas. Las fisuras en arco son medidas en metros cuadrados ( $m^2$ ) (p. 58).

**Figura 12.**

*Fisuras de arco en los pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “fisura de arco” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (catálogos de fallas)*, por el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de República Dominicana, 2016, (<https://www.mopc.gov.do/media/2335/sistema-identificaci%C3%B3n-fallas.pdf>)

### **1.3.2.4.3 Desintegraciones.**

#### **1.3.2.4.3.1 Desprendimiento de agregados.**

El MOPC (2016) señala que el desprendimiento de agregados es el deterioro gradual de la superficie de rodadura debido a la disgregación y separación del material fino o matic (asfalto + fino), dejándola cada vez más expuesta a la abrasión del tráfico o las condiciones ambientales. Tienen origen en la excesiva rigidez del asfalto, deficiente dotación de materiales,



oxidación del bitumen, pérdida de adhesión entre los insumos, etc. Se calcula en metros cuadrados ( $m^2$ ) (pp. 61 – 62).

**Figura 13.**

*Desprendimiento de agregados en los pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “desprendimiento de agregados” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Pulimento de agregados empleados en capas de rodamiento*, de M. Ramírez, M. Arce y F. Leiva, 2005, (<https://docplayer.es/77303654-Pulimento-de-agregados-empleados-en-capas-de-rodamiento.html>)

#### 1.3.2.4.3.2 *Peladuras.*

Rondón y Reyes (2015) exponen que, las peladuras son los desprendimientos de pequeñas porciones o placas de material en la capa de rodadura, causadas por el tráfico vehicular y que producen hoyos en su superficie, sin afectar la capa subyacente. Estas fallas son provocadas por el uso de un aglutinante inadecuado, déficit en el espesor de la carpeta de rodadura, mala compactación, incompatibilidad entre el asfalto y el agregado pétreo, mezcla

asfáltica permeable, insuficiente riego de liga, agregados contaminados, altas temperaturas, y tránsito de vehículos pesados, etc. En cuanto a la severidad, se clasifica como “baja”, para profundidades menores a 1 cm ; “regular”, entre 1 cm y 2,5 cm y “alta”, superiores a 2,5 cm (p. 277).

**Figura 14.**

*Peladuras en los pavimentos flexibles*



*Nota:* Esta figura muestra la falla denominada “peladuras” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (catálogos de fallas)*, por el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de República Dominicana, 2016, (<https://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identificaci%C3%B3n-fallas.pdf>)

**1.3.2.4.3.3** *Estrías longitudinales.*

El MOPC (2016) refiere que las estrías longitudinales son una secuencia de peladuras o desprendimientos pétreos de la zona de rodadura que se distribuyen de manera longitudinal, similares a surcos ubicados paralelamente al sentido del tráfico. Los factores que provocan

dichas imperfecciones son los incorrectos procesos de construcción o variaciones en el dosaje de agregados pétreos. Su unidad de medida es el metro cuadrado (m<sup>2</sup>) (p. 71).

**Figura 15.**

*Estrías longitudinales en los pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “peladuras” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (catálogos de fallas)*, por el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de República Dominicana, 2016, (<https://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identificaci%C3%B3n-fallas.pdf>)

#### 1.3.2.4.3.4 Baches.

Rondón y Reyes (2015) argumentan que los baches son fallas en las que una sección de la carpeta de rodadura se despegó totalmente y dejó exteriorizada la capa granular. En la mayoría de los casos es resultado del incremento de la “piel de cocodrilo”, la mala compactación de las capas granulares, la humedad en la subrasante, las deficiencias en los sistemas de drenaje, etc. Su grado de severidad es obtenido mediante una escala en la que el

nivel “bajo” se refiere a una profundidad menor a 2,5 cm; “regular”, entre 2,5 cm y 5 cm y “alto”, mayor a 5 cm (p. 278).

**Figura 16.**

*Baches en los pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “baches” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Factores que afectan al pavimento flexible*, por el Proyec Plus Servicios y Construcciones, 2016, (<http://proyecplus.blogspot.com/2016/02/factores-que-afectan-al-pavimento.html>)

**1.3.2.4.3.5 Roturas de bordes.**

Según el MOPC (2016), es la descomposición gradual de los bordes debido a la pérdida del aglomerado bituminoso (mezcla); como resultado, muestran irregularidades en su linealidad, disminución del ancho efectivo de la carpeta de rodadura y exposición de la base granular al ambiente. Es precedida por fisuras, hundimientos o desprendimientos en los 0,50 m siguientes al borde.

**Figura 17.**

*Rotura de bordes en pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “rotura de bordes” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Identificación y Evaluación de las fallas superficiales en los pavimentos flexibles de algunas vías de la ciudad de Barranca –2017*, de R. Zeballos, 2018, (<https://docplayer.es/96887416-Identificacion-y-evaluacion-de-las-fallas-superficiales-en-los-pavimentos-flexibles-de-algunas-vias-de-la-ciudad-de-barranca-2017.html>)

Así mismo, el autor menciona que una de las razones principales que conducen a la aparición de estos daños, es la acción abrasiva de las cargas vehiculares sobre los extremos de la carpeta de rodadura, la cual es comúnmente más frágil que las otras zonas de la estructura. Otras de las razones son: ancho de calzada muy angosto, mala compactación de materiales, confinamiento lateral insuficiente, estancamiento de agua en los bordes, etc. Para realizar la evaluación de la vía, las roturas de borde se cuantifican en metros lineales (m) (pp. 82 – 83).

### 1.3.2.4.4 Otros modos de falla.

#### 1.3.2.4.4.1 Exudación del asfalto.

#### Figura 18.

*Exudación de asfalto en los pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “exudación de asfalto” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Exudación de asfalto*, por Diccionario geotecnia, 2021, (<https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/exudacion-de-asfalto/>)

El MOPC (2016) la define como un daño irreversible que radica en la aparición del asfalto en la superficie del pavimento, constituyendo una capa de ligante o mastic (ligante + finos). A temperaturas altas, se origina una apariencia brillante, resbaladiza y pegajosa en el área afectada. Los factores que generan su existencia son: el abundante material bituminoso en la mezcla asfáltica, escaso contenido de vacíos, déficit en la selección del bitumen, dosificaciones insuficientes para soportar el tráfico presentado, etc. Las exudaciones se miden en metros cuadrados (m<sup>2</sup>) (p. 89).

#### 1.3.2.4.4.2 Bombeo / Exudación de agua.

#### Figura 19.

*Exudación de agua en pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “exudación de agua” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (catálogos de fallas)*, por el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de República Dominicana, 2016, (<https://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identifici%C3%B3n-fallas.pdf>)

El MOPC (2016) indica que el bombeo es el ascenso de agua hacia la superficie del pavimento mediante sus poros y fisuras que, al estar acompañado del flujo vehicular, arrastra partículas finas suspendidas. Este fenómeno es producto de la presencia de agua atrapada en una capa porosa ubicada entre dos impermeables o por el desplazamiento de esta, a causa del aumento de la presión generado por variaciones en la temperatura ambiental. Su unidad de medida es en metros cuadrados ( $m^2$ ) (p. 92).

#### 1.3.2.4.4.3 Bacheos/repificaciones.

**Figura 20.**

*Baches/ reparación en los pavimentos flexibles*



**Nota:** Esta figura muestra la falla denominada “bacheos/repificación” presentada en los pavimentos flexibles. Tomado de *Cómo reparar un bache con asfalto en frío*, por Fixer, 2019, (<https://fixer.es/blog/como-reparar-bache-con-asfalto-en-frio/>)

De acuerdo con Rondón y Reyes (2015), las reparaciones son la forma de subsanar daños en la vía como: piel de cocodrilo, baches, malla eslabonada, áreas en donde se necesita la instalación de tuberías o cableado debajo del pavimento, etc. Estos tipos de resarcimientos deben estar registrados dentro de la evaluación al pavimento, pues evidencian la presencia de fallas con anterioridad. Se le llama parcheo cuando solo se involucra a la capa asfáltica y bacheo cuando adicionalmente se interviene parte de la capa granular. Su unidad de medida es el metro cuadrado (m<sup>2</sup>) (p. 279).



### 1.3.3 Asfalto

#### 1.3.3.1 Definición.

Salazar (2011) expone que el asfalto es un componente con un alto grado de impermeabilidad, adherencia y cohesión; es decir, tiene propiedades ideales para la construcción de pavimentos, además posee la capacidad de soportar grandes esfuerzos inmediatos y fluir por la acción de cargas permanentes. Presenta las funciones descritas a continuación:

- Impermeabilizar la estructura del pavimento para evitar que sufra daños ocasionados por la humedad (precipitaciones u otra causa).
- Brindar una sólida unión y cohesión entre agregados, que permita soportar la acción mecánica, para evitar la desintegración generada por las cargas vehiculares.

Así mismo, la empresa Comercializadora Internacional de Manufacturas y Procesos Industriales (MPI, 2020), refiere que el asfalto es aplicado principalmente en la construcción de vías; brindando propiedades de durabilidad, impermeabilización y flexibilidad frente a las exigencias climáticas y de cargas vehiculares. A temperatura ambiente, presenta un estado sólido y es clasificado de acuerdo su grado de penetración o viscosidad.

#### 1.3.3.2 Principales constituyentes del asfalto.

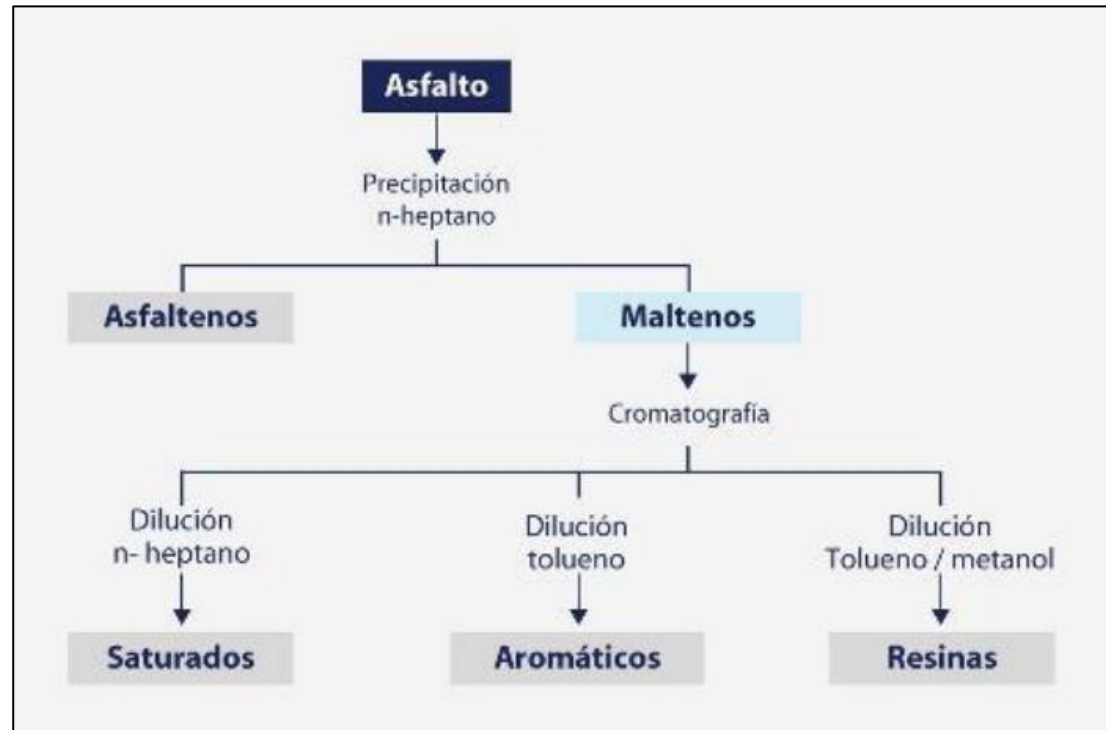
Para PETROPERU (2020), el asfalto está compuesto por hidrocarburos de elevado peso molecular, que entrelazados presentan características termoplásticas. Su estado y nivel de consistencia pueden cambiar de sólido a semisólido, como a líquido viscoso si la temperatura es adecuada para ello y, se encuentra conformado por:

- Saturados: Aceites blancos no polares conformados por hidrocarburos alifáticos lineales o por cadenas laterales alifáticas y aromáticas. El peso molecular se establece entre 300 g/mol y 2000 g/mol .

- **Asfaltenos:** Son sólidos sin forma definida y de color insoluble en n-heptano que comprende Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Oxígeno y Azufre; además son compuestos de elevado peso molecular.
- **Resinas:** Compuestos sólidos negros, brillantes y quebradizos, de característica muy polar y con pesos moleculares entre 500 g/mol y 50 000 g/mol .
- **Naftaleno Aromáticos:** Se refiere a componentes de color marrón anaranjado, con reducido peso molecular y similar al de los saturados.

**Figura 21.**

*Estructura fisicoquímica del asfalto*

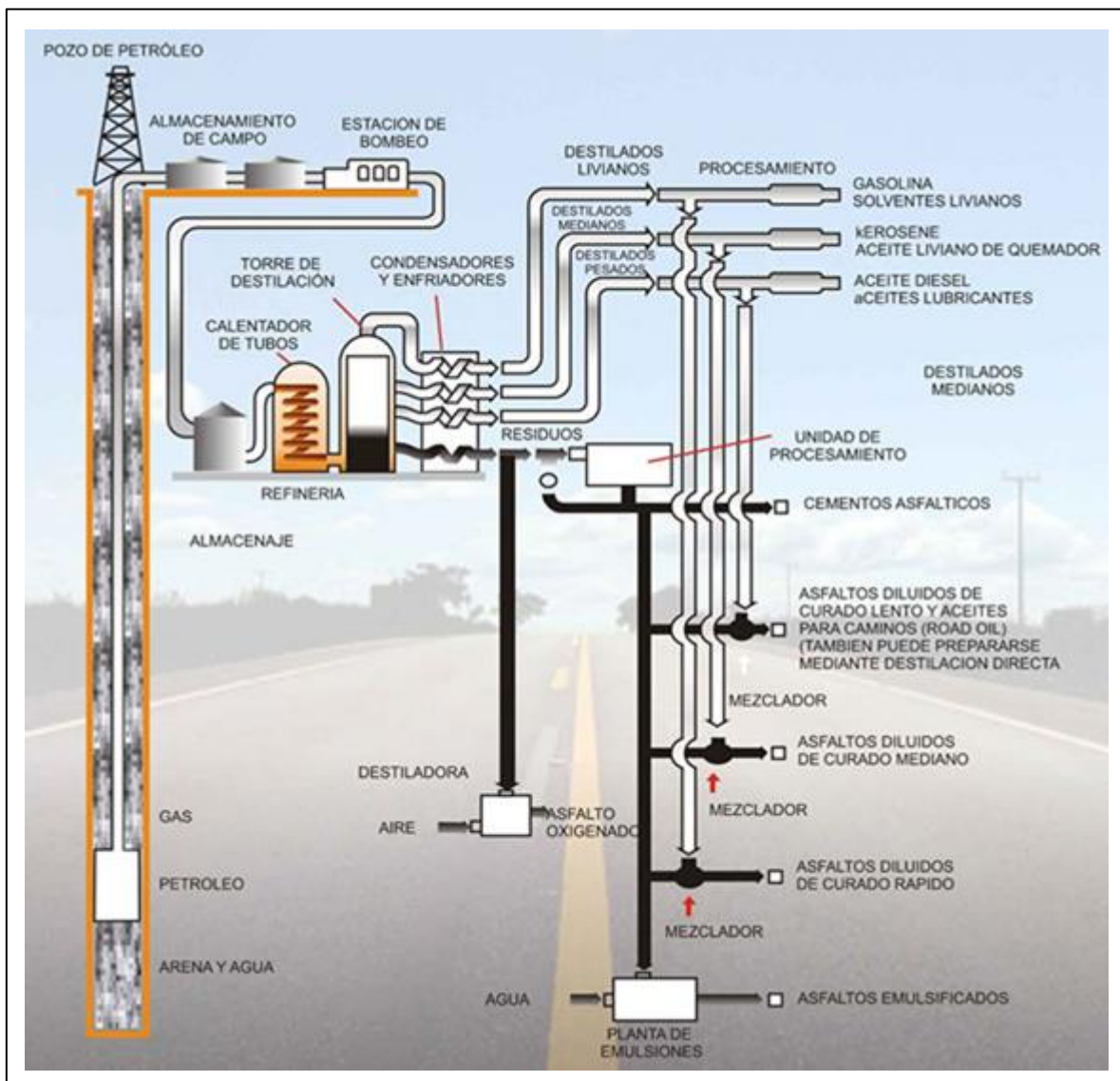


**Nota:** Esta figura muestra la estructura fisicoquímica del asfalto empleado para la construcción de pavimentos flexibles. Tomado de *Fisicoquímica del asfalto*, por Sol petróleo, 2009, (<http://www.solpetroleo.com/fisico-quimica-del-asfalto#:~:text=La%20composici%C3%B3n%20qu%C3%ADmica%20de%20los,%20hierro%20calcio%20y%20magnesio.>)

### 1.3.3.3 Fabricación del asfalto.

Figura 22.

Esquema de fabricación de los productos asfálticos



**Nota:** Esta figura muestra un organizador visual que grafica el proceso de fabricación de los asfaltos. Tomado de *Diagrama de flujo para asfaltos de petróleo*, de PETROPERU, 2020, (<https://asfaltos.petroperu.com.pe/descripcion-asfaltos.php>)

García y Negrete (2006) mencionan que se busca modificar los asfaltos debido a que son sensibles a las variaciones bruscas de temperatura, las lluvias, las radiaciones solares, etc. Así mismo, explican que el bitumen es un componente natural que se obtiene producto de la destilación del petróleo crudo como fracción del “fondo de barril”, mediante procesos que se ejecutan en las plantas de destilación primaria y de alto vacío. A continuación, el proceso de forma detallada.

Los autores citados refieren que el primer proceso que se realiza es a través de la “planta de destilación atmosférica”. En la que inicialmente se precalienta la materia cruda proveniente de los tanques de almacenamiento, el cual se ejecuta a una temperatura de 141 °C con la finalidad de solubilizar las sales con el agua inyectada y evitar que se evaporicen los hidrocarburos. Luego se ejecuta el proceso de desalado del crudo, con el objetivo de prevenir daños por corrosión en equipos de calentamiento y destilación. Este procedimiento, consiste en inyectar desemulsificante y humectante con el fin de separar los hidrocarburos del agua emulsionada (contiene las sales del crudo), para que posteriormente se caliente en tanques y una parte sea conducida a la desaladora; mientras que la otra, a la bomba de recirculación de agua.

El crudo que se obtiene de la desaladora es enviado a la torre de despunte, para que mediante un precalentador, intercambie calor simultáneamente con gasóleo pesado. Al producto de este proceso se le inyecta inhibidor fílmico y neutralizante, con el fin de evitar la corrosión; luego se enfría en el condensador de la torre y pasa al acumulador. Inmediatamente, la nafta de despunte es bombeada desde el acumulador hacia la torre estabilizadora de naftas y, los gases amargos son enviados a la unidad de craqueo catalítico fluido (unidades FCC), para el control de presión.

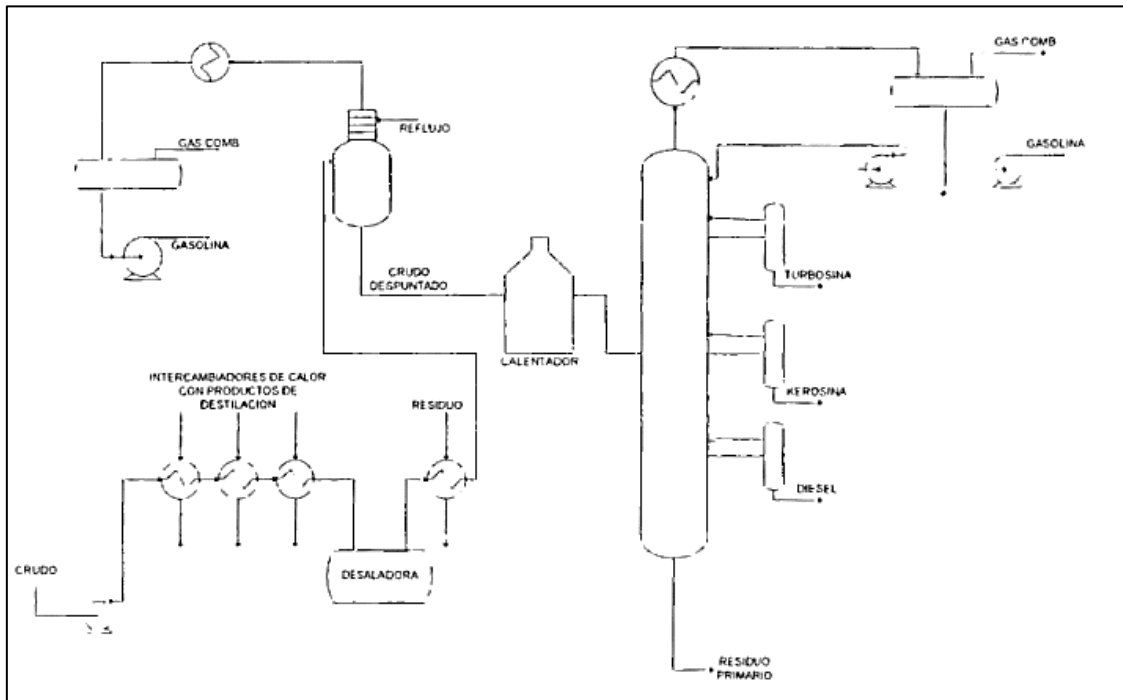
El último precalentamiento de crudo despuntado permite recuperar calor adicional y minimizar el consumo de combustible en los calentadores, alcanzando una temperatura de 260 °C . Los calentadores producen vapores de baja que son usados en los agotadores de turbosina, Kerosina, Diesel y gasóleo pesado atmosférico, pero también son empleados como vapor de arrastre en la torre atmosférica. De igual forma, la nafta ligera (gasolina) y los hidrocarburos ligeros salen por el domo de la torre; una como gasolina de reflujo a la torre de despunte y la otra, como gasolina excedente a la torre estabilizadora. Además, de la torre fraccionadora se extrae, se agota, se enfría y se envía la turbosina a la planta de hidros de destilados intermedios, que también es destino de la kerosina en estado frío, y a tratamiento cáustico. Así mismo, el diésel es extraído para ser agotado y, el líquido del fondo es enfriado y bombeado a la planta de hidros de destilados intermedios. También se produce el gasóleo pesado enfriado y es conducido hacia el almacenamiento o a la unidad FCC. Finalmente, el residuo atmosférico sale por el fondo de la torre, es enfriado y bombeado al almacenamiento o a la planta de vacío.

Las naftas ligeras (gasolina) son dirigidas del precalentador a la estabilizadora, con el objetivo de separar los hidrocarburos ligeros de la nafta ligera y que esta pase a ser estabilizada. En seguida, el carburante proveniente de la torre atmosférica se une con el producto de fondo de la torre estabilizadora y se envía a la planta de hidros de destilados intermedios.

Después, los hidrocarburos ligeros (LPG) se condensan y pasan al acumulador de LPG, produciendo gases que son dirigidos a la unidad FCC y a la planta tratadora. Del mismo modo, el gas LPG es bombeado como reflujo a la torre y, el excedente se direcciona a la planta de endulzamiento. Por último, la gasolina estabilizada es enfriada y se conduce a las plantas de tratamiento de nafta o a tanques de almacenamiento.

**Figura 23.**

*Planta de destilación atmosférica*



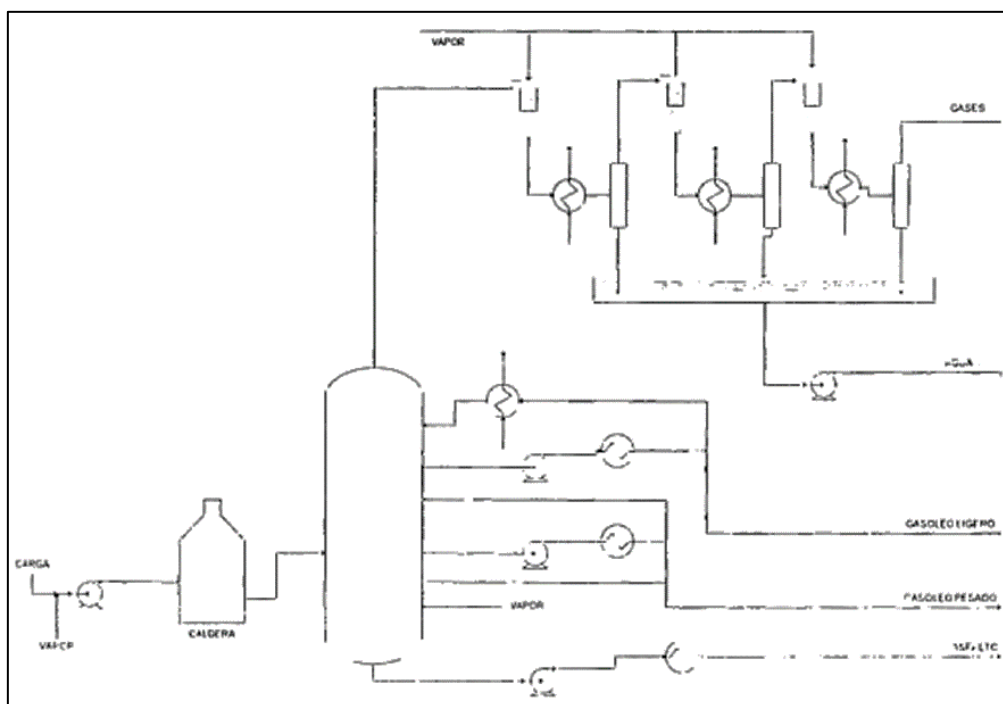
**Nota:** Esta figura muestra un organizador visual que grafica el proceso que se realiza en la planta de destilación atmosférica. Tomado de *Control de la deformación de los asfaltos en base a polímeros*, de J. García y R. Negrete, 2006

A continuación, en la “planta de destilación de alto vacío” se sigue una ruta de procesos, la cual comienza con el calentamiento del residuo atmosférico en la torre de vacío, en un rango de temperatura de 388 °C a 399 °C . Luego, del gasóleo ligero de vacío que se extrae de la torre, una fracción es enfriada y bombeada hacia la planta hidrodesulfuradora de gasóleos (HDSGO), al almacenamiento o a la unidad FCC y, la otra retorna como reflujo al domo de la torre. Además, se extrae el gasóleo pesado de vacío que es enviado al acumulador; del cual, el fondo es bombeado en dos partes: una como reflujo caliente hacia la torre y la otra (fría) es direccionada a la unidad HDSGO, unidad FCC o almacenamiento. Para concluir, la salida del fondo se bombea a los precalentadores y luego se divide en tres corrientes: la primera vuelve

al precalentador y retorna al fondo de la torre, la segunda va a la planta de coque o a la planta reductora de viscosidad y la tercera va a la caja enfriadora; de la cual salen dos corrientes, una va al almacenamiento y la segunda a la planta de asfalto, para ser procesada.

**Figura 24.**

*Planta de destilación de alto vacío*



**Nota:** Esta figura muestra un organizador visual que grafica el proceso que se realiza en la planta de destilación de alto vacío. Tomado de *Control de la deformación de los asfaltos en base a polímeros*, de J. García y R. Negrete, 2006

Los residuos pesados resultantes, son sometidos a la planta reductora de viscosidad, para ser descompuestos térmicamente y producir combustóleo menos viscoso. Luego, el sobrante es dirigido a la planta hidrodeseintegradora de residuales (H-OIL), que mediante reacciones de desintegración e hidrogenación, reducen las olefinas, sus productos poli aromáticos y coque. Finalmente, los resultantes más densos son conducidos a la planta

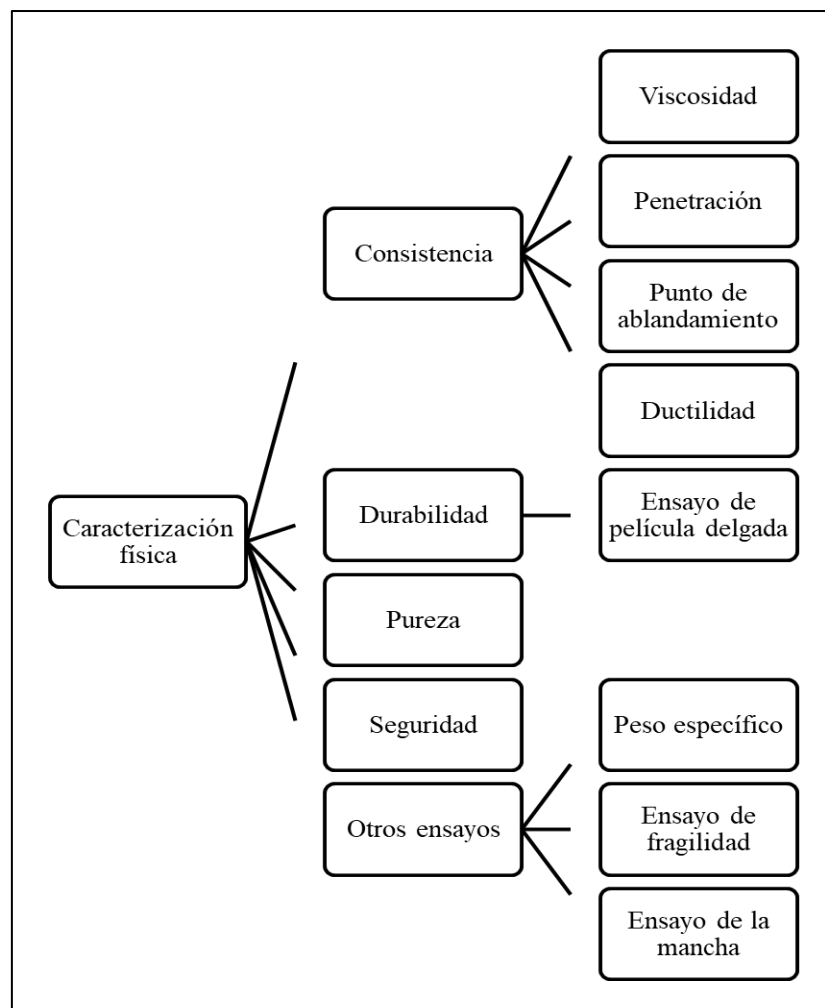


coquizadora, para ser empleados en la fabricación de gasolinas, gasóleos y coque de calidad comercial.

### 1.3.3.4 Caracterización física.

**Figura 25.**

*Ensayos para caracterización de asfaltos*



**Nota:** En la figura se muestra un organizador visual resumen de los ensayos necesarios para la caracterización física de los asfaltos.

El MTC (2013) en su manual de carreteras, refiere que los asfaltos son clasificados por viscosidad absoluta y por penetración; su aplicación es de acuerdo con las características

meteorológicas de la región, a la carta de viscosidad del cemento asfáltico y según lo señalado en la tabla 415-01 del mencionado manual (p. 470).

**Figura 26.**

*Selección del tipo de cemento asfáltico*

**Tabla 415-01**  
**Selección del tipo de cemento asfáltico**

Temperatura Media Anual			
24°C o más	24°C - 15°C	15°C - 5°C	Menos de 5°C
40-50 ó 60-70 o modificado	60-70	85-100 120-150	Asfalto Modificado

**Nota:** Esta figura muestra el tipo de asfalto a emplear de acuerdo con la tempera media anual que presenta la zona en donde se construirá el pavimento flexible. Tomado de *Manual de carreteras - Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013*, por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, ([https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/manuales.html](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html))

Así mismo, se hace énfasis en que el cemento asfáltico debe presentar un aspecto homogéneo, libre de agua y no formar espuma al ser calentado a 175 °C , además puede ser modificado con la incorporación de diversos aditivos como rejuvenecedores, polímeros o cualquier producto garantizado, que cumpla con los parámetros correspondientes (p. 471).

Figura 27.

Clasificación de los asfaltos por penetración

**Tabla 415-02**  
**Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración**

Tipo		Grado Penetración									
Grado	Ensayo	PEN 40-50		PEN 60-70		PEN 85-100		PEN 120-150		PEN 200-300	
		min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
<b>Pruebas sobre el Material Bituminoso</b>											
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	MTC E 304	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de Inflamación, °C	MTC E 312	232		232		232		218		177	
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	100		100		100		100		100	
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTC E 302	99,0		99,0		99,0		99,0		99,0	
Índice de Penetración (Susceptibilidad Térmica) <sup>(1)</sup>	MTC E 304	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
Ensayo de la Mancha (Oliensies) <sup>(2)</sup>											
Solvente Nafta – Estándar	AASHTO M 20	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Nafta – Xileno, %Xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Heptano – Xileno, %Xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
<b>Pruebas sobre la Película Delgada a 163°C, 3,2 mm, 5 h</b>											
Pérdida de masa, %	ASTM D 1754		0,8		0,8		1,0		1,3		1,5
Penetración retenida después del ensayo de película fina, %	MTC E 304	55+		52+		47+		42+		37+	
Ductilidad del residuo a 25°C, 5 cm/min, cm <sup>(3)</sup>	MTC E 306			50		75		100		100	

(1), (2) Ensayos opcionales para su evaluación complementaria del comportamiento geológico en el material bituminoso indicado.  
(3) Si la ductilidad es menor de 100 cm, el material se aceptará si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 cm a la velocidad de 5 cm/min.

**Nota:** Esta figura muestran las especificaciones que deben cumplir los asfaltos al ser clasificados por penetración. Tomado de *Manual de carreteras - Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013*, por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, ([https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/manuales.html](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html))

**Figura 28.**

*Clasificación de los asfaltos por viscosidad*

**Tabla 415-03**  
**Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por viscosidad**

Características	Grado de Viscosidad				
	AC-2,5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-40
Viscosidad Absoluta a 60°C, Poises	250±50	500±100	1.000±200	2.000±400	4.000±800
Viscosidad Cinemática, 135°C St mínimo	80	110	150	210	300
Penetración 25°C, 100gr, 5 s mínimo	200	120	70	40	20
Punto de Inflamación COC, °C mínimo	163	177	219	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, % masa, mínimo	99	99	99	99	99
Pruebas sobre el residuo del ensayo de película fina					
➤ Viscosidad Absoluta, 60°C, Poises máximo	1.250	2.500	5.000	10.000	20.000
➤ Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm, mínimo	100	100	50	20	10
Ensayo de la Mancha (Oliensies) <sup>(1)</sup>					
Solvente Nafta – Estándar	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Solvente Nafta – Xileno, %Xileno	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Solvente Heptano – Xileno, %Xileno	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo

(1) Porcentajes de solvente a usar, se determinara si el resultado del ensayo indica positivo.  
Fuente: ASTM D 3381, NTP

**Nota:** Esta figura muestran las especificaciones que deben cumplir los asfaltos al ser clasificados por viscosidad. Tomado de *Manual de carreteras - Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013*, por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, ([https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/manuales.html](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html))

**Figura 29.**

*Equivalencia entre la penetración y el grado de viscosidad*

Grado de Penetración	Grado de Viscosidad AC (Asphalt Cement)
40-50	AC-40
60-70	AC-20
85-100	AC-10
120-150	AC-5
200-300	AC-2.5

**Nota:** Esta figura muestran las equivalencias entre grado de penetración y viscosidad. Adaptado de “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)” (p. 29), por J. Salazar, 2011, *Métodos y Materiales, 1*, 25 – 38. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/view/8392/7926>

### 1.3.3.5 Propiedades.

#### 1.3.3.5.1 *Densidad Relativa.*

Según la ASTM (2021) en su normativa D70, la densidad relativa es la relación que existe entre la masa del volumen de un material asfáltico semisólido y la masa del mismo volumen de agua a igual temperatura; esta propiedad es calculada con el uso de un picnómetro y su unidad de medida es el kilogramo sobre metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ) (p. 1).

#### 1.3.3.5.2 *Viscosidad.*

Rondón y Reyes (2015) definen a la viscosidad como la resistencia a fluir que presenta un material, sobre una superficie; así mismo, es una medida indirecta de su consistencia y rigidez. En la producción de pavimentos, es un parámetro que se utiliza para determinar las temperaturas aproximadas de mezclado entre el agregado pétreo y el ligante en la planta de

asfalto, además de la extensión y grado de compactación de estas, en condiciones de laboratorio (p. 8).

Por otro lado, la ASTM (2018) en su publicación D2171, menciona que la razón entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de corte es denominada coeficiente de viscosidad; el cual mide la resistencia al flujo del líquido y es conocida simplemente como “viscosidad”. A una temperatura de 60 °C , caracteriza el comportamiento del flujo y, puede emplearse para requerimientos específicos de asfaltos líquidos, semisólidos o sólidos. Su unidad de medida es en Pascales por segundo (Pa\*s) o en Newton por segundo sobre metro al cuadrado (N\*s/m<sup>2</sup>) (p. 2).

#### **1.3.3.5.3      *Consistencia.***

Velásquez (2016) señala que la consistencia es el estado físico que experimenta el asfalto en un tiempo y temperatura determinados y, es calculado de forma habitual mediante pruebas de penetración y punto de ablandamiento. Esta propiedad está ligada a la susceptibilidad térmica, que precisa la sensibilidad del asfalto a la variación de su viscosidad frente a los cambios de temperatura; así mismo, se comporta como un indicador de adherencia, trabajabilidad, compactación y estabilidad (p. 20).

#### **1.3.3.5.4      *Susceptibilidad térmica.***

De acuerdo con Velásquez (2016), la susceptibilidad térmica de un bitumen grafica su grado de sensibilidad a la variación de la viscosidad, por acción de las altas temperaturas. Esta propiedad debe ser la mínima posible para que el asfalto no se convierta en un fluido viscoso en presencia de calor, ni en un sólido quebradizo a temperaturas bajas (pp. 21 – 22).

#### **1.3.3.5.5      *Ductilidad.***

Rondón y Reyes (2015) expresan que la ductilidad es la propiedad que tienen las mezclas para experimentar deformaciones permanentes o elásticas, sin que se produzcan fallas

a nivel estructural; excepto que las exigencias de cargas superen los máximos permitidos. Lo ideal es que el betún exhiba esta característica durante la vida útil del pavimento, de lo contrario se pueden ocasionar microfisuras térmicas a bajas temperaturas y el rompimiento prematuro de la mezcla bajo cargas repetidas (p. 8).

ASTM (2017) en su norma D113, señala que la ductilidad de un material bituminoso se obtiene midiendo la distancia de elongación que experimenta al ser estirado a una velocidad y temperatura específica, antes de romperse. Su unidad de medida es en centímetros (cm).

#### **1.3.3.5.6      *Fragilidad.***

Velásquez (2016) manifiesta que la fragilidad es la característica que tiene un cuerpo de quebrarse o romperse con facilidad, debido a impactos o deformaciones que experimenta. Este defecto se presenta en el material bituminoso cuando es sometido a temperaturas ambientales en niveles muy bajos.

#### **1.3.3.5.7      *Adhesión y cohesión.***

Urrego y Ruiz (2016) explican que la adhesión, es la capacidad del asfalto para fusionarse con los agregados pétreos en la preparación de mezcla asfáltica, utilizada en la producción de pavimentos flexibles. Por otro lado, la cohesión es la propiedad que consiste en mantener firmemente la unión de las partículas de agregado que constituyen la carpeta de rodadura, cuando esta se encuentra en servicio.

#### **1.3.3.5.8      *Estabilidad y almacenamiento de asfaltos modificados.***

El MTC (2016) en su publicación MC-06-16, menciona que cuando el asfalto es modificado, en general con compuestos poliméricos, se pueden producir fenómenos de cremado o de sedimentación, lo cual causa una concentración mayor de polímeros en la parte inferior o superior del tanque de almacenamiento, de acuerdo con sus densidades respectivas. Esta deficiencia se origina por dispersión incorrecta del polímero en el ligante o por

incompatibilidad entre ambos (asfalto – modificador). Los resultados de este ensayo se expresan como la diferencia que existe entre las penetraciones, así como entre los puntos de ablandamiento obtenidos de las muestras superiores e inferiores ensayadas.

#### **1.3.3.5.9 Solubilidad en tricloroetileno.**

De acuerdo con Salazar (2011) y la ASTM (2015) en su publicación D2042, la prueba de solubilidad indica el contenido de bitumen del asfalto original. La fracción de betún soluble en tricloroetileno está conformada por las sustancias aglomerantes activas y; la insoluble es considerada materia inerte, probablemente de naturaleza inorgánica. Es una forma de hallar la cantidad de contaminantes que contiene el asfalto y su unidad de medida es en porcentaje (%) (p. 27).

#### **1.3.3.5.10 Punto de Inflamación.**

La ASTM (2018) en la norma D92, explica que el punto de inflamación es la medida en la que una muestra ensayada tiende a formar una mezcla inflamable con el aire en condiciones controladas de laboratorio. Esta propiedad es utilizada en las normas de seguridad y transporte, con el objetivo de identificar materiales inflamables; además, puede evidenciar la posible presencia de compuestos volátiles y combustibles dentro de otros relativamente no volátiles o no incendiables. Se utiliza como unidad de medida el grado Celsius (°C) u otro que indique temperatura.

#### **1.3.3.5.11 Durabilidad.**

Arenas (s.f) define a la durabilidad como la capacidad que tiene el asfalto de mantener sus propiedades ligantes y cohesivas en la mezcla; es decir, de resistir las exigencias por cargas vehiculares y climáticas sin deformarse, fisurarse o desintegrarse, durante la vida útil de la estructura del pavimento. Así mismo, el autor señala los factores que contribuyen al envejecimiento del asfalto:



- **Oxidación:** Es la reacción que se da entre el oxígeno y los componentes químicos del bitumen.
- **Volatilización:** Es la evaporación de los solventes más livianos.
- **Polimerización:** Se refiere a la combinación de moléculas y formación de enlaces débiles en grandes cadenas, que conllevan al endurecimiento progresivo del cemento asfáltico.
- **Sinéresis:** Se denomina a la oxidación por la que los aceites menos viscosos fluyen a la superficie de la película, causando el endurecimiento acelerado del betún.
- **Tixotropía:** Se refiere al endurecimiento progresivo ocasionado por la formación de una estructura dentro del asfalto, que puede ser destruida por recalentamiento o durante el servicio y; que está asociada a pavimentos de poco tránsito.
- **Separación:** Se define como la remoción de aceites, resinas y asfaltenos que constituyen el asfalto, causado por la absorción selectiva de agregados con alta porosidad.

#### **1.3.3.5.12 *Envejecimiento del asfalto en el pavimento.***

Para Arenas (s.f) una de las causas del envejecimiento es la acción del oxígeno, catalizado por los rayos ultravioletas de la luz solar y la elevación de la temperatura, que generan la oxidación de las moléculas más susceptibles del ligante; otro causal que genera el endurecimiento del bitumen es la presencia de finos, los cuales incrementan la viscosidad del asfalto y alteran sus características reológicas.

El envejecimiento del cemento asfáltico en condiciones de servicio depende de factores como el tiempo, temperatura, contenido de ligante asfáltico, absorción del agregado, espesor de la película alrededor de las partículas y las características propias del ligante. Por lo que, es recomendable que los pavimentos expuestos a los climas tropicales tengan diseños de mezclas asfálticas con mayor contenido de asfalto (p. 191).

### **1.3.3.6 Tipos de asfalto y uso.**

Escudero Grupo Empresarial (2019), menciona que el asfalto debe poseer diferentes especificaciones, dependiendo de la región en donde se va a emplear y las cargas que va a soportar, con la finalidad de que el material no sufra deterioros prematuros causados por condiciones meteorológicas o de tráfico. La empresa Petróleos del Perú (PETROPERU, 2020) clasifica a los asfaltos en los siguientes tipos:

#### **1.3.3.6.1 *Asfaltos sólidos o cementos asfálticos.***

Componen parte de las mezclas asfálticas en caliente, empleadas para la construcción de pavimentos flexibles, debido a sus propiedades aglomerantes e impermeabilizantes, que ofrecen flexibilidad, durabilidad y alta resistencia frente a ácidos y sales.

#### **1.3.3.6.2 *Asfaltos líquidos o asfaltos cortados.***

Son obtenidos de la dilución del cemento asfáltico, mediante el uso de un solvente derivado del petróleo o agua. Este tipo de asfaltos permiten ejecutar el proceso de mezclado con los agregados pétreos, sin la necesidad de ser calentados; generando así menores costos.

#### **1.3.3.6.3 *Emulsiones asfálticas.***

Solpetróleo (SOL, 2020) define a las emulsiones asfálticas como dispersiones de cemento asfáltico bituminoso (CPC) en la fase acuosa, estabilizada por agentes tensioactivos. Este material se aplica en estado frío y, representa un considerable ahorro en energía y maquinaria de fundimiento; así mismo, se puede aplicar en condiciones climáticas adversas (lluvia, humedad, etc.), permitiendo evitar retrasos.

#### **1.3.3.6.4 *Asfaltos modificados.***

Rondón y Reyes (2015), mencionan que al mezclar los asfaltos con polímeros u otros productos similares, se modifican las características físico-mecánicas, químicas y reológicas de las mezclas asfálticas. Con esta adición se pretende mejorar el comportamiento de las

mezclas tradicionales frente a las exigencias de cargas vehiculares y climáticas. Particularmente, se busca potenciar la rigidez y las resistencias al ahuellamiento, a la fatiga, a los daños por humedad, al envejecimiento, etc. (p. 19).

Así mismo, Arenas (s.f) explica que una mezcla asfáltica ideal debe tener baja rigidez o viscosidad a temperaturas normales de manejo en planta y colocación en obra; además, elevada rigidez frente a altas temperaturas, con el fin de reducir el ahuellamiento y; baja rigidez, con presencia de elasticidad, para evitar fisuras a temperaturas bajas y poseer buenas características adherentes en presencia de humedad (p. 283).

#### **1.3.4 Polímeros**

##### **1.3.4.1 Definición.**

Hermida (2011) expresa que los polímeros son moléculas de gran tamaño, constituidas por monómeros, fusionados mediante enlaces covalentes. Los monómeros están constituidos por átomos de carbono y pueden poseer grupos laterales o radicales con uno o más átomos. Estas moléculas forman parte de algunos tejidos de los seres vivos y también componen los plásticos (p. 14).

Otra definición es la otorgada por Arenas (s.f), quien conceptualiza a los polímeros como compuestos macromoleculares naturales o sintéticos, que son producidos a partir de moléculas más sencillas, por medio de reacciones poliméricas; este material tiene un peso molecular alto debido a que está formado por pequeñas unidades (p. 285).

##### **1.3.4.2 Clasificación.**

###### **1.3.4.2.1 Primera fuente citada.**

Según Arenas (s.f), la estructura de los polímeros permite clasificarlos como:

#### *1.3.4.2.1.1 Polímeros termoplásticos.*

Por lo general, son compuestos lineales o ligeramente ramificados, que se caracterizan por ser solubles, reblandecerse al ser sometidos a fuentes de calor y moldearse sin perder sus propiedades; algunos de los más comunes son: polietileno, polipropileno, poliestireno, entre otros.

#### *1.3.4.2.1.2 Polímeros termoendurecibles.*

Son materiales que se forman debido a reacciones químicas entre la base y el endurecedor, dando como resultado una estructura entrecruzada, la cual no permite que sean recuperados para transformarse nuevamente; los más comunes son las resinas fenólicas, resinas epoxi, etc.

#### *1.3.4.2.1.3 Elastómeros o cauchos.*

Son polímeros lineales amorfos, generalmente insaturados que, al ser sometidos a un proceso de vulcanización, adquieren una estructura parcialmente reticulada que les confiere propiedades elásticas. Los más utilizados son el caucho natural, los cauchos de etileno – propileno, butadieno – estireno (SBR) y elastómeros termoplásticos de butadieno – estireno (SBS) (pp. 285 – 286)

#### *1.3.4.2.2 Segunda fuente citada.*

Así mismo, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México (SCT, 2006) señala que los modificadores mayormente empleados son:

##### *1.3.4.2.2.1 Polímero tipo I.*

La SCT (2006) explica que este modificador mejora el comportamiento de las mezclas bituminosas, a elevadas y bajas temperaturas; es producido en base a polímeros elastoméricos radiales de configuraciones como las de Estireno – Butadieno – Estireno (SBS) o Estireno –

Butadieno (SB) y son utilizados en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales, en vías de alto tránsito pesado y, en climas fríos y cálidos (pp. 1 – 2).

#### *1.3.4.2.2.2 Polímero tipo II.*

Velásquez (2016) sostiene que se trata de un modificador que mejora el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente, al ser expuestas a bajas temperaturas. Está elaborado en base a polímeros elastómeros lineales, con una configuración de caucho de Estireno Butadieno Látex o Neopreno Látex. En cuanto a su aplicación, es recomendable su uso en pavimentos que necesiten una mejora en su comportamiento en climas fríos y templados; así como en emulsiones empleadas en tratamientos superficiales (p. 52).

#### *1.3.4.2.2.3 Polímero tipo III.*

La SCT (2006) lo define como un modificador que incrementa la resistencia de las mezclas asfálticas, frente al ahuellamiento y a la susceptibilidad térmica. Es producido en base a un polímero de tipo plastómero, mediante configuraciones de Etil – Vinil – Acetato (EVA) o poliestileno de alta o baja densidad (HDPE y LDPE) y; es utilizado en mezclas asfálticas para carpetas con altos niveles de tráfico y en climas calientes o, para emulsiones empleadas en tratamientos superficiales (p. 2).

#### *1.3.4.2.2.4 Hule molido de neumáticos.*

Según la SCT (2006), es un modificador de asfaltos que potencia la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas bituminosas, con el propósito de reducir la aparición de grietas originadas por fatiga o por variaciones en la temperatura. Es fabricado en base al producto de trituración de neumático y, se aplica en carpetas delgadas de granulometría abierta o en tratamientos superficiales (p. 2).

### 1.3.4.3 Propiedades.

Arenas (s.f) considera que las propiedades generales más comunes que presentan los polímeros son:

#### 1.3.4.3.1 *Peso específico.*

Los polímeros se caracterizan por presentar un peso específico bajo; los valores más reducidos son de  $0,02 \text{ g/cm}^3$  para el poliestireno expandido y  $0,04 \text{ g/cm}^3$  para la espuma de poliuretano. Por otro lado, los pesos específicos más altos, corresponden a los polímeros fluorados como el politetrafluoretileno o teflón de  $2,1 \text{ g/cm}^3$  (p. 288).

#### 1.3.4.3.2 *Propiedades mecánicas.*

El comportamiento de los polímeros a temperatura ambiente puede ser desde quebradizo, hasta flexible y elástico. Entre los más rígidos se sitúan: el policloruro de vinilo, el poliestireno, el polimetacrilato de metilo, etc.; mientras que entre los más flexibles y elásticos, se encuentran los cauchos, PVC plastificados, etc. La mayoría de los polímeros tienen un comportamiento viscoelástico, haciendo que sus propiedades mecánicas sean dependientes del tiempo de duración de la carga (p. 288).

#### 1.3.4.3.3 *Influencia de la temperatura.*

La variación de la temperatura genera cambios en las propiedades de los polímeros, lo cual limita su uso. Cuando esta se incrementa, genera un descenso acelerado en su resistencia mecánica; mientras que si disminuye, los vuelve más frágiles y quebradizos, lo que indica una menor resistencia a la tracción o al impacto.

En los polímeros termoestables, las propiedades mecánicas se conservan en un mayor rango de temperatura; sin embargo, en los elastómeros cuando la temperatura disminuye, su rigidez aumenta hasta perder su capacidad de deformación y tornarse frágiles (p. 289).

#### **1.3.4.3.4 Durabilidad.**

Es la capacidad que tienen los materiales para conservar sus propiedades originales a través del tiempo. Usualmente, las alteraciones que se presentan son causadas por fatiga o por envejecimiento; es decir, factores como: humedad, oxígeno, radiación solar, agentes químicos, entre otros (p. 289).

#### **1.3.5 Polímero SBS (Styrene – Butadiene – Styrene)**

Infante y Vásquez (2016) lo definen como un elastómero termoplástico sintético producto de la polimerización de estireno y butadieno. Consta de 3 segmentos; el primero es una cadena de poliestireno, la central es de polibutadieno y finalmente, una larga sección de poliestireno.

El autor también afirma que el SBS ofrece un excelente coeficiente de fricción superficial, poca deformación permanente, gran resistencia a la tracción, excelentes propiedades eléctricas, buen comportamiento a bajas temperaturas, etc. En cuanto a su aplicación, puede utilizarse en el proceso de fusión en caliente como material de sellado y adhesivo, también en la modificación de polímeros y asfalto, fabricación de calzado, componentes de automóviles, etc. (pp. 62 – 64).

### **1.4 Justificación**

#### **1.4.1 Justificación general**

Con la ejecución de este estudio se obtienen una base de datos confiables y una serie de aportes fundamentados, referentes a la variación del punto de ablandamiento y el grado de penetración; así como, su impacto en el asfalto modificado con polímeros SBS, utilizado en la construcción de pavimentos flexibles. Con esto se logrará identificar las ventajas y la influencia del uso de los polímeros en dichas obras civiles, con el fin de dar solución al déficit presentado en las vías de tránsito actualmente.

Es así que, teniendo una revisión documental de investigaciones realizadas a nivel mundial, como la presente, los profesionales interesados en la especialidad de carreteras gozarán de una fuente rica en información organizada y clasificada, que servirá como base para la aplicación de futuros estudios referentes a diseños de mezclas asfálticas o, para comprender de forma más clara y concisa, la relación que existe entre las variables estudiadas (punto de ablandamiento y grado de penetración) y, las demás propiedades del asfalto. Todo esto con el objetivo de comprender el comportamiento de las propiedades y proponer el uso de un asfalto de mejor calidad para la construcción de pavimentos con mayor tiempo de vida útil que contribuyan al desarrollo económico.

#### ***1.4.2 Justificación teórica***

Considerando que este análisis documental ha sido realizado en diversos estudios con distinto proceder geográfico, claramente podrían existir diferencias entre los resultados obtenidos, debido a las distintas condiciones a las que el asfalto se puede ver expuesto durante el ensayo, además de la incompatibilidad asfalto – polímero, el clima, entre otros. Es por esto que se presenta un análisis de los resultados y un contraste teórico entre los mismos.

#### ***1.4.3 Justificación práctica***

Teniendo en cuenta los objetivos del estudio y con el respaldo de diversas investigaciones a nivel mundial, los resultados permiten reforzar una concreta alternativa de solución para los problemas de escasez de pavimentos duraderos y materiales adecuados para su construcción. Adicionalmente, se tiene la posibilidad de mostrar las ventajas que traería el empleo de asfalto modificado con polímero SBS, para la construcción de pavimentos flexibles en nuestro país.



#### **1.4.4 Justificación metodológica**

Para cumplir con los objetivos trazados en el presente estudio, se optó por hacer uso de la técnica de investigación llamada revisión documental, debido a que se trata de una investigación de tipo no experimental descriptiva. Los instrumentos utilizados para la recolección de información fueron la matriz de datos y la ficha resumen, con esto se logró conocer el comportamiento e impacto generado por la variación del punto de ablandamiento y grado de penetración en el asfalto modificado con polímero SBS, en el mundo. Por lo que los resultados obtenidos del estudio se apoyan en técnicas de investigación válidas y confiables.

#### **1.5 Formulación del problema**

¿Cuál es el análisis del punto de ablandamiento y el grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS para pavimentos flexibles en el Mundo 2021?

#### **1.6 Objetivos**

##### **1.6.1 Objetivo general**

Analizar el punto de ablandamiento y el grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS para pavimentos flexibles en el Mundo, 2021.

##### **1.6.2 Objetivos específicos**

OE1. Analizar el comportamiento del punto de ablandamiento del asfalto modificado con polímero SBS para pavimentos flexibles en el Mundo, 2021.

OE2. Describir el impacto causado por la variación del punto de ablandamiento en el asfalto modificado con SBS para pavimentos flexibles en el Mundo, 2021.

OE3. Analizar el comportamiento del grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS para pavimentos flexibles en el Mundo, 2021.

OE4. Describir el impacto causado por la variación del grado de penetración en el asfalto modificado con SBS para pavimentos flexibles en el Mundo, 2021.

## 1.7 Hipótesis

El análisis del punto de ablandamiento y el grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS, permite conocer y comprender el comportamiento de las propiedades mencionadas; así como, describir el impacto que se tendría sobre un pavimento flexible y comprobar si esta nueva tecnología soluciona la problemática existente en el Mundo, 2021.

## **CAPITULO II: METODOLOGÍA**

### **2.1 Enfoque de la investigación**

El enfoque del presente estudio es cuantitativo, debido a que las variables son medibles en las unidades indicadas en los estudios citados y analizados; además, se utilizó el método inductivo porque se analizaron distintas investigaciones a nivel mundial y casos particulares, para finalmente obtener conclusiones generales.

### **2.2 Tipo de Investigación**

#### ***2.2.1 Por el propósito***

La presente investigación, según su propósito, es de tipo aplicada o también denominada práctica; debido a que está basada fundamentalmente en hallazgos e ideas plasmadas en estudios básicos o estudios anteriormente realizados; de los cuales, se extrae información importante para ser analizada y aplicada en el presente trabajo.

#### ***2.2.2 Según el diseño de investigación***

El presente estudio, según su diseño, es de tipo no experimental; debido a que se seleccionaron estudios a nivel mundial provenientes de bases de datos confiables, de las cuales se extrajeron los aportes y valores para su posterior análisis; es decir, no se manipularon las variables independientes buscando que modifiquen el comportamiento de variables dependientes, sino que se estudiaron los valores obtenidos de las investigaciones citadas. Así mismo, se trata de una investigación descriptiva, debido a que solo se limita a describir y citar valores y aportes de otras investigaciones.

#### ***2.2.3 Según el nivel de investigación***

El presente trabajo, según el nivel de investigación, es de tipo descriptiva, porque se limitará a medir la presencia, características o distribución de un fenómeno en la población de

estudio; es decir, se definen las variables de esta investigación considerando sus características y componentes, a fin de comprender el enfoque y los resultados obtenidos.

### 2.3 Diseño de investigación

El diseño de investigación es no experimental, porque se extrae y se analiza información de un conjunto de estudios ya realizados; es decir, no se manipulan las variables de manera deliberada. Así mismo, es un estudio de diseño transversal descriptivo; transversal porque la recopilación de datos se llevó a cabo en un determinado periodo de tiempo, sobre una población definida y; es descriptivo, debido a que el foco de estudio es describir características, propiedades y comportamiento de las variables de esta investigación, basándose en datos de la realidad.

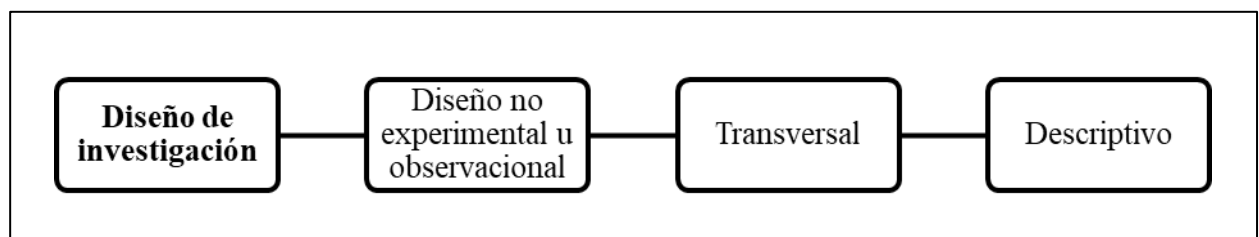
**Tabla 3.**

*Esquema de diseño no experimental*

Muestra	T1
<b>50 estudios sobre las propiedades del asfalto modificado con SBS en el mundo.</b>	O.1 Punto de ablandamiento O.2 Grado de penetración

**Figura 30.**

*Ruta de diseño de investigación*



## 2.4 Variables

### 2.4.1 Definición de variables

#### 2.4.1.1 Punto de ablandamiento.

Bastidas y Rondón (2020) definen al punto de ablandamiento como la medida de la temperatura a la que el material bituminoso experimenta un estado de fluidez; de igual forma, la ASTM (2020) en su normativa D36 refuerza el concepto, sosteniendo que se trata de un indicativo de temperatura, en la que el material cambia su estado y altera sus propiedades y; concluye que, a mayor valor de punto de ablandamiento, el asfalto presenta un mejor comportamiento frente a altas temperaturas.

#### 2.4.1.2 Grado de penetración.

La ASTM (2020) en su publicación D5, indica que la penetración es la medida de consistencia de un material bituminoso, expresada en la distancia en décimas de milímetro, a la que una aguja estándar penetra verticalmente una muestra de material en condiciones conocidas de carga, tiempo y temperatura; así pues, las cifras más altas de penetración evidencian una consistencia más suave. Además, estos valores siguen formando parte de una de las principales metodologías para la clasificación de asfaltos.

### 2.4.2 Clasificación de variables

**Tabla 4.**

*Matriz de clasificación de variables*

CLASIFICACIÓN					
Variables	Relación	Naturaleza	Escala de medición	Dimensión	Forma de medición
<b>Punto de ablandamiento</b>	Independiente	Cuantitativa Continua.	Razón	Multidimensional	Indirecta
<b>Grado de penetración</b>	Independiente	Cuantitativa Continua.	Razón	Multidimensional	Indirecta

### 2.4.3 Matriz de operacionalización de variables

Tabla 5.

Matriz de operacionalización de variables

TÍTULO: Análisis del punto de ablandamiento y el grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS para pavimentos flexibles, Mundo 2021.						
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDICIÓN	INSTRUMENTO
<b>Punto de ablandamiento</b>	Es la medida de la temperatura a la que el material bituminoso experimenta un estado de fluidez (Bastidas y Rondón, 2020).	Se realizó la búsqueda de artículos en distintas revistas halladas en bases de datos como Redalyc y Google Académico, los cuales presentaron ensayos de punto de ablandamiento en su contenido. A continuación, se recolectó y clasificó esta información en tablas y gráficos para su posterior análisis.	Comportamiento del punto de ablandamiento.	Valores del ensayo de punto de ablandamiento obtenido de las investigaciones.	°C	Matriz de datos
			Impacto causado por la variación del punto de ablandamiento en el asfalto modificado con SBS.	Aportes teóricos obtenidos de las investigaciones.		Ficha Resumen

<b>Grado de penetración</b>	Consistencia de un material bituminoso, expresada como la distancia en décimas de milímetro, a la que una aguja estándar penetra verticalmente en una muestra del material en condiciones conocidas de carga, tiempo y temperatura (ASTM, 2020).	Se realizó la búsqueda de artículos en distintas revistas halladas en bases de datos como Redalyc y Google Académico, los cuales presentaron ensayos de grado de penetración en su contenido. A continuación, se recolectó y clasificó esta información en tablas y gráficos para su posterior análisis.	Comportamiento de la penetración.	Valores del ensayo del grado de penetración obtenido de las investigaciones.	dmm	Matriz de datos
			Impacto causado por la variación del grado de penetración en el asfalto modificado con SBS.	Aportes teóricos obtenidos de las investigaciones.		Ficha resumen

*Nota:* En la presente tabla se muestra a las dos variables estudiadas, sus definiciones, dimensiones, indicadores, unidad de medida e instrumento con el que se van a extraer los aportes para su posterior análisis.

## **2.5 Población y muestra**

### **2.5.1 Población**

La población de estudio está conformada por todas las investigaciones relacionadas al asfalto modificado con polímero SBS para pavimentos flexibles en el mundo.

### **2.5.2 Muestra**

#### **2.5.2.1 Técnicas de muestreo.**

La muestra está determinada por la técnica de muestreo no probabilístico, porque los elementos fueron elegidos a juicio del investigador y no se ha hecho una selección al azar. Específicamente es una selección por juicio de experto, debido a que se seleccionaron estudios que cumplieran con los criterios de inclusión definidos; se consideraron tesis y artículos científicos a nivel mundial, provenientes de bases de datos confiables y publicados desde el año 2015 hasta el 2021. Además, en su contenido se debieron estudiar las variables, punto de ablandamiento y grado de penetración consideradas en el presente documento y, dar aportes numéricos o teóricos que permitan analizar su comportamiento en un asfalto modificado con polímero SBS.

#### **2.5.2.2 Tamaño de muestra.**

Para que la presente investigación tenga un grado de confiabilidad importante, se optó por recopilar todos los estudios que cumplan con los requisitos descritos en el ítem 2.8.1. Luego de este proceso de búsqueda se obtuvo una muestra de 50 estudios referente al asfalto modificado con polímero SBS para pavimentos flexibles, publicados desde el año 2015 hasta el 2021.



Tabla 6.

Muestra de la investigación

Código generado	Base de Datos	Autor	Título de la fuente	Año	Tipo	País de publicación
E01	NCBI	Hui Wei	Aging Mechanism and Properties of SBS Modified Bitumen under Complex Environmental Conditions	2019	Artículo científico	China
		Xianpinhg Bai				
		Guoping Qian				
		Feiyue Wang				
		Zhengfu Li				
		Jiao Jin				
		Yuhao Zhang				
E02	Google académico	Diones Henrique Araújo	Análise comparativa do asfalto borracha com o asfalto convencional e o asfalto com adição de polímeros	2015	Tesis	Brasil
E03	Researchgate	Peng Wang	Anti-ageing properties of styrene-butadiene-styrene copolymer-modified asphalt combined with multi-walled carbon nanotubes	2017	Artículo científico	China
		Ze-jiao Dong				
		Yi-qiu Tan				
		Zhi-yang Liu				
E04	Alicia	Valdivia Sánchez, Vitmer Lubel	Análisis del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente incorporando polímeros SBS en la Av. Universitaria cuadra 53 al 57- Comas, Lima 2017	2017	Tesis	Perú
E05	Google académico	Juceline Batista dos Santos Bastos	Avaliação do efeito de ligantes asfálticos modificados com SBS e com argilas organofílicas na resistência à deformação permanente	2015	Artículo Científico	Brasil
		Sergio Alexandre da Rocha Lima Filho				
		Jorge Barbosa Soares				
		Sandra de Aguiar Soares				
E06	Google académico	Laide Magalhães Rodrigues	Avaliação do ligante asfáltico modificado por polímero SBS e aditivo surfactante	2020	Tesis	Brasil
E07	Google académico	Filippo Meruse	A review of the fundamentals of polymer - modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility	2015	Artículo científico	Italia
		George Stastna				
		Giovanni Polacco				
		Sara Filippi				

<b>E08</b>	Google académico	López Pérez, Diana Puma Vásquez, Cristian	Caracterización de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y RET, mediante la determinación del módulo de rigidez.	2019	Tesis	Ecuador
<b>E09</b>	Google académico	Stalin Borja Torres Joffre Cárdenas Castillo	Caracterización de mezclas asfálticas en caliente, elaboradas con el uso de cemento asfáltico modificado con polímero SBR y SBS	2019	Tesis	Ecuador
<b>E10</b>	Google académico	Ana Carolina Ostrovski Andressa Raffler	Caracterização do ligante asfáltico de alto desempenho altamente modificado por polímeros (HiMA)	2018	Tesis	Brasil
<b>E11</b>	Google académico	Armando Aguilar Añazco Dennis Valdivieso Gaguancela	Comparación del Módulo de Rigidez por Tensión Indirecta utilizando el Método Marshall y Método Superpave de Mezclas Asfálticas con Polímeros SBS	2019	Tesis	Ecuador
<b>E12</b>	Proquest	Lucia Hrušková Michal Hornáček Pavol Daučík	Comparison of changes of basic parameters of asphalt caused by various additives	2016	Artículo científico	Eslovaquia
<b>E13</b>	Researchgate	Dharamveer Singh Aniket V. Kataware	Comparison of different rheological parameters for rutting susceptibility of SBS + WMA modified binders.	2016	Artículo científico	India
<b>E14</b>	Researchgate	U. Arun Kumar P.V.V Satyanarayana	Comparison of the Polyethylene and SBS Poly Modified Bitumen's Effect - A Case Study	2015	Artículo científico	India
<b>E15</b>	Proquest	Erkut Yalçın M. Ertuğrul Çeloğlu Mustafa Akpolat Özge Erdoğan Yamaç Taner Alataş Baha Vural Kök Mehmet Yılmaz	Effect of Gilsonite Use on Storage Stability of Styrene-butadiene-styrene Modified Bitumen	2019	Artículo científico	Turquía
<b>E16</b>	Science Direct	Aravind Krishna Swamy Uma Devi Rongali Pramod Kumar Jain	Effect of HDPEH polymer on viscoelastic properties of SBS modified asphalt	2017	Artículo científico	India
<b>E17</b>	Proquest	Bagdat B. Teltayev Cesare O. Rossi	Effect of Freeze-Thaw Cycles on Mechanical	2019	Artículo científico	Kazakhstan

		Galiya G. Izmailova Erik D. Amirbayev	Characteristics of Bitumens and Stone Mastic Asphalts			
E18	Google Académico	Victor Estrada Escalante	Estudio y análisis de desempeño de mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 Plus y mezcla asfáltica modificada con polímero tipo SBS PG 70 -28	2017	Tesis	Perú
E19	Google académico	Heloise Sasso Teixeira	Estudo e caracterização de pavimentação asfáltica modificada empregando os polímeros elastoméricos látex de borracha natural (nrl) e estireno-butadieno-estireno (SBS) em sua composição	2018	Tesis	Brasil
E20	Google académico	Rosana Marcozzi Claudio Veloso Jorge Coacci	Evaluación reológica de asfaltos modificados con polímeros	2016	Artículo Científico	Argentina
E21	Researchgate	L. Medina M. Muniz de Farias C. Recarey	Evaluación reológica y mecánica de un aglutinante asfáltico modificado por polímeros	2020	Artículo Científico	Brasil
E22	Google académico	Aurelio Zambrano Bustamante	Evaluación del comportamiento del asfalto modificado con polímeros utilizados en la vía asfaltada Macusani - Ollachea KM 182+250 al KM 188+300	2018	Tesis	Perú
E23	Proquest	Xiaobing Chen Juntian Wang Xiaorui Zhang Han Liu, Jinhu Tong Ronglong Zhao	Evaluating the Physical and Rheological Properties of Rejuvenated Styrene-Butadiene-Styrene-Modified Asphalt Binders	2020	Artículo científico	China
E24	MDPI	Hamad Abdullah Ali Mohammed Zubair Ahmed Memon Abdulrahman Saleh Abdalahman Milad	Evaluation and Comparison of Mechanical Properties of Polymer-Modified Asphalt Mixtures	2021	Artículo científico	Arabia Saudita
E25	MDPI	Bei Chen Fuqiang Dong Xin yu Changjiang Zheng	Evaluation of Properties and Micro-Characteristics of Waste Polyurethane/Styrene-Butadiene-Styrene Composite	2021	Artículo científico	China

Modified Asphalt						
<b>E26</b>	Science Direct	Shisong Ren Xueyan Liu Haopeng Wang Weiyu Fan Sandra Erkens	Evaluation of rheological behaviors and anti-aging properties of recycled asphalts using low-viscosity asphalt and polymers	2020	Artículo científico	China
<b>E27</b>	Proquest	Gabriela Ceccon Carlesso Glicério Trichês João Victor Staub de Melo Matheus Felipe Marcon Liseane Padilha Thives Lídia Carolina da Luz	Evaluation of Rheological Behavior, Resistance to Permanent Deformation, and Resistance to Fatigue of Asphalt Mixtures Modified with Nanoclay and SBS Polymer	2019	Artículo científico	Brasil
<b>E28</b>	Science Direct	Mahmoud Ameri Reza Mohammadi Mostafa Vamegh Mohammad Molayem	Evaluation the effects of nanoclay on permanent deformation behavior of stone mastic asphalt mixtures	2017	Artículo científico	Irán
<b>E29</b>	Ebscohost	Jiqing Zhu Xiaohu Lu Niki Kringos	Experimental investigation on storage stability and phase separation behaviour of polymer-modified bitumen	2016	Artículo Científico	Suecia
<b>E30</b>	Proquest	M. Tiğdemir S.F.Kalyonuoğlu	Fatigue life prediction of the modified asphalt mixtures with ANFIS modeling	2017	Artículo científico	Turquía
<b>E31</b>	Science Direct	Feipeng Xiao Denghui Ma Jiayu Wang Degou Cai Liangwei Lou Jie Yuan	Impacts of high modulus agent and anti-rutting agent on performances of airfield asphalt pavement	2019	Artículo científico	China
<b>E32</b>	Science Direct	Dongmei Zhang Henglong Zhang Caijun Shi	Investigation of aging performance of SBS modified asphalt with various aging methods	2017	Artículo científico	China
<b>E33</b>	Proquest	Jie Wang Yongchun Qin Songchang Huang Jian Xu	Laboratory Evaluation of Aging Behaviour of SBS Modified Asphalt	2017	Artículo científico	China
<b>E34</b>	Proquest	Xinquan Xu Guilin Lu Jun Yang Xinhai Liu	Mechanism and Rheological Properties of High-Modulus Asphalt	2020	Artículo científico	China
<b>E35</b>	Google Académico	Kenyi Acosta Mestre	Modificación de la mezcla asfáltica mediante la incorporación de	2019	Tesis	Perú

			polímeros SBS en la Av. Canta Callao, entre la Av. Naranjal y la Av. Alisos			
<b>E36</b>	Science Direct	Ali Behnood Mahsa Modiri	Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders	2019	Artículo Científico	EE.UU.
<b>E37</b>	Science Direct	Behnam Golestani Boo Hyun Nam Fereidoon Moghadas Nejad Shahab Fallah	Nanoclay application to asphalt concrete: Characterization of polymer and linear nanocomposite-modified asphalt binder and mixture	2015	Artículo científico	EE.UU.
<b>E38</b>	Researchgate	Harpreet Singh Tanuj Chopra Sahil Kamotra Sambhav Jain Amandeep Kaur	Performance Evaluation of Bituminous Concrete Mixes Modified with SBS Polymer and Warm mix Additive	2019	Artículo Científico	India
<b>E39</b>	Proquest	Chen Zhang Hainian Wang Zhanping You Junfeng Gao Muhammad Irfan	Performance Test on Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) Modified Asphalt Based on the Different Evaluation Methods	2019	Artículo Científico	EE.UU.
<b>E40</b>	Science Direct	Jing Li Fenglei Zhang Yu Liu Yaseen Muhammad Zhibin Su Fei Meng Xuya Chen	Preparation and properties of soybean bio-asphalt/SBS modified petroleum asphalt	2019	Artículo Científico	China
<b>E41</b>	Proquest	Jie Ji Hui Yao Di Wang Zhi Suo Luhou Liu Zhanping You	Properties of Direct Coal Liquefaction Residue Modified Asphalt Mixture	2017	Artículo Científico	China
<b>E42</b>	Google académico	Josué Velásquez Mayén	Rehabilitación de carreteras pavimentadas utilizando mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros	2016	Tesis	Guatemala
<b>E43</b>	Proquest	Sen Han Pei Sun Yamin Liu Wei Li	Revised Penetration Method Based on Evaluate High Temperature Property of SBS Modified Asphalt	2017	Artículo Científico	China
<b>E44</b>	Proquest	Zhen Lu		2020		China

		Aimin Sha Wentong Wang Junfeng Gao	Studying the Properties of SBS/Rice Husk Ash-Modified Asphalt Binder and Mixture		Artículo Científico	
E45	Science Direct	Yourong Tan Haiyan Zhang Dongwei Cao Lei Xia Rongjie Du Zhaoqiang Shi Rui Dong Xianhe Wang	Study on cohesion and adhesion of high-viscosity modified	2019	Artículo Científico	China
E46	MDPI	Sylwia Dziadosz Mieczyslaw Slowik Filip Niwczyk Marcin Bilski	Study on Styrene-Butadiene-Styrene Modified Asphalt Binders Relaxation at Low Temperature	2021	Artículo Científico	Poland
E47	Google académico	Matheus David I. Domingos Adalberto Leandro Faxina	Suscetibilidade de ligantes asfálticos modificados com sbs e ppa à deformação permanente: uma avaliação à luz da evolução dos parâmetros da especificação superpave	2019	Artículo Científico	Brasil
E48	Researchgate	Rui He Shuhua Wu Xiaofeng Wang Zhenjun Wang Huaxin Chen	Temperature Sensitivity Characteristics of SBS/CRP-Modified Bitumen after Different Aging Processes	2018	Artículo Científico	China
E49	Ebscohost	Fernando Moreno Navarro Maria Carmen Rubio Gámez Ana Jiménez del Barco Carrión	Tire crumb rubber effect on hot bituminous mixtures fatigue-cracking behaviour	2016	Artículo científico	España
E50	Google académico	Feipeng Xiao Naipeng Tang Peng Lin Weidong Huang Yi Li	Understanding the low temperature properties of Terminal Blend hybrid asphalt through chemical and thermal analysis methods	2018	Artículo Científico	China

**Nota:** En la presente tabla se muestra información relacionada a la autoría, fecha y lugar de publicación de los estudios citados que conforman la muestra para la presente investigación.

### **2.5.3 Materiales**

#### **2.5.3.1 Laptop.**

Esta herramienta básica fue fundamental para realizar los procesos de búsqueda de información, recolección y análisis de datos; para luego, mediante softwares, plasmar los resultados a fin de cumplir los objetivos trazados.

#### **2.5.3.2 Internet.**

Es una red informática que fue utilizada como herramienta para ejecutar el proceso de búsqueda de información y tener una buena base, para realizar correctamente los procedimientos de investigación posteriores.

#### **2.5.3.3 Impresora.**

Este equipo permitió plasmar la información en físico, para facilitar su lectura y comprensión.

#### **2.5.3.4 Libreta de apuntes.**

Se utilizó una libreta de apuntes para anotar toda la información puntual y relevante, que permitió comprender algunos conceptos relacionados al estudio.

#### **2.5.3.5 Materiales de escritorio.**

Comprenden materiales como lapiceros, resaltadores, papeles, entre otros; que fueron utilizados para ejecutar el proceso de lectura en documentos impresos, remarcar ideas principales y anotarlas en la libreta de apuntes.

## **2.6 Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos**

### **2.6.1 Técnica de recolección de datos**

La técnica utilizada es la revisión documental, debido a que la investigación es no experimental, descriptiva y se apoyará en fuentes de carácter documental. El análisis

documentario es indispensable a fin de extraer, clasificar, ordenar y analizar la información encontrada referente al tema investigado.

### **2.6.2 Instrumento de recolección de datos**

Como instrumentos se utilizaron estudios retrospectivos, que permitieron extraer y ordenar la información de las fuentes citadas, para de esta manera realizar la presente investigación; se utilizó una matriz de datos (ver anexo n.º 1) y una matriz de ficha resumen (ver anexo n.º 2).

### **2.6.3 Validación del instrumento de recolección datos**

Los instrumentos utilizados fueron validados por el MSc. Ing. Ricardo Daniel Avalos Alayo, quien cuenta con experiencia en:

- Gerencia General de la Constructora Avalos G SAC
- Gerencia Comercial/Contractual en la Central Hidroeléctrica Hidromanta
- Gerente General en Building Business SAC
- Responsable Comercial en el Consorcio Vial Arenal – Punta de Bombón
- Responsable Comercial en el Consorcio Vías de Cusco
- Responsable Comercial en el Proyecto Central Hidroeléctrica Manduriacu
- Responsable Comercial y planeamiento en Carretera Huambo – Malanje
- Responsabilidad Comercial y planeamiento de Línea de Transmisión 400Kv y 220Kv

Debido a la experiencia que posee el Ingeniero, en distintos proyectos de ejecución, especialmente en lo relacionado a pavimentación con asfaltos, se le consultó la validación de los instrumentos de recolección de datos utilizados en el presente estudio. Estas herramientas se adjuntan en el anexo n.º 1 y anexo n.º 2; y la matriz para evaluación de expertos, en el anexo n.º 3.



## 2.6.4 Análisis de datos

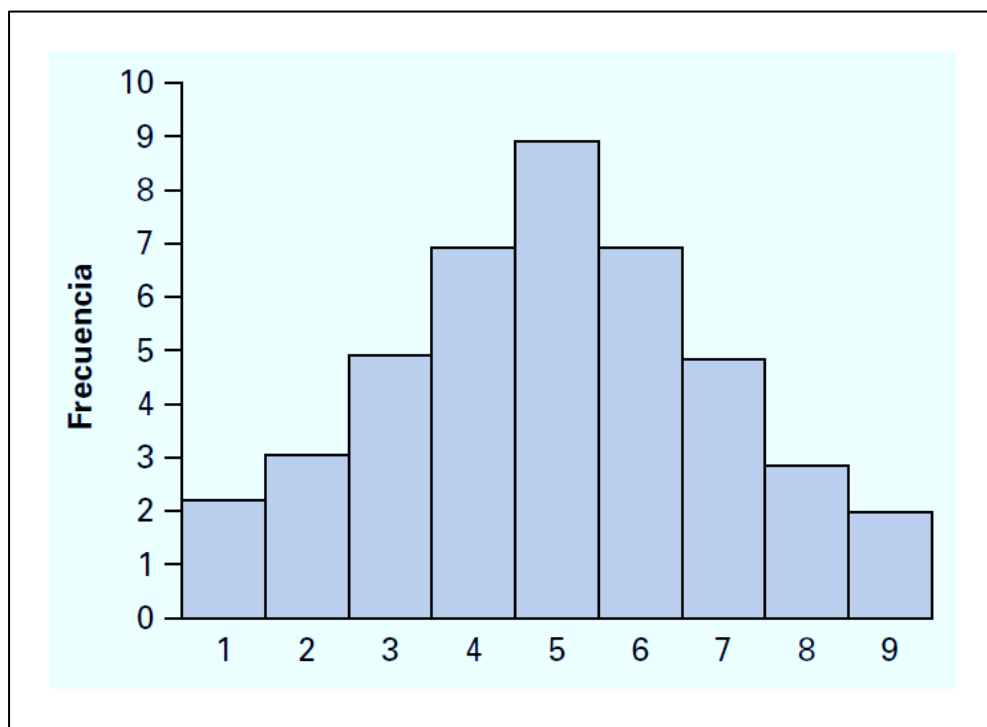
### 2.6.4.1 Técnicas de Análisis de Datos.

La presente investigación es de diseño no experimental y transversal, debido a que se realizó el estudio en un solo periodo de tiempo; por lo tanto, se utilizó el método de estadística descriptiva, cuyos instrumentos a aplicar son medidas estadísticas, histogramas y diagramas de dispersión.

#### 2.6.4.1.1 Histograma.

**Figura 31.**

*Histograma de frecuencia*



*Nota:* Esta figura muestra un ejemplo de histograma de frecuencia. Tomado de *Histograma de frecuencias – la guía completa*, de Méndez A., 2022, (<https://www.plandemejora.com/histograma-de-frecuencias/>)

Izar y Gonzales (2004) definen al histograma como una herramienta empleada para encontrar la tendencia que experimentan una serie de datos extraídos en un periodo de tiempo

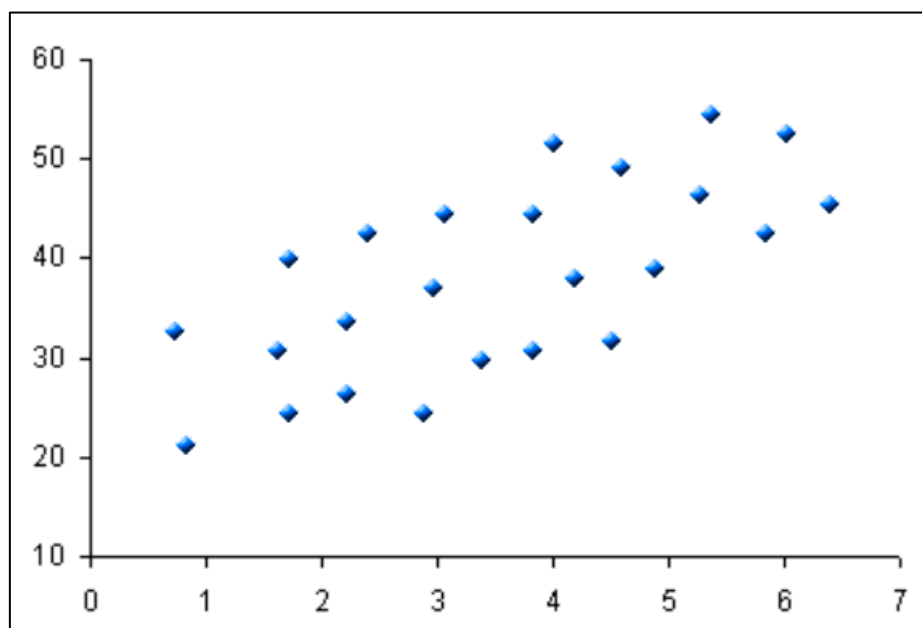
determinado. Estos datos son representados en forma gráfica y se hace más simple identificar si siguen algún patrón o se comportan conforme a una distribución probabilística; lo cual no es tan simple de demostrar en una tabla de datos (p. 23).

#### 2.6.4.1.2 *Diagrama de dispersión.*

Según Domenech (s.f), un diagrama de dispersión permite identificar la relación existente entre dos clases de datos, magnitudes o parámetros de un problema y cuantificar la intensidad y tipo de dicha relación (p. 2).

**Figura 32.**

*Diagrama de dispersión*

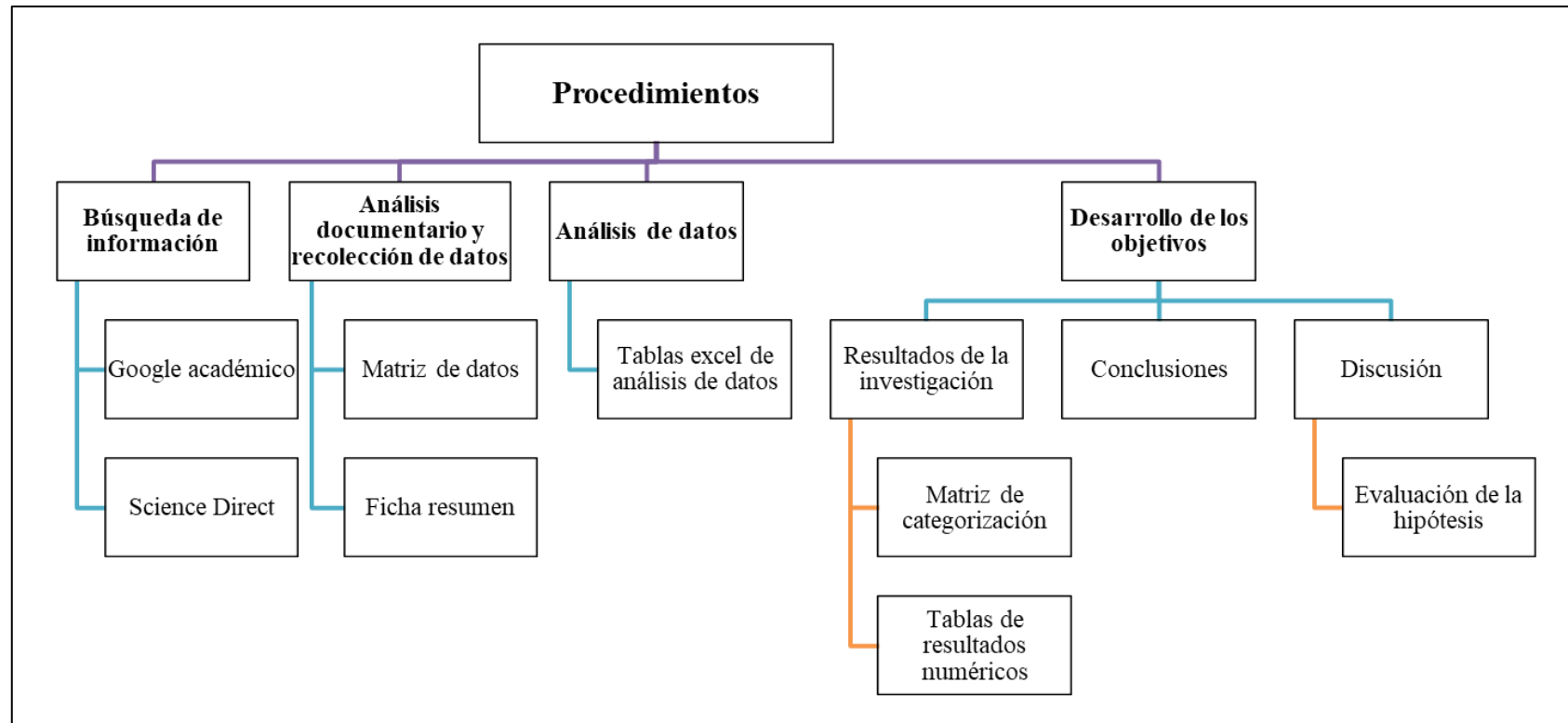


**Nota:** Esta figura muestra un ejemplo de diagrama de dispersión. Tomado de *Diagrama de dispersión*, de Gehisy, 2017, (<https://aprendiendocalidadyadr.com/diagrama-de-dispersion/>)

## 2.7 Procedimientos

Figura 33.

*Etapas de la investigación*



**Nota:** En el organizador visual se muestra de manera general el procedimiento a seguir para llevar a cabo el presente trabajo de investigación.

### **2.7.1 Búsqueda de información**

Según la Universidad de Alicante (s.f), la búsqueda de información científica es un proceso de carácter global, en el que intervienen una serie de factores relacionados entre sí; además, debe ser precisa y eficaz para obtener resultados que se adecuen a las necesidades de información. La finalidad de la búsqueda y el tema que se quiere estudiar, definen el tipo de fuente a consultar (estadísticas, libros, artículos de revistas, tesis, etc.); a continuación, se muestran las etapas del proceso de búsqueda.

#### **2.7.1.1 Análisis y definición de la necesidad de información.**

Se deben definir los objetivos y la finalidad de la búsqueda, encuadrar el tema en un ámbito científico concreto y delimitar el punto de vista desde donde se enfocará el tema de investigación: general, sociológico, estadístico, metodológico, económico, educativo, etc.

#### **2.7.1.2 Nivel y cobertura de la búsqueda.**

Se debe establecer el periodo temporal que cubrirá la búsqueda (intervalo de tiempo en el que debe estar el año de publicación), además de delimitar la cobertura geográfica; es decir, el contexto geográfico en el que se centra la investigación y, definir la tipología documental que se manejará. Esto se realiza para obtener citas de estudios actualizados y confiables.

#### **2.7.1.3 Selección de las fuentes de información.**

Es una de las fases más importantes, ya que garantiza la recuperación de la información más adecuada para el estudio realizado. Las fuentes varían de acuerdo con la disciplina o el ámbito de estudio y; actualmente existen bases de datos en las que se publican estudios confiables, que cumplen con requisitos fundamentales y de autores con experiencia, especializados en los temas a tratar.

#### **2.7.1.4 Elaboración de la estrategia de búsqueda.**

Primero se debe definir una frase que contenga lo que se quiere buscar, luego se identifican conceptos e ideas principales y se eligen los conceptos que mejor representen lo que se quiere buscar, seguidamente se deben generar términos alternativos y ejecutar la búsqueda, para finalmente evaluar los resultados.

#### **2.7.1.5 Valoración de los resultados.**

Se deben analizar los resultados obtenidos, para definir si se adecuan a las necesidades de información requeridas en la investigación; esto implica, identificar si los resultados obtenidos de los estudios citados tienen relación con el estudio que se está realizando y si servirán como aporte para el logro de los objetivos planteados.

#### **2.7.1.6 Gestión de la información recuperada.**

Es de vital importancia guardar las referencias de los documentos citados, para que posteriormente puedan ser revisados de forma minuciosa; esto con el fin de verificar información importante, constatar si la estructura del estudio citado es la requerida o, citar y referenciar aportes necesarios para el estudio nuevo a realizar.

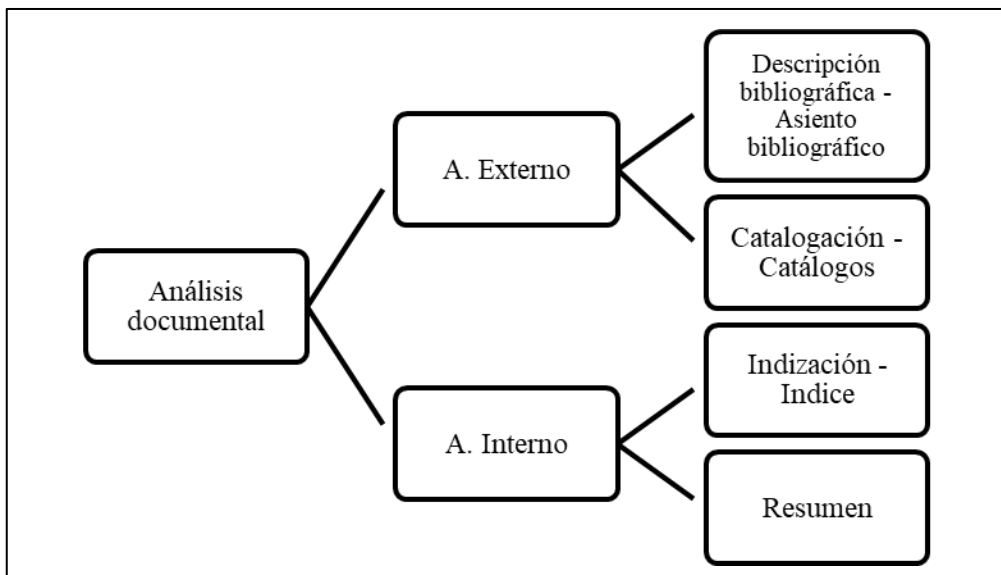
### **2.7.2 *Análisis documentario y recolección de datos***

#### **2.7.2.1 Análisis documentario.**

Castillo (2005) define al análisis documentario como una de las operaciones esenciales de la cadena documental; es un conjunto de técnicas encaminadas a representar el contenido de una investigación de una manera distinta a la original, con el objetivo de facilitar su posterior recuperación. Es una operación intelectual, que consiste en la realización de un proceso de interpretación y análisis de la información, para luego ser sintetizada y dar lugar a un subproducto o documento secundario, que sirve como herramienta de búsqueda o intermediario, entre la publicación original y la persona que solicita la información (p. 1).

**Figura 34.**

*Fases del análisis documental*



**Nota:** Esta figura muestran las fases del análisis documental. Adaptado de “Análisis documental: el análisis formal” (p. 14), por A. Clausó, 1993, *Revista General de Información y Documentación*, 3(1), 11 – 19. <https://revistas.ucm.es/index.php/RGID/article/view/RGID9393120011A/11739>

### 2.7.2.2 Recolección de datos.

La Universidad Privada del Norte (UPN, 2016) argumenta que, la recolección de datos es el proceso de aplicación de diversas técnicas para la obtención de información. Esta metodología comprende el dominio de las herramientas de fichaje o recopilación de información teórica y empírica, la observación sistemática, la destreza para elaborar y realizar entrevistas, encuestas, focus group, etc. y; la elaboración de documentos de registro de información. Para ejecutar un correcto proceso de recolección se deben seguir los siguientes pasos:

- Seleccionar el método de recolección de información o instrumento (válido y fiable).
- Aplicar el método o instrumento para la recolección de datos.
- Preparar las observaciones, registros y mediciones obtenidas para su posterior análisis.

### **2.7.3 *Análisis de datos***

Albert (2007) sostiene que el análisis de datos es una de las tareas más atractivas del proceso de investigación, debido a que la información recolectada por el investigador no es suficiente para cumplir con los objetivos trazados en el estudio; por lo que, el estudiador se encuentra con el reto de hallar el significado a todo el conjunto de materiales informativos que provienen de los estudios originales.

Así mismo, explica que el análisis de datos es un conjunto de manipulaciones, transformaciones, operaciones, reflexiones y demostraciones; que se realizan sobre los datos obtenidos del estudio, a fin de extraerles un significado que sea importante para colaborar con la solución de un problema de investigación.

En la investigación cualitativa, se debe revisar el material recopilado, el cual debe ser de buena calidad y encontrarse en un formato que permita organizarlo de manera simple. Luego, se debe establecer un plan de trabajo para la obtención de datos confiables; posteriormente, es necesario implementar un sistema de codificación de los datos y definir el método de análisis a seguir o los programas e instrumentos a utilizar; en seguida, se debe simplificar, resumir y seleccionar la información, para hacerla abarcable y manejable; a continuación, se interpretan los datos, intentando dar sentido a las descripciones de cada categoría y ubicándola en el fenómeno estudiado. Finalmente se obtienen los resultados y las conclusiones y, se aseguran la validez de estos.

### **2.7.4 *Desarrollo de objetivos***

#### **2.7.4.1 Resultados de la investigación.**

La UPN (2016) manifiesta que esta sección, contiene los resultados de la medición de los indicadores que corresponden a la variable dependiente, bajo los efectos de la variable independiente. Si el producto de especialidad no se pudiera aplicar de manera real para medir

algunos indicadores, es válido realizar la medición a través de una simulación o proyección estadística del mismo. Los resultados concluyen con la prueba de hipótesis.

#### **2.7.4.2 Conclusiones.**

Según la UPN (2016), las conclusiones deben responder a los objetivos, la primera responderá si se cumplió o no el objetivo general y especificar evidencias de ello y, las demás conclusiones deben responder a los objetivos específicos en el orden en que fueron planteados. El número de conclusiones no necesariamente coincide con el número de objetivos específicos planteados, pudiendo ser más.

#### **2.7.4.3 Discusión.**

Así mismo, la UPN (2016) se refiere a la sección de discusión, como un texto argumentativo con el que el autor valida o demuestra su hipótesis, a través de inferencias de los resultados obtenidos en la medición de indicadores y la prueba de hipótesis. Puede, en caso de ser una investigación experimental, mencionar las características del producto-solución que permitieron alcanzar los resultados.

#### **2.7.5 Aspectos éticos**

El presente estudio fue elaborado siguiendo los procedimientos descritos anteriormente. Además, todos los aportes utilizados para la definición de conceptos fundamentales, así como la información sobre la que se sostienen los resultados y el logro de los objetivos, son auténticos y fueron correctamente citados y referenciados; ya que todo ser humano debe tener valores morales, forjados de manera sólida y clara, que guíen el correcto comportamiento en su desempeño personal y profesional, e incentiven a reconocer la importancia de otros autores en sus investigaciones. Es por ello que esta investigación, al ser sometida a programas antiplagio, tuvo un porcentaje de 18 % de similitud con otras fuentes.



## 2.8 Desarrollo de tesis

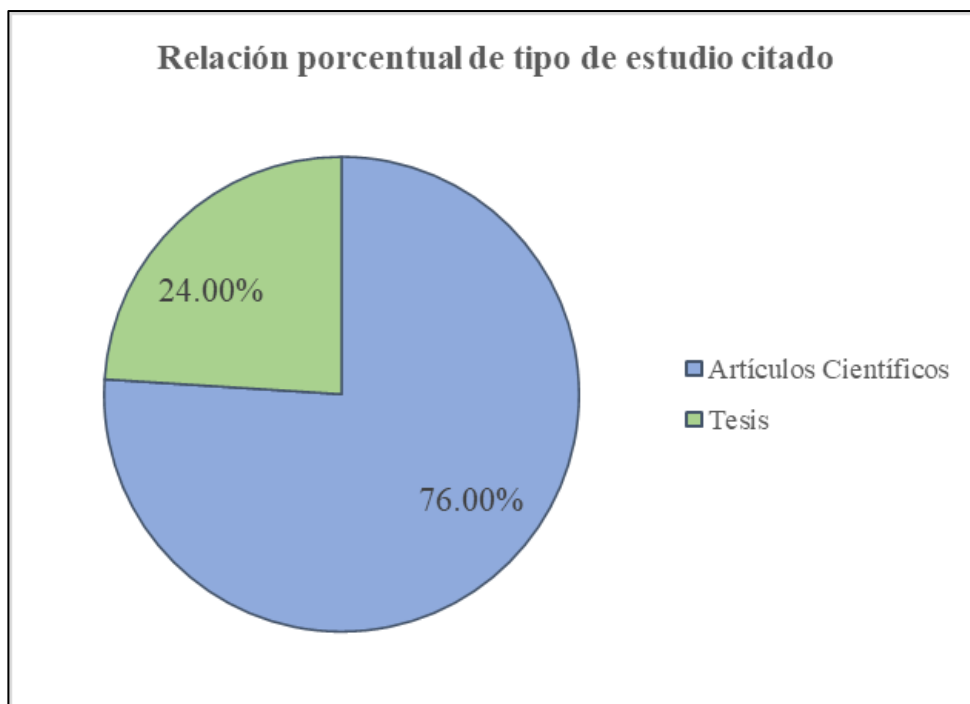
A continuación, se detallan los procedimientos realizados para la búsqueda, recolección, selección, extracción, síntesis, análisis y categorización de la información que se ha utilizado en esta investigación.

### 2.8.1 *Búsqueda de información*

Se dio inicio al estudio, con la compilación de artículos científicos, revistas y tesis realizadas a nivel mundial, que respondían a la pregunta de investigación formulada y donde se analizaban una o ambas variables de estudio (grado de penetración y punto de ablandamiento), brindando aportes numéricos o teóricos que permitieron analizar su comportamiento en un asfalto modificado con polímeros SBS. Además, estos estudios debieron tener una estructura clara, provenir de bases de datos confiables y encontrarse dentro de un periodo de publicación desde el año 2015 hasta el 2021. Al finalizar esta etapa, se obtuvo una muestra de 50 estudios que cumplieron los requisitos mencionados y, provenientes de bases de datos como: NCBI, Researchgate, Alicia, Proquest, Google Académico, Science Direct, entre otros; de los cuales, el 24 % fueron tesis y el 76 % artículos científicos.

**Figura 35.**

*Relación porcentual de tipos de estudio citados*



*Nota:* En el organizador visual se muestra la comparación porcentual de los tipos de estudios citados que conformaron la muestra para la presente investigación.

### **2.8.2 Análisis documentario y recolección de datos**

Luego de culminar el proceso de búsqueda de información, en donde se obtuvo una muestra de 50 fuentes, que fueron las que cumplieron con los requisitos establecidos en el ítem 2.8.1, se procedió a dar una lectura de forma más detallada y se identificó el tipo de aporte que cada una ofreció a la presente investigación, pudiendo ser teórico, práctico o ambos; posteriormente se ordenó, se sintetizó y se plasmó la información en las matrices (herramientas de recolección), permitiendo así el análisis de los aportes hallados. Para poder ejecutar de manera correcta esta técnica, se utilizaron 2 instrumentos de recolección de datos.

La primera herramienta utilizada se denominó “matriz de datos” (ubicada en el anexo n.º 1), la cual permitió registrar información como: dosificación del modificador, tipo de asfalto base y polímero SBS empleados; además de los resultados de los ensayos de punto de ablandamiento y grado de penetración, obtenidos por los autores referenciados.

El segundo instrumento aplicado es conocido como “ficha resumen” (mostrada en el anexo n.º 2), mediante la cual se elaboró un resumen de cada uno de los documentos, considerando sus objetivos, metodología, resultados, conclusiones y discusión; que permitió posteriormente, adquirir aportes teóricos fundamentales, para sintetizar ideas que faciliten el logro de los objetivos planteados.

Ambos instrumentos de recolección de datos fueron revisados y aprobados por un experto. El MSc. Ing. Ricardo Daniel Avalos Alayo, profesional experimentado en la ejecución de distintos proyectos de construcción de pavimentos flexibles, indicó que las herramientas utilizadas fueron las correctas para elaborar el estudio. A continuación, se muestran los cuadros de aportes obtenidos de cada fuente, la matriz de datos y la ficha resumen, elaboradas a partir de los documentos referenciados para la presente.

**Tabla 7.**

*Tipo de aporte extraído de los estudios consultados*

Código de estudio	Tipo de Aporte	
	Teórico	Numérico
E01	X	
E02		X
E03		X
E04		X
E05	X	X
E06	X	X
E07	X	
E08	X	X
E09	X	X

<b>E10</b>	X	
<b>E11</b>	X	X
<b>E12</b>		X
<b>E13</b>	X	
<b>E14</b>		X
<b>E15</b>	X	
<b>E16</b>	X	X
<b>E17</b>		X
<b>E18</b>	X	
<b>E19</b>	X	X
<b>E20</b>		X
<b>E21</b>	X	
<b>E22</b>	X	X
<b>E23</b>	X	
<b>E24</b>		X
<b>E25</b>	X	X
<b>E26</b>	X	
<b>E27</b>	X	
<b>E28</b>	X	
<b>E29</b>	X	X
<b>E30</b>	X	
<b>E31</b>	X	
<b>E32</b>		X
<b>E33</b>	X	X
<b>E34</b>		X
<b>E35</b>	X	
<b>E36</b>	X	
<b>E37</b>		X
<b>E38</b>	X	X
<b>E39</b>		X
<b>E40</b>		X
<b>E41</b>		X
<b>E42</b>	X	
<b>E43</b>	X	
<b>E44</b>	X	X
<b>E45</b>		X
<b>E46</b>		X
<b>E47</b>	X	X
<b>E48</b>		X
<b>E49</b>		X
<b>E50</b>		X

**Nota:** En la presente tabla se muestran los tipos de aportes extraídos de cada una de las investigaciones citadas para la elaboración de la presente revisión.

Tabla 8.

Matriz de datos general

Código de estudio	Tipo de asfalto según el estudio	%SBS	Asfalto Base		Asfalto modificado	
			Pen. (dmm)	Abland. (°C)	Pen. (dmm)	Abland. (°C)
E02	CAP 50/70	4.00%	58.50		55.50	
E03	PG 64-22	4.30%	70.00	46.50	59.00	77.00
E04	PEN 60/70	4.00%	62.00		68.00	
E05	50/70	4.50%	59.00	50.00	39.00	59.50
E06	CAP 50/70	4.00%	50.50	50.00	39.50	57.00
E08	AC - 20	2.00%			55.00	63.00
		3.00%	65.00	49.00	44.00	72.00
		4.00%			42.00	79.00
E09	AC - 20	2.00%			60.00	63.10
		3.00%	67.00	49.00	53.00	65.65
		4.00%			42.00	69.90
E11	AC - 20	2.50%	81.00	50.00	55.00	65.00
E12		5.00%	104.00	44.00	73.00	54.50
E14	Grado 80/100	1.00%			81.60	58.00
		2.00%	93.30	44.20	78.30	61.00
		3.00%			69.10	65.00
E16	Viscosidad 30	6.00%		50.50		72.10
E17	130/200	5.00%	175.00	41.00	69.00	79.00
E19	CAP 50/70	2.00%			55.00	56.30
		4.00%	51.40	52.20	65.70	59.00
		6.00%			54.50	66.00
E20	70-100	1.00%			63.00	53.30
		2.00%	69.00	50.60	62.00	59.40
		4.00%			62.00	58.90
E22	PEN 120/150	2.00%			97.00	52.00
		2.50%	113.00	46.00	90.00	60.00
		3.00%			78.00	59.00
		4.00%			78.00	66.00
E24	PEN 60/70	3.00%	68.00	48.00	47.00	55.00
E25	PEN 60/80	3.00%			55.30	74.30
		4.00%	68.00	47.80	55.80	83.50
		5.00%			57.00	86.10
E29	70/100	5.00%	99.00	43.00	57.00	76.00
		5.00%	93.00	43.20	52.00	85.00

		5.00%	86.00	43.40	56.00	77.80
		5.00%	93.00	45.50	52.00	65.00
<b>E32</b>	Alfa 70	3.40%	61.00	48.40	48.50	66.70
	Poly-90	3.40%	84.20	44.80	53.30	57.70
<b>E33</b>	TIPCO 70#	3.50%	61.30	50.70	56.00	60.50
<b>E34</b>	70#	4.50%	61.00	48.50	55.00	81.00
<b>E37</b>	PG 58-10	6.00%	98.00	47.00	61.00	85.00
<b>E38</b>	VG30	3.00%			50.00	60.00
		5.00%	65.00	52.00	45.00	74.00
		7.00%			42.00	75.00
<b>E39</b>	SK70#	4.50%				51.80
		5.00%	73.00	49.00		55.30
		5.50%				60.00
		6.00%				61.90
	SK90#	4.50%			81.60	57.00
		5.00%			79.30	59.40
		5.50%	91.00	47.00	77.90	63.00
		6.00%			76.90	68.90
<b>E40</b>		4.00%	62.00	48.50	40.00	76.30
<b>E41</b>	SK-90 AC-20	3.40%	81.00	51.00	61.20	65.40
<b>E44</b>	70#	1.00%	70.30	48.20	70.30	48.20
<b>E45</b>	ESSO 70#	6.00%	63.00	46.50	48.40	89.40
<b>E46</b>	50/70	3.00%			63.70	53.00
		4.50%			68.50	83.30
		6.00%	54.60	50.30	72.30	99.00
		7.50%			76.90	101.60
		9.00%			83.40	104.50
<b>E47</b>	CAP 50/70 o PG 64-22	4.70%	30.00	53.30	29.00	68.10
<b>E48</b>		4.50%	94.60	45.80	74.20	73.90
<b>E50</b>	PG 64-22	3.00%		51.25		64.03
		4.50%				73.35

**Nota:** En la presente tabla se muestran todos los aportes numéricos, referentes a las variables de estudio, extraídos de la muestra definida, empleando el instrumento “matriz de datos”.

**Tabla 9.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E01*

<b>Título:</b>	<b>E01: Aging Mechanism and Properties of SBS Modified Bitumen under Complex Environmental Conditions</b>
<b>Autor (es):</b>	H. Wei, X. Bai, G. Qian, F. Wang, Z. Li, J. Jin y Y Zhang
<b>Año:</b>	2019
<b>País:</b>	China
<b>Objetivo:</b>	Analizar el comportamiento de un asfalto convencional y uno modificado con polímero SBS frente al envejecimiento con la influencia de UV, agua, ácido y sales.

---

**Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Para la presente investigación, se utilizó un asfalto con grado de penetración #70 y un polímero SBS como modificador. Se realizaron los estudios correspondientes con el fin de obtener las propiedades físicas del asfalto base y del polímero a utilizar.

El asfalto en estado de fusión (135 °C) se mezcló con el modificador SBS al 5 % , respecto a la masa del betún virgen; el SBS se dispersó uniformemente en el asfalto y se agitó manualmente de 2 min a 3 min , para luego ser calentado a 160 °C en un horno eléctrico multipropósito. Posteriormente, se sometió la mezcla a cizallamiento rotatorio a 4000 revoluciones por minuto (rpm) durante 1 h a 160 °C ; para finalmente ser colocada en un horno a 160 °C e hinchar durante una 1 1/2 h , para obtener el asfalto modificado con SBS.

En una máquina de destilación se preparó el agua destilada; la solución ácida se elaboró con ácido sulfúrico, ácido nítrico y agua destilada. La solución salina resultó de la mezcla de cristales de cloruro de sodio y agua destilada a una concentración del 7 % .

---

---

Se seleccionó la prueba de horno de película (TFOT), para simular la oxidación térmica del betún de acuerdo con la norma ASTM D1754 (2014). Seguidamente, las muestras se colocaron en un horno de película y se envejecieron durante 5 h a 163 °C ; luego del envejecimiento TFOT, fueron expuestas a rayos ultravioletas (UV) en una cámara de simulación de ambiente ultravioleta de fabricación propia, durante 7 días. Para simular las condiciones ambientales adversas, se roció 1 g de agua/ácido/sal sobre la superficie del betún y se realizaron diversas pruebas para analizar el comportamiento de ambos asfaltos luego del proceso de envejecimiento.

Además, se realizaron pruebas de propiedades físicas como penetración, punto de ablandamiento y viscosidad; las cuales se utilizan como índices principales para evaluar el rendimiento del betún. Así mismo, se aplicó un reómetro de cizallamiento dinámico, para realizar pruebas de barrido de temperatura en el asfalto base y en el asfalto modificado con SBS, en distintos estados de envejecimiento. Las pruebas se realizaron utilizando un modo de deformación constante a una frecuencia fija de 10 rad/s y se aplicaron el módulo de cizallamiento ( $|G^*|$ ), ángulo de fase ( $\delta$ ) y factor de deformación de surcos ( $|G^*| / \sin \delta$ ), en función de la temperatura para todas las muestras, con la finalidad de evaluar las propiedades reológicas del asfalto durante el proceso de envejecimiento. También se realizó la espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR), para detectar los grupos funcionales químicos presentes en las cadenas del polímero; y el microscopio electrónico de barrido fue utilizado para observar la morfología y estructura de los insumos.

El envejecimiento por UV dio como resultado la disminución de la penetración y el aumento del punto de ablandamiento de ambos tipos de asfaltos; es decir, se volvió más duro y quebradizo. Lo antes mencionado fue debido a la migración de componentes ligeros a componentes pesados del betún. La humedad aceleró el envejecimiento UV del betún; el ácido



---

y la sal aceleraron aún más la corrosión y envejecimiento y, afectaron más sus propiedades reológicas y mecánicas.

El envejecimiento aumenta el factor de formación de surcos, lo que tiene un cierto efecto de mejora en el rendimiento del material a altas temperaturas. Microscópicamente, los componentes ligeros del betún migraron a componentes pesados; lo que causó una disminución de contenido aromático y gelatinoso, un aumento de asfaltenos y, por lo tanto, grietas en la superficie del betún. Respecto al agrietamiento, se observó que las fisuras del betún modificado con SBS fueron más ordenadas que la del betún virgen, en las mismas condiciones. Por otro lado, en medio ácido, el ancho de la grieta del betún virgen aumentó; mientras el agrietamiento superficial del betún modificado fue mayor e irregular, pero pequeño.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*Actualmente la penetración, el punto de ablandamiento y la viscosidad, son utilizados como principales índices para evaluar el rendimiento del betún en la mayoría de los países del mundo. El envejecimiento por UV causa la disminución en la penetración y aumento en el punto de ablandamiento, es decir el asfalto se vuelve más duro y quebradizo; esto debido a la migración de componentes ligeros (aromático y gelatinosos) a componentes pesados (asfaltenos) del betún, lo que origina grietas en su superficie. La resistencia al envejecimiento del asfalto modificado es mejor que la de la virgen, en términos de agrietamiento. La humedad acelera el envejecimiento UV y, el ácido y la sal aceleran aún más el proceso de corrosión.*

---

### **2.8.3 Análisis de datos**

Luego de haber concluido el proceso de análisis documental y recolección de datos, se continuó con la ejecución de las técnicas de análisis de datos, que consistieron en ordenar

las ideas y aportes recolectados, mediante matrices elaboradas en Excel (ver anexo n.º 4) que permitan obtener resultados, para dar solución al problema de investigación planteado.

En la matriz de datos obtenida de la revisión, se muestran resultados numéricos acerca del comportamiento de la variable punto de ablandamiento, expresada en grados Celsius y; del grado de penetración, expresado en décimas de milímetro, correspondientes al asfalto modificado. Es por esto, que se ordenaron todos los estudios de acuerdo con el porcentaje de polímero SBS aplicado, para cumplir con el objetivo trazado.

Mientras que, las fichas resumen de cada estudio graficaron la influencia de la variación de las propiedades antes mencionadas, sobre las características del asfalto modificado; es por ello, que la información teórica referente a los estudios de los investigadores antedichos fue organizada y resumida en un solo aporte, válido para la ejecución del presente trabajo.

### 2.8.3.1 Para el objetivo específico n.º 1 (OE01).

Se tomaron los valores referentes al punto de ablandamiento y se clasificaron, teniendo en cuenta la dosificación de polímero SBS aplicado en cada estudio; para finalmente calcular el porcentaje de variación de dicha propiedad en el asfalto modificado, con respecto al bitumen base.

**Tabla 10.**

*Aportes numéricos para el punto de ablandamiento (°C)*

Código de estudio	%SBS	Ablandamiento (°C)	
		Asf. Base	Asf. Modificado
<b>E14</b>	1.00%	44.20	58.00
<b>E20</b>		50.60	53.30
<b>E44</b>		48.20	48.20
<b>E08</b>		49.00	63.00
<b>E09</b>	2.00%	49.00	63.10
<b>E14</b>		44.20	61.00
<b>E19</b>		52.20	56.30

<b>E20</b>		50.60	59.40
<b>E22</b>		46.00	52.00
<b>E11</b>	2.50%	50.00	65.00
<b>E22</b>		46.00	60.00
<b>E08</b>		49.00	72.00
<b>E09</b>		49.00	65.65
<b>E14</b>		44.20	65.00
<b>E22</b>		46.00	59.00
<b>E24</b>	3.00%	48.00	55.00
<b>E25</b>		47.80	74.30
<b>E38</b>		52.00	60.00
<b>E46</b>		50.30	53.00
<b>E50</b>		51.25	64.03
<b>E32</b>	3.40%	48.40	66.70
<b>E41</b>		51.00	65.40
<b>E33</b>	3.50%	50.70	60.50
<b>E06</b>		50.00	57.00
<b>E08</b>		49.00	79.00
<b>E09</b>		49.00	69.90
<b>E19</b>	4.00%	52.20	59.00
<b>E20</b>		50.60	58.90
<b>E22</b>		46.00	66.00
<b>E25</b>		47.80	83.50
<b>E40</b>		48.50	76.30
<b>E03</b>	4.30%	46.50	77.00
<b>E05</b>		50.00	59.50
<b>E34</b>		48.50	81.00
<b>E39</b>	4.50%	49.00	51.80
		47.00	57.00
<b>E46</b>		50.30	83.30
<b>E48</b>		45.80	73.90
<b>E50</b>		51.25	73.35
<b>E47</b>	4.70%	53.30	68.10
<b>E12</b>		44.00	54.50
<b>E17</b>		41.00	79.00
<b>E25</b>		47.80	86.10
		43.00	76.00
<b>E29</b>	5.00%	43.20	85.00
		43.40	77.80
		45.50	65.00
<b>E38</b>		52.00	74.00
<b>E39</b>		49.00	55.30
		47.00	59.40
<b>E39</b>	5.50%	49.00	60.00

		47.00	63.00
<b>E16</b>		50.50	72.10
<b>E19</b>		52.20	66.00
<b>E37</b>		47.00	85.00
<b>E39</b>	6.00%	49.00	61.90
		47.00	68.90
<b>E45</b>		46.50	89.40
<b>E46</b>		50.30	99.00
<b>E38</b>	7.00%	52.00	75.00
<b>E46</b>	7.50%	50.30	101.60
<b>E46</b>	9.00%	50.30	104.50

*Nota:* En la presente tabla se muestran los aportes numéricos referentes a la variable punto de ablandamiento (°C).

### 2.8.3.2 Para el objetivo específico n.º 2 (OE02).

Para poder describir el impacto causado por los cambios en el punto de ablandamiento del betún incorporado con SBS, fue necesario organizar los aportes teóricos en las fichas resumen elaboradas anteriormente, con el propósito de sintetizar todo el contenido en una sola idea que explique los fenómenos que acontecen en el asfalto y que son importantes para el logro de los objetivos del presente estudio.

#### Tabla 11.

*Ficha resumen correspondiente al estudio E06*

<b>Título:</b>	<b>E06:</b> Avaliação do ligante asfáltico modificado por polímero SBS e aditivo surfactante
<b>Autor (es):</b>	Laide Magalhães Rodrigues
<b>Año:</b>	2020
<b>País:</b>	Brasil

---

**Objetivo:** Presentar y evaluar una alternativa a los efectos no deseados existentes en los ligantes asfálticos modificados por SBS.

---

### **Metodología, Resultados y Conclusión**

---

El ligante base utilizado fue un CAP 50/70 y su clasificación fue de acuerdo a la penetración; en dicho ligante se realizaron dos modificaciones, la primera únicamente adicionando 4 % de polímero SBS y la segunda incorporando 4 % de SBS más 1 % de aditivo tensioactivo. Se realizaron los ensayos de caracterización para todos los materiales mencionados y, se hizo uso de un mezclador de alto cizallamiento para obtener una mezcla homogénea.

Se calentaron 450 g del asfalto base CAP 50/70, hasta alcanzar la temperatura aproximada de 155 °C , para luego agregar el 4 % del polímero SBS; una vez completada la adición de SBS, se procedió a mezclar durante 2 h con temperaturas de 155 °C  $\pm$  5 °C y una velocidad de 250 rpm . Para preparar la mezcla que contenía 1 % de surfactante, se siguió el mismo procedimiento, pero permaneció por 1/2 h más en las mismas condiciones. Una vez finalizado el proceso de modificación del asfalto, se extrajeron las muestras para realizar los estudios de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad aparente.

Para la prueba de penetración, se realizaron tres mediciones con agujeros diferentes y distantes, luego los valores fueron promediados para obtener la consistencia final. Para el punto de ablandamiento, se anotaron los dos valores de temperaturas registrados cuando las bolas bajaron hasta llegar al fondo de la varilla y se promediaron para obtener el valor final; con estos dos datos se calculó el índice de susceptibilidad térmica. Finalmente, se realizó el ensayo con el viscosímetro de Brookfield para obtener el valor de viscosidad aparente.

El asfalto modificado con SBS registró valores de consistencia más altos que el ligante base, esto posiblemente se debe al reordenamiento químico que proporciona la estructura química del SBS ligado a los componentes del asfalto. El valor de penetración disminuyó de 50 dmm a

---

39,5 dmm , presentando un aumento en la consistencia de más de 20 % . Por otro lado, la adición de tensoactivo provocó una disminución de la consistencia del ligante modificado con SBS a una similar a la del asfalto base.

Respecto al punto de ablandamiento en el asfalto modificado con SBS, se evidenció un aumento de 50 °C a 57 °C , es decir 14 % más, con relación al asfalto base; en cuanto a la adición de aditivo tensoactivo, este originó una disminución en el punto de ablandamiento, haciéndolo más sensible a las variaciones de temperatura.

Respecto a la viscosidad, se obtuvo un asfalto más glutinoso con la adición de SBS y ligeramente suavizado, al agregarle el aditivo tensoactivo. En general, la modificación del ligante asfáltico con los productos mencionados, mejoró las propiedades del aglutinante puro, aumentando su rendimiento.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*El índice de penetración evidencia la facilidad o dificultad de deformación del ligante, pudiendo ser más o menos consistente. Por otro lado, el punto de ablandamiento indica el punto donde hay mayor trabajabilidad del asfalto.*

*La consistencia superior se puede relacionar con una mayor rigidez, lo que hace probable el aumento de la resistencia a las deformaciones permanentes. Los asfaltos con mayores puntos de ablandamiento son recomendados para lugares con elevadas temperaturas y que sumado al tráfico excesivo sobre el pavimento, provocan hundimientos en el mismo.*

*A mayor contenido de SBS, mayor punto de ablandamiento y menor grado de penetración.*

---

Se realizó el mismo procedimiento para todos los estudios que presentaron aportes teóricos; esto se evidencia en la sección de anexos (anexo n.º 7), en donde se muestran todas las fichas resumen extraídas.

### 2.8.3.3 Para el objetivo específico n.º 3 (OE03).

De igual forma, se clasificaron los valores de grado de penetración, considerando la dosificación de modificador SBS aplicado en cada investigación citada, para finalmente calcular el porcentaje de variación de la propiedad aludida en el betún modificado, con respecto al asfalto base.

**Tabla 12.**

*Aportes numéricos para la penetración (dmm)*

Código de estudio	%SBS	Penetración (dmm)	
		Asf. Base	Asf. Modificado
E14		93.30	81.60
E20	1.00%	69.00	63.00
E44		70.30	70.30
E08		65.00	55.00
E09		67.00	60.00
E14	2.00%	93.30	78.30
E19		51.40	55.00
E20		69.00	62.00
E22		113.00	97.00
E11	2.50%	81.00	55.00
E22		113.00	90.00
E08		65.00	44.00
E09		67.00	53.00
E14		93.30	69.10
E22	3.00%	113.00	78.00
E24		68.00	47.00
E25		68.00	55.30
E38		65.00	50.00
E46		54.60	63.70
E32	3.40%	61.00	48.50
		84.20	53.30
E41		81.00	61.20
E33	3.50%	61.30	56.00
E02		58.50	55.50
E04		62.00	68.00
E06		50.50	39.50
E08	4.00%	65.00	42.00
E09		67.00	42.00
E19		51.40	65.70
E20		69.00	62.00
E22		113.00	78.00

<b>E25</b>		68.00	55.80
<b>E40</b>		62.00	40.00
<b>E03</b>	4.30%	70.00	59.00
<b>E05</b>		59.00	39.00
<b>E34</b>		61.00	55.00
<b>E39</b>	4.50%	73.00	0.00
		91.00	81.60
<b>E46</b>		54.60	68.50
<b>E48</b>		94.60	74.20
<b>E47</b>	4.70%	30.00	29.00
<b>E12</b>		104.00	73.00
<b>E17</b>		175.00	69.00
<b>E25</b>		68.00	57.00
		99.00	57.00
<b>E29</b>	5.00%	93.00	52.00
		86.00	56.00
		93.00	52.00
<b>E38</b>		65.00	45.00
<b>E39</b>		73.00	0.00
		91.00	79.30
<b>E39</b>	5.50%	73.00	0.00
		91.00	77.90
<b>E19</b>		51.40	54.50
<b>E37</b>		98.00	61.00
<b>E39</b>	6.00%	73.00	0.00
		91.00	76.90
<b>E45</b>		63.00	48.40
<b>E46</b>		54.60	72.30
<b>E38</b>	7.00%	65.00	42.00
<b>E46</b>	7.50%	54.60	76.90
<b>E46</b>	9.00%	54.60	83.40

*Nota:* En la presente tabla se muestran los aportes numéricos referentes a la variable grado de penetración (dmm)

#### 2.8.3.4 Para el objetivo específico n.º 4 (OE04).

Así mismo, para describir el impacto originado por los cambios en el grado de penetración del asfalto modificado con SBS, fue fundamental ordenar los aportes teóricos en las fichas resumen realizadas con anterioridad, con el fin de resumir todo el contenido en una única idea que explique los acontecimientos que se producen en el asfalto y que son de suma importancia para conseguir los objetivos trazados.



Tabla 13.

*Ficha resumen correspondiente al estudio E22*

---

<b>Título:</b>	<b>E22:</b> Evaluación del comportamiento del asfalto modificado con polímeros utilizados en la vía asfaltada Macusani – Ollachea Km 182+250 al Km 188+300
<b>Autor (es):</b>	Aurelio Zambrano Bustamante
<b>Año:</b>	2018
<b>País:</b>	Perú
<b>Objetivo:</b>	Evaluar el comportamiento, parámetros reológicos y propiedades físico mecánicas de la carpeta asfáltica con la adición de polímeros modificados en las mezclas asfálticas en la vía Macusani – Ollachea.

---

**Metodología, Resultados y Conclusión**

Se realizó la evaluación del Índice de Condición del Pavimento (PCI) de la carretera Macusani – Ollachea, debido a que grafica el estado en el que se encuentran la mayoría de las carreteras de la región y porque está ubicada en zona de altura 3500 m.s.n.m.; de cada kilómetro se muestreó 700 m<sup>2</sup> con 59 muestras, haciendo el análisis y los procedimientos de acuerdo con el método de estudio indicado.

En buena condición se encontraron 20 unidades, que equivalen al 33,9 % ; en condición regular, 34 unidades (57,6 %) ; en condición mala, 4 unidades (6,8 %) y en condición de muy mala, 1 unidad. Se utilizó como asfalto base el PEN 120/150 y un polímero SBS Solprene 411; por lo que se tuvo especial atención en las especificaciones de estos.

Se realizaron ensayos de control de calidad en los materiales; por lo cual se ubicó la cantera Macusani km 188 del corredor vial interoceánico Sur, Perú – Brasil, con el objetivo de

---

determinar si los materiales de dicha cantera son óptimos para realizar una mezcla asfáltica (para la elección de la cantera, se observó que los agregados pétreos tengan una textura rugosa y alargada que dan mayor resistencia que las redondeadas).

La mezcla del asfalto con polímero se ejecutó haciendo uso de un dispensador mecánico con una velocidad de 10 rpm ; además, se calentaron 800 g de asfalto PEN 120/150 a 160 °C , para luego añadir 2 % ; 2,5 % ; 3 % y 4 % de SBS. Posteriormente se realizaron ensayos para conocer las propiedades de los asfaltos; así mismo, se empleó el método Marshall para determinar el óptimo contenido de asfalto y la combinación específica de agregados; después, se realizaron probetas de 2,5” de espesor y 4” de diámetro, de las que se determinó su estabilidad y deformación.

Se obtuvo una penetración de 120 dmm para el asfalto base y para los asfaltos modificados al 2 % ; 2,5 % ; 3 % y 4 % fueron 94 dmm ; 85 dmm ; 75 dmm y 78 dmm respectivamente. Respecto al punto de ablandamiento se obtuvo 46 °C para el asfalto base y, para los asfaltos modificados al 2 % ; 2,5 % ; 3 % y 4 % fueron 54 °C ; 58 °C ; 59 °C y 66 °C de manera respectiva; por lo que, el asfalto modificado necesita una temperatura mayor para ablandarse. El cemento asfáltico convencional tuvo 8 % de recuperación, mientras que los del asfalto modificado son superiores, esto evidencia mayor flexibilidad y elasticidad de la mezcla a bajas temperaturas y por lo tanto, menor riesgo de fisuración. De acuerdo con el ensayo Marshall, se obtuvo que el contenido óptimo de asfalto modificado con 3 % de polímero, es de 6,3 % en peso de la mezcla total; mientras que, para el asfalto convencional es 7,3 % ; por esta razón, se podría afirmar, con el respaldo de las mejoras obtenidas en las propiedades, que el uso de asfalto modificado es muy ventajoso.

---

### **Aporte a la investigación**

---

---

*Una elevada susceptibilidad térmica causa problemas de fisuramiento en el pavimento; por lo que, con un asfalto modificado, se busca que este sea más flexible a bajas temperaturas y menos susceptible al calor. Al verse reducido el grado de penetración del asfalto, disminuye la susceptibilidad al cizallamiento y aumenta la viscosidad (más resistente y menos riesgo a fracturarse a altas temperaturas); por tanto, se incrementa el periodo de diseño del pavimento, alargando su vida útil. Por otro lado, al aumentar el punto de ablandamiento, se garantiza un buen funcionamiento del pavimento a elevadas temperaturas.*

---

#### **2.8.4 Desarrollo de los objetivos**

Finalmente, todos los procesos descritos y realizados con anterioridad permitieron conocer el comportamiento de las variables analizadas, punto de ablandamiento y grado de penetración, en diversos asfaltos modificados con distintos polímeros SBS, además de describir su impacto sobre las otras propiedades de los bitúmenes y los pavimentos flexibles en los que estos serían aplicados; cumpliéndose así, los objetivos planteados en la presente investigación.

Los resultados del estudio, que respondieron a los objetivos OE2 y OE4, fueron plasmados en la tabla de resultados presentada en el anexo n.º 5; mientras que los objetivos OE1 y OE3, en la matriz de categorización, ubicada en el anexo n.º 6. A continuación, se analizaron dichos resultados y se elaboró la discusión; en la que se dio respuesta a la pregunta de investigación, se verificó la hipótesis planteada, se interpretó cada uno de los resultados obtenidos y se identificaron las limitaciones de estudio. Finalmente se concluyó dando respuesta al objetivo general y a cada uno de los objetivos específicos del presente estudio, además de dar recomendaciones para futuros investigadores, teniendo en cuenta las limitaciones encontradas.

### CAPITULO III: RESULTADOS

#### 3.1 Comportamiento del punto de ablandamiento (°C)

Indicador 1: Valores del ensayo de punto de ablandamiento obtenido de las investigaciones

Objetivo 1: Analizar el comportamiento del punto de ablandamiento del asfalto modificado con polímero SBS para pavimentos flexibles en el mundo, 2021.

**Tabla 14.**

*Variación del punto de ablandamiento (°C) en los asfaltos modificados con SBS*

Código de estudio	%SBS	Variación en el punto de ablandamiento (%)
E14	1.00%	31.22%
E20		5.34%
E44		0.00%
E08		28.57%
E09	2.00%	28.78%
E14		38.01%
E19		7.85%
E20		17.39%
E22		13.04%
E11	2.50%	30.00%
E22		30.43%
E08		46.94%
E09		33.98%
E14	3.00%	47.06%
E22		28.26%
E24		14.58%
E25		55.44%
E38		15.38%
E46		5.37%
E50		24.94%
E32	3.40%	37.81%
E41		28.24%

<b>E33</b>	3.50%	19.33%
<b>E06</b>		14.00%
<b>E08</b>		61.22%
<b>E09</b>		42.65%
<b>E19</b>	4.00%	13.03%
<b>E20</b>		16.40%
<b>E22</b>		43.48%
<b>E25</b>		74.69%
<b>E40</b>		57.32%
<b>E03</b>	4.30%	65.59%
<b>E05</b>		19.00%
<b>E34</b>		67.01%
<b>E39</b>	4.50%	5.71%
<b>E46</b>		21.28%
<b>E48</b>		65.61%
<b>E50</b>		61.35%
<b>E47</b>	4.70%	43.11%
<b>E12</b>		27.77%
<b>E17</b>		23.86%
<b>E25</b>		92.68%
		80.13%
		76.74%
<b>E29</b>	5.00%	96.76%
		79.26%
		42.86%
<b>E38</b>		42.31%
<b>E39</b>		12.86%
		26.38%
<b>E39</b>	5.50%	22.45%
		34.04%
<b>E16</b>		42.77%
<b>E19</b>		26.44%
<b>E37</b>		80.85%
<b>E39</b>	6.00%	26.33%
		46.60%
<b>E45</b>		92.26%
<b>E46</b>		96.82%
<b>E38</b>	7.00%	44.23%
<b>E46</b>	7.50%	101.99%
<b>E46</b>	9.00%	107.75%

**Nota:** En la presente tabla se muestran las variaciones del punto de ablandamiento clasificadas de acuerdo con el porcentaje de polímero SBS en el asfalto.

**Tabla 15.**

*Parámetros estadísticos de la variable punto de ablandamiento*

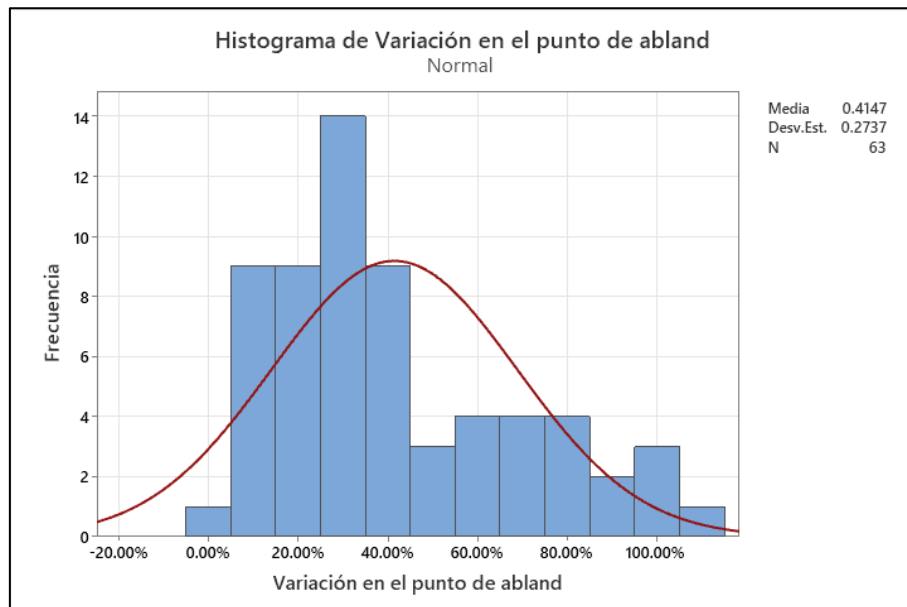
Variable	Número de muestras	Media	Error estándar de la media	Desviación estándar	Mínimo
Variación del punto de ablandamiento	63	0.4147	0.0345	0.2737	0

Variable	Número de muestras	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Variación del punto de ablandamiento	63	0.2128	0.3398	0.6122	1.0775

*Nota:* En la presente tabla se muestran los parámetros estadísticos para la variable punto de ablandamiento, luego de realizar el análisis estadístico.

**Figura 36.**

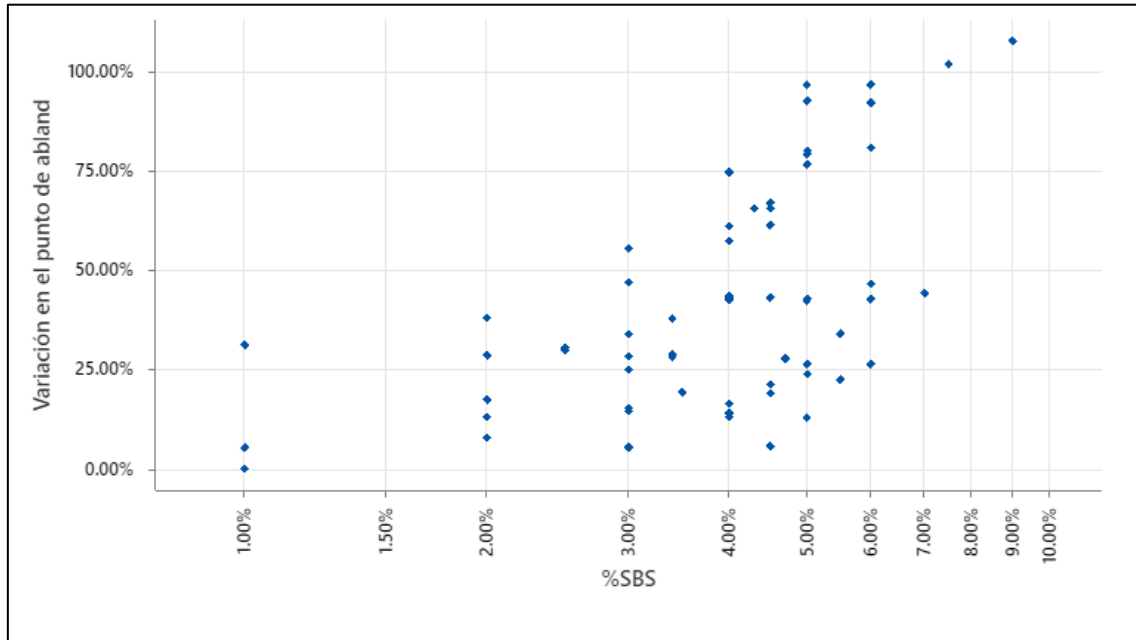
*Histograma correspondiente a la variación del punto de ablandamiento*



*Nota:* En la presente figura se muestra el histograma que grafica la variación de la variable de estudio: punto de ablandamiento del asfalto modificado con polímero SBS.

**Figura 37.**

*Diagrama de dispersión correspondiente a la variación del punto de ablandamiento*



**Nota:** En la presente imagen se muestra el diagrama de dispersión que grafican la variación de la variable de estudio: punto de ablandamiento del asfalto modificado con polímero SBS.

### 3.2 Impacto causado por la variación del punto de ablandamiento

Indicador 2: Aportes teóricos obtenidos de las investigaciones

Objetivo 2: Describir el impacto causado por la variación del punto de ablandamiento en el asfalto modificado con SBS para pavimentos flexibles en el mundo, 2021.

**Tabla 16.**

*Impacto de la variación del punto de ablandamiento (°C) en los asfaltos modificados con polímero SBS*

<b>Categoría</b>	<b>Código</b>	<b>Impacto por la variación del punto de ablandamiento (°C)</b>	<b>Aporte</b>
<b>Relación del contenido de polímero SBS con el punto de ablandamiento</b>	E01	Actualmente el punto de ablandamiento y la viscosidad son utilizadas como principales índices para evaluar el rendimiento del betún en la mayoría de los países del mundo. La humedad acelera el envejecimiento ultravioleta (UV) del asfalto; el ácido y la sal aceleran aún más el proceso de corrosión.	<i>El punto de ablandamiento y la viscosidad son utilizados actualmente como principales índices para evaluar el rendimiento del asfalto en la mayoría de las naciones del mundo. Además, la humedad, el ácido y la sal, son sustancias que aceleran el envejecimiento UV del betún. El punto de ablandamiento aumenta en los asfaltos modificados con SBS, debido a la formación de una</i>
	E06	Al aumentar el contenido de polímero SBS, se incrementa punto de ablandamiento.	
	E08	El punto de ablandamiento aumenta en los asfaltos modificados con polímero (PMA) SBS, conforme se incrementa el contenido de modificador en el asfalto.	
	E10	Los valores de punto de ablandamiento son considerablemente mayores en la mezcla altamente modificada, respecto a la mezcla base.	
	E16	El aumento en la concentración de polímero SBS, condujo a un incremento en el punto de ablandamiento.	



	E27	Las muestras modificadas con polímero SBS, experimentan un aumento en el punto de ablandamiento.	<i>estructura de red en el ligante causada por la adición de los modificadores y una mejor interacción entre sus moléculas.</i>
	E31	A mayor porcentaje de SBS, mayor será el punto de ablandamiento.	
	E36	La incorporación de polímero SBS a los aglutinantes bituminosos causa una mejora en propiedades básicas como el punto de ablandamiento; es decir hace que esta propiedad incremente su valor.	
	E38	Se observó un aumento del punto de ablandamiento, debido a la adición de polímero SBS al bitumen.	
	E42	Con la adición de polímero SBS, se originó un incremento en el punto de ablandamiento a comparación del asfalto base utilizado.	
	E48	La adición de modificadores al asfalto afecta considerablemente al punto de ablandamiento; el cual, por ejemplo, aumentó en el asfalto modificado en un 58,2 % a comparación del original, debido a la formación de una estructura de red en el ligante y una mejor interacción entre las moléculas del asfalto.	
<b>Trabajabilidad</b>	E06	El punto de ablandamiento es un indicador de a qué temperatura hay mayor trabajabilidad en el asfalto.	<i>El punto de ablandamiento indica la temperatura en donde se presenta la mayor trabajabilidad del asfalto.</i>
<b>Adherencia</b>	E42	El polímero SBS como modificador bituminoso, posee una influencia positiva en la mejora de las propiedades físico – mecánicas de la mezcla, mediante la generación de reacciones entre iones de forma superficial cuando se encuentran en una fase caliente, aumentando así la capacidad de adherencia entre la materia pétreo y el cemento bituminoso.	<i>La incorporación de modificador SBS al asfalto mejora la reacción entre iones cuando este se encuentra en una fase caliente y permite que se adhiera mejor al material</i>

			<i>pétreo, potenciando así la mezcla asfáltica.</i>
<b>Consistencia y viscosidad</b>	E09	Al tener el asfalto un valor de punto de ablandamiento elevado evidencia una mayor consistencia y un alto rango de temperatura para ser utilizado.	
	E11	El ensayo de punto de ablandamiento se realiza con la finalidad de conocer a qué temperatura el asfalto pierde consistencia y comienza a fluir, volviéndose más blando debido a la pérdida de viscosidad.	<i>El punto de ablandamiento elevado evidencia una mejor consistencia y un mayor rango de temperatura para ser utilizado; además, se encontró que la adición de modificadores afecta considerablemente la viscosidad, la cual aumenta a causa de que el modificador absorbe los componentes livianos del asfalto base y por esto la estructura se vuelve más resistente.</i>
	E19	El punto de ablandamiento es un indicador de la consistencia del asfalto.	
	E27	Las muestras modificadas con polímero SBS experimentan un aumento considerable en la viscosidad.	
	E31	El punto de ablandamiento es un indicador de la consistencia del asfalto.	
	E47	La modificación de un asfalto base convencional trae consigo mejoras significativas en propiedades asociadas a la elasticidad y a la consistencia.	
	E48	La adición de modificadores en el asfalto afecta considerablemente a la viscosidad del betún original; la cual aumenta, debido a que el modificador absorbe los componentes livianos del asfalto base y su estructura se vuelve más resistente al viscosímetro.	
<b>Fluencia</b>	E08	El punto de ablandamiento permite determinar la temperatura con la que el asfalto comienza a fluir; es decir, el punto en el que se vuelve más blando y menos viscoso.	
	E11	El punto de ablandamiento indica la temperatura en la que el asfalto empieza a fluir.	

	E13	El punto de ablandamiento muestra la tendencia a fluir de un asfalto, cuando aumenta la temperatura.	
	E19	Los pavimentos que presentan punto de ablandamiento bajo pueden fluir provocando la rotura de los áridos y en consecuencia, se presentan pavimentos quebradizos.	
	E36	Al agregar polímero SBS al asfalto se mejora la fluencia de este.	
	E38	El punto de ablandamiento indica el grado en el que el asfalto empieza a fluir a elevadas temperaturas.	
<b>Susceptibilidad térmica</b>	E06	El índice de penetración evidencia la facilidad o dificultad de deformación del ligante, pudiendo ser más o menos consistente.	<i>El índice de penetración evidencia la facilidad y dificultad de deformación del ligante y su susceptibilidad térmica. Si el índice de penetración es positivo, se tiene un material con baja sensibilidad térmica; si esta es muy elevada, trae problemas de fisuramiento en el pavimento, es por esto que con un asfalto modificado se busca que este sea más flexible a bajas temperaturas y menos susceptible al calor. Con la modificación de bitúmenes, utilizando polímeros, el punto de ablandamiento aumenta, lo</i>
	E08	Con la adición de polímeros, el punto de ablandamiento aumenta, lo que proporciona información acerca de la susceptibilidad térmica e indica una mejora en el comportamiento frente a altas temperaturas, respecto al asfalto convencional. El índice de penetración (IP) es una medida de susceptibilidad térmica que presenta el asfalto; por lo tanto, un mayor IP indica una baja susceptibilidad térmica.	
	E09	El punto de ablandamiento indica la susceptibilidad térmica de los materiales y la temperatura a la que el asfalto empieza a fluir (cambia de estado sólido a líquido); con la adición de polímeros se mejoró el comportamiento de los asfaltos a altas temperaturas, lo que indica que se necesita una elevada temperatura para separar el betún de los agregados pétreos.	
	E10	Los valores de punto de ablandamiento fueron mayores, lo que aumenta la resistencia del ligante frente a las	

	deformaciones permanentes y altas temperaturas de servicio.	<i>que causa una mejora frente a las deformaciones permanentes a altas temperaturas; además, es necesaria una gran temperatura para separar el asfalto de los agregados.</i>
E11	El índice de penetración del asfalto, indica el grado de susceptibilidad que posee, frente a altas temperaturas; si tiene un índice positivo es menos sensible al calor y si este es negativo, es más susceptible. El asfalto modificado tiene un índice de penetración positivo; mientras el asfalto base tiene un índice de penetración negativo.	
E16	La modificación de asfaltos trae como beneficio la disminución de la susceptibilidad a altas temperaturas.	
E19	El índice de penetración es la relación entre el punto de ablandamiento y la penetración, lo que indica la susceptibilidad térmica del material.	
E22	A mayor punto de ablandamiento, menor susceptibilidad térmica; si esta tiene un valor elevado, causa problemas de fisuramiento en el pavimento, por lo que con un asfalto modificado, se busca más flexibilidad a bajas temperaturas y menos susceptibilidad al calor. Al aumentar el punto de ablandamiento, se garantiza un buen funcionamiento del pavimento en presencia de calor.	
E25	El índice de penetración (PI) refleja la sensibilidad del asfalto a la temperatura; cuanto mayor sea este, menor es la sensibilidad. Con el incremento del contenido de polímero SBS en la muestra de asfalto y el punto de ablandamiento, aumentaron gradualmente; lo que indicó que la modificación del asfalto contribuye a la mejora del rendimiento a altas y bajas temperaturas.	

	E26	El asfalto modificado reciclado con SBS, tiene una mejor eficacia frente a bajas temperaturas, y también mejora las propiedades elásticas del asfalto.	
	E27	Al aumentar el punto de ablandamiento, se reduce la sensibilidad a los daños por elevadas temperaturas.	
	E42	La elección del polímero elastómero SBS como modificador bituminoso, ofrece un comportamiento mejorado frente a cargas y a la susceptibilidad a temperaturas altas y bajas; siendo así más resistente al ahuellamiento.	
	E44	El punto de ablandamiento del asfalto modificado aumentó, lo que significa que se mejoró la capacidad del ligante frente a deformaciones en condición de calor.	
	E46	El polímero SBS incorporado en el aglutinante, genera un enfoque positivo en cuanto a la aceleración del fenómeno de relajación y a la susceptibilidad térmica.	
	E47	La modificación de un asfalto base convencional, trae consigo mejoras significativas en propiedades asociadas a la susceptibilidad frente a las deformaciones permanentes	
<b>Dureza y rigidez</b>	E08	A mayor contenido de polímero SBS, mayor punto de ablandamiento; lo que evidencia mayor viscosidad, mayor dureza y elevada resistencia.	<i>A mayor punto de ablandamiento, el asfalto será más rígido y duro y; al aportársele una mayor rigidez, se controla el ahuellamiento frente al calor y el agrietamiento a bajas temperaturas.</i>
	E09	Al tener el asfalto un valor de punto de ablandamiento elevado, se evidencia una rigidez y dureza mayores.	
	E11	Las características del polímero elastómero varían con la temperatura; ya que, a altas temperaturas tienen la capacidad de aportar una mayor rigidez, impidiendo el ahuellamiento y; a bajas temperaturas tienden a	

<b>Deformación permanente</b>		controlar el aumento del módulo de rigidez y evitan el agrietamiento.	
	E36	A mayor cantidad de SBS, se obtiene una mayor rigidez en el asfalto.	
	E06	La consistencia superior se puede relacionar con una mayor rigidez, lo que hace probable el aumento de la resistencia a las deformaciones permanentes.	
	E13	El punto de ablandamiento y grado de penetración dan un indicativo para comprender el comportamiento a la formación de surcos de los ligantes y su influencia en el rendimiento general del pavimento.	
	E16	Los pavimentos modificados con polímero SBS experimentan una mayor resistencia a las deformaciones permanentes a temperaturas altas. La adición de polímeros aumenta la elasticidad del material, por lo que dichas mezclas brindan una mayor resistencia a la formación de surcos a altas temperaturas y ofrecen flexibilidad a temperaturas medias o bajas.	<i>El punto de ablandamiento es un indicador de resistencia a las deformaciones permanentes del asfalto; mientras mayor valor tenga esta propiedad, el betún presentará mejor resistencia ante la deformación permanente, debido al aumento de su capacidad de recuperación elástica.</i>
	E18	La mezcla modificada con polímero SBS presenta mejor desempeño frente a las deformaciones permanentes, a comparación con la mezcla bituminosa convencional, garantizando la resistencia al ahuellamiento	
	E31	El punto de ablandamiento es un indicador de la resistencia frente a las deformaciones permanentes del asfalto.	
	E35	El polímero SBS aumenta el intervalo de plasticidad, ocasionando que la mezcla tenga una mejor respuesta frente al tipo de falla denominada "deformación permanente"; si mejora la elasticidad, conlleva a que tenga una mejor respuesta ante este fenómeno.	

	E36	Cuando aumenta el contenido de polímero SBS en el asfalto, se presenta una mayor adhesión de los agregados y resistencia al ahuellamiento.
<b>Estabilidad de almacenamiento</b>	E07	<p>La estabilidad de almacenamiento es la compatibilidad a escala macroscópica y el principal requisito en la tecnología de los PMA. El punto de ablandamiento es un indicador que permite conocer la estabilidad de la mezcla asfáltica. Si la diferencia de los valores tomados en la parte superior e inferior de las muestras es mínima o está dentro del rango establecido, entonces la mezcla será estable; es decir, no habrá problemas de separación entre el asfalto y el polímero SBS. El punto de ablandamiento es un indicador para la segregación de los materiales.</p> <p><i>La separación entre las fases rica en polímero y rica en betún durante la etapa de almacenamiento y transporte es uno de los principales problemas que sufre el asfalto modificado. Dicho problema puede ser consecuencia de la diferencia de densidades entre ambos materiales; es por esto que, es recomendable no superar el 7 % de modificador SBS, con el fin de conservar la estabilidad de la mezcla y no experimentar una separación de fases. El punto de ablandamiento es uno de los indicadores que permiten conocer la estabilidad de almacenamiento y la segregación de los asfaltos; si la diferencia de los valores tomados en la parte superior e inferior de la muestra es mínima o está</i></p>
	E15	Solo para las muestras modificadas únicamente con polímero SBS, tomadas en el fondo del tubo, se determinó que el punto de ablandamiento aumentó a medida que se incrementó el contenido de modificador. A mayor porcentaje de SBS, la diferencia entre los valores de grado de penetración y punto de ablandamiento de la parte superior e inferior aumenta; lo que hace que el asfalto sea menos estable. La muestra con 5 % de SBS presentó la peor estabilidad.
	E18	La mezcla modificada con polímero SBS presenta mayor estabilidad que la mezcla convencional, esto se debe a que tiene una mayor cohesión y adhesividad.
	E28	En la prueba de estabilidad de almacenamiento, cuantos menores sean las diferencias entre los valores de punto de ablandamiento, mayor estabilidad presentará el

	<p>asfalto; por ende, resultará en un mejor comportamiento del pavimento asfáltico ante las variaciones de temperatura, durante su vida útil.</p>	
<p>E29</p>	<p>La desunión entre el polímero y el asfalto, durante la etapa de almacenamiento y transporte, es un proceso de separación entre fases: rica en polímero y rica en betún, convirtiéndose en un problema de inestabilidad de almacenamiento en el asfalto modificado, que puede ser resultado de una diferencia de densidades entre sus componentes.</p> <p>En el ensayo de estabilidad de almacenamiento, cuanto menor sea la diferencia entre los valores de puntos de ablandamiento tomados en una muestra, mayor estabilidad tendrá el asfalto estudiado; se considera estable si esta diferencia no supera los 5 °C .</p>	<p><i>dentro del rango aceptado, se considera una mezcla estable y no tendrá problemas de separación entre asfalto y polímero. En una de las fuentes citadas se encontró que en la prueba de estabilidad de almacenamiento, la diferencia máxima entre puntos de ablandamiento puede ser hasta 5 °C , para considerarse aún un asfalto estable; mientras en otro estudio se informó que en China, esta diferencia no puede superar los 2,5 °C . Además, se manifiesta que para un asfalto modificado con SBS, el punto de ablandamiento del fondo de la muestra aumentó a medida que se incrementó el porcentaje modificador y; según otro estudio, la mezcla modificada tiene mejor estabilidad que la mezcla convencional; por lo tanto, se presentará mayor adhesión, cohesión</i></p>
<p>E38</p>	<p>Se recomienda no superar el 7 % de contenido de polímero SBS en el asfalto para conservar la estabilidad de la mezcla; ya que, al utilizar mayor dosis de modificador, este puede experimentar una separación de fases.</p>	
<p>E50</p>	<p>El punto de ablandamiento es un indicador para la estabilidad del asfalto, si la diferencia de los valores tomados en la parte superior e inferior de las muestras es mínima o está dentro del rango establecido, entonces la mezcla será estable; es decir, no habrá problemas de separación entre el asfalto y el polímero SBS. En China, se admite hasta 2,5 °C de diferencia, entre los valores de punto de ablandamiento tomados de la muestra, para considerarse un material con buena estabilidad de</p>	



	almacenamiento; dicha prueba es muy importante para la aplicación del material en campo.	<i>y el pavimento tendrá también un mejor comportamiento frente a variaciones de temperatura.</i>
<b>Daños por fatiga</b>	E06 Los asfaltos con mayores puntos de ablandamiento son recomendados para lugares con temperaturas altas, que sumado al tráfico excesivo sobre el pavimento, provocan hundimientos en el mismo.	<i>Los asfaltos con mayores puntos de ablandamiento son recomendados para pavimentos contruidos en lugares con elevadas temperaturas; las cuales, sumadas al tráfico excesivo, los hacen propensos a hundimientos. La propiedad física de punto de ablandamiento es un factor que influye en el rendimiento a la fatiga del asfalto. El aumento del contenido del polímero SBS incrementa parcialmente los valores de resistencia a la fatiga.</i>
	E16 Los pavimentos modificados con polímero SBS, experimentan una mayor resistencia a la fatiga.	
	E18 La mezcla asfáltica modificada presentó mejor resistencia a la fatiga sin perder rigidez, soportando mayor cantidad de ciclos de carga repetitiva, siendo 17 veces mejor en comparación con la mezcla asfáltica convencional.	
	E27 Las muestras modificadas con polímero SBS tuvieron una mayor resistencia a la fatiga.	
	E30 La propiedad física de punto de ablandamiento es un factor que influye en el rendimiento a la fatiga del asfalto; se encontró que el aumento del porcentaje de polímero SBS, aumentan parcialmente los valores de resistencia a la fatiga.	
E42 Con la adición de polímero SBS en la composición del asfalto se incrementa la capacidad de soportar periodos de carga más largos, sin experimentar deformaciones.		

<b>Envejecimiento</b>	E01	<p>El envejecimiento por radiación ultravioleta (UV) causa la disminución en la penetración y aumento en el punto de ablandamiento; es decir, el asfalto se vuelve más duro y quebradizo. Esto debido a la migración de componentes ligeros (aromático y gelatinosos) del betún, a componentes pesados (asfaltenos), lo que origina grietas en la superficie del asfalto.</p> <p>La humedad acelera el envejecimiento UV del bitumen y, el ácido y la sal aceleran aún más el proceso de corrosión.</p>	<p><i>El envejecimiento por radiación ultravioleta (UV) causa el aumento en el punto de ablandamiento; es decir, el asfalto se vuelve más duro y quebradizo, debido a la migración de componentes ligeros (aromático y gelatinosos) del betún, a componentes pesados (asfaltenos), lo que origina grietas en la superficie del betún. El poco incremento del punto de ablandamiento revela menos sensibilidad de la mezcla frente al envejecimiento.</i></p>
	E05	<p>Los valores bajos de incremento del punto de ablandamiento revelan menos sensibilidad de la mezcla ante el envejecimiento.</p>	<p><i>La modificación de asfaltos trae como beneficios la resistencia al desgaste, envejecimiento y desprendimiento.</i></p>
	E16	<p>La modificación de asfaltos trae como beneficios la resistencia al desgaste, envejecimiento y desprendimiento.</p> <p>Todas las muestras estudiadas exhibieron un punto de ablandamiento mayor después del envejecimiento.</p>	<p><i>La modificación de asfaltos trae como beneficios las resistencias al desgaste, envejecimiento y desprendimiento.</i></p>
	E26	<p>El punto de ablandamiento aumenta considerablemente cuando la mezcla de asfalto modificada con SBS ha sufrido un proceso de envejecimiento.</p> <p>El asfalto envejecido tiene un buen comportamiento a altas temperaturas, pero con un comportamiento desfavorable a temperaturas bajas y peor trabajabilidad.</p>	<p><i>El punto de ablandamiento aumenta considerablemente cuando la mezcla de asfalto modificada con SBS ha sufrido un proceso de envejecimiento.</i></p>
	E33	<p>El proceso de envejecimiento influye de manera notable en los ligantes modificados con polímero SBS, pues se evidencia mediante el incremento de la viscosidad y punto de reblandecimiento.</p>	

	E36	Con el aumento de polímero SBS se presenta una alta resistencia al proceso de envejecimiento.	
<b>Rejuvenecimiento</b>	E23	Un asfalto envejecido modificado con polímero SBS, al tener mayor porcentaje de rejuvenecedor, disminuye en su punto de ablandamiento.	<i>El punto de ablandamiento tiende a ser menor en mezclas envejecidas sometidas a procesos de rejuvenecimiento.</i>
	E01	La resistencia al envejecimiento del betún modificado es mejor que la del betún virgen, en términos de agrietamiento.	
<b>Agrietamiento</b>	E16	Los pavimentos modificados con polímero SBS experimentan una mayor resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas.	<i>En términos de agrietamiento, la resistencia del betún modificado es mejor que la del asfalto virgen; es decir, experimenta una mayor resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas.</i>
	E35	Al reducirse la rigidez de la mezcla de asfalto, se reduce el peligro de que se produzca falla por agrietamiento.	
	E46	La incorporación de polímero SBS como modificador, optimiza la capacidad de relajación del betún a bajas temperaturas. Esto es importante, pues ayuda a la prevención de la tensión acumulada en las capas de asfalto del pavimento, sobrepasando la resistencia al agrietamiento a baja temperatura.	

**Nota:** En la presente tabla se muestran los aportes teóricos obtenidos de los estudios citados, respecto a la influencia de la variación del punto de ablandamiento en los pavimentos flexibles.

### 3.3 Comportamiento del grado de penetración

Indicador 3: Valores del ensayo del grado de penetración obtenido de las Investigaciones.

Objetivo 3: Analizar el comportamiento del grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS para pavimentos flexibles en el mundo, 2021.

**Tabla 17.**

*Variación del grado de penetración (dmm) en los asfaltos modificados con SBS*

Código de estudio	%SBS	Variación en el grado de penetración (%)
E14	1.00%	-12.54%
E20		-8.70%
E44		0.00%
E08		-15.38%
E09		-10.45%
E14	2.00%	-16.08%
E19		7.00%
E20		-10.14%
E22		-14.16%
E11	2.50%	-32.10%
E22		-20.35%
E08	3.00%	-32.31%
E09		-20.90%
E14		-25.94%
E22		-30.97%
E24		-30.88%
E25		-18.68%
E38		-23.08%
E46	16.67%	
E32	3.40%	-20.49%
E41		-36.70%
E33	3.50%	-8.65%
E02	4.00%	-5.13%

<b>E04</b>		<b>9.68%</b>
<b>E06</b>		-21.78%
<b>E08</b>		-35.38%
<b>E09</b>		-37.31%
<b>E19</b>		<b>27.82%</b>
<b>E20</b>		-10.14%
<b>E22</b>		-30.97%
<b>E25</b>		-17.94%
<b>E40</b>		-35.48%
<b>E03</b>	4.30%	-15.71%
<b>E05</b>		-33.90%
<b>E34</b>		-9.84%
<b>E39</b>	4.50%	-10.33%
<b>E46</b>		<b>25.46%</b>
<b>E48</b>		-21.56%
<b>E47</b>	4.70%	-3.33%
<b>E12</b>		-29.81%
<b>E17</b>		-60.57%
<b>E25</b>		-16.18%
		-42.42%
<b>E29</b>	5.00%	-44.09%
		-34.88%
		-44.09%
<b>E38</b>		-30.77%
<b>E39</b>		-12.86%
<b>E39</b>		-14.40%
<b>E19</b>		<b>6.03%</b>
<b>E37</b>		-37.76%
<b>E39</b>	6.00%	-15.49%
<b>E45</b>		-23.17%
<b>E46</b>		<b>32.42%</b>
<b>E38</b>	7.00%	-35.38%
<b>E46</b>	7.50%	<b>40.84%</b>
<b>E46</b>	9.00%	<b>52.75%</b>

**Nota:** En la presente tabla se muestran las variaciones del grado de penetración clasificadas de acuerdo con el porcentaje de polímero SBS en el asfalto.

**Tabla 18.**

*Parámetros estadísticos de la variable grado de penetración*

Variable	Número de muestras	Media	Error estándar de la media	Desviación estándar	Mínimo
Variación en la penetración	58	-0.1595	0.0286	0.2175	-0.6057

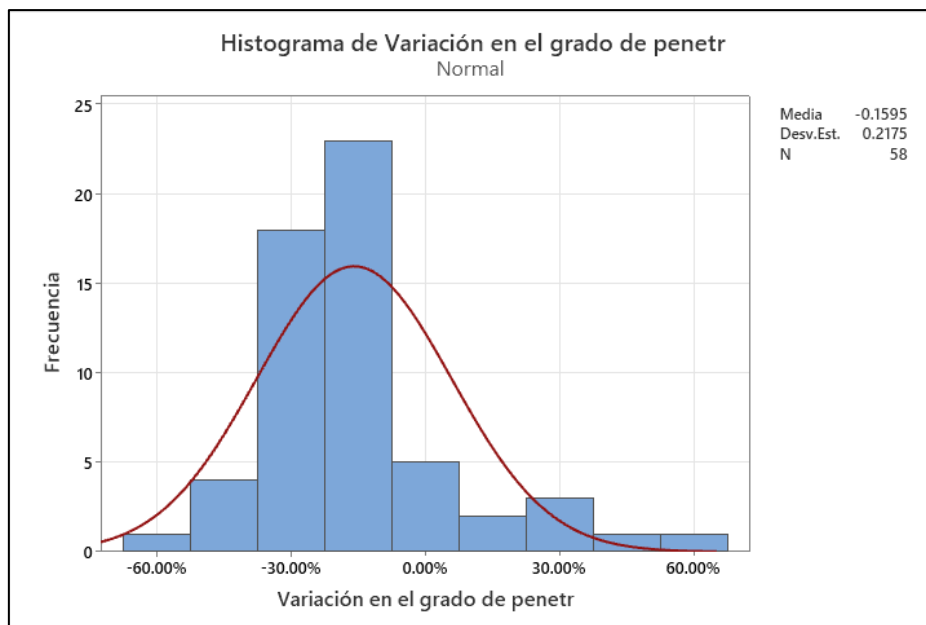
  

Variable	Número de muestras	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Variación en la penetración	58	-0.3125	-0.1831	-0.0955	0.5275

*Nota:* En la presente tabla se muestran los parámetros estadísticos para la variable grado de penetración, luego de realizar el análisis estadístico.

**Figura 38.**

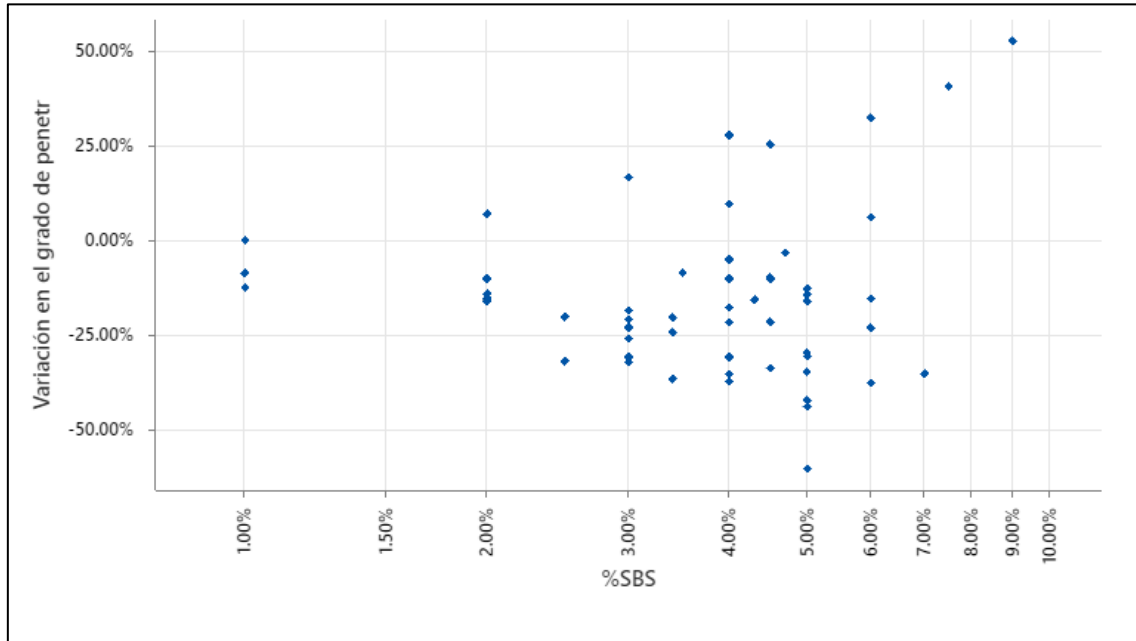
*Histograma correspondiente a la variación del grado de penetración*



*Nota:* En la presente figura se muestra el histograma que grafica la variación de la variable de estudio: grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS.

**Figura 39.**

*Diagrama de dispersión correspondiente a la variación del grado de penetración*



**Nota:** En la presente imagen se muestra el diagrama de dispersión que grafica la variación de la variable de estudio: grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS.

### 3.4 Impacto causado por la variación del grado de penetración

Indicador 4: Resultado de matriz de categorización

Objetivo 4: Describir el impacto causado por la variación del grado de penetración en el asfalto modificado con SBS para pavimentos flexibles en el mundo, 2021.

**Tabla 19.**

*Impacto de la variación del grado de penetración (dmm) en los asfaltos modificados con polímero SBS*

Categoría	Código	Impacto por la variación del grado de penetración (dmm)	Aporte
<b>Relación del contenido de polímero SBS con el grado de penetración</b>	E01	Actualmente la penetración y la viscosidad son utilizadas como principales índices para evaluar el rendimiento del betún en la mayoría de los países del mundo.	<i>La penetración al igual que la viscosidad, es un índice que permite conocer el comportamiento que tendrá el asfalto. Se obtuvo que el grado de penetración disminuyó con la adición de polímero SBS en el asfalto; es decir, a mayor porcentaje de polímero SBS, se presentará menor valor de penetración en la muestra asfáltica modificada, esto se</i>
	E06	A mayor contenido de polímero SBS, menor grado de penetración.	
	E08	El asfalto modificado con polímero (PMA) SBS presenta valores menores de grado de penetración a comparación del asfalto base.	
	E10	El resultado del ensayo de penetración del asfalto modificado (con alto porcentaje de polímero SBS), presentó menor valor a comparación del asfalto base puro.	
	E16	El aumento en la concentración de polímero SBS condujo a una disminución en el valor del grado de penetración.	
	E27	Las muestras modificadas con polímero SBS experimentan una reducción en la penetración.	



	E31	A medida que aumentó el porcentaje de aditivo, disminuyó el grado de penetración.	<i>debe a la formación de una estructura de red en el ligante causada por la adición de los modificadores y una mejor interacción entre las moléculas del asfalto.</i>	
	E36	La incorporación de polímeros SBS al asfalto mejora las propiedades básicas como la penetración, la cual disminuye.		
	E38	Se observó una disminución en el grado de penetración a causa de la adición de polímero SBS al asfalto.		
	E42	La adición de modificador SBS al asfalto conlleva a una disminución en la penetración respecto al asfalto base.		
	E43	A mayor temperatura, el grado de penetración aumenta; al comparar dos muestras de asfalto, si se exponen a temperaturas de más de 30 °C , entonces se notarán diferencias grandes en sus grados de penetración.		
	E48	La adición de modificadores al asfalto afecta considerablemente a la penetración del betún original; esta disminuye en un 19,4 % debido a la formación de una estructura de red en el ligante, causada por la adición de modificadores y una mejor interacción que se produce entre las moléculas del asfalto.		
	E08	La penetración permite cuantificar la consistencia del asfalto; una menor consistencia indica que el valor de penetración es alto.		<i>La penetración es un indicador de consistencia del asfalto, es decir si el ligante es más duro o blando. Al adicionar polímero SBS en el material bituminoso, se reduce el grado de penetración; lo que indica un aumento en la viscosidad del asfalto, debido a que el modificador absorbe los componentes livianos del asfalto base y la estructura se vuelve más resistente.</i>
	E09	Se evidencio una disminución en el grado de penetración, lo que indica una mayor consistencia del material.		
E11	La penetración permite medir la consistencia del asfalto; es decir, si es un asfalto duro o blando.			
E15	A medida que aumentaba el contenido de polímero SBS, las tasas de penetración en el fondo de las muestras disminuían y; por lo tanto, incrementaban su consistencia.			
E19	La penetración es un indicador de la consistencia del asfalto.			
E27	Las muestras modificadas con polímero SBS experimentan un aumento considerable en la viscosidad.			
E31	El grado de penetración ayuda a determinar la consistencia del asfalto.			

**Consistencia y Viscosidad**

	E36	Las propiedades viscoelásticas del asfalto mejoraron con la adición de SBS, debido a que el tamaño de las partículas del polímero (10 $\mu m$ ) hace más viscoso al material.	
	E38	Un valor de penetración más alto indica una consistencia más suave del aglutinante; a mayor valor de penetración, menor consistencia.	
	E42	El asfalto al tener una viscosidad mayor se vuelve más resistente.	
	E44	La penetración mide la consistencia que tiene el asfalto, dicha propiedad se vio reducida al adicionarse el polímero al bitumen base, por lo que se evidencio una consistencia más dura.	
	E47	La modificación de un asfalto base convencional trae consigo mejoras significativas en propiedades asociadas a la elasticidad y consistencia; a menor penetración, se tiene asfaltos más consistentes y con menores deformaciones.	
	E48	La adición de modificadores al asfalto afecta considerablemente su viscosidad; la cual aumenta debido a que el modificador absorbe los componentes livianos del asfalto base y la estructura de este se vuelve más resistente al viscosímetro.	
	E10	Al tener un menor grado de penetración se obtiene mejor comportamiento en zonas con altas temperaturas y menor deformación a causa del tráfico.	<i>Al tener un menor grado de penetración, el asfalto tendrá un mejor comportamiento en zonas en donde se presenten altas temperaturas y experimentará menores deformaciones a causa del tráfico. El índice de penetración (IP) es un indicador del grado de susceptibilidad térmica; si se</i>
<b>Susceptibilidad térmica</b>	E11	El índice de penetración indica el grado de susceptibilidad del asfalto frente a altas temperaturas; si tiene un índice positivo es menos sensible al calor y si tiene un índice negativo, es más susceptible. El asfalto modificado tiene un índice de penetración positivo; mientras que el asfalto base, un índice negativo.	

	E26	El asfalto modificado reciclado con SBS tiene una mayor eficacia frente a bajas temperaturas, así como mejores propiedades elásticas.	<i>tiene un índice de penetración positivo, el material será menos sensible frente a altas temperaturas y si se tiene un IP negativo, será más susceptible.</i>
	E42	La elección del polímero elastómero SBS como modificador bituminoso ofrece un comportamiento mejorado frente a las cargas y a la susceptibilidad a temperaturas altas y bajas; lo que lo hace resistente al ahuellamiento.	
	E46	El polímero SBS incorporado en el aglutinante genera un enfoque positivo en cuanto a la aceleración del fenómeno de relajación y a la susceptibilidad a la temperatura.	
<b>Dureza y Rigidez</b>	E08	Al tener el asfalto modificado con polímero (PMA), un menor valor de penetración significa que se tiene un incremento en la dureza y una mayor rigidez del material.	<i>La prueba de penetración refleja la rigidez del asfalto; es decir, al tener un menor valor de penetración, se tiene un asfalto con mayor dureza y rigidez.</i>
	E09	A mayor contenido de polímero SBS, se tiene menor penetración y por lo tanto mayor dureza.	
	E10	Un menor resultado de ensayo de penetración indica que el material es más rígido.	
	E13	La prueba de penetración refleja la rigidez de un asfalto.	
	E42	Al reducirse la penetración se vuelve un asfalto más rígido.	
<b>Durabilidad y Vida útil</b>	E22	Al verse reducido el grado de penetración del asfalto aumenta la viscosidad (más resistente y menos riesgo a fracturarse a altas temperaturas); por lo que, se incrementa el periodo de diseño del pavimento y se alargara su tiempo de vida útil.	<i>Al reducirse la penetración en el asfalto, este se vuelve más resistente y con menos riesgo de fracturarse; por lo que, se incrementa el periodo de diseño del pavimento y se alargara su vida útil.</i>
<b>Adherencia</b>	E42	La elección del tipo de polímero elastómero SBS como modificador bituminoso posee una influencia positiva en la mejora de las propiedades físico - mecánicas de la mezcla, debido a la generación de reacciones entre iones de forma superficial cuando se encuentran en una fase caliente, incrementando la capacidad de adherencia de la materia pétreo y el cemento bituminoso.	<i>La incorporación de modificador SBS al asfalto mejora la reacción entre iones cuando este se encuentra en una fase caliente y permite que se adhiera mejor al material</i>

		<i>pétreo, repotenciando así la mezcla asfáltica.</i>
<b>Deformación permanente</b>	E05	Los asfaltos modificados presentan una reducción en la penetración de las muestras iniciales y de vida corta, lo que indica que son menos susceptibles a la deformación permanente.
	E08	Al tener un grado de penetración menor, se tiene un incremento de la resistencia a la deformación del pavimento modificado.
	E13	El punto de ablandamiento y grado de penetración dan una señal para comprender el comportamiento a la formación de surcos de los ligantes y su influencia en el rendimiento general del pavimento.
	E18	La mezcla modificada con polímero SBS presenta mejor desempeño ante la resistencia a la deformación permanente, a comparación de la mezcla asfáltica convencional, garantizando la resistencia al ahuellamiento.
	E27	A menor grado de penetración se incrementa la rigidez y disminuye el ángulo de fase; por lo tanto, la resistencia a la deformación permanente es mayor.
	E31	Al disminuir la penetración, el asfalto modificado tiene una resistencia mucho mejor frente a las deformaciones permanentes a alta temperatura.
	E35	El polímero SBS incrementa el intervalo de plasticidad, por lo que la mezcla tiene una mejor respuesta frente al tipo de falla llamada "deformación permanente", debido a que mejora su elasticidad.
	E36	Cuando aumenta el contenido de polímero SBS en el asfalto, se presenta una mayor adhesión de los agregados y resistencia al ahuellamiento.
	E47	La modificación de un asfalto base convencional trae consigo mejoras significativas en propiedades asociadas a la susceptibilidad frente a las deformaciones permanentes.

*La penetración es uno de los indicadores para comprender el comportamiento de los ligantes frente a la formación de surcos y su influencia en el rendimiento general del pavimento flexible; es decir, mientras menor sea la penetración, mayor va a ser la resistencia frente a las deformaciones permanentes a elevadas temperaturas. La mezcla modificada tiene un mejor comportamiento frente a este fenómeno, a comparación del ligante convencional; lo que garantiza una resistencia mayor frente al ahuellamiento, debido a que permite una mejor adhesión de los agregados en el pavimento flexible.*

**Estabilidad de almacenamiento**

E15	<p>La separación entre las fases rica en polímero y rica en betún durante el almacenamiento y el transporte, es uno de los problemas más predominantes del asfalto modificado con polímero SBS.</p> <p>En la prueba de estabilidad de almacenamiento, las tasas de penetración obtenidas de la parte superior de las muestras fueron mayores a las obtenidas del fondo, además que a medida que aumentaba el contenido de modificador SBS, las tasas de penetración en el fondo de las muestras disminuían; lo contrario sucedió en la parte superior, esto quiere decir que a medida que aumenta la dosificación se incrementa la desintegración entre polímero y asfalto.</p> <p>A mayor porcentaje de SBS, la diferencia entre los valores de grado de penetración y punto de ablandamiento de la parte superior e inferior aumenta, lo que hace que el asfalto sea menos estable. La muestra con 5 % de SBS presentó la peor estabilidad.</p>	<p><i>Uno de los problemas más perjudiciales en los asfaltos es la separación entre las fases rica en polímero y rica en betún; esto sucede durante el almacenamiento y transporte del material. En la prueba de estabilidad se tuvo que a medida que el contenido de SBS aumenta, la desintegración de polímero y asfalto se incrementa; a mayor diferencia entre valores de penetración de la parte superior e inferior de la muestra, mayor es la inestabilidad del material. Se recomienda no utilizar más del 7 % de polímero en el asfalto, ya que se puede experimentar separación de fases.</i></p>
E18	<p>La mezcla modificada con polímero SBS presenta un mejor desempeño de estabilidad a comparación de la mezcla convencional, esto se debe a que produce mayor cohesión y adhesividad.</p>	
E38	<p>Se recomienda no superar el 7 % de polímero SBS para conservar la estabilidad en la mezcla; ya que, al utilizar mayor dosis de polímero, este puede experimentar una separación de fases.</p>	
E50	<p>La penetración es un indicador para la estabilidad del asfalto; si la diferencia de los valores tomados en la parte superior e inferior de las muestras es mínima o está dentro del rango establecido, entonces la mezcla será estable; es decir, no habrá problemas de separación de fases entre el asfalto y el polímero SBS.</p>	

<b>Daños por fatiga</b>	E18	La mezcla asfáltica modificada presentó mejor desempeño ante la resistencia a la fatiga sin perder rigidez, soportando mayor cantidad de ciclos de carga repetitiva; es por esto que resultó siendo 17 veces mejor en comparación con la mezcla asfáltica convencional.	<i>El grado de penetración es un indicador o parámetro relacionado al comportamiento del asfalto ante los daños por fatiga. La mezcla modificada presentó mejor comportamiento ante la fatiga, lo cual se vio reflejado en la cantidad de ciclos de carga que pudo soportar.</i>
	E30	La propiedad física de grado de penetración es un factor que influye en el rendimiento a la fatiga del asfalto. Se encontró que el aumento del porcentaje de polímero SBS en el asfalto, aumentaron parcialmente los valores de resistencia a la fatiga.	
	E42	Con la adición de polímero SBS en la composición del asfalto, se incrementa la capacidad de soportar periodos de carga más largos sin experimentar deformaciones.	
<b>Envejecimiento</b>	E01	El envejecimiento por radiación ultravioleta (UV) causa la disminución en la penetración y el aumento en el punto de ablandamiento; es decir, el asfalto se vuelve más duro y quebradizo, esto debido a la migración de componentes ligeros (aromático y gelatinosos) del betún a componentes pesados (asfaltenos), lo que origina grietas en la superficie del betún. La humedad acelera el envejecimiento UV del asfalto y, el ácido y la sal aceleran aún más el proceso de corrosión.	<i>El envejecimiento causa una disminución en la penetración del asfalto; es decir, lo hace más duro y quebradizo, debido a la migración de componentes ligeros (aromáticos y gelatinosos) del betún a componentes pesados (asfaltenos), lo que origina grietas en la superficie; sin embargo, con la adición de polímero SBS, se presenta mayor resistencia al envejecimiento.</i>
	E05	La adición de modificadores redujo el grado de penetración, tanto antes como después del envejecimiento en RTFOT, lo que indica que los asfaltos modificados se volvieron más rígidos que los asfaltos vírgenes.	
	E26	El grado de penetración se reduce considerablemente cuando la mezcla de asfalto modificada con polímero SBS ha sufrido un proceso de envejecimiento.	
	E27	Las muestras modificadas con polímero SBS tuvieron una mayor resistencia a la fatiga.	

	E33	El proceso de envejecimiento influye de manera notable en los ligantes con polímero SBS, pues se ve evidenciado mediante la reducción de las propiedades como la penetración y la ductilidad.	
	E36	Con el aumento de polímero SBS, se presenta una alta resistencia al envejecimiento.	
<b>Rejuvenecimiento</b>	E23	Cuando a un asfalto envejecido modificado con polímero SBS, se le aplica un mayor porcentaje de rejuvenecedor, la penetración se incrementa.	<i>El grado de penetración es mayor en mezclas envejecidas modificadas con polímero SBS que sufrieron proceso de rejuvenecimiento.</i>
<b>Agrietamiento</b>	E01	En términos de agrietamiento, la resistencia al envejecimiento del betún modificado es mejor que la del asfalto virgen.	<i>En términos de agrietamiento, la resistencia del betún modificado es mejor que la del betún virgen; es decir, experimentan una mayor resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas.</i>
	E16	Los pavimentos modificados con polímero SBS experimentan una mayor resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas.	
	E35	Al reducirse la rigidez de la mezcla de asfalto, se reduce el peligro de que se produzca falla por agrietamiento.	
	E46	La incorporación de polímero SBS como modificador optimiza la capacidad de relajación del betún a bajas temperaturas; esto es importante, pues ayuda a la prevención de la tensión acumulada en las capas de asfalto del pavimento, sobrepasando la resistencia al agrietamiento a baja temperatura.	

**Nota:** En la presente tabla se muestran los aportes teóricos obtenidos de los estudios citados, respecto a la influencia de la variación del grado de penetración en los pavimentos flexibles.

## CAPITULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1 Discusión

#### 4.1.1 *Respuesta a la pregunta de investigación*

Luego de haber realizado la revisión documentaria de los estudios relacionados al punto de ablandamiento y grado de penetración en el asfalto modificado con polímero SBS, para pavimentos flexibles en el mundo 2021, se dio respuesta a la pregunta de investigación planteada. Es decir, se logró validar la hipótesis, debido a que la investigación ejecutada permitió conocer el comportamiento de ambas variables de estudio, luego de haberse realizado la modificación con polímero SBS; así como, el impacto causado por dicha variación, en las demás propiedades del asfalto modificado.

Con la presencia del modificador, el punto de ablandamiento experimentó variaciones positivas de entre 5,34 % y 107,75 % ; mientras que el grado de penetración disminuyó en hasta -60,57 % . Ambas tendencias de comportamiento se evidenciaron de forma marcada, con algunos casos aislados a causa de lo descrito en las limitaciones de estudio. Estos comportamientos son explicados por Behnood y Modiri (2018), quienes mencionan que la estructura de los polímeros SBS, está conformada por regiones de poliestireno (PS) vítreo, que se entrelazan por segmentos de polibutadieno (PB) gomosos. Al ser sometidos a elevadas temperaturas, los PS se ablandan, por lo que se debilitan los enlaces y el polímero se torna procesable; así mismo, mencionan que luego de modificar el asfalto con SBS, los PS y PB tienen un comportamiento reológico nuevo, el cual es condicionado por: la naturaleza y transición vítrea del aceite, la estructura molecular del modificador y la relación polímero/aceite.

Además, los autores citados explican que se da la interacción entre los electrones de los PB y los grupos funcionales del asfalto cargados de forma positiva; mientras que los protones



aromáticos de los PS interactúan con los grupos electrónicos del bitumen, esto origina una red tridimensional, en la que los bloques de poliestireno se desempeñan como enlaces cruzados físicos y dan mayor fortaleza al sistema. Los bloques de PS aumentan la resistencia a la tracción a temperaturas elevadas; mientras que los PB gomosos son causantes de la elasticidad, resistencia a la fatiga y flexibilidad a bajas temperaturas.

Todo lo antes mencionado fue producto del análisis de estudios retrospectivos y la clasificación de la información extraída, haciendo uso de los instrumentos adecuados, lo cual garantizó la exposición correcta y detallada de los resultados. Las variaciones del punto de ablandamiento y grado de penetración se muestran en las tablas n.º 14 y 17; mientras que el impacto causado por estas variaciones, en las tablas n.º 16 y 19.

#### ***4.1.2 Interpretación de cada resultado mostrado***

##### **4.1.2.1 Resultado del ensayo de punto de ablandamiento.**

Existen diversas pruebas definidas a lo largo del tiempo, que son aplicadas para evaluar el comportamiento de cada una de las propiedades de los diversos materiales. Cuando los cementos asfálticos son sometidos a temperaturas elevadas van cambiando gradualmente su estado físico, tornándose más blandos y menos viscosos; este comportamiento es evaluado con el ensayo de punto de ablandamiento, el cual se rige a los lineamientos descritos en la normativa ASTM D36, explicada en el ítem n.º 1.3.1.1.

En la tabla n.º 14, se plasmaron los resultados referentes a la variación del punto de ablandamiento en los asfaltos modificados con polímero SBS; los cuales fueron obtenidos a través de los ensayos ejecutados por los autores en referencia, dependiendo del porcentaje de modificador aplicado a su composición. En los distintos tipos de betunes, con las diferentes dosificaciones de polímero SBS estudiadas, se obtuvieron variaciones positivas desde 5,34 % a 107,75 % ; es decir, al aplicarse el modificador en la estructura del asfalto base, su punto de

ablandamiento aumentó, lo que evidenció una mejora en propiedades como la trabajabilidad, adherencia, viscosidad, susceptibilidad térmica, entre otros. Esta tendencia de comportamiento tuvo un caso aislado en donde no se sufrió variación, debido a las causas descritas en las limitaciones del estudio y al escaso contenido de modificador.

Así mismo, en la figura n.º 36 se grafica un histograma que representa la forma de distribución de los datos correspondientes a la muestra estadística evaluada (tabla n.º 14); en donde la altura de las barras dependió de la frecuencia de los datos, ubicada en el eje Y; en tanto en el eje X, se puede observar la variación del punto de ablandamiento. La mayoría de las variaciones obtenidas se muestran frecuentemente ubicadas cerca al 41,47 % , que de acuerdo con los parámetros estadísticos calculados, viene a ser la “media” y tiene un error estándar de 3,45 % debido a la cantidad de muestras (63) que fueron evaluadas. Además, en la figura n.º 37 se grafica un diagrama de dispersión, en el cual se evidencian las variaciones positivas (incremento) de la propiedad de punto de ablandamiento en presencia del polímero SBS en el asfalto; siendo la mínima variación la de 0 % y la máxima de 107,75 % .

La optimización en el comportamiento de la variable analizada y de algunas propiedades (físicas y mecánicas) que guardan relación con esta, se produce debido a las interacciones que ocurren entre las partículas presentes en la composición de los polímeros y en el asfalto base, durante el proceso de modificación. Dichas interacciones, según Behnood y Modiri (2018), dan como resultado una mejora en las propiedades relacionadas a la resistencia a la tracción, resistencia frente a elevadas y bajas temperaturas, elasticidad, resistencia a la fatiga, etc.

Si bien es cierto, en la mayoría de los resultados se ve un aumento en el valor del punto de ablandamiento del bitumen modificado respecto al asfalto base utilizado, Polacco, Filippi, Mesuri y Stastna (2015) afirman que no es posible obtener una “tendencia” universal, debido

al alto número de variables que influyen en las interacciones asfalto/polímero; las cuales son: la variabilidad en la composición del asfalto, características y contenido del polímero, instrumento de mezclado, etc.

#### **4.1.2.2 Resultado de la matriz de categorización del punto de ablandamiento.**

En gran parte de las investigaciones citadas se pudo observar un aumento en el valor del punto de ablandamiento de los bitúmenes ensayados, paralelamente proporcional con el aumento de dosificación de modificador SBS en su composición. Rodrigues (2020) afirma que el SBS es un material con un punto de fusión más alto que el ligante asfáltico base y que al fundirse se genera una combinación entre los componentes de ambos productos, que advierte un aumento de la temperatura de ablandamiento; es decir, probablemente se presente una menor susceptibilidad térmica a causa de enlaces químicos más largos generados durante la modificación, que elevan la temperatura requerida para el flujo. Además, el autor hace énfasis en que estos materiales son indicados para emplearse en lugares que experimentan elevadas temperaturas y que pueden verse agravadas por efectos de cargas excesivas.

En los resultados obtenidos y plasmados en la tabla n.º 16, los autores afirman que al incrementar el punto de ablandamiento, trae consigo el aumento de la viscosidad y consistencia del bitumen. Este fenómeno, según Singh, Chopra, Kamotra, Jain y Kaur (2019) se produce debido a que el modificador absorbe los componentes livianos del asfalto base y su estructura se hace más resistente. La viscosidad fue definida por Rondón y Reyes (2015) como la resistencia que tiene un material a fluir sobre una superficie y su inversa es la característica denominada “fluidez; es decir, mientras más viscoso sea un material, más difícil será que fluya, lo que resulta beneficioso para los pavimentos flexibles porque garantiza resistencia a las altas temperaturas solares.

Como se viene mostrando, el punto de ablandamiento es un indicador que grafica la reacción del bitumen al ser sometido a altas temperaturas, cuando esta variable se relaciona con el grado de penetración, se genera un índice de susceptibilidad térmica (IP), al que la Universidad de Piura (s.f) define como el valor que mide la sensibilidad del bitumen a variar su viscosidad en presencia del calor. Teniendo en cuenta los aportes de los autores citados, se puede afirmar que con la presencia de polímero en la composición del bitumen, el punto de ablandamiento se incrementa, indicando una susceptibilidad térmica menor; lo cual evidencia que el ligante asfáltico tiene un comportamiento adecuado cuando es expuesto al calor. La idea mencionada es reforzada por Zambrano (2018), quien explica que un pavimento ideal debe ser flexible a bajas temperaturas y menos susceptible a altas temperatura y; que una elevada susceptibilidad térmica causa problemas de fisuramiento en el pavimento, porque tiene una elevada rigidez.

Así mismo, se pudo observar que propiedades como la dureza, rigidez y deformación permanente del asfalto, también mejoran cuando se tiene un valor mayor de punto de ablandamiento a causa de la presencia del polímero SBS. En párrafos anteriores se viene reforzando la idea de que en condiciones de elevadas temperaturas, el asfalto modificado se comporta mejor que el betún base. Swamy, Rongali y Jain (2017) explican que el modificador tiene la capacidad de aportar mayor rigidez frente a altas temperaturas para impedir el ahuellamiento, además de controlar el aumento del módulo de rigidez a bajas temperaturas, con el fin de evitar el agrietamiento; lo cual resulta ventajoso, ya que Zambrano (2018) manifiesta que las temperaturas frías ocasionan el deterioro de las capas asfálticas y posterior fisuramiento por acción de la dilatación y contracción térmica, causada por el aumento de la rigidez en conjunto con el tráfico.

Respecto a las deformaciones permanentes, el aumento del punto de ablandamiento es un indicador de resistencia frente a estos fenómenos. Krishna (2017) sostiene que al adicionar modificadores a la estructura del betún, este experimenta un aumento en su elasticidad, por lo que dichas mezclas brindan mayor resistencia a la formación de surcos a altas temperaturas y flexibilidad a temperaturas medias o bajas; es decir, tienen un mejor comportamiento frente a las “deformaciones permanentes”.

Con el transcurrir del tiempo, los pavimentos flexibles van envejeciendo debido a los factores a los que son expuestos; es por esto, que se realizan ensayos que simulan estas condiciones. Batista, Barbosa y Aguiar (2015) refieren que luego del envejecimiento, el punto de ablandamiento experimenta un incremento escaso, revelando así una menor sensibilidad de la mezcla a envejecer. De todas formas, el asfalto se vuelve más duro y quebradizo al experimentar este proceso, que según Wei, Bai, Qian, Wang, Li, Jim y Zhang (2019), es causado por la migración de los componentes ligeros (aromáticos y gelatinosos) del betún hacia los componentes pesados (asfaltenos), lo que origina grietas en el pavimento; además, afirma que la humedad acelera el envejecimiento por radiación ultravioleta (UV) y, que el ácido y la sal aceleran el proceso de corrosión.

Por otro lado, respecto al rejuvenecimiento, Chen, Wang, Zhang, Liu, Tong y Zhao (2020) sostienen que la aplicación de un rejuvenecedor a un asfalto envejecido causa un incremento en su punto de ablandamiento, dando indicios de que su rigidez también se reduce. Según lo detallado previamente, se puede decir que tanto los procesos de envejecimiento como los de rejuvenecimiento, tienen influencia sobre el comportamiento y los valores de penetración y, a su vez sobre las propiedades abordadas debido a la relación directa existente entre ellas y la variable de estudio mencionada.

#### 4.1.2.3 Resultado del ensayo de grado de penetración.

El grado de penetración, el cual se expresa en décimas de milímetro (dmm), se obtiene siguiendo los lineamientos descritos en la normativa ASTM D5 explicada en el ítem n.º 1.3.1.2. y, su resultado indica el grado de dureza o blandura del material bituminoso. Según Múnera y Ossa (2014), la penetración tiene un comportamiento inverso al grado de dureza del asfalto; es decir, si la penetración disminuye, la dureza en el betún aumenta. Así mismo, los autores citados, afirman que los bitúmenes que tienen un grado de penetración inferior a 30 dmm, son considerados como asfaltos “duros”; lo cual origina que el pavimento al que constituyen, presente mejores propiedades de durabilidad, sea más resistente a las sollicitaciones vehiculares, entre otros beneficios.

En la tabla n.º 17, se mostraron los resultados correspondientes a la variación del grado de penetración de los asfaltos ensayados en las diversas investigaciones citadas y, que fueron ordenados teniendo en consideración el contenido de modificador SBS aplicado. En los distintos tipos de betunes base, con diferentes dosificaciones de polímero SBS estudiadas a nivel mundial, se obtienen variaciones negativas de hasta -60,57 % ; es decir, la modificación de asfaltos conlleva a una reducción en la penetración, este comportamiento permite confirmar una mejora en propiedades como la durabilidad, agrietamiento, resistencia a daños por fatiga, entre otros. Esta tendencia de comportamiento no se evidenció en algunos casos aislados, debido a razones que fueron descritas y explicadas en las limitaciones del estudio.

De igual forma, en la figura n.º 38 se muestra un histograma que evidencia la distribución de los datos correspondientes a la muestra estadística analizada (tabla n.º 17); en donde la altura de las barras dependió de la frecuencia de los datos, situada en el eje Y; en tanto en el eje X, se puede observar la variación del grado de penetración. La mayoría de las variaciones obtenidas se muestran frecuentemente ubicadas cerca al -15,95 % , que de acuerdo

con los parámetros estadísticos calculados, viene a ser la “media” y tiene un error estándar de 2,86 % debido al número de muestras (58) que fueron analizadas. Además, en la figura n.º 39 se muestra un diagrama de dispersión, en el cual se observan mayoritariamente variaciones negativas (disminución) de la propiedad de grado de penetración en los asfaltos modificados con polímero SBS; siendo la mínima variación la de -60,57 % y la máxima de 52,75 %

Las conductas antes descritas son explicadas por Behnood y Modiri (2018), como una reacción que se da entre las moléculas del modificador juntamente con las del asfalto base. Las regiones de poliestireno y polibutadieno que forman el polímero interactúan con las partículas del asfalto, originando así una red tridimensional, en la que los bloques de poliestireno se desempeñan como enlaces cruzados firmes que dan fortaleza al sistema y aumentan la resistencia; mientras que el polibutadieno potencia la elasticidad.

#### **4.1.2.4 Resultado de la matriz de categorización del grado de penetración.**

El grado de penetración es una de las propiedades fundamentales de los asfaltos, Wei et. al (2019) sostienen que en la actualidad, la penetración y la viscosidad son utilizadas como índices principales para evaluar el betún en la mayoría de los países del mundo. Con la presente investigación, se pudo conocer que en la mayoría de los estudios realizados, se evidenció una disminución en el valor del grado de penetración de los asfaltos ensayados, conforme aumentó la dosificación de polímero SBS en su estructura; lo cual resulta ventajoso, debido a que según los aportes teóricos recolectados a nivel mundial y mostrados en la tabla n.º 19, esto conlleva a la reducción de la susceptibilidad térmica, una mejor consistencia, mayor dureza, etc. La influencia positiva en los pavimentos flexibles, causada por el potenciamiento de dichas propiedades, ya fue explicada con anterioridad.

Según los autores citados, la disminución en el valor de la penetración trae consigo un incremento en la dureza y viscosidad del material; lo que los hace más resistentes, con menos

riesgo a fracturarse y alarga su vida útil. De acuerdo con He et. al (2018), este comportamiento se debe a la formación de una estructura de red más fuerte en el asfalto, originada por la presencia del modificador, el cual mejora la interacción entre las moléculas del betún, además de absorber los componentes livianos y formar una estructura de red más resistente.

Así mismo, se pudo observar que al reducirse la penetración, la susceptibilidad térmica fue más baja. Velásquez (2016) explica que al aumentar la temperatura del asfalto, se debilitan las fuerzas que unen sus moléculas y por esto la viscosidad disminuye; por lo cual, su evaluación a diferentes temperaturas da una idea de la susceptibilidad térmica del material. El autor también define a la susceptibilidad térmica, como la sensibilidad que experimenta el betún a variar su viscosidad al ser sometido a altas temperaturas; además, indica que esta debería ser lo más baja posible, sin que el asfalto llegue a convertirse en un sólido quebradizo en presencia de frío (agrietamiento), ni en un líquido relativamente viscoso al ser sometido al calor. Teniendo en cuenta lo mencionado con anterioridad, se puede afirmar que, al verse una reducción en el grado de penetración, se garantiza un buen comportamiento del material al ser expuesto al calor.

Por otro lado, los autores manifestaron que con el acrecentamiento del grado de penetración, la rigidez incrementa, así lo sostiene López y Puma (2017), quien indica que al presentarse un valor de penetración menor, significa que existe un endurecimiento en el material modificado y un aumento en su rigidez. A lo que Rodrigues (2020) agrega, que una mayor rigidez conlleva a una resistencia superior frente a las deformaciones permanentes, a la generación de surcos, entre otros; por lo tanto, se puede afirmar, que el reducido grado de penetración evidencia un buen comportamiento frente a las deformaciones permanentes.

Como se explicó anteriormente, los pavimentos flexibles envejecen debido a factores meteorológicos, exposiciones a cargas, etc. Según los aportes citados, la penetración disminuye



luego del envejecimiento, lo que evidencia que la rigidez del asfalto se incrementa. Este fenómeno fue explicado por Wei et. al (2019), quien afirma que es causado debido a la migración de los componentes ligeros (aromáticos y gelatinosos) del asfalto, hacia los componentes pesados (asfaltenos), desencadenando grietas en el pavimento, producidas por la rigidez que adquiere el material.

Respecto al rejuvenecimiento, Chen et. al (2020) sostienen que la aplicación de un rejuvenecedor a un asfalto envejecido causa una disminución en su grado de penetración, dando indicios de que su rigidez también se reduce. Según lo detallado previamente, se puede decir que tanto los procesos de envejecimiento como los de rejuvenecimiento, tienen influencia sobre el comportamiento y los valores de penetración y, a su vez sobre las propiedades abordadas debido a la relación directa existente entre ellas y la variable de estudio mencionada.

### ***4.1.3 Comparación de antecedentes***

#### **4.1.3.1 Antecedente n.º 1.**

##### **“Caracterización de mezclas asfálticas en caliente, elaboradas con el uso de cemento asfáltico modificado con polímero SBR y SBS”**

En la presente investigación se tiene como parte de los objetivos, analizar el comportamiento del punto de ablandamiento y del grado de penetración en las mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS en el mundo 2021. Para lo cual, se tiene como antecedente el estudio realizado por Borja y Cárdenas (2019), quienes hallaron que para la mezcla modificada con polímero SBS al 2 % ; 3 % y 4 % , los valores de punto de ablandamiento aumentan con relación a la mezcla base en 28,78 % ; 33,98 % y 42,65 % respectivamente; mientras que las cifras correspondientes a la penetración disminuyeron en -10,45 % ; -20,9 % y -37,31 % .

Luego de analizar el comportamiento del punto de ablandamiento en las mezclas asfálticas modificadas se obtuvieron los siguientes resultados, provenientes de los ensayos realizados por los autores consultados: con 2 % de adición de polímero SBS, las variaciones fueron de 28,57 % ; 38,01 % ; 7,85 % ; 17,39 % y 13,04 % ; para mezclas con el 3 % , de 46,94 % ; 47,06 % ; 28,26 % ; 14,58 % ; 55,44 % ; 15,38 % ; 5,37 % y 24,94 % y; para modificaciones con el 4 % , de 14 % ; 61,22 % ; 13,03 % ; 16,40 % ; 43,48 % ; 74,69 % y 57,32 % .

Así mismo, al evaluar el comportamiento del grado de penetración para las mezclas asfálticas con dosificación del 2 % de SBS, las variaciones fueron de -15,38 % ; -16,08 % ; -10,14 % ; -14,16 % y 7 % ; para modificaciones al 3 % , de -32,31 % ; -25,94 % ; -30,97 % ; -30,88 % ; -18,68 % ; -23,08 % y 16,67% y; para concentraciones al 4 % , de -5,13 % ; 9,68 % ; -21,78 % ; -35,38 % ; 27,82 % ; -10,14 % ; -30,97 % ; -17,94 % y -35,48 % .

Poniendo en contraste los datos del antecedente y los resultados de esta investigación, se evidencia que en algunos casos, las variaciones son mínimas y en otros son más notorias. Estas variaciones halladas entre los valores obtenidos pueden darse debido al tipo de asfalto base y polímero SBS utilizados en cada estudio, además de las diferencias de las condiciones ambientales en las que se realizaron los ensayos, dado que es una investigación a nivel mundial. Esta idea es reforzada por Behnood y Modiri (2018), quienes señalan que las propiedades del asfalto modificado se ven considerablemente influenciadas por las condiciones presentadas en el proceso de mezclado; además mencionan, que el polímero debe ser lo suficientemente compatible con el asfalto para obtener una mezcla homogénea, que permita tener las características deseadas y minimizar el fenómeno de separación de fases durante la etapa de almacenamiento, transporte, aplicación y servicio. Sin embargo, según los resultados

alcanzados, es evidente que se mantiene la tendencia del incremento de los valores del punto de ablandamiento y la disminución de los valores del grado de penetración.

#### **4.1.3.2 Antecedente n.º 2.**

##### **“Caracterización de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y RET, mediante determinación del módulo de rigidez”**

Los resultados encontrados en el presente estudio guardan relación con los hallazgos presentados en el antecedente de López y Puma (2017), quienes indicaron que al ensayar la muestra de mezcla asfáltica modificada con SBS al 2 % ; 3 % y 4 % , se obtuvieron los siguientes valores: en el punto de ablandamiento hubo un aumento respecto a la mezcla base del antecedente en 28,57 % ; 46,94 % y 61,22 % , respectivamente; mientras que los valores del grado de penetración disminuyeron en -15,38 % ; -32,31 % y -35,38 % .

Luego de evaluar el comportamiento del punto de ablandamiento en las mezclas asfálticas modificadas se obtuvieron los siguientes resultados, provenientes de los ensayos realizados por los autores consultados: con 2 % de adición de polímero SBS, las variaciones fueron de 28,78 % ; 38,01 % ; 7,85 % ; 17,39 % y 13,04 % ; para mezclas con el 3 % , de 33,98 % ; 47,06 % ; 28,26 % ; 14,58 % ; 55,44 % ; 15,38 % ; 5,37 % y 24,94 % y; para modificaciones con el 4 % , de 14 % ; 42,65 % ; 13,03 % ; 16,40 % ; 43,48 % ; 74,69 % y 57,32 % .

Del mismo modo, al analizar el comportamiento del grado de penetración para las mezclas asfálticas con dosificación del 2 % de SBS, las variaciones fueron de -10,45 % ; -16,08 % ; -10,14 % ; -14,16 % y 7 % ; para modificaciones al 3 % , de -20,90 % ; -25,94 % ; -30,97 % ; -30,88 % ; -18,68 % ; -23,08 % y 16,67% y; para concentraciones al 4 % , de

-5,13 % ; 9,68 % ; -21,78 % ; -37,31 % ; 27,82 % ; -10,14 % ; -30,97 % ; -17,94 % y -35,48 % .

Por otro lado, este antecedente muestra que a mayor punto de ablandamiento y menor grado de penetración, la mezcla tendrá una mayor consistencia y viscosidad; además, ambas variables de estudio influyen en la susceptibilidad térmica del bitumen y su capacidad de resistir a las deformaciones permanentes, causada por la mejora de su elasticidad. Los resultados del análisis realizado en la presente investigación, basada en la opinión de otros autores, sostienen y refuerzan dicha idea. Así mismo, se evidencia una relación existente entre el porcentaje de modificador SBS utilizado en la mezcla y los valores de las variables de estudio; dado que, en la mayoría de los casos sucedió que a mayor porcentaje de polímero utilizado, mejor desempeño se observó en estas propiedades.

Las diferencias entre los resultados del antecedente y los de la presente revisión, se producen debido al tipo de asfalto base y polímero SBS utilizados en cada investigación. Se entiende que al tratarse de estudios realizados en diversas partes del mundo, se emplearon bitúmenes base con características diferentes y de distintos orígenes o fabricantes; lo cual influye directamente en los valores de las propiedades físicas del asfalto.

#### **4.1.3.3 Antecedente n.º 3.**

**“Temperature Sensitivity Characteristics of SBS/CRP-Modified Bitumen after Different Aging Processes.”.**

Según el antecedente de He et. al (2018), al ensayar la mezcla de asfalto con 4,5 % de polímero SBS, la variación en el incremento del punto de ablandamiento respecto a la del asfalto base que experimentó fue de 61,35 % y, la variación descendiente del grado penetración fue de -21,56 % . En los resultados obtenidos del análisis de datos realizado con la presente investigación, se muestra que al analizar el comportamiento del punto de ablandamiento con

porcentajes de 4,5 % de modificador, se obtuvieron incrementos de 19 % ; 67,01 % ; 5,71 % ; 21,28 % ; 65,61 % y 43,11 % , dependiendo del tipo de polímero SBS y asfalto base utilizados. Por otro lado, al analizar el comportamiento del grado de penetración para el mismo contenido de SBS, las variaciones fueron de -33,90 % ; -9,84 % ; -10,33 % y 25,46 % .

Las variaciones entre los resultados del antecedente y los de este estudio pueden ocasionarse, entre otros motivos, debido a la variedad de tipos de polímeros SBS a nivel mundial, ya que cada fabricante cuenta con sus productos y pueden tener composiciones diferentes a comparación de otro, influenciando directamente en las propiedades físicas, mecánicas y reológicas de la mezcla asfáltica modificada; a esto se le añade, las condiciones climáticas del entorno en el que se ejecutaron los ensayos y el distinto tipo de bitumen base utilizado.

#### **4.1.3.4 Antecedente n.º 4.**

**“Comparison of the Polyethylene and SBS Polymer Modified Bitumen’s Effect – A Case Study”.**

Según el antecedente de Kumar y Satyanarayana (2015), al ensayar una mezcla asfáltica con 1 % ; 2 % y 3 % de polímero SBS, se obtuvieron resultados referentes al comportamiento e influencia de dicho modificador en las propiedades físicas del punto de ablandamiento y el grado penetración. Los resultados numéricos de la revisión documentaria realizada indicaron concordancia con lo hallado en el antecedente.

A pesar de los distintos factores influyentes en los resultados a nivel mundial, los documentos revisados evidenciaron la relación existente entre las variables estudiadas y la propiedad de estabilidad; la cual tiene una tendencia a disminuir conforme se aumenta el porcentaje de modificador SBS. Polacco et. al (2015) explican que la estabilidad de almacenamiento es la compatibilidad a escala macroscópica y uno de los principales requisitos

de los asfaltos modificados. Así mismo, afirma que el punto de ablandamiento y la penetración son indicadores de estabilidad; es decir, si la diferencia entre los valores obtenidos del fondo y de la parte superficial de las probetas es mínima, entonces la mezcla será estable y no habrá problemas de separación entre polímero y asfalto.

Dicho fenómeno es explicado por Behnood y Modiri (2018), quienes sostienen que puede ser producto de las condiciones en el proceso de mezclado, además de la deficiente compatibilidad de la fase polimérica con la fase asfáltica; mencionan también, que el polímero debe ser lo suficientemente compatible con el asfalto para obtener una mezcla homogénea, que minimice el fenómeno de separación de fases en los distintos procesos que experimentaría el asfalto modificado.

#### **4.1.3.5 Antecedente n.º 5.**

##### **“Understanding the low temperature properties of Terminal Blend hybrid asphalt through chemical and thermal analysis methods”**

Los resultados obtenidos del presente estudio sustentan lo que se expone en el antecedente de Lin, Huang, Tang, Xiao y Li (2018) referente a la propiedad de estabilidad de almacenamiento. Los autores mencionados afirman que el punto de ablandamiento y el grado de penetración dan indicios de cómo se comporta la estabilidad, dado que permiten medirla y conocer su estado. Producto de esta revisión documentaria se encontró que a mayor diferencia entre los puntos de ablandamiento y grados de penetración de las muestras ensayadas del fondo y superficie de la probeta, menor estabilidad existirá en la mezcla; esto causado por factores ya antes explicados.

Así mismo, se pudo conocer que Zhu, Lu y Kringos (2016) manifiestan que la separación de fases en el asfalto modificado durante la etapa de almacenamiento y transporte, puede ser resultado de la diferencia de densidades entre sus componentes; además, consideran

que una mezcla es estable cuando la diferencia entre los puntos de ablandamiento no supera los 5 °C . Por otro lado, el autor de este antecedente refuerza lo afirmado, manifestando que esta prueba es de suma importancia para garantizar el correcto estado del material durante el proceso de aplicación en campo; sin embargo, sostiene que en China solo se admiten diferencias de hasta 2,5 °C . Por lo que, Singh et. al (2019) recomiendan no superar la dosificación de 7 % de polímero SBS en los asfaltos modificados para conservar la estabilidad de la mezcla y si se supera este porcentaje, se puede experimentar una separación de fases.

#### **4.1.3.6 Antecedente n.º 6.**

##### **“Comparación del Módulo de Rigidez por Tensión Indirecta utilizando el Método Marshall y Método Superpave de Mezclas Asfálticas con Polímeros SBS”**

Los resultados encontrados en el presente estudio argumentan lo detallado en el antecedente de Aguilar y Valdivieso (2019), quienes señalan que el asfalto modificado con 2,5 % de polímero SBS presentó una variación positiva en el punto de ablandamiento de 30 % con respecto al betún base y, un descendente cambio en el grado de penetración de -32,10 % . Así mismo, afirman que estas variables indican la temperatura a la que el asfalto pierde viscosidad y empieza a fluir, además las definen como un parámetro que permite conocer la susceptibilidad térmica (IP) de la mezcla, debido a que ambas variables tienen relación.

En los resultados numéricos obtenidos del presente estudio se muestra que al analizar el comportamiento del punto de ablandamiento y grado de penetración en los betunes modificados con una dosificación de 2,5 % de polímero SBS, la variación resultante fue de 30,43 % y -20,35 % , respectivamente; mostrando así valores similares y con un comportamiento beneficioso, de acuerdo con lo explicado respecto a las demás propiedades que se ven influenciadas.

Con relación a los resultados de los aportes teóricos de la revisión documentaria, se evidencia que las variables tienen influencia en la determinación de propiedades como la viscosidad, fluencia del asfalto y su índice de susceptibilidad; lo cual está acorde con lo afirmado por los autores del antecedente. Esto reitera la importancia de conocer el comportamiento del grado de penetración y del punto de ablandamiento, a fin de garantizar el buen desempeño de la mezcla asfáltica y sus demás propiedades al estar en servicio.

#### ***4.1.4 Limitaciones de la investigación y aportes del estudio***

La presente investigación se limitó a considerar las fuentes que brinden datos completos que posibiliten analizar los comportamientos de la variable punto de ablandamiento y/o grado de penetración, tanto en los asfaltos modificados con polímero SBS como en los betunes base; esto a fin de que se logró contrastar las variaciones y cambios de comportamiento de las variables estudiadas. Muchos estudios fueron descartados debido a que no presentaron las cifras que grafiquen el comportamiento de las propiedades analizadas de los asfaltos base y/o modificados.

Debido a que el estudio se realizó a nivel mundial, se identificaron diversas clasificaciones y nominaciones para los distintos tipos de cemento asfáltico utilizado en los pavimentos; he allí la dificultad para agrupar correctamente los resultados encontrados, debido a que se desconocen algunas otras propiedades de los asfaltos base que son consideradas para su clasificación. A esto se le suma el hecho de que cada estudio se realizó en distintas zonas del mundo, siendo muy variables las condiciones climáticas, las de ejecución de ensayo, las de procedencia de los materiales, compatibilidad, inestabilidad de almacenamiento, entre otras; lo que explica las variaciones obtenidas del análisis y la existencia de algunos casos particulares que no estuvieron dentro de la tendencia de comportamiento de las variables, evidenciada en la mayoría de las investigaciones citadas.



Pese a las limitaciones encontradas, el presente documento precisa de forma concreta los resultados obtenidos del análisis de estudios retrospectivos a nivel mundial, relacionados con las variables de estudio: grado de penetración y punto de ablandamiento. Mediante los datos obtenidos se pudo evidenciar el comportamiento de dichas propiedades en el asfalto modificado con polímero SBS, lo que permitió conocer parte de la influencia que el modificador ejerce en el betún y, fortalecer el conocimiento y comprensión sobre su uso para mezclas asfálticas utilizadas para la construcción de pavimentos flexibles. Cabe resaltar que este es un tema de investigación de alta importancia en la actualidad, debido a la problemática que presentan los pavimentos comunes y los beneficios alcanzados a través del uso de los polímeros SBS como solución.

#### ***4.1.5 Ubicar resultados en la unidad de estudio***

Los resultados obtenidos del análisis documental realizado mostraron el comportamiento de las variables de estudio en el asfalto modificado con polímero SBS; el cual es empleado como material principal para la construcción de pavimentos flexibles a nivel mundial. Los valores de grado de penetración y punto de ablandamiento de un betún permiten conocer el comportamiento y calidad del material, así como el rendimiento de los pavimentos flexibles durante el servicio y su periodo de vida útil.

#### ***4.1.6 Breve resumen o conclusión de los hallazgos***

Finalmente, teniendo en consideración las limitaciones de estudio expuestas, se concluye que el punto de ablandamiento presentó una tendencia a incrementar, producida por la aplicación del polímero SBS en la modificación de asfaltos; conforme se aumentó la dosificación de modificador, el punto de ablandamiento acrecentó considerablemente. Así mismo, los valores del grado de penetración tienden a disminuir y el efecto fue más notorio a medida que el porcentaje de modificador fue superior. Frente a un mayor punto de

ablandamiento y menor grado de penetración, el betún modificado presenta mejores propiedades y se potencia su desempeño en servicio, siendo más resistente a las deformaciones permanentes, menos susceptible a las elevadas temperaturas, más rígido y viscoso, etc.

## **4.2 Conclusiones**

Se realizó el análisis del punto de ablandamiento y el grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS en pavimentos flexibles, obteniendo resultados positivos en ambos ensayos; los cuales mostraron un mejor comportamiento del nuevo asfalto modificado con SBS.

Se estudió el comportamiento del punto de ablandamiento del asfalto modificado con polímero SBS y se obtuvieron variaciones de entre 5,34 % y 107,75 % ; es decir, dicha propiedad experimentó un incremento en el valor registrado de los asfaltos modificados a comparación de los ligantes base empleados en las fuentes citadas, lo que resulta beneficioso para el comportamiento del asfalto y posteriormente del pavimento flexible.

Se describió el impacto causado por la variación del punto de ablandamiento en el asfalto modificado con SBS, el cual fue positivo en propiedades como: la consistencia, viscosidad, susceptibilidad térmica, dureza, rigidez, resistencia a las deformaciones permanentes, resistencia a los daños por fatiga, entre otros. Esto debido a que, como se explicó con anterioridad, el SBS es un material con un punto de fusión más alto que el asfalto y; al fundirse juntos, se genera una combinación entre sus componentes, que advierte un aumento en la temperatura de punto de ablandamiento a causa de los enlaces químicos más largos generados por la modificación, los mismos que dan mayor fortaleza al sistema y lo hacen más consistente, duro, resistente a las deformaciones permanentes y a altas temperaturas, etc. Por lo que se evidencia la relación entre el comportamiento de la variable estudiada y las otras propiedades del asfalto mencionadas.

Se analizó el comportamiento del grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS y se obtuvieron generalmente variaciones de hasta -60,57 % ; en otras palabras, dicha propiedad experimentó una reducción en el valor conseguido de los asfaltos modificados a comparación de los ligantes base empleados por los autores consultados, lo que es favorable para el comportamiento del asfalto y posteriormente del pavimento flexible.

Se describió el impacto causado por la variación del grado de penetración en el asfalto modificado con SBS, el cual fue beneficioso en propiedades como: la consistencia, susceptibilidad térmica, dureza, resistencia a las deformaciones permanentes, resistencia a los daños por fatiga, entre otros. Esto debido a que, como se mencionó en la discusión, al modificarse el asfalto, las regiones de poliestireno vítreo y polibutadieno del polímero SBS, forman enlaces cruzados que dan mayor resistencia a la estructura del nuevo betún modificado y disminuyen su valor de penetración; lo cual evidencia que el material adquirió mayor dureza, consistencia, resistencia a las deformaciones, etc. Lo antes señalado, explica el impacto causado por el comportamiento de la variable estudiada sobre las propiedades mencionadas con anterioridad.

#### **4.3 Recomendaciones**

Se recomienda a las entidades públicas y privadas de todo el país, realizar futuros estudios experimentales, con el propósito de obtener resultados más precisos acerca del comportamiento de los polímeros SBS en los asfaltos; es decir, ejecutar ensayos para estudiar las propiedades de los asfaltos base modificados con distintos tipos de SBS, ambos de características conocidas y bajo las mismas condiciones; así se podrá obtener una tendencia o una posible gráfica que demuestre una relación entre el porcentaje de modificador SBS en el asfalto y el impacto causado en sus distintas propiedades.

A los Ingenieros especialistas se les recomienda la revisión de mayor variedad de literatura científica relacionada al tema tratado en el presente estudio, ya que se ha demostrado que la modificación de asfaltos con polímero SBS resulta beneficiosa; sin embargo, es necesaria una mayor cantidad de investigaciones que respalden estos hallazgos. Esto, con la finalidad de incentivar al mayor empleo de asfaltos modificados en la construcción de carreteras con pavimento flexible y garantizar su durabilidad.

Se recomienda a futuros investigadores, realizar ensayos en las mismas condiciones climáticas, con las normativas mencionadas y teniendo asfaltos base conocidos para ser modificados con polímeros SBS definidos; todo esto con el objetivo de poder obtener el porcentaje óptimo de modificador en la composición del asfalto, con el que se pueda potenciar al máximo sus propiedades y por ende, realizar diseños de mezclas asfálticas que cumplan con las solicitudes requeridas en servicio.

**CAPITULO V: REFERENCIAS**

- Acosta, K. (2019). *Modificación de la mezcla asfáltica mediante la incorporación de polímeros SBS en la Av. Santa Callao, entre la Av. Naranjal y la Av. Alisos*. [Tesis de pre grado, Universidad Cesar Vallejo]. <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/47921>.
- Aguilar, A. y Valdivieso, D. (2019). *Comparación del Módulo de Rigidez por Tensión Indirecta utilizando el Método Marshall y Método Superpave de Mezclas Asfálticas con Polímeros SBS*. [Tesis de pre grado, Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/20656?mode=full>
- Gómez, M. (2007). *La investigación educativa*. McGRAW-HIL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U. ([https://www.academia.edu/27287685/La\\_Investigaci%C3%B3n\\_Educativa\\_Claves\\_Te%C3%B3ricas\\_Albert\\_G](https://www.academia.edu/27287685/La_Investigaci%C3%B3n_Educativa_Claves_Te%C3%B3ricas_Albert_G))
- Álvarez, L. y Cabrera, E. (2017). *Influencia de la incorporación de partículas de reciclado como agregados en el diseño de mezcla asfáltica*. [Tesis de pre grado, Universidad Privada Antenor Orrego] <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/3595>
- Alsolieman, H., Babalghaith, A., Memon, Z., Al-Suhaibani, A. y Milad, A. (2021). Evaluation and Comparison of Mechanical Properties of Polymer-Modified Asphalt Mixtures. *Polymers 2021*, 13(14), 2282. <https://doi.org/10.3390/polym13142282>
- Ameri, M., Mohammadi, R., Vamegh, M., Molayem., M. (2017). Evaluation the effects of nanoclay on permanent deformation behavior of stone mastic asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 156, 107-113. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.055](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.055)

- American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials. doi: 10.1520/D0113-17
- American Society for Testing and Materials. (2018). Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. doi: 10.1520/D0092-18
- American Society for Testing and Materials. (2020). Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. doi: 10.1520/D0005\_D0005M-20
- American Society for Testing and Materials. (2020). Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). doi: 10.1520/D0036\_D0036M-14R20
- American Society for Testing and Materials. (2015). Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene. doi: 10.1520/D2042-15
- American Society for Testing and Materials. (2021). Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method). doi: 10.1520/D0070-18A
- American Society for Testing and Materials. (2018). Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer. doi: 10.1520/D2171\_D2171M-18
- Arenas, H. (s.f). *Tecnología del cemento asfáltico* (5° ed.). Fa Editores.  
[https://www.academia.edu/28252531/Rugo\\_Le%C3%B3n\\_Arenas\\_Lozano\\_Tecnolog%C3%ADa\\_del\\_cemento\\_asf%C3%A1ltico\\_Segunda\\_edici%C3%B3n](https://www.academia.edu/28252531/Rugo_Le%C3%B3n_Arenas_Lozano_Tecnolog%C3%ADa_del_cemento_asf%C3%A1ltico_Segunda_edici%C3%B3n)
- Bastidas, J. y Rondón, H. (2020). *Caracterización de mezclas de concreto asfáltico*. Universidad Piloto de Colombia.  
<http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/8146>
- Batista, J., Rocha, S., Barbosa, J., y Aguiar, S. (2015). *Avaliação do efeito de ligantes asfálticos modificados com SBS e com argilas organofílicas na resistência à deformação permanente*. Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto 2015, Brasil.

- Behnood, A. y Modiri, M. (2019). Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, 112, 766-791. doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049
- Blogger (18 de mayo de 2014). *Tipos de Fallas en Pavimento Flexible*. <http://fallasenpavimentoflexible.blogspot.com/2014/05/tipos-de-fallas-en-pavimento-flexible.html>
- Borja, S., y Cárdenas, J. (2019). *Caracterización de mezclas asfálticas en caliente, elaboradas con el uso de cemento asfáltico modificado con polímero SBR y SBS*. [Tesis de pre grado, Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/18757>
- Cárdenas, C. y Jara, F. (2013). *Análisis físico-mecánico del cemento asfáltico modificado con caucho industrial*. [Tesis de pre grado, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1529/2/RAE.pdf>
- Carlesso, G., Trichês, G., Melo, J., Marcon, M., Thives, L. y Luz, L. (2019). Evaluation of Rheological Behavior, Resistance to Permanent Deformation, and Resistance to Fatigue of Asphalt Mixtures Modified with Nanoclay and SBS Polymer. *Applied Sciences* 9(13):2697 doi.org/10.3390/app9132697
- Castillo, L. (2005). *Análisis documental* [Archivo PDF]. <https://www.uv.es/macas/T5.pdf>
- Chen, X., Wang, J., Zhang, X., Liu, H., Tong, J. y Zhao, R. (2020). Evaluating the Physical and Rheological Properties of Rejuvenated Styrene-Butadiene-Styrene-Modified Asphalt Binders. *Advances in Materials Science and Engineering* 2020(2), 1-14. doi:10.1155/2020/4513824

- Chen, B., Dong, F., Yu, X. y Zheng, C. (2021). Evaluation of Properties and Micro-Characteristics of Waste Polyurethane/Styrene-Butadiene-Styrene Composite Modified Asphalt. *Polymers* 2021, 13, 2249. <https://doi.org/10.3390/polym13142249>
- Clausó, A. (1993). Análisis documental: el análisis formal. *Revista General de Información y Documentación*, 3(1), 11-19. [Archivo PDF]. <https://revistas.ucm.es/index.php/RGID/article/view/RGID9393120011A>
- Delbono, H. y Rebollo, O. (2017). *Ahuellamiento en pavimentos asfálticos utilizando geosintéticos* [Archivo PDF]. <https://docplayer.es/199045068-Ahuellamiento-en-pavimentos-asfalticos-utilizando-geosinteticos.html>
- Diccionario Geotecnia (18 de julio de 2021). *Corrugación*. <https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/corrugacion/>
- Diccionario Geotecnia (18 de julio de 2021). *Exudación de asfalto*. <https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/exudacion-de-asfalto/>
- Docplayer. (s.f). *Compactadores compactos CB34 CB34 XW. Compactador mixto compacto CC34*. <https://docplayer.es/63067593-Compactadores-compactos-cb34-cb34-xw-compactador-mixto-compacto-cc34.html>
- Domenech, J. (s.f). *Diagrama de correlación - dispersión* [Archivo PDF]. [http://www.jomaneliga.es/PDF/Administrativo/Calidad/Diagrama\\_Correlacion\\_Dispersion.pdf](http://www.jomaneliga.es/PDF/Administrativo/Calidad/Diagrama_Correlacion_Dispersion.pdf)
- Domingos, M. y Faxina, A. (2019). *Suscetibilidade de ligantes asfálticos modificados com sbs e ppa à deformação permanente: uma avaliação à luz da evolução dos parâmetros da especificação superpave*. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes Balneário Camboriú - SC, Brasil.



- Dziadosz, S., Slowik, M., Niwczyk, F. y Bilski, M. (2021). Study on Styrene-Butadiene-Styrene Modified Asphalt Binders Relaxation at Low Temperature. *Materials* 2021, 14, 2888. <https://doi.org/10.3390/ma14112888>
- Escudero Grupo Empresarial (2019). *Asfaltos, mezclas y emulsiones*. <https://escudero.com.mx/servicios-para-empresas-constructoras/asfaltos-mezclas-y-emulsiones/>
- Estrada, V. (2017). *Estudio y análisis de desempeño de mezcla asfáltica convencional pen 85/100 plus y mezcla asfáltica modificada con polímero tipo SBS PG 70/28*. [Tesis de pre grado, Universidad Andina del Cusco]. <https://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/1057>
- Estrella, G. (2016). *Aplicación de la metodología para la modificación de asfaltos convencionales mediante polímeros en el pavimento de la carretera Pilcomayo - Chupaca 2016*. [Tesis de pre grado, Universidad Peruana Los Andes]. [https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848/524/T037\\_70084109\\_T%2026.07.18.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848/524/T037_70084109_T%2026.07.18.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Fixer. (16 de enero de 2019). *Cómo reparar un bache con asfalto en frío*. <https://fixer.es/blog/como-reparar-bache-con-asfalto-en-frio/>
- García J. y Negrete R. (2006). *Control de la deformación de los asfaltos en base a polímeros*. [Tesis de pre grado, Instituto Politécnico Nacional].
- Gargate, F., y Huamaní, J. (2018). *Análisis comparativo de mezclas asfálticas con polímeros y tradicional para optimizar propiedades mecánicas en pavimento flexibles - Lima, 2018*. [Tesis de pre grado, Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/34891>

Gehisy (8 de mayo de 2017). *Diagrama de dispersión.*

<https://aprendiendocalidadyadr.com/diagrama-de-dispersion/>

Golestani, B., Nam, B.H., Nejad, F.M. y Fallah, S. (2015). Nanoclay application to asphalt concrete: Characterization of polymer and linear nanocomposite-modified asphalt binder

and mixture. *Construction and Building Materials*, 91, 32-38.

[doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.019](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.019)

Han, S., Sun P., Liu, Y. y Li, W. (2017). Revised Penetration Method Based on Evaluate High Temperature Property of SBS Modified Asphalt. *Materials Science Forum*, 902, 3-8.

[doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.902.3](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.902.3)

He, R., Wu, S., Wang, X., Wang, Z. y Chen, H. (2018). Temperature Sensitivity Characteristics of SBS/CRP-Modified Bitumen after Different Aging Processes. *Materials* 11(11), 2136.

[doi:10.3390/ma11112136](https://doi.org/10.3390/ma11112136)

Henrique, D. (2015). *Análise comparativa do asfalto borracha com o asfalto convencional e o asfalto com adição de polímeros*. [Centro Universitário de Formiga - Unifor - MG, Brasil].

<https://repositorioinstitucional.uniformg.edu.br:21074/xmlui/handle/123456789/296>

Hermida, H. (2011). *Polímeros*. Industria Argentina. [http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09\\_Polimeros.pdf](http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09_Polimeros.pdf)

Hrušková, L., Hornáček, M. y Daučík, P. (2016). Comparison of changes of basic parameters of asphalt caused by various additives. *Chemical Papers- Slovak Academy of Sciences*,

70(3), 793-800. doi: 10.1515/chempap-2016-0010

Infante, C., y Vásquez, D. (2016). *Estudio comparativo del método convencional y uso de los polímeros EVA y SBS en la aplicación de mezclas asfálticas*. [Tesis de pre grado,

Universidad Señor de Sipán]. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/2253>

IngeCivil (17 de julio de 2018). *Componentes estructurales de un Pavimento Flexible*.

<https://www.ingecivil.net/2018/01/17/procedimiento-de-diseno-de-pavimento-flexible/>

Izar, J. y Gonzales, J. (2004). *Las 7 Herramientas Básicas de la Calidad*. Editorial Universitaria Potosina.

[https://www.researchgate.net/publication/303876708\\_CAPITULO\\_V\\_EL\\_HISTOGRAMA](https://www.researchgate.net/publication/303876708_CAPITULO_V_EL_HISTOGRAMA)

Ji, J., Yao, H., Wang, D., Suo, Z., Liu, L., y You, Z. (2016). Properties of Direct Coal Liquefaction Residue Modified Asphalt Mixture. *Advances in Materials Science and Engineering* 2017(6), 1-11. doi:10.1155/2017/2473283

Kumar, U.A., y Satyanarayana, P.V.V. (2015). Comparison of the Polyethylene and SBS Polymer-Modified Bitumen's Effect – A Case Study. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. Volumen 22(7). <https://www.researchgate.net/publication/328413219>

Li, J., Zhang, F., Liu, Y., Muhammad, Y., Su, Z., Meng, F y Chen, X. (2019). Preparation and properties of soybean bio-asphalt/SBS modified petroleum asphalt. *Construction and Building Materials*, 201 (2019), 268-277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.206>

Lin, P., Huang, W., Tang, N., Xiao, F. y Li, Y. (2018). Understanding the low temperature properties of Terminal Blend hybrid asphalt through chemical and thermal analysis methods. *Construction and Building Materials* 169, 543-552. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.060](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.060)

López, D., y Puma, C. (2017). *Caracterización de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y RET, mediante la determinación*

*del módulo de rigidez.* [Tesis de pre grado, Universidad Central del Ecuador].

<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/13743>

Lu, Z., Sha, A., Wang, W. y Gao, J. (2020). Studying the Properties of SBS/Rice Husk Ash-Modified Asphalt Binder and Mixture. *Advanced Pavement Materials for Sustainable Transportation Infrastructure 2020*. doi.org/10.1155/2020/4545063.

Marcozzi, R., Veloso, C. y Coacci, J. (2016). *Evaluación reológica de asfaltos modificados con polímeros* [Archivo PDF].

<http://congresodevialidad.org.ar/congreso2016/TRA/TRA-227.pdf>

Medina, L., Muniz de Farias, M. y Recarey, C. (2020). Evaluación reológica y mecánica de un aglutinante asfáltico modificado por polímeros. *Ingeniería de Construcción*, 35(2). doi:10.4067/S0718-50732020000200170

Méndez, A. (17 de abril de 2022). *Histograma de Frecuencias – La guía completa*. <https://www.plandemejora.com/histograma-de-frecuencias/>

Minaya S. y Ordoñez A. (2006). *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*. Universidad Nacional de Ingeniería. [https://www.academia.edu/34829662/UNIVERSIDAD\\_NACIONAL\\_DE\\_INGENIERIA\\_DISE%3%91O\\_MODERNO\\_DE\\_PAVIMENTOS\\_ASF%3%81LTICOS\\_M\\_Sc\\_SILENE\\_MINAYA\\_GONZ%3%81LEZ](https://www.academia.edu/34829662/UNIVERSIDAD_NACIONAL_DE_INGENIERIA_DISE%3%91O_MODERNO_DE_PAVIMENTOS_ASF%3%81LTICOS_M_Sc_SILENE_MINAYA_GONZ%3%81LEZ)

Ministerio de Obras Públicas y comunicaciones de República Dominicana (2016). *Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación* [Archivo PDF]. <https://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identifici%3%B3n-fallas.pdf>

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Especificaciones técnicas generales para construcción EG 2013*. [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuale](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuale)

s/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-01-

13%20Especificaciones%20Tecnicas%20Generales%20para%20Construcci%C3%B3n%20-%20EG-2013%20-%20(Versi%C3%B3n%20Revisada%20-%20JULIO%202013).pdf

Ministerio de transporte y comunicaciones. (2014). *Manual de carreteras - suelos geología, geotecnia y pavimentos - Sección suelos y pavimentos.*

[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-05-](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-05-)

14%20Seccion%20Suelos%20y%20Pavimentos\_Manual\_de\_Carreteras\_OK.pdf

Ministerio de transporte y comunicaciones. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales.*

[http://transparencia.mtc.gob.pe/idm\\_docs/normas\\_legales/1\\_0\\_3729.pdf](http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_3729.pdf)

Moreno, F., Rubio, M. y Barco, A. (2016). Tire crumb rubber effect on hot bituminous mixtures fatigue-cracking behaviour. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(1), 65-72. doi:10.3846/13923730.2014.897982

Comercializadora Internacional de Manufacturas y Procesos Industriales. (2020). *Cementos Asfálticos.* <http://www.mpi.net.co/Cementos-asfalticos>

Múnera, J. y Ossa, E. (2014). Estudio de mezclas binarias Asfalto - Polímero. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 70, 18-33.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=430/43030033002>

Ortiz, S. (2016). *Análisis del mejoramiento de la mezcla asfáltica, modificada con polímero elastomérico de butadieno (látex).* [Tesis de pre grado, Universidad Técnica de Ambato].

<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/24609/1/Tesis%201089%20-%20Ortiz%20Montero%20Santiago%20Andr%c3%a9s.pdf>

- Ostrovski, A.C. y Raffler, A. (2018). *Caracterização do ligante asfáltico de alto desempenho altamente modificado por polímeros (HiMA)*. [Tesis de pre grado, Universidade Tecnológica Federal Do Paraná].  
<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/9798>
- PETROPERU. (2020). Principales Constituyentes del Asfalto.  
<https://www.petroperu.com.pe/asfaltos/descripcion-asfaltos.php#constituyentes>
- Polacco, G., Filippi, S., Mesuri, F. y Stastna, G. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, 224, 72-112.  
[doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010](https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010)
- Productos Bituminosos de Argentina S.S. (2021). *Obras, servicios y productos para la construcción y el mantenimiento vial*. <http://www.probiar.com.ar/>
- Proyec Plus Servicios y Construcciones. (15 de febrero de 2016). *Factores que afectan al pavimento flexible*. <http://proyecplus.blogspot.com/2016/02/factores-que-afectan-al-pavimento.html>
- Ramírez, M., Arce, M. y Leiva, F.(2005). *Pulimento de agregados empleados en capas de rodamiento* [Archivo PDF]. <https://docplayer.es/77303654-Pulimento-de-agregados-empleados-en-capas-de-rodamiento.html>
- Ren, S., Liu, X., Wang, H., Fan, W. y Erkens, S. (2020). Evaluation of rheological behaviors and anti-aging properties of recycled asphalts using low-viscosity asphalt and polymers. *Journal of Cleaner Production*, 253, 120048.  
[doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120048](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120048)

- Rodrigues, L. (2020). *Avaliação do ligante asfáltico modificado por polímero SBS e aditivo surfactante*. [Tesis de bachiller, Centro Universitário Unichristus].  
<https://repositorio.unichristus.edu.br/jspui/handle/123456789/1067?locale=es>
- Rondón, H., y Reyes, F. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. Ecoe Ediciones.  
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/upnortesp/reader.action?docID=4422274&query=asfalto+modificado>
- Salazar, J. (2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos trabajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047). *Métodos y materiales, 1*. doi: <https://doi.org/10.15517/mym.v1i1.8392>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México. (2006). *CMT. Características de los materiales* [Archivo PDF]. <https://normas.imt.mx/normativa/n-cmt-4-05-002-06.pdf>
- Singh, D. y Kataware, A. (2016). Comparison of different rheological parameters for rutting susceptibility of SBS + WMA modified binders. *Innovative Infrastructure Solutions* 1(1). doi: 10.1007/s41062-016-0026-7
- Singh, H., Chopra, T., Kamotra, S., Jain, S. y Kaur, A. (2019). Performance Evaluation of Bituminous Concrete Mixes Modified with SBS Polymer and Warm mix Additive. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(3), 2277-3878.  
doi:10.35940/ijrte.C4219.098319
- Solpetróleo. (2020). *Emulsiones asfálticas*. <http://www.solpetroleo.com/emulsiones-asfalticas>
- Swamy, A., Rongali, U. y Jain, P. (2017). Effect of HDPEH polymer on viscoelastic properties of SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials* 136, 230-236.  
[doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.049](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.049)

- Tan, Y., Zhang, H., Cao, D., Xia, L., Du, R., Shi, Z., Dong, R. y Wang, X. (2019). Study on cohesion and adhesion of high-viscosity modified asphalt. *International Journal of Transportation Science and Technology* 8, 394-402. doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.04.001
- Tecnología de Materiales Perú. (2014). *TDM Perú, más allá siempre*. <https://www.tdm.com.pe/about/>
- Teixeira, H. (2018). *Estudo e caracterização de pavimentação asfáltica modificada empregando os polímeros elastoméricos látex de borracha natural (nrl) e estireno-butadieno-estireno (SBS) em sua composição*. [Tesis de maestría, Universidade Federal do Paraná]. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/57444>
- Teltayev, B.B., Rossi, C.O., Izmailova, G.G. y Amirbayev, E.D. (2019). Effect of Freeze-Thaw Cycles on Mechanical Characteristics of Bitumens and Stone Mastic Asphalts. *Applied Sciences* 9(3), 458. doi:10.3390/app9030458
- Tiğdemir, M. y Kalyonuoğlu, S.F. (2017). Fatigue life prediction of the modified asphalt mixtures with ANFIS modeling. *Scientia Iranica* 24(1), 72-81. doi:10.24200/sci.2017.2378
- Universidad de Alicante. (s.f). *La búsqueda de información científica* [Archivo PDF]. [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/33983/1/BUSQUEDA\\_informacion\\_DOCTORADO.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/33983/1/BUSQUEDA_informacion_DOCTORADO.pdf)
- Universidad de Piura. (s.f). *Caracterización del asfalto para la mezcla* [Archivo PDF]. [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1\\_627\\_180\\_496\\_5010.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_627_180_496_5010.pdf)
- Universidad Nacional de Colombia (2006). *Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras - Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles* [Archivo PDF]. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y>



documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/974-manual-  
para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles/file

Universidad Privada del Norte. (2016). *Glosario de Investigación* [Archivo PDF].

[https://www.academia.edu/40434616/Glosario\\_de\\_investigaci%C3%B3n\\_2016](https://www.academia.edu/40434616/Glosario_de_investigaci%C3%B3n_2016)

Urrego, E. y Ruiz, C. (2016). *Determinación de la adherencia en mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos convencionales y materiales de peña y río*. [Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Colombia].

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15108/1/DETERMINACI%C3%93N%20DE%20LA%20ADHERENCIA%20EN%20MEZCLAS%20ASF%C3%81LTICAS%20ELABORADAS%20CON%20ASFALTOS%20CONVENCIONALES%20Y%20MAT.pdf>

Valdés, G., Jiménez, F. y Calabi, A.(2012). La fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro. *Revista Científico Tecnológica Departamento Ingeniería de Obras Civiles, 1*, <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/article/view/1964>.

Valdivia, V. (2017). *Análisis del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente incorporando polímeros SBS en la Av. Universitaria cuadra 53 al 57- Comas, Lima 2017*. [Tesis de pre grado, Universidad Cesar Vallejo].

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/1523>

Velásquez, J. (2016). *Rehabilitación de carreteras pavimentadas utilizando mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros*. [Tesis de pre grado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/5697/>

Wang, J., Qin, Y., Huang, S. y Xu, J. (2017). Laboratory Evaluation of Aging Behaviour of SBS Modified Asphalt. *Advances in Materials Science and Engineering, 2017(1)*, 1-12. [doi.org/10.1155/2017/3154634](https://doi.org/10.1155/2017/3154634)

- Wang, P., Dong, Z., Tan, Y. y Liu, Z. (2016). Anti-ageing properties of styrene–butadiene–styrene copolymer-modified asphalt combined with multi-walled carbon nanotubes. *Road Materials and Pavement Design*, 18(3), 1-17. doi: 10.1080/14680629.2016.1181561
- Wei H, Bai X, Qian G, Wang F, Li Z, Jin J. y Zhang Y. (2019). Aging Mechanism and Properties of SBS Modified Bitumen under Complex Environmental Conditions. *Materials (Basel)*. 2019, 12(7), 1189. doi: 10.3390/ma12071189.
- Xiao, F., Ma, D., Wang, J., Cai, D., Lou, L., y Yuan J. (2019). Impacts of high modulus agent and anti-rutting agent on performances of airfield asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 204, 1-9. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.138
- Xu, X., Lu, G., Yang, J. y Liu, X. (2020). Mechanism and Rheological Properties of High-Modulus Asphalt. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(6), 1-13. doi:10.1155/2020/8795429
- Yalçın, E., Çeloğlu, M., Akpolat, M., Yamaç, Ö., Alataş, T., Kök, B., y Yılmaz, M. (2019). Effect of Gilsonite Use on Storage Stability of Styrene-butadiene-styrene Modified Bitumen. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering; Budapest Tomo 63*, (3), 833-844. doi:10.3311/PPci.12816
- Zambrano, A. (2018). *Evaluación del comportamiento del asfalto modificado con polímeros utilizados en la vía asfáltica macusani - ollachea km 182 + 250 al km 188+300*. [Tesis de pre grado, Universidad Andina "Nestor Cáceres Velásquez"]. <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/2974>
- Zeballos, R. (2018). *Identificación y Evaluación de las fallas superficiales en los pavimentos flexibles de algunas vías de la ciudad de Barranca – 2017*. [Tesis de maestría, Universidad Cesar Vallejo]. <https://docplayer.es/96887416-Identificacion-y->

evaluacion-de-las-fallas-superficiales-en-los-pavimentos-flexibles-de-algunas-vias-de-la-ciudad-de-barranca-2017.html

Zhang, C., Wang, H., You, Z., Gao, J. y Irfan, M. (2019). Performance Test on Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) Modified Asphalt Based on the Different Evaluation Methods. *Applied Sciences*, 9(3), 467. doi:10.3390/app9030467

Zhang, D., Zhang, H. y Shi, C. (2017). Investigation of aging performance of SBS modified asphalt with various aging methods. *Construction and Building Materials*, 145, 445-451. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.055

Zhu, J., Lu, X. y Kringos, N. (2016). Experimental investigation on storage stability and phase separation behaviour of polymer-modified bitumen. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(9), 832-841. doi:10.1080/10298436.2016.1211870

**CAPITULO VI: ANEXOS****6.1 Anexo n.º 1****Tabla 20.***Matriz de datos*

Código de estudio	Tipo de asfalto base según el estudio	%SBS	Asfalto Base		Asfalto modificado	
			Pen (dmm)	Abland. (°C)	Pen (dmm)	Abland. (°C)

*Nota:* Esta matriz permite extraer los aportes numéricos provenientes de los ensayos de grado de penetración y punto de ablandamiento de los estudios que conforman la muestra analizada.

## 6.2 Anexo n.º 2

**Tabla 21.**

*Ficha resumen*

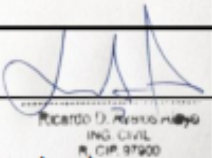
<b>Título:</b>
<b>Autor (es):</b>
<b>Año:</b>
<b>País:</b>
<b>Objetivo:</b>
<b>Metodología, Resultados y Conclusión</b>
<b>Aporte a la investigación</b>

*Nota:* Esta matriz permite extraer los aportes teóricos provenientes de los estudios que conforman la muestra analizada, relacionados a la variación del punto de ablandamiento y grado de penetración en el asfalto modificado con polímero SBS.



**Figura 43.**

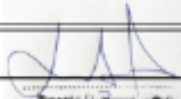
*Fichas resumen aprobada por experto*

<b>Título:</b>	
<b>Autor (es):</b>	
<b>Año:</b>	
<b>País:</b>	
<b>Objetivo:</b>	
<b>Metodología, Resultados, Conclusión</b>	
<b>Aporte a la investigación</b>	
<b>Firma del experto:</b>	 Ricardo D. Avalos Alayo ING. CIVIL R. CIP 97900 MSc. Ing. Ricardo Daniel Avalos Alayo

**Nota:** Esta figura muestra la ficha resumen aprobada por el Ing. Especialista.

Figura 46.

Matriz de evaluación de experto aprobada

<b>MATRIZ PARA EVALUACIÓN DE EXPERTOS</b>				
<b>Título de la investigación:</b>	Análisis del punto de ablandamiento y el grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS para pavimentos flexibles, Mundo 2020			
<b>Línea de investigación:</b>	Tecnologías emergentes			
<b>Apellidos y nombres del experto:</b>	- Chavarría Villarreal, Tania - Marreros Riveros, José Miguel			
<b>El instrumento de medición pertenece a la variable:</b>	- Punto de ablandamiento - Grado de penetración			
Mediante la matriz de evaluación de expertos, Ud. tiene la facultad de evaluar cada una de las preguntas marcando con una "x" en las columnas de SÍ o NO. Asimismo, le exhortamos en la corrección de los ítems, indicando sus observaciones y/o sugerencias, con la finalidad de mejorar la medición sobre la variable en estudio.				
Ítems	Preguntas	Aprecia		Observaciones
		SÍ	NO	
1	¿El instrumento de medición presenta el diseño adecuado?	X		
2	¿El instrumento de recolección de datos tiene relación con el título de la investigación?	X		
3	¿En el instrumento de recolección de datos se mencionan las variables de investigación?	X		
4	¿El instrumento de recolección de datos facilitará el logro de los objetivos de la investigación?	X		
5	¿El instrumento de recolección de datos se relaciona con las variables de estudio?	X		
6	¿Cada una de los ítems del instrumento de medición se relaciona con cada uno de los elementos de los indicadores?	X		
7	¿El diseño del instrumento de medición facilitará el análisis y procesamiento de datos?	X		
8	¿El instrumento de medición será accesible a la población sujeto de estudio?	X		
9	¿El instrumento de medición es claro, preciso y sencillo de manera que se pueda obtener los datos requeridos?	X		
<b>Firma del experto:</b>				
<b>Sugerencias:</b> Para efectos de recolección de datos es factible; sin embargo, se recomienda realizar los estudios de laboratorio para identificar los resultados más reales de acuerdo a los materiales usados en el asfalto modificado.				
 _____ MCs. Ing. Ricardo Daniel Avalos Alayo <small>R. CIP. 17500</small>				



## 6.4 Anexo n.º 4

**Tabla 22.**

*Tabla de orden y análisis de datos*

---

Código	%SBS	Penetración (dmm)	
		Asf. base	Asf. modificado

---

**Nota:** Esta matriz permite ordenar y analizar los aportes numéricos de los ensayos de grado de penetración de los estudios citados. Esta herramienta se utiliza para el ensayo de punto de ablandamiento.



## 6.6 Anexo n.º 6

**Tabla 24.**

*Tabla de resultados de la variación de las propiedades estudiadas*

<b>Código</b>	<b>%SBS</b>	<b>Variación del punto de ablandamiento o grado de penetración (%)</b>
---------------	-------------	--

**Nota:** Esta matriz permite mostrar los resultados numéricos relacionados a la variación del punto de ablandamiento y grado de penetración en el asfalto modificado con polímero SBS.

## 6.7 Anexo n.º 7

**Tabla 25.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E05*

<b>Título:</b>	<b>E05:</b> Avaliação do efeito de ligantes asfálticos modificados com SBS e com argilas organofílicas na resistência à deformação permanente
<b>Autor (es):</b>	Juceline Batista dos Santos Bastos, Sergio Alexandre da Rocha Lima Filho, Jorge Barbosa Soares y Sandra de Aguiar Soares
<b>Año:</b>	2015
<b>País:</b>	Brasil
<b>Objetivo:</b>	Evaluar el efecto del uso de arcillas organofílicas sobre la resistencia a la deformación permanente de los ligantes asfálticos.
<b>Metodología, Resultados y Conclusión</b>	
<p>Para la preparación de las formulaciones se utilizó un ligante asfáltico convencional clasificado como 50/70 y como modificadores, se utilizaron el polímero SBS D1192Bt y arcilla organofílica (CLO) de nombre comercial Cloisite® 20<sup>a</sup>.</p> <p>Se trabajaron formulaciones de asfalto base 50/70, asfalto base + 4,5 % de SBS y asfalto base + 2,5 % de SBS + 2,5 % de arcilla; para la preparación de estas se hizo uso de un mezclador de alto cizallamiento modelo L4R de la marca Silverson®. En las formulaciones se mantuvo el PG y; posteriormente se realizó la caracterización de las muestras y ensayos con el fin de analizar su comportamiento.</p> <p>Se realizó el envejecimiento a corto plazo en un horno rotatorio de película fina – RTFOT, los aglutinantes fueron calentados a 163 °C por 85 min y se verificaron los datos de masas antes y después de la prueba para saber qué tan sensible es el material frente al envejecimiento a corto</p>	

---

plazo; además, se realizaron pruebas de penetración y punto de ablandamiento en muestras antes y después del envejecimiento en RTFOT. Se obtuvo la penetración retenida (PENRET) mediante el cálculo de la relación entre la penetración del material envejecido y el material virgen; también se calculó el aumento en el punto de ablandamiento (IPA), que es la diferencia entre el punto de ablandamiento del material envejecido y el material virgen. Los valores más bajos de PENRET y los más altos de IPA indicaron una sensibilidad mayor del aglutinante asfáltico frente al envejecimiento a corto plazo.

Para analizar la viscosidad rotacional se utilizó un viscosímetro Brookfield, modelo DV-II+, acoplado a un controlador de temperatura Thermosel, en un rango de temperaturas de 135 °C ; 150 °C y 177 °C a una velocidad de 20 rpm ; así mismo, se utilizó un reómetro modelo AR2000 fabricado por TA Instruments para realizar los ensayos de cizallamiento dinámico (DSR) a temperaturas altas e intermedias. Los valores obtenidos para el módulo complejo ( $G^*$ ) y del ángulo de fase ( $\delta$ ) en función de la frecuencia a una temperatura de 60 °C se colocaron de forma horizontal en una escala logarítmica para originar la curva maestra. Además, se determinaron el grado de rendimiento (PG), recuperación elástica (R), susceptibilidad a la acumulación de deformación plástica (Jnr) y clasificación de recuperación de deformación por esfuerzo múltiple (MSCR).

Los resultados mostraron que los ligantes modificados tienen mayor resistencia a la deformación permanente en comparación al asfalto base, teniendo en consideración los incrementos en los porcentajes de R y reducciones considerables de Jnr en las temperaturas y valores de voltajes considerados; además se incrementó el volumen de tráfico que el pavimento es capaz de soportar.

---

### **Aporte a la investigación**

---

- 
- *Los bajos valores de incremento del punto de ablandamiento revelan menos sensibilidad de la mezcla frente al envejecimiento.*
  - *La adición de modificadores redujo el grado de penetración tanto antes como después del envejecimiento en RTFOT, lo que indica que los asfaltos modificados se volvieron más rígidos que los asfaltos vírgenes.*
  - *Los asfaltos modificados presentan un aumento en el punto de ablandamiento en las muestras iniciales y de vida corta, evidenciando su baja susceptibilidad frente a las deformaciones permanentes.*
- 

**Tabla 26.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E06*

<b>Título:</b>	<b>E06:</b> Avaliação do ligante asfáltico modificado por polímero SBS e aditivo surfactante
<b>Autor (es):</b>	Laide Magalhães Rodríguez
<b>Año:</b>	2020
<b>País:</b>	Brasil
<b>Objetivo:</b>	Presentar y evaluar una alternativa a los efectos no deseados existentes en los ligantes asfálticos modificados por SBS.

---

### **Metodología, Resultados y Conclusión**

El ligante base utilizado fue un CAP 50/70 y fue clasificado de acuerdo a su penetración; en dicho ligante se realizaron dos modificaciones: la primera únicamente adicionando 4 % de polímero SBS y la segunda incorporando 4 % de SBS más 1 % de aditivo tensioactivo. Se realizaron los ensayos de caracterización para todos los materiales mencionados y se hizo uso de un mezclador de alto cizallamiento para obtener una mezcla homogénea.

---

---

Se calentaron 450 g del asfalto base CAP 50/70 hasta alcanzar la temperatura aproximada de 155 °C para luego agregar el 4 % del polímero SBS; una vez completada la adición de SBS, se procedió a mezclar durante 2 h con temperaturas de 155 °C  $\pm$  5 °C y una velocidad de 250 rpm . Para preparar la mezcla que contuvo 1 % de surfactante se siguió el mismo procedimiento, pero la mezcla permaneció por 1/2 h más en las mismas condiciones.

Una vez finalizado el proceso de modificación del asfalto, se extrajeron las muestras para realizar los estudios de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad aparente. Para la prueba de penetración, se realizaron tres mediciones con agujeros diferentes y distantes, luego los valores fueron promediados para obtener la consistencia final; en cuanto al punto de ablandamiento, se anotaron los dos valores de temperaturas registrados cuando las bolas bajaron hasta llegar al fondo de la varilla y se promediaron para obtener el valor final. Con estos dos datos se calculó el índice de susceptibilidad térmica y finalmente se realizó el ensayo con el viscosímetro de Brookfield para obtener el dato de viscosidad aparente.

El asfalto modificado con SBS registró valores de consistencia más altos que el ligante base, esto posiblemente se debió al reordenamiento químico que proporcionó la estructura química del SBS ligado a los componentes del asfalto. El valor de penetración disminuyó de 50 dmm a 39,5 dmm , presentando un aumento en la consistencia de más de 20 % ; por otro lado, la adición de tensoactivo provocó una disminución de la consistencia del ligante modificado con SBS, a una similar a la del asfalto base. Con relación al punto de ablandamiento en el asfalto modificado con SBS, se evidenció un aumento de 50 °C a 57 °C (14 %) en comparación al asfalto base; además, respecto a la adición de aditivo tensoactivo, este originó una disminución en el punto de ablandamiento, lo que lo hace más sensible a las variaciones de temperatura. Referente a la viscosidad, se obtuvo un asfalto más viscoso con la adición de SBS y ligeramente suavizado al agregársele el aditivo tensoactivo.

En general, la modificación del ligante asfáltico con los productos mencionados mejoró las propiedades del aglutinante puro, aumentando así su rendimiento.

### Aporte a la investigación

- *El índice de penetración evidencia la facilidad o dificultad de deformación del ligante, pudiendo ser más o menos consistente.*
- *La consistencia superior se puede relacionar con una mayor rigidez, lo que hace probable el aumento de la resistencia a las deformaciones permanentes.*
- *Los asfaltos con mayores puntos de ablandamiento son recomendados para lugares con temperaturas altas que sumado al tráfico excesivo sobre el pavimento, provocan hundimientos en el mismo.*
- *A mayor contenido de SBS, mayor punto de ablandamiento y menor grado de penetración.*
- *El punto de ablandamiento indica el punto donde hay mayor trabajabilidad del asfalto.*

**Tabla 27.**

Ficha resumen correspondiente al estudio E07

<b>Título:</b>	<b>E07:</b> A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility
<b>Autor (es):</b>	Giovanni Polacco, Sara Filippi, Filippo Merusi y George Stastna
<b>Año:</b>	2015
<b>País:</b>	Italia
<b>Objetivo:</b>	Revisar aspectos de los asfaltos modificados con polímeros (PMA) y describir brevemente la especificación y las técnicas propuestas para cuantificar la estabilidad de almacenamiento de los PMA.



---

## Metodología, Resultados y Conclusión

---

Se utilizaron dos procedimientos de prueba en tubo, en el primero se llenó un tubo de papel aluminio con PMA y se colocó verticalmente en un horno a 180 °C durante 14 días; la muestra se recuperó y después se colocó horizontalmente sobre una placa de vidrio, para luego ser transferida en un horno a una temperatura de 50 °C ; posteriormente, la muestra fue inspeccionada visualmente en busca de cualquier asentamiento o flujo no uniforme de extremo a extremo, durante un periodo de 24 h y finalmente, el tubo se almacenó verticalmente a 180 °C durante 3 días y luego se enfrió a una temperatura por debajo de 30 °C .

El segundo procedimiento se realizó de la siguiente manera, en un tubo de pasta de dientes de aluminio de altura mínima de 160 mm y diámetro de entre 25 mm y 40 mm , se vertió con precaución la muestra de PMA a una altura de 100 mm a 120 mm, evitando que se incorporen burbujas de aire y luego se colocó en un horno a 180 °C  $\pm$  5 °C en posición vertical durante 72 h  $\pm$  1 h ; después, se retiró el tubo del horno y se enfrió a temperatura ambiente, manteniéndose en la misma posición vertical. Por último, se sacó el papel aluminio y se colocó horizontalmente la muestra cilíndrica recuperada, cortándola en tres partes iguales denominadas: superior, central e inferior.

Se obtuvo que los asfaltos de diferentes fracciones SARA (determinadas usando TLC FID), al evaluárseles su compatibilidad frente a los dos SBS: Kraton D1101 (lineal) y Kraton D1184 (ramificado), presentaron una afinidad limitada; por lo cual se observó un grado regular de hinchazón y el PI solo fue posible en alto contenido de polímeros. La baja compatibilidad fue corroborada a través de la prueba del tubo, que reveló que todas las mezclas eran inestables; sin embargo, las interacciones entre el asfalto y el polímero mostraron una fuerte dependencia de la composición química del asfalto; es decir, una alta aromaticidad y bajo contenido de asfaltenos, favoreciendo esta interacción.

---

Se concluyó que los PMA están siendo utilizados continuamente en los trabajos de pavimentación, debido las ventajas que poseen y a su resistencia prolongada contra las fallas habituales, relacionadas con la carga del tráfico y en condiciones climáticas; además, la presencia del polímero permite la producción de pavimentos abiertos insonorizados con antideslizante, que sumado a la reducción de la operación de mantenimiento, compensa fácilmente la inversión inicial.

---

### **Aporte a la investigación**

*La estabilidad de almacenamiento es la compatibilidad a escala macroscópica y principal requisito en la tecnología de los PMA.*

*La penetración y punto de ablandamiento son indicadores que permiten conocer la estabilidad de la mezcla asfáltica. Si la diferencia de los valores tomados en la parte superior e inferior de las muestras es mínima o está dentro del rango establecido, entonces la mezcla será estable; es decir, no habrá problemas de separación entre el asfalto y el polímero SBS. El punto de ablandamiento es un indicador para la segregación de los materiales.*

---

### **Tabla 28.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E08*

---

<b>Título:</b>	<b>E08:</b> Caracterización de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y RET, mediante la determinación del módulo de rigidez
<b>Autor (es):</b>	Diana Janeth López Pérez y Cristian Javier Puma Vásquez
<b>Año:</b>	2017
<b>País:</b>	Ecuador

---

---

**Objetivo:** Caracterizar mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y RET, mediante la determinación del módulo de rigidez.

---

### **Metodología, Resultados y Conclusión**

---

El proyecto de investigación se basó en caracterizar mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas modificadas con polímeros mediante el módulo de rigidez y adicionalmente la obtención de estabilidad, flujo de Marshall, tracción indirecta y pérdida por desgaste. Esto se logró determinando primero las propiedades físicas de los agregados, cemento asfáltico convencional y modificado; para luego, según el Diseño Marshall obtener el porcentaje óptimo de asfalto en briquetas y determinar las propiedades físico – mecánicas, con la finalidad de evaluar el desempeño de ambas mezclas. Se realizaron ensayos con dos tipos de polímeros: SBS en cantidades de 2 % ; 3 % y 4 % y; Elvaloy RET 4170 de DuPont al 1 % ; 1,3 % ; 1,5 % y 2 % a temperaturas de 5 °C ; 20 °C ; y 40 °C .

Para iniciar, se caracterizó el agregado pétreo y el cemento asfáltico convencional y modificado. Como base se utilizó un cemento asfáltico AC – 20 clasificado por viscosidad a 60 °C y el cemento asfáltico modificado se obtuvo de mezclar el asfalto base con polímero SBS y RET; además, se requirió un aceite plastificante para compensar las pérdidas durante el calentamiento y un catalizador que ayudó al enlace asfalto – polímero. Se utilizaron dosis de 2 % ; 3 % y 4 % de SBS para un tipo de modificación del asfalto; mientras que para el otro tipo se usó 1 % ; 1,3 % ; 1,5 % y 2 % de RET.

En el ensayo de Marshall se elaboraron 12 briquetas: 3 al 5,5 % ; 6 % ; 6,5 % y 7 % de asfalto; 6 briquetas adicionales para comprobar el diseño y porcentaje óptimo de asfalto; posteriormente, se elaboraron 120 briquetas: 3 briquetas por grupo de temperatura de 5 °C ; -10 °C ; 20 °C ; -30 °C ; 40 °C y -50 °C para el ensayo de módulo de rigidez, 3 briquetas para

---

ensayo de tensión indirecta y 3 para ensayos de pérdida por desgaste en las 8 condiciones de mezclas (convencional, 1 % ; 2 % ; 3 % y 4 % SBS y; 1 % ; 1,3 % ; 1,5 % y 2 % RET).

En cuanto al ensayo de penetración a 25 °C, fue evidente una disminución en los resultados obtenidos del PMA con SBS, respecto al asfalto base a medida que aumenta el porcentaje de polímero. El asfalto convencional tuvo 65 dmm de penetración a comparación de los PMA con SBS: al 2 % presentó 10 dmm menos; al 3 % , 20 dmm menos y al 4 % , 23 dmm menos; estos resultados son indicadores de que la modificación de los asfaltos causa endurecimiento en los mismos. La penetración no se vio considerablemente afectada con la modificación con RET.

El punto de ablandamiento tiende a aumentar conforme la dosis de SBS es mayor; por lo que se deduce que con la adición de los polímeros a mayores concentraciones, mejora significativamente el comportamiento a altas temperaturas respecto al asfalto convencional. El incremento del punto de ablandamiento en los PMA con SBS fue relativamente proporcional; ya que con el 2 % tuvo un aumento de 14 °C ; con 3 % , 23 °C y con 4 % , 30 °C de aumento. Mientras que el asfalto modificado con RET solo experimentó un aumento de 8 °C con la menor dosificación y 17 °C con la mayor dosificación de dicho modificador.

Se concluyó que la variación de las propiedades físicas y reológicas de los PMA modificados con SBS y RET, es evidente respecto al asfalto base, con una considerable mejora; la cual fue gradual conforme aumentó la concentración del polímero. El uso del modificador en el asfalto base AC – 20 disminuyó la susceptibilidad térmica y aumentó la rigidez, lo que se reflejó en el incremento del punto de ablandamiento, la disminución de la penetración, la elevación del índice de penetración y la viscosidad; mejorando además la resistencia a la deformación, lo cual se observó en el incremento de la recuperación elástica por torsión y por ductilómetro, aportado por las características elastoméricas del polímero. La variabilidad de las propiedades

---

---

de los PMA respecto al asfalto convencional depende del tipo de asfalto base utilizado, de la naturaleza y concentración del polímero.

El diseño obtenido mediante Marshall estuvo conformado por 5 % de AG, 40 % de AM, 55 % de AF y 6,6 % de asfalto. El porcentaje óptimo de SBS según los ensayos fue de 3 % ; con el cual se incrementó el 42 % de estabilidad, 17 % de flujo y 22 % en la relación Elasticidad/Flujo. Así mismo, el módulo de rigidez presentó un incremento del 6 % y 11 % a temperaturas de 5 °C y -10 °C y un aumento del 24 % ; 36 % ; 90 % y 137 % a 20 °C ; 30 °C ; 40 °C y 50 °C respectivamente. Por último, la capa de rodadura con SBS tuvo 9 cm de espesor; mientras que la convencional fue de 10 cm, con un incremento de costo por m<sup>2</sup> de 34 % .

---

### **Aporte a la investigación**

---

*La penetración permite cuantificar la consistencia del asfalto; una menor consistencia indica que el valor de penetración es alto.*

*El punto de ablandamiento permite determinar la temperatura con la que el asfalto comienza a fluir; es decir cuando se vuelve más blando y menos viscoso.*

*El PMA modificado con SBS presenta valores menores de grado de penetración comparado con el asfalto base; lo que significa un incremento de dureza con la resistencia a la deformación permanente y en efecto, implica una mayor rigidez. Por el contrario, el punto de ablandamiento aumenta en los PMA modificados con SBS conforme se incrementa el contenido de polímero en el asfalto; lo que proporciona información acerca de la susceptibilidad térmica e indica una mejora en el comportamiento frente a altas temperaturas, respecto al asfalto convencional; además de evidenciar mayor viscosidad, mayor dureza y más resistencia.*

*El índice de penetración (IP) es una medida de susceptibilidad térmica que presenta el asfalto; el aumento del IP grafica una baja susceptibilidad térmica.*

---

**Tabla 29.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E09*

<b>Título:</b>	<b>E09:</b> Caracterización de mezclas asfálticas en caliente, elaboradas con el uso de cemento asfáltico modificado con polímero SBR y SBS
<b>Autor (es):</b>	Stalin Borja Torres y Joffre Cárdenas
<b>Año:</b>	2019
<b>País:</b>	Ecuador
<b>Objetivo:</b>	Caracterizar mezclas asfálticas en caliente, elaboradas con el uso de cemento asfáltico modificado con polímero SBR y SBS, mediante la determinación de parámetros resistentes relacionados con la deformación plástica.

---

**Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Se obtuvieron las propiedades físicas de los materiales pétreos y asfaltos, para determinar mediante el diseño Marshall los porcentajes óptimos de materiales para la fabricación de briquetas y obtener las propiedades físico – mecánicas de estas. Los agregados pétreos gruesos y medianos fueron extraídos de la provincia de Pichincha y tuvieron tamaños máximos nominales de 1/2” y 3/4”; se modificaron los asfaltos con 2 % ; 3 % y 4 % de SBS y 1 % ; 2 % y 3 % de SBR.

Se realizó la granulometría de los agregados y el ensayo de desgaste de Los Ángeles aplicando la normativa correspondiente y tomando como base la gradación de tipo B; así mismo, se realizaron ensayos de gravedad específica y absorción de agregado grueso y fino, entre otros. Para caracterizar los asfaltos se realizaron pruebas de viscosidad absoluta a 60 °C , viscosidad cinemática, viscosidad rotacional, penetración, punto de ablandamiento, índice de penetración, ductilidad, etc.

---

---

La temperatura de mezcla y compactación varía entre la mezcla modificada y convencional; se elaboraron mezclas con una dosificación de agregados ya determinada de acuerdo a la granulometría establecida en las especificaciones, el asfalto se agregó partiendo de 5,5 % hasta 7 % con incrementos de 0,5 % y se elaboraron 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto. La investigación comparó los resultados de los ensayos de la mezcla convencional con el porcentaje óptimo de asfalto frente a los resultados obtenidos en las mezclas modificadas con el mismo porcentaje.

Los resultados obtenidos permitieron establecer que al modificar las mezclas con SBS y SBR se mejoró significativamente su comportamiento; esto fue evidenciado por la disminución de la susceptibilidad térmica a bajas temperaturas, disminución del riesgo de deformación permanente con mejoras de la elasticidad a altas temperaturas, mayor durabilidad y resistencia de la mezcla.

La mezcla asfáltica modificada al 2 % de SBS es la que mejor desempeño obtuvo, ya que cumplió con las especificaciones del método Marshall. El polímero SBS presentó mejores características ante la acción de cargas destructivas, teniendo mejor comportamiento en flujo, de desgaste y acción ante cargas de tensión.

Se llegó a la conclusión de que el polímero SBS puede ser utilizado con mayores beneficios en el campo vial dentro del país (resistencia de la mezcla ante procesos de ahuellamiento o formación de ronderas, resistencia a la deformación, etc.); así mismo, en una carpeta asfáltica de 7,5 cm de espesor, se tuvo un incremento del costo de 25,36 % por m<sup>2</sup> de carpeta modificada respecto a la convencional.

---

### **Aporte a la investigación**

*La penetración disminuyó; por lo tanto, se presentó una mayor dureza y consistencia.*

---

---

*El punto de ablandamiento indica la susceptibilidad térmica de los materiales; es decir, la temperatura en la que el asfalto empieza a fluir y cambia de estado sólido a líquido.*

*Con la adición de polímeros se mejoró el comportamiento de los asfaltos a altas temperaturas, lo que evidenció que se necesita gran temperatura para separar el betún de los agregados; así mismo, al tener un valor de punto de ablandamiento elevado se evidencia una rigidez elevada, mayor dureza, mayor consistencia y un mayor rango de temperatura para ser utilizado.*

---

**Tabla 30.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E10*

---

<b>Título:</b>	<b>E10:</b> Caracterização do ligante asfáltico de alto desempenho altamente modificado por polímeros (HiMA)
<b>Autor (es):</b>	Ana Carolina Ostrovski y Andressa Raffler
<b>Año:</b>	2018
<b>País:</b>	Brasil
<b>Objetivo:</b>	Caracterizar el ligante asfáltico altamente modificado por polímeros HiMA (Highly Modified Asphalt) mediante ensayos de laboratorio.

---

**Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Para la presente investigación se utilizaron tres tipos de asfalto: el convencional CAP 50/70, el modificado 55/75 y el HiMA. La viscosidad a altas temperaturas se realizó con tres puntos diferentes (135 °C ; 150 °C y 177 °C), haciendo uso de un viscosímetro rotacional. Se hizo girar un cuerpo cilíndrico (husillo) a velocidad constante y uniforme sumergido en un fluido, determinándose la fuerza necesaria para vencer la resistencia que tuvo el material para fluir (se modelaron 3 probetas para cada uno de los aglutinantes). Además, se realizó el ensayo de penetración determinado en 3 puntos de la muestra distantes entre sí y el resultado final fue el

---



---

promedio; para este ensayo también se realizaron 3 muestras por cada tipo de aglutinante. Así mismo, el punto de ablandamiento se realizó mediante el método de anillo y bola, que consistió en medir la temperatura a la que una esfera atraviesa un anillo perfectamente lleno de material y toca una placa de referencia (la distancia recorrida por la esfera es de 25 mm). Para determinar el punto de inflamación se aplicó el método Cleveland Open Vase, que indica la temperatura más baja a la que el asfalto emite vapores capaces de arder en presencia de una fuente externa de ignición. El ensayo de recuperación elástica se realizó haciendo uso de un ductilómetro modificado; se midió la capacidad de retorno del material asfáltico después de la interrupción de la tracción mecánica especificada.

El resultado de viscosidad de HiMA fue mayor al de los otros aglutinantes; lo que contribuyó a la producción de bajas deformaciones permanentes de las mezclas con este ligante, que puede minimizar el hundimiento de la huella de la rueda. La penetración de HiMA es menor a la del resto de aglutinantes; lo que indicó que es un material más rígido, siendo adecuado para temperaturas más altas y con menos deformaciones a causa del tráfico. El punto de ablandamiento fue superior, evidenciando que el ligante tiene capacidad para resistir deformaciones permanentes a altas temperaturas de servicio. El resultado del punto de inflamación de HiMA fue mayor que lo requerido y su recuperación elástica fue superior, lo que sugiere un mejor comportamiento a la fatiga.

---

### **Aporte a la investigación**

*El resultado del ensayo de penetración del asfalto modificado con alto porcentaje de SBS presentó menor valor en comparación del asfalto base puro; lo que indicó que el material es más rígido, teniendo un mejor comportamiento en zonas con altas temperaturas y menor deformación a causa del tráfico. Los valores de punto de ablandamiento son considerablemente mayores en la mezcla altamente modificada respecto a la mezcla base sin*

---

*modificación; lo que aumentó la resistencia del ligante frente a las deformaciones permanentes y altas temperaturas de servicio.*

---

**Tabla 31.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E11*

---

<b>Título:</b>	<b>E11:</b> Comparación del Módulo de Rigidez por Tensión Indirecta utilizando el Método Marshall y Método Superpave de Mezclas Asfálticas con Polímeros SBS
<b>Autor (es):</b>	Armando Aguilar Añazco y Dennis Valdivieso Gaguancela
<b>Año:</b>	2019
<b>País:</b>	Ecuador
<b>Objetivo:</b>	Comparar el desempeño de mezclas asfálticas en caliente, convencionales y las modificadas con polímeros SBS, mediante la determinación del Módulo de Rigidez por Tracción Indirecta.

---

### **Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Para la obtención del porcentaje óptimo con el método de Marshall se elaboraron 15 briquetas, tres de cada porcentaje de estudio (4 % ; 4,5 % ; 5 % ; 5,5 % y 6 %) y, para comprobarlo se elaboraron 6 briquetas; posteriormente, se realizaron 27 briquetas, tanto en asfalto convencional como en asfalto modificado con polímero y se ensayaron a 10 °C ; 20 °C y 40 °C para obtener las características por el módulo de rigidez. En lo que concierne al método Superpave se elaboraron 10 briquetas, en juegos de 2 briquetas por cada porcentaje mencionado anteriormente, se comprobó el porcentaje óptimo con 4 briquetas y, se siguió el mismo proceso elaborando briquetas para asfalto modificado y convencional (6 de cada tipo); de igual forma se caracterizó por módulo de rigidez.

---

---

Los materiales que constituyeron las mezclas estudiadas (agregados pétreos, asfalto convencional y modificado con polímero SBS) fueron caracterizados por ensayos normados para determinar sus propiedades físicas. El cemento asfáltico utilizado en el presente estudio es denominado AC – 20 y para su modificación se utilizaron porcentajes de SBS comprendidos entre 2 % y 3,5 % ; previamente a la modificación se añadió un aditivo promotor de adherencia y un aditivo para normalizar el asfalto, que permitió calentarlo a temperaturas de hasta 190 °C . En primer lugar, se pesaron 2500 g de asfalto base, que debieron estar entre 130 °C y 140 °C de temperatura; posteriormente se añadió el aditivo de adherencia y se homogenizó la mezcla haciendo uso de un agitador mecánico en un tiempo de al menos 15 min , luego se añadió el plastificante y se mezcló nuevamente mediante el uso del agitador. Dada la incorporación de los aditivos a la mezcla, fue posible elevar la temperatura a 185 °C sin que se exponga a procesos de oxidación o envejecimiento de corto plazo; a dicha temperatura se incorporó el polímero SBS en función del peso del asfalto base y se trató de modificar al 2,3 % , pero al no cumplir con algunos parámetros se modificó al 2,5 % , siendo este el porcentaje empleado en la investigación.

En el diseño de la mezcla asfáltica en caliente, primero se usó el método Marshall y luego el método Superpave, para los cuales se tomó como referencia el diseño para tráfico pesado (más desfavorable).

Luego de los ensayos se encontró que al modificar asfalto base con SBS, se obtuvo un asfalto más rígido; esto se vio reflejado en el 32 % que se redujo el valor de penetración. Por otro lado, el punto de ablandamiento aumentó 30 % gracias a la modificación del asfalto; es decir, el asfalto modificado tendría un mejor comportamiento frente a altas temperaturas.

El resultado del índice de penetración indica que tan susceptible es el asfalto al cambio de temperatura; los valores negativos señalan que el asfalto es bastante susceptible, mientras que

---

los valores positivos indican que es menos sensible. El asfalto base tiene un índice negativo, mientras el asfalto modificado tiene índice positivo.

El efecto de modificación con SBS en el asfalto hizo que este sea más duro y tenga valores de viscosidad mucho mayores; volviéndolo menos trabajable y demandando mayores temperaturas de compactación y mezcla. Además, al tratarse de un asfalto más duro, se vuelve menos dúctil, en este caso se obtuvo una reducción del 50 % de ductilidad con la modificación del asfalto base con SBS. Así mismo, el punto de inflamación fue menor en el asfalto modificado debido a que para realizar este procedimiento se hizo uso de aditivos adicionales altamente volátiles, lo que lo hace más inflamable.

El porcentaje óptimo obtenido en el método Marshall fue de 5,5 % y Superpave de 5,6 % , además el porcentaje de vacíos con Marshall fue de 4,6 % y el de Superpave de 4,8 % . La temperatura de compactado fue de 165 °C y la de mezcla de 180 °C .

El desempeño frente a la susceptibilidad térmica de las mezclas asfálticas modificadas fue significativamente mayor con respecto a las mezclas asfálticas convencionales, esto debido a que en las temperaturas de ensayo, las mezclas modificadas tienen un comportamiento adecuado frente a la variación de su valor de módulo de rigidez.

Los valores de rigidez obtenidos por el diseño Superpave son superiores a las mezclas obtenidas por diseño Marshall; por lo que se concluyó que el valor de módulo de rigidez se debe al tipo de compactación, ya que al utilizar un compactador giratorio se tuvo una presión constante de compactación y esta a su vez, realizó un tipo de amasado que evitó la segregación de agregados pétreos y distribuyó mejor las partículas y el asfalto, lo que hizo que los esfuerzos se apliquen de manera uniforme en el interior de la probeta.

---

### **Aporte a la investigación**

---

---

*La penetración permite medir la consistencia del asfalto; es decir si es un asfalto duro o blando y el ensayo de punto de ablandamiento se realiza con la finalidad de conocer a que temperatura el asfalto pierde consistencia y comienza a fluir, volviéndose más blando debido a la perdida de viscosidad.*

*El índice de penetración indica el grado de susceptibilidad frente a altas temperaturas del asfalto; si tiene un índice positivo es menos susceptible y si tiene un índice negativo, es más sensible. El asfalto modificado presenta un índice de penetración positivo; mientras el asfalto base posee un índice negativo.*

*Las características del polímero elastómero varían con la temperatura; ya que a altas temperaturas tienen la capacidad de aportar una mayor rigidez, lo que controla el ahuellamiento y, a bajas temperaturas tiende a controlar el aumento del módulo de rigidez, evitando el agrietamiento.*

---

**Tabla 32.***Ficha resumen correspondiente al estudio E13*

---

<b>Título:</b>	<b>E13:</b> Comparison of different rheological parameters for rutting susceptibility of SBS + WMA modified binders
<b>Autor (es):</b>	Dharamveer Singh y Aniket V. Kataware
<b>Año:</b>	2016
<b>País:</b>	India
<b>Objetivo:</b>	Evaluar los efectos de tres aditivos WMA diferentes sobre la resistencia a la formación de surcos del asfalto PMB40; así como comparar la resistencia a la formación de surcos de PMB40 que contiene aditivos WMA y desarrollar una correlación entre los parámetros estudiados.

---

---

## Metodología, Resultados, Conclusión

---

Se utilizó como asfalto control un aglutinante (PMB40) modificado con 3,5 % de polímero SBS; así mismo, se utilizaron tres aditivos para aglutinantes de asfalto modificados con aditivos de mezcla caliente (WMA) diferentes: a base de surfactante – Rediset®, a base de zeolita Advera® y a base de cera Sasobit®. El PMB40 se mezcló con tres dosis diferentes de aditivo WMA: Sasobit® al 1 % ; 2 % y 3 % ; Advera® al 4 % ; 6 % y 8 % y Rediset® al 1 % ; 2 % y 3 %, teniendo en cuenta la recomendación de contenido óptimo que otorgó el fabricante de 2 % ; 6 % y 2 % respectivamente; adicionalmente a estas, se realizaron muestras con una dosificación superior y otra inferior a las óptimas. Se prepararon diez ligantes (3 porcentajes x 3 aditivos + uno de control PMB40) haciendo uso de un mezclador de alto cizallamiento a 140 °C con una velocidad de 500 rpm durante 1/2 h .

Los aglutinantes modificados WMA se envejecieron a corto plazo haciendo uso de un horno de película delgada a 143 °C por 5 h y el asfalto base se envejeció a 163 °C por el mismo tiempo. Se midió el parámetro superpave ( $G^*/\sin\delta$ ) y se utilizó para determinar el parámetro Shenoy ( $G^* / (1 - (1 / \tan\delta \sin\delta))$ ). El ensayo de barrido de frecuencia se realizó en un rango de 0,1 rad/s a 100 rad/s y la prueba de recuperación de fluencia por tensión múltiple (MSCR) se ejecutó a un nivel de estrés de 100 Pa y 3200 Pa .

Los parámetros de surco Superpave y Shenoy mostraron una tendencia parecida en la resistencia a la formación de surcos; además, los tres parámetros evidenciaron que la adición de Sasobit® y Advera® pueden contribuir a mejorar la resistencia a los surcos del aglutinante base, mientras que Rediset® puede menorar el rendimiento. Por otro lado, el estudio de viscosidad de cizallamiento cero (ZSV) mostró que los tres aditivos ayudaron a mejorar la resistencia a la formación de surcos del ligante control, lo que es contrario a los resultados

---

---

obtenidos anteriormente; cabe destacar que ZSV puede proporcionar datos inexactos y poco realistas.

Se determinó que la dosis óptima de Sasobit® fue 2 % en peso del asfalto según los tres parámetros (Superpave, Shenoy y Jnr); de Advera fue el 8 % según Jnr y el 6 % según Superpave y Shenoy y; para Rediset® se observó una disminución de la resistencia en todas las dosis estudiadas, por lo que no se pudo determinar el porcentaje óptimo.

Se encontró una buena correlación entre los parámetros Superpave y los otros estudiados, lo cual puede ayudar a estimar parámetros alternativos; además, se mostró que Jnr puede considerarse como un parámetro de surco confiable y el ZSV necesita una mayor validación. Así mismo, se recomendó validar la resistencia a la formación de surcos de los aglutinantes mediante pruebas de laboratorios en mezclas asfálticas.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*El punto de ablandamiento y grado de penetración dan una indicación para comprender el comportamiento a la formación de surcos de los ligantes y su influencia en el rendimiento general del pavimento. La prueba de penetración refleja la rigidez de un asfalto y, el punto de ablandamiento muestra la tendencia de un asfalto a fluir a una temperatura más alta.*

---

### **Tabla 33.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E15*

---

<b>Título:</b>	<b>E15: Effect of Gilsonite Use on Storage Stability of Styrene-butadiene-styrene Modified Bitumen</b>
<b>Autor (es):</b>	Erkut Yalçın, M. Ertuğrul Çeloğlu, Mustafa Akpolat, Özge Erdoğan Yamaç, Taner Alataş, Baha Vural Kök y Mehmet Yılmaz
<b>Año:</b>	2019

---

---

**País:** Turquía

---

**Objetivo:** Obtener betún modificado al mismo nivel de rendimiento que el betún modificado con SBS, pero estable con respecto a la estabilidad de almacenamiento.

---

### **Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Se utilizó el aglutinante puro de clase 160/220 como ligante base; así mismo, los aditivos empleados fueron el polímero SBS (Kraton D 1101) y Gilsonite. El asfalto modificado se obtuvo mezclando el betún base con aditivo a 180 °C y 1000 rpm por 1 h . Se utilizaron muestras con 5 % de SBS, 18 % de American Gilsonite, 2 % de SBS + 13 % de AG, 3 % de SBS + 10 % de AG y 4 % de SBS + 6 % de AG según el peso del betún; además, con el objetivo de hacer el estudio más claro, se realizaron muestras con SBS al 2 % ; 3 % y 4 % y, fueron sometidas a las pruebas.

Para la prueba de estabilidad de almacenamiento se utilizaron tubos de aluminio estándar de 160 mm de altura y 30 mm – 40 mm de diámetro. El betún modificado fue mezclado hasta que se tornó homogéneo según los estándares, para luego ser vertido en el tubo de aluminio hasta alcanzar una altura de 100 mm – 120 mm sin burbujas de aire, luego se cerró herméticamente la tapa del tubo y se almacenó verticalmente a 180 °C durante 72 h  $\pm$  1 h . Después, los tubos enfriaron a temperatura ambiente y seguidamente fueron almacenados a 20 °C durante 30 min . Por último, el betún se extrajo en 3 partes iguales; las partes superior e inferior fueron sometidas a pruebas de aglutinante.

Se realizaron los estudios de punto de ablandamiento y grado de penetración según las normativas correspondientes; además, se hizo la prueba de viscosímetro rotacional a 135 °C y 165 °C para determinar la consistencia y bombeabilidad de los ligantes bituminosos. La prueba de reómetro de haz de flexión se utilizó para realizar ensayos de fluencia y, la temperatura



---

experimental fue  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  . Una viga de muestra (125 x 12,5 x 6,25 mm) se sumergió en un baño a temperatura constante y se almacenó a la temperatura experimental por 1 h . Posteriormente, fue apoyada a los extremos y sometida a una carga constante de 100 g para medir continuamente la deflexión en el punto central; la rigidez a la fluencia del ligante (S) y la tasa de fluencia (m) se obtuvieron para un período de carga de 60 s . Además, el endurecimiento físico se obtuvo después de un periodo de 24 h a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  de temperatura. El método mecánico dinámico que utiliza una prueba de tipo oscilatorio dentro de área de respuesta viscoelástica lineal (LVE), es el método empleado con más frecuencia para las pruebas reológicas fundamentales del betún; se utilizó el reómetro de cizallamiento dinámico para realizar las pruebas mencionadas anteriormente. La magnitud del módulo de corte complejo ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) son los principales parámetros viscoelásticos adquiridos con el DSR.

Luego de la prueba de estabilidad de almacenamiento, se determinó que en el asfalto modificado con SBS al 2 % ; 3 % ; 4 % y 5 % , las tasas de penetración obtenidas en la parte superior fueron 1,38; 1,84; 2,73 y 3,47 veces mayores que las obtenidas en el fondo de la muestra. Lo que refleja que a medida que aumenta el polímero, mayor es la desintegración entre betún y el modificador; así mismo, se obtuvo que la muestra más estable fue la de 18 % de adición de AG.

En el betún modificado con SBS al 2 % ; 3 % ; 4 % y 5 % , los puntos de ablandamiento en la parte superior, después de la prueba de almacenamiento fueron de 1,34; 1,42; 1,42; 1,44 y 1,42 veces superiores a las obtenidas en el fondo; por lo que, se deduce que a medida que aumenta el contenido de SBS en el asfalto, disminuye la estabilidad de almacenamiento del betún.

---

### **Aporte a la investigación**

- *La separación entre las fases rica en polímero y rica en betún, durante el almacenamiento y el transporte, es uno de los problemas más predominantes del asfalto modificado con SBS.*

- 
- *En la prueba de estabilidad de almacenamiento, las tasas de penetración obtenidas de la parte superior de las muestras fueron mayores a las obtenidas del fondo, además que a medida que aumentaba el contenido de SBS, las tasas de penetración en el fondo de las muestras disminuían y, por lo tanto, aumentaban su consistencia; lo contrario sucede en la parte superior. Esto quiere decir que a medida que aumenta el contenido de SBS, aumenta la desintegración entre polímero y asfalto.*
  - *Solo para las muestras modificadas únicamente con SBS, tomadas en el fondo del tubo, se determinó que el punto de ablandamiento aumentó a medida que aumento el modificador.*
  - *A mayor contenido de SBS, la diferencia entre los valores de grado de penetración y punto de ablandamiento de la parte superior e inferior, aumentan; lo que hace que el asfalto sea menos estable.*
  - *La muestra con 5 % de SBS presentó la peor estabilidad.*
- 

**Tabla 34.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E16*

<b>Título:</b>	<b>E16:</b> Effect of HDPEH polymer on viscoelastic properties of SBS modified asphalt
<b>Autor (es):</b>	Aravind Krishna Swamy, Uma Devi Rongali y Pramod Kumar Jain
<b>Año:</b>	2017
<b>País:</b>	India
<b>Objetivo:</b>	Analizar el efecto combinado del homopolímero de polietileno de alta densidad (HDPEHP) y el SBS sobre las propiedades reológicas y convencionales del asfalto de grado de viscosidad 30 comúnmente utilizado en la India.

---

---

## Metodología, Resultados y Conclusión

---

Se utilizó un asfalto base de viscosidad 30, un polímero SBS Kraton D0243K y homopolímero de polietileno de alta densidad (HDPEHP) con una densidad de  $0,99 \text{ g/cm}^3$  y un peso molecular de  $8800 \text{ g/mol}$ .

Se prepararon seis mezclas de aglutinante asfáltico con porcentajes de SBS y HDPEHP variados; el ligante fue calentado a  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  y se añadió el peso determinado de SBS para ser combinado por un mezclador de alto cizallamiento durante  $2,5 \text{ h}$ . Posteriormente, se añadió el HDPEHP correspondiente y se mezcló durante  $30 \text{ min}$ ; para luego envejecer las muestras en condiciones de corto y largo plazo.

La viscosidad de las mezclas modificadas y no modificadas fueron medidas utilizando un viscosímetro rotacional Brookfield a una temperatura de  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  en incremento de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . El punto de ablandamiento se realizó aplicando la prueba de anillo y bola (ASTM D36) y los aglutinantes con punto de ablandamiento de hasta  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  se determinaron usando un baño de agua; mientras los que tuvieron punto de ablandamiento mayor a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  se obtuvieron utilizando un baño de glicerina.

Para medir el módulo complejo y el ángulo de fase del aglutinante se utilizó un reómetro de cizallamiento dinámico; la prueba de barrido de frecuencia se realizó entre  $0,1 \text{ Hz}$  y  $60 \text{ Hz}$  a temperaturas entre  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  en incrementos de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , haciendo uso de todas las mezclas preparadas. Con las medidas del módulo complejo se construyó la curva maestra con una temperatura de referencia de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; haciendo uso de estas y del ángulo de fase, se obtuvo la curva maestra del módulo de relajación aplicando la técnica de interconversión.

La adición de SBS dio como resultado un aumento de la viscosidad a todas las temperaturas y condiciones de envejecimiento y, la más alta a corto plazo y sin envejecimiento fue de B5 y B3; además, la viscosidad de la mezcla B6 fue cercana a la del asfalto base.

---

Todas las mezclas presentaron un punto de ablandamiento más alto después del proceso de envejecimiento; así mismo, se observó un aumento significativo del módulo complejo con el envejecimiento a largo plazo a comparación del envejecimiento a corto plazo y el no envejecimiento, en todas las mezclas. Las mezclas que contienen SBS y HDPEHP pueden proporcionar una mayor resistencia durante un periodo de tiempo prolongado; además, pueden soportar cargas más pesadas con poca deformación durante más tiempo.

---

### **Aporte a la investigación**

- *La adición de polímeros en el asfalto aumenta la elasticidad del material; por lo que dichas mezclas brindan una mayor resistencia a la formación de surcos a altas temperaturas y ofrecen flexibilidad a temperaturas medias o bajas.*
- *En múltiples estudios se ha informado que la modificación de asfaltos trae como beneficios la disminución de la susceptibilidad a altas temperaturas y aumento de la resistencia al agrietamiento por temperaturas bajas; además de la resistencia al desgaste, envejecimiento y desprendimiento.*
- *Los pavimentos modificados con polímero SBS experimentan una mayor resistencia a las deformaciones permanentes a temperaturas altas, a la fatiga y al agrietamiento a bajas temperaturas.*
- *El aumento en la concentración de SBS condujo a un incremento en el punto de ablandamiento y una disminución en el valor del grado de penetración.*
- *Todas las muestras estudiadas exhibieron un punto de ablandamiento mayor después del envejecimiento.*

**Tabla 35.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E18*

<b>Título:</b>	<b>E18:</b> Estudio y análisis de desempeño de mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 Plus y mezcla asfáltica modificada con polímero tipo SBS PG 70 -28
<b>Autor (es):</b>	Víctor Estrada Escalante
<b>Año:</b>	2017
<b>País:</b>	Perú
<b>Objetivo:</b>	Estudiar y evaluar el desempeño de mezclas asfálticas convencional PEN 85/100 y modificada con polímero de tipo SBS PG 70-28 y determinar cuál de las mezclas asfálticas presentan mejor desempeño.

**Metodología, Resultados y Conclusión**

A la mezcla asfáltica convencional (patrón de asfalto PEN 85/100 Plus) se le propuso como mejora una mezcla asfáltica modificada con polímero SBS PG 70 – 28, que es recomendada para climas fríos; ambas mezclas estuvieron en igualdad de condiciones, teniendo como única variable el tipo de asfalto usado.

Para los ensayos y análisis del diseño de cada mezcla se contó con 20 briquetas de 10 cm de diámetro y 6 cm de altura por diseño; así mismo, para el ensayo de resistencia a la deformación permanente se utilizaron 8 cuerpos de prueba de 15 cm de diámetro y 5 cm de altura y para los ensayos de resistencia a la fatiga se emplearon 4 vigas normalizadas y estandarizadas de 5 x 6,3 x 38 cm .

Todos los cuerpos de prueba se realizaron de manera controlada y cumpliendo con los estándares normativos. Para el diseño de mezclas, los cuerpos fueron moldeados de acuerdo con la norma ASTM D 6926 y un peso de 1200 g aproximadamente; mientras que para el

---

ensayo de densidad máxima media de acuerdo con la ASTM D 2041 y un peso aproximado de 1500 g .

Para el ensayo Marshall, en la producción de las mezclas, se tuvieron que calentar los agregados pétreos a una temperatura de 5 °C a 10 °C ; seguidamente se aplicó el ligante asfáltico a una temperatura promedio de acuerdo a la carta Viscosidad – Temperatura y se mezcló hasta lograr el recubrimiento total del agregado y la homogeneidad de la mezcla. Posteriormente se armaron y compactaron las briquetas con 75 golpes por cara haciendo uso de un martillo Marshall normado y se dejó enfriar y endurecer por un periodo de 24 h . Luego se le aplicaron los ensayos necesarios en el estudio.

En cuanto al contenido de asfalto según el diseño de Marshall, no presentan variaciones considerables; siendo el porcentaje óptimo de asfalto de 6,30 % para el asfalto base (estabilidad de 1382 kgf y 14 mm de flujo) y 6,20 % para el PG 70-28 (estabilidad 2047 kgf y 14,10 kgf); así mismo, se obtuvieron valores de estabilidad mayores en el asfalto modificado con SBS a comparación del asfalto convencional. Además, se obtuvo 12,50 mm de ahuellamiento para asfalto base y 3,79 mm para asfalto SBS PG 70-28 (muy inferior al máximo permitido), lo que garantizó un buen comportamiento del asfalto modificado frente al ahuellamiento. Respecto a la fatiga, el asfalto convencional solo pudo soportar 183 223 ciclos de carga repetitiva y el modificado con SBS, 3 244 490 ciclos; lo que representa una resistencia a la fatiga de 17 veces más del asfalto SBS sobre el convencional.

---

### **Aporte a la investigación**

*La mezcla modificada con SBS presentó mejor desempeño frente a la resistencia a la deformación permanente en comparación con la mezcla asfáltica convencional, garantizando la resistencia al ahuellamiento; además, mostró un mejor desempeño de estabilidad que la mezcla convencional, esto se debe a que presentó mayor cohesión y adhesividad.*

---

*La mezcla asfáltica modificada reveló un mejor desempeño ante la resistencia a la fatiga sin perder rigidez, soportando mayor cantidad de ciclos de carga repetitiva; siendo 17 veces mejor en comparación con la mezcla asfáltica convencional.*

---

**Tabla 36.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E19*

---

<b>Título:</b>	<b>E19:</b> Estudo e caracterização de pavimentação asfáltica modificada empregando os polímeros elastoméricos látex de borracha natural (nrl) e estireno-butadieno-estireno (SBS) em sua composição
<b>Autor (es):</b>	Heloise Sasso Teixeira
<b>Año:</b>	2018
<b>País:</b>	Brasil
<b>Objetivo:</b>	Estudiar y caracterizar mezclas asfálticas modificadas utilizando materiales poliméricos, de tipo elastómero – Látex de caucho natural (NRL) y copolímero de estireno – butadieno – estireno (SBS) en su composición, con el objetivo de mejorar las propiedades físicas de estos en comparación con el pavimento de asfalto habitual.

---

**Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Se utilizó como aglutinante base el cemento asfáltico CAP 50/70 y los polímeros empleados fueron el látex de caucho natural (NRL) y el copolímero Estireno – Butadieno – Estireno (SBS). Primero se caracterizaron los materiales (CAP 50/70, polímero y áridos), luego se prepararon las mezclas para obtener los aglutinantes modificados, posteriormente se definió el contenido ideal de modificador y se produjeron probetas de aglomerante – agregado para estudiar su comportamiento mecánico.

---

---

Se prepararon tres tipos de mezcla: CAP 50/70 + NRL, CAP 50/70 + SBS y CAP 50/70 + NRL + SBS; se utilizaron contenidos de 2 % ; 4 % y 6 % de SBS y NRL cuando se analizaron por separado y para la mezcla que involucra ambos modificadores se utilizó 4 % de látex y 2 % de SBS.

Para realizar la mezcla, se calentó el aglutinante base a una temperatura de 120 °C con la finalidad de que fluya y, posteriormente a 150 °C ; luego de estabilizar el aglutinante, se agregaron los polímeros (para el NRL se mantuvo la rotación del agitador por 1 ½ h y para el SBS por 2 ½ h ). En cuanto a las mezclas asfálticas se agregó 5 % de aglutinante y 95 % de agregados (calentados por 12 h a 155 °C ).

En los estudios, se obtuvo un valor de penetración de 51,4 dmm y un punto de ablandamiento de 52,4 °C para el asfalto CAP 50/70; además se encontró que no hubo ruptura del material cuando fue sometido a tracción. También, se pudo calcular el índice de susceptibilidad térmica: - 0,59 ( $\pm$  0,29); así mismo, en el ensayo DRX se obtuvo 9,060 ppm de átomos de azufre. Respecto al asfalto modificado, el NRL aumentó la consistencia, mientras el SBS la redujo. Los resultados de penetración en SBS fueron inconsistentes con la teoría; sin embargo, los rangos de penetración se definieron en intervalos entre 50 dmm y 70 dmm y no se considera un cambio significativo debido que al estar en ese rango tiene rigidez y comportamiento similares. Por otro lado, el punto de ablandamiento que se obtuvo en ambos modificadores mejoró. En general, los ligantes modificados con polímeros presentaron mejores características en relación con el ligante base; sin embargo, el contenido máximo de modificador en este estudio fue de 4 % independientemente del compuesto utilizado.

---

### **Aporte a la investigación**

- *Los pavimentos que presentan punto de ablandamiento bajo pueden fluir provocando la rotura de los áridos y en consecuencia presentando pavimentos quebradizos.*



- 
- *El índice de penetración es la relación entre el punto de ablandamiento y la penetración, lo que indica la susceptibilidad térmica del material. A su vez, ambas propiedades físicas son indicadores de la consistencia del asfalto.*
- 

**Tabla 37.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E21*

---

<b>Título:</b>	<b>E21:</b> Evaluación reológica y mecánica de un aglutinante asfáltico modificado por polímeros
<b>Autor (es):</b>	L. Medina, M. Muniz de Farias y C. Recarey
<b>Año:</b>	2020
<b>País:</b>	Brasil
<b>Objetivo:</b>	Comparar las propiedades de un asfalto convencional y un asfalto comercial modificado por polímeros.

---

### **Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Las muestras fueron producidas con agregado de caliza dolomítica y asfalto modificado con polímeros elastoméricos clasificado como PG 76/22. Los áridos se dosificaron en la curva granulométrica según la fracción tipo “C” definida por el Departamento Nacional de Infraestructura de Transporte (DNIT) de España y; muestran resultados de abrasión de los ángeles de 21 % , sulfato de magnesio de 4,2 % y equivalente arena de 68 % .

Para caracterizar los parámetros reológicos de cementos asfálticos puros y modificados se hizo uso de un reómetro de corte dinámico (DSR). Los cementos asfálticos se probaron después del envejecimiento para verificar y comparar sus propiedades reológicas y; para la construcción de la curva maestra se aplicó el principio de superposición tiempo – temperatura, que es una

---

---

característica inherente a los materiales viscoelásticos para una temperatura de referencia (25 °C).

Se realizó además una evaluación mecánica de mezcla asfáltica; los cuerpos de ensayo (TB) de hormigón asfáltico denso se produjeron con diámetro de 150 mm en un compactador giratorio con energía de compactación de 100 giros; una vez estabilizados a temperatura ambiente, se extrajeron testigos de 100 mm de diámetro, para ajustar las medidas a los requerimientos de los ensayos mecánicos. Con el fin de evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente en mezclas asfálticas, se realizaron ensayos de fluencia estática.

Como resultado de los ensayos de caracterización se obtuvo que el asfalto modificado es “más duro” y se evidencia en el valor de penetración; además es menos sensible a la influencia de la temperatura, como lo muestran los valores de punto de ablandamiento. La susceptibilidad bajo la influencia de la temperatura está determinada por la pérdida de peso durante el envejecimiento a corto plazo (RTFOT); cuanto menor sea el valor, menos sensible es el cemento asfáltico a los efectos de la temperatura.

Con los resultados de la viscosidad de Brookfield se obtienen las temperaturas de mezcla y compactación para el asfalto convencional; este método no se aplica para los asfaltos modificados debido al aumento de la viscosidad de estos. Para bajas frecuencias o altas temperaturas, en términos de rigidez, el comportamiento del asfalto modificado y el asfalto CAP 50/70 es similar; sin embargo, para bajas temperaturas o frecuencias altas, el asfalto modificado tiene un módulo complejo  $G^*$  más alto, lo que indica deformaciones totales más bajas. A pesar de que el asfalto CAP 50/70 tiene un mayor valor de esfuerzo cortante a la rotura, tiene un comportamiento más frágil en comparación con el asfalto modificado.

---

---

Las pruebas muestran que el asfalto modificado es menos susceptible a la fatiga que el asfalto convencional; además tiene una menor susceptibilidad a las deformaciones permanentes, un mayor potencial de recuperación elástica y presenta menor susceptibilidad térmica.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*La susceptibilidad a la temperatura se ve reflejada en la pérdida de peso durante el envejecimiento a corto plazo RTFOT, cuando dicho valor es más bajo, el cemento asfáltico es menos sensible a condiciones de temperatura; así es el caso del asfalto modificado con SBS en comparación con el asfalto base.*

*El asfalto modificado presentó menor valor de grado de penetración que el asfalto base, lo cual señala que es un asfalto más rígido y menos sensible ante temperaturas elevadas, ya que los valores de punto de ablandamiento son más altos en el asfalto modificado; a su vez, estos efectos influyen en el aumento de la capacidad de recuperación elástica.*

---

### **Tabla 38.**

*Fichas resumen correspondiente al estudio E22*

---

<b>Título:</b>	<b>E22:</b> Evaluación del comportamiento del asfalto modificado con polímeros utilizados en la vía asfaltada Macusani – Ollachea km 182+250 al km 188+300
<b>Autor (es):</b>	Aurelio Zambrano Bustamante
<b>Año:</b>	2018
<b>País:</b>	Perú
<b>Objetivo:</b>	Evaluar el comportamiento, parámetros reológicos y propiedades físico mecánicas de la carpeta asfáltica con la adición de polímeros modificados en las mezclas asfálticas en la vía Macusani – Ollachea.

---

### **Metodología, Resultados y Conclusión**

---

---

Se realizó la evaluación PCI de la carretera Macusani – Ollachea porque grafica el estado en el que se encuentran la mayoría de las carreteras de la región y está ubicada en zona de altura (3500 m.s.n.m.); de cada kilómetro se muestreó 700 m<sup>2</sup> con 59 muestras, haciendo el análisis y los procedimientos de acuerdo con el método de estudio indicado.

En condición buena se encontraron 20 unidades (33,88 %); en condición regular, 34 unidades (57,64 %); en condición mala, 4 unidades (6,77 %) y en condición de muy mala, 1 unidad. Se utilizó como asfalto base el PEN 120/150 y un polímero SBS Solprene 411; por lo que se tuvo especial atención en las especificaciones de estos.

Se realizaron ensayos de laboratorio para hacer el control de calidad de los materiales; para esto, se ubicó la cantera Macusani km 188 del corredor vial interoceánico Sur, Perú – Brasil, con el objetivo de determinar si los materiales de dicha cantera son óptimos para realizar una mezcla asfáltica (para la elección de la cantera se observó que los agregados pétreos tengan una textura rugosa y alargada, que dan mayor resistencia que las redondeadas).

La mezcla del asfalto con polímero se ejecutó haciendo uso de un dispensador mecánico con una velocidad de 10 rpm ; se calentó 800 g . de asfalto PEN 120/150 a 160 °C para luego añadir 2 % ; 2,5 % ; 3 % y 4 % de SBS. Posteriormente se realizaron ensayos para saber las propiedades de los asfaltos; así mismo, se empleó el método Marshall con el objetivo de determinar el óptimo contenido de asfalto para la combinación específica de agregados y; finalmente, se realizaron probetas de 2,5” de espesor y 4” de diámetro, de las que se determinó su estabilidad y deformación.

Se obtuvo una penetración de 120 dmm para el asfalto base y para los asfaltos modificados al 2 % ; 2,5 % ; 3 % y 4 % fueron 94 dmm ; 85 dmm ; 75 dmm y 78 dmm, respectivamente. Referente al punto de ablandamiento se obtuvo 46 °C para el asfalto base y para los asfaltos modificados al 2 % ; 2,5 % ; 3 % y 4 % fueron 54 °C ; 58 °C ; 59 °C y 66 °C, respectivamente;

---

por lo que el asfalto modificado necesita una temperatura mayor para ablandarse. El cemento asfáltico convencional tuvo 8 % de recuperación, pero los del asfalto modificado fueron mayores, evidenciando mayor flexibilidad y elasticidad de la mezcla a bajas temperaturas y menos riesgo de fisuración. De acuerdo con el ensayo Marshall se obtuvo que el contenido óptimo de asfalto modificado con 3 % de polímero fue de 6,30 % en peso de la mezcla total, mientras que para el asfalto convencional fue 7,25 % ; por lo cual se puede afirmar que el uso de asfalto modificado es muy ventajoso, respaldado por las mejoras obtenidas en las propiedades.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*Una elevada susceptibilidad térmica causa problemas de fisuramiento en el pavimento; por lo que con un asfalto modificado se busca que este sea más flexible a bajas temperaturas y menos susceptible a altas temperaturas. Al verse reducido el grado de penetración del asfalto, se reduce la susceptibilidad al cizallamiento y aumenta la viscosidad (más resistente y menos riesgo a fracturarse a altas temperaturas); por lo cual, se incrementa el periodo de diseño del pavimento, alargando su vida útil. Al aumentar el punto de ablandamiento, se garantiza un buen funcionamiento del pavimento a altas temperaturas.*

---

### **Tabla 39.**

Ficha resumen correspondiente al estudio E23

---

<b>Título:</b>	<b>E23:</b> Evaluating the Physical and Rheological Properties of Rejuvenated Styrene-Butadiene-Styrene-Modified Asphalt Binders
<b>Autor (es):</b>	X. Chen, J.Wang, X. Zhang, H. Liu, J. Tong y R. Zhao
<b>Año:</b>	2020
<b>País:</b>	China

---

---

**Objetivo:** Evaluar las propiedades físicas y reológicas de los aglutinantes de asfalto modificado con estireno – butadieno – estireno rejuvenecido (SBSMA)

---

### **Metodología, Resultados y Conclusión**

---

La cantidad de polímero utilizado para la modificación de asfalto fue de 4,5 % . Se empleó la prueba RTFOT (envejecimiento a 163 °C durante 5 h) para simular el envejecimiento a corto plazo del asfalto modificado con estireno-butadieno-estireno rejuvenecido (SBSMA) en la etapa de construcción, procesos de producción, mezcla, transporte y pavimentación; además, se empleó PAV (envejecimiento a 100 °C por 20 h bajo 2,1 MPa de presión de aire) para simular el envejecimiento de campo a largo plazo del SBSMA en etapa de servicio. Luego de envejecido el material, se mezcló con los tres rejuvenecedores a temperatura de mezcla de 140 °C a 160 °C durante 30 min ; para posteriormente, probar la muestra envejecida y rejuvenecida y evaluar sus propiedades físicas y reológicas.

Dentro de las propiedades físicas a evaluar se incluyó penetración (25 °C), punto de ablandamiento y ductilidad (5 °C), haciendo uso de las normativas correspondientes; así mismo, para evaluar las propiedades reológicas se utilizaron el reómetro de cizallamiento dinámico (DSR) en el modo controlado por deformación (en un rango de temperatura de 64 °C a 82 °C con incrementos de 6 °C), el grado de rendimiento (PG) de baja temperatura se estimó utilizando el reómetro de haz de flexión (BBR) (a dos temperaturas de prueba de -12 y -18 °C) y las pruebas de recuperación de fluencia de tensión múltiple (MSCR) se realizaron a 70 °C , utilizándose dos niveles de tensión de carga de 0,1 kPa y 3,2 kPa . La fatiga fue evaluada por la prueba de barrido de amplitud lineal (LAS), la cual se realizó a 25 °C de temperatura y con muestras de 8 mm de diámetro por 2 mm de espesor.

---

---

En comparación con los residuos de los envejecimientos RTFOT y PAV, las propiedades físicas del primer y segundo SBSMA rejuvenecido, mejoraron y se presentaron como disminución del punto de ablandamiento y aumentos de la penetración y ductilidad. El rejuvenecedor del Tipo I fue el de mejor rendimiento; para el primer rejuvenecimiento se tuvo una dosis óptima de 6 % a 8 % y para el segundo rejuvenecimiento de 10 % a 12 % . La adición de rejuvenecedor a SBSMA envejecido, redujo la resistencia a formación de surcos del asfalto a alta temperatura, además, se evidenció valores de rigidez de fluencia más bajos y una tasa de relajación más alta en el SBSMA rejuvenecido a comparación del envejecido y; se esperó que la mejora en las propiedades de relajación de los asfaltos rejuvenecidos aumente la resistencia al agrietamiento a baja temperatura de los pavimentos rejuvenecidos.

Se observó como resultado una reducción del porcentaje de recuperación y un aumento en la deformación de fluencia no recuperable, lo que indica efectos positivos de los rejuvenecedores en la formación de surcos a alta temperatura. En general, se demostró que el empleo de rejuvenecedores tiene un potencial de mejora de las propiedades físico – reológicas y características de rendimiento del SBSMA envejecido; siendo el rejuvenecedor que mejor se comportó el de tipo I, con una dosis óptima de 6 % a 8 % y para el segundo rejuvenecedor, de 10 % a 12 % .

---

### **Aporte a la investigación**

*Los parámetros de clasificación tradicionales de los aglutinantes asfálticos, como la penetración, el punto de ablandamiento y la viscosidad, no pueden reflejar completamente la viscoelasticidad de los aglutinantes asfálticos. A mayor contenido de rejuvenecedor, la penetración aumenta y el punto de ablandamiento disminuye.*

---

**Tabla 40.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E25*

<b>Título:</b>	<b>E25:</b> Evaluation of Properties and Micro-Characteristics of Waste Polyurethane/Styrene-Butadiene-Styrene Composite Modified Asphalt
<b>Autor (es):</b>	Bei Chen, Fuqiang Dong, Xin yu y Changjiang Zheng
<b>Año:</b>	2021
<b>País:</b>	China
<b>Objetivo:</b>	Reemplazar parte del modificador de estireno – butadieno – estireno (SBS) con poliuretano residual (WP) para la preparación de asfalto modificado compuesto WP / SBS, así como explorar sus propiedades y microestructura.

---

**Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Se prepararon muestras de asfalto modificado con WPU/SBS a partir de un asfalto a base de SK con penetración 60/80. Se realizó la caracterización de cada material y posteriormente se prepararon las mezclas haciendo uso de una cizalla FM300-DIGITAL. Primero se fundieron tres muestras de asfalto a 175 °C y se agregaron 3 % ; 4 % y 5 % de SBS; después, el asfalto base se cortó con una máquina cizalladora a 3000 rpm durante 1 h y se calentó a 180 °C , para luego ser agitado con un mezclador durante 1 h . Para la mezcla de asfalto con WPU/SBS se siguió un proceso similar.

Se llevaron a cabo las pruebas de rendimiento y observación de la microestructura del asfalto modificado compuesto WPU/SBS. Las pruebas básicas contemplaron los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y ductilidad a 5 °C . La sensibilidad a la temperatura se puede caracterizar por el índice de penetración (IP), cuanto mayor sea esta, menor será la sensibilidad; así mismo, la viscosidad del asfalto WPU/SBS se evaluó mediante una prueba de



---

viscosidad rotacional. Para las pruebas de propiedades reológicas se realizaron pruebas de barrido de temperatura, haciendo uso de un reómetro de cizallamiento dinámico (DSR); se midieron el módulo de almacenamiento ( $G'$ ), módulo de pérdida ( $G''$ ), el módulo de fase y el factor anti - formación de surcos ( $G^* / \sin \delta$ ) del asfalto WPU / SBS, para explicar las propiedades de este a altas temperaturas. Se realizó también la prueba de fluencia de tensión múltiple (MSCR), se estudió la capacidad de retrasar la deformación elástica y recuperar el asfalto WPU/SBS. Luego, se ejecutaron pruebas de reómetro de haz de flexión (BBR) y se midió el rendimiento a baja temperatura del asfalto WPU/SBS haciendo uso de un TE-BBR SD. Además, se realizaron pruebas de estabilidad de almacenamiento y análisis de microestructura (microscopio de fluorescencia y prueba de espectroscopia infrarroja FTIR).

Con el aumento del contenido de modificador SBS, la penetración, punto de ablandamiento y ductilidad a 5 °C del asfalto modificado aumentaron gradualmente, lo que evidenció que la adición del modificador SBS contribuye a la mejora del rendimiento a altas y bajas temperaturas. Para el asfalto modificado compuesto, la penetración y ductilidad disminuyeron y el punto de ablandamiento aumentó gradualmente, evidenciando que el WPU puede endurecer el asfalto y mejorar su resistencia a la deformación a elevadas temperaturas. La viscosidad del asfalto modificado con SBS aumentó a medida que el contenido de polímero aumentaba; con el contenido de WPU la viscosidad del asfalto compuesto disminuyó al inicio y luego aumentó, siendo mejor cuando el contenido de WPU fue superior al 15 % . Según los resultados, WP puede reemplazar al SBS como modificador para asfalto modificado compuesto WP/SBS con buena resistencia a bajas temperaturas; sin embargo, presenta menor resistencia que el modificado con SBS a altas temperaturas. Siendo la dosificación más adecuada 4S/15W.

---

### **Aporte a la investigación**

---

---

*El índice de penetración (IP) refleja la sensibilidad a la temperatura del asfalto; cuanto mayor sea el PI, menor es la sensibilidad. Con el aumento del contenido de SBS en la muestra de asfalto el punto de ablandamiento aumentó gradualmente; lo que indicó que la modificación de asfalto con este polímero contribuye a la mejora del rendimiento a altas y bajas temperaturas.*

---

**Tabla 41.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E26*

---

<b>Título:</b>	<b>E26:</b> Evaluation of rheological behaviors and anti-aging properties of recycled asphalts using low-viscosity asphalt and polymers.
<b>Autor (es):</b>	Shisong Ren, Xueyan Liu, Haopeng Wan, Weiyu Fan y Sandra Erkens
<b>Año:</b>	2020
<b>País:</b>	Países bajos
<b>Objetivo:</b>	Utilizar asfalto de baja viscosidad modificado con polímeros, como rejuvenecedor para reciclar el asfalto envejecido.

---

**Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Primero se realizó la obtención del asfalto envejecido, por lo cual se procedió a ejecutar la prueba de soplado que consistió en colocar betún base n.º 70 al aire, soplando con un recipiente. Luego fue sometida a una temperatura de 220 °C y 230 °C con un caudal de aire de 2 L/min a temperatura de presión atmosférica. En estas pruebas, el tiempo de envejecimiento por oxidación de asfalto virgen, se adaptó observando el cambio de valor de penetración; el asfalto envejecido se obtuvo cuando se alcanzó una penetración de 10 dmm , que se basó en el valor real de penetración del aglutinante envejecido del pavimento asfáltico recuperado. El rejuvenecedor de asfalto modificado con SBS fue preparado por un mezclador de alto

---

---

cizallamiento; el asfalto base n.º 200 se calentó a 140 °C y el 6 % en peso de SBS. Esto se combinó alrededor de 1 h a una velocidad de 5000 rpm a 175 °C . Finalmente, para obtener el asfalto modificado SBS estable con polímero, se agregó 0,12 % en peso del azufre a la mezcla, esto se realizó mediante un mezclador a una velocidad de rotación de 1000 rpm durante 2 h . De igual manera, se preparó el rejuvenecedor de asfalto modificado con CR; tomando como base el asfalto n.º 200, se calentó a una temperatura de 140 °C y se añadió un 20 % en peso del caucho triturado al asfalto de baja viscosidad. La mezcla se calentó a 180 °C y se homogenizó bajo una velocidad de 1000 rpm durante 3 h , para asegurar tanto la hinchazón como la dispersión de partículas de caucho triturado en asfalto. Los rejuvenecedores de asfalto modificado con polímeros se mezclaron durante 30 min a una velocidad de 1000 rpm ; la temperatura de la mezcla se fijó en 140 °C para evitar que los rejuvenecedores se envejecen y mantener la alta eficiencia de la mezcla entre rejuvenecedor y asfaltos envejecidos.

Las mezclas obtenidas fueron sometidas a 4 pruebas, la primera fue la del viscosímetro rotacional (RV) en donde se evaluó el impacto del rejuvenecedor de asfalto modificado con polímeros, usando un viscosímetro rotacional Brookfield a una temperatura de 135 °C y a una velocidad de 20 rpm . En la segunda prueba de reómetro de cizallamiento dinámico (DSR), los métodos reológicos, incluido la prueba de temperatura de barrido, la prueba de frecuencia de barrido, fluencia y recuperación de tensión múltiple (MSCR) y la prueba de estado de flujo estacionario, se realizaron probando el asfalto mediante el método de barrido de temperatura a una frecuencia de 102 rad/s y aumentando la temperatura de 48 °C a 78 °C . Además, la prueba de barrido de frecuencia de 60 °C también fue sometida con el aumento de la frecuencia de 101 rad/s a 102 rad/s ; la prueba MSCR se ejecutó en el RTFO-envejecido con las muestras de asfalto en dos niveles de tensión de 0,1 kPa y 3,2 kPa a una temperatura de 60 °C , con la finalidad de medir los comportamientos de flujo viscoso del asfalto reciclado modificado con

---

polímeros. La región de velocidad de corte fue de 103 rad/s a 102 rad/s . En la tercera prueba del reómetro de haz de flexión (BBR), se midió el rendimiento a bajas temperaturas de la resistencia al agrietamiento de las fibras recicladas modificadas con polímeros, en función de los parámetros de rigidez a la fluencia (S) a las temperaturas de 18 °C y 24 °C . Por último, se realizó las pruebas de envejecimiento a corto y largo plazo donde se agregó 35 g de asfalto reciclado al horno rotatorio de película delgada rodante (RTFOT) a 163 °C . La tasa de aire caliente del horno y la velocidad de rotación se estableció en 4000 ml/min y 15 rpm durante 85 minutos, luego en el recipiente de envejecimiento a presión (PAV) se agregaron 50 g de la muestra de RTFOT en las placas, a una temperatura experimental de 90 °C y la presión de aire fue de 2,1 MPa ; la muestra de PAV se obtuvo después de 20 h .

Se encontró que el asfalto tiene una excelente propiedad a altas temperaturas, pero presenta una peor capacidad antifisuras cuando la temperatura es baja; afortunadamente las propiedades como penetración, ductilidad y viscosidad de los asfaltos se pueden restaurar agregando asfalto de baja viscosidad. Comparado al asfalto envejecido, la penetración y ductilidad del BA3-7 de asfalto reciclado aumentó en 30 dmm y 1,4 cm , mientras que la viscosidad a 135 °C disminuyó en 8,3 Pa/s . Sin embargo, el punto de reblandecimiento del asfalto envejecido disminuyó de la temperatura 84,1 °C a 60,4 °C , después de agregar asfalto de baja viscosidad.

Se concluyó que el asfalto de baja viscosidad puede mejorar la penetración y ductilidad del asfalto envejecido, pero se debilitan estas propiedades al ser sometidos a una alta temperatura; mientras tanto, la influencia del asfalto de baja viscosidad en la mejora de las propiedades a baja temperatura del asfalto envejecido es limitada, por eso se seleccionaron SBS y CR para modificar y mejorar aún más el asfalto reciclado.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*El asfalto modificado reciclado con SBS tiene una mejor eficacia frente a bajas temperaturas, así como mejora las propiedades elásticas del asfalto.*

*El asfalto envejecido tiene un buen comportamiento a altas temperaturas, pero con un comportamiento desfavorable a temperaturas bajas y peor trabajabilidad.*

*El grado de penetración se reduce considerablemente cuando la mezcla de asfalto modificada con SBS ha sufrido un proceso de envejecimiento, a su vez que el punto de ablandamiento aumenta.*

**Tabla 42.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E27*

<b>Título:</b>	<b>E27:</b> Evaluation of Rheological Behavior, Resistance to Permanent Deformation, and Resistance to Fatigue of Asphalt Mixtures Modified with Nanoclay and SBS polymer.
<b>Autor (es):</b>	Gabriela Ceccon Carlesso, Glicerio Triches, Joao Victor Staub de Melo, Matheus Felipe Marcon, liseane Padilha Thives y Lidia Carolina da Luz.
<b>Año:</b>	2019
<b>País:</b>	Brasil
<b>Objetivo:</b>	Realizar un análisis comparativo del comportamiento reológico y resistencia a la permanente deformación y fatiga de cuatro mezclas asfálticas diferentes.

**Metodología, Resultados y Conclusión**

Se realizó la modificación del ligante convencional y la caracterización de los ligantes modificados en una mezcladora de laboratorio de alto cizallamiento; de esta manera se obtuvo el ligante al 3 % NC (modificado por 35 % de nanoarcilla) y el ligante al 3 % NC + 2 % SBS (modificado por 3 % de nanoarcilla y 2 % de polímero SBS). La temperatura en la que se realizó

la modificación para producir el ligante 3 % NC fue de 150 °C , con una velocidad de corte de 5000 rpm y un periodo de 100 min y; la temperatura de la modificación del ligante 3 % NC + 2 % SBS fue de 180 °C en un periodo de 180 min a una velocidad de 5000 rpm . Luego se aplicó el método Superpave, con el uso de un compactador giratorio, dosificando de acuerdo con los criterios del tamaño nominal y volumen del ligante de diseño. Las mezclas asfálticas se produjeron y compactaron a temperaturas con viscosidades de 0,17 Pa.s y 0,28 Pa.s ; después, se moldearon 3 placas, una con dimensión de 60 x 40 x 9 cm y dos de 50 x 18 x 5cm en la mesa de compactación LCPC. La caracterización del comportamiento reológico de las diferentes mezclas fue evaluada mediante una máquina de ensayos de flexión en cuatro puntos, para cada mezcla se ensayaron dos probetas, bajo flexión alterna con carga sinusoidal manteniendo la amplitud de deformación y se evaluaron a temperaturas de 0,5 °C ; 10 °C ; 15 °C ; 20 °C ; 25 °C y 30 °C con frecuencias de carga de 0,1 Hz ; 0,2 Hz ; 0,5 Hz ; 1 Hz ; 2 Hz ; 5 Hz; 10 Hz y 20 Hz . Se construyeron curvas maestras en la temperatura de 20 °C basadas en el principio TTS aplicando la ecuación de Williams – Landel – Ferry, cuyas constantes se calcularon mediante el software Viscoanalyse. Luego se evaluó la resistencia a la deformación permanente de las 4 diferentes mezclas, a una temperatura de 60 °C , aplicando en un solo eje una carga de una sola rueda, con intensidad de 5 kN , a una presión de inflado de neumáticos de 0,6 MPa y a una frecuencia 1 Hz . El desarrollo de huecos y formación de surcos fue medido después de 100; 300; 1000; 3000; 10 000 y 30 000 ciclos, luego fueron comparados con límites establecidos por las normas europeas. En la evaluación de la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas, los ensayos se colocaron en la máquina de flexión en cuatro puntos, en total fueron 15 probetas de cada mezcla a niveles de deformación de 80 uE y 375 uE (um/m), a una frecuencia de 10 Hz y a temperatura de 15 °C a 20 °C ; finalmente, se realizaron simulaciones numéricas en base a estructuras para estimar la deformación por tracción que sufren las fibras

---

inferiores de las capas asfálticas, a una velocidad de 20 m/s y a la temperatura de los ensayos de fatiga.

Se obtuvo que la modificación de los ligantes provocó una disminución de la penetración y un aumento del punto de reblandecimiento, entre estos resultados destacan la penetración baja obtenida para el ligante 3% NC + 2% SBS y el punto de reblandecimiento alto para el ligante SBS 60/85, estas características indicaron que las mezclas asfálticas formuladas serían muy resistentes a la deformación permanente, y se esperó un mejor desempeño en las mezclas SBS 60/85 y 3 % NC + 2 % SBS; sin embargo, en cuanto a la propiedad de recuperación elástica presentó un valor superior para el ligante SBS 60/85, esto se debió al contenido del polímero elastomérico agregado al material en un 4 % . La baja recuperación elástica del ligante 3 % NC se produjo debido a que, en la modificación, la nanoarcilla no funcionó como un producto elastomérico.

La viscosidad de los ligantes modificados cumplieron con lo establecido. Para la mezcla 3 % NC + 2 % SBS se obtuvo el efecto positivo de la nanoarcilla, en términos de trabajabilidad de la mezcla, con el efecto negativo de la presencia del polímero.

En cuanto a las curvas de caracterización reológica en general, indicaron una mayor rigidez para las mezclas asfálticas modificadas, la mezcla 3 % NC + 2 % SBS mostró valores muy altos, lo que quiere decir que la mezcla tendrá mayor resistencia a deformarse permanentemente. En la resistencia a la fatiga, debido al aumento considerable de la rigidez del material, no tuvo un mayor efecto; lo cual se verificó en la caracterización del ligante.

En relación con la reducción de la profundidad del surco que en campo es hasta un 58 % , las mezclas SBS 60/85 y 3 % NC, podrían llegar hasta el 35 % y 29 % , respectivamente.

---

---

Referente a los límites máximos para la profundidad de ahuellamiento establecidos, todas las mezclas asfálticas cumplieron con el criterio del 10 % para 30 000 ciclos de carga. Sin embargo, solo la mezcla 3 % NC + 2 % SBS cumplió el criterio más restrictivo, correspondiente al 5 % . Se concluye que mediante la comparación de las mezclas modificadas, el compuesto 3 % NC + 2 % SBS contiene una menor cantidad de polímero y se comporta mejor en cuanto a la resistencia de la deformación permanente, pudiendo sustituir a la mezcla SBS 60/85; por lo cual, podemos decir que el uso de polímeros junto con nanotecnología puede conducir a grandes avances en el área de mezclas asfálticas modificadas, para utilizarse en vías donde se requiere un mayor desempeño de los materiales de pavimentación. Se destaca que esta alternativa tiene un gran potencial para brindar superficies asfálticas mejoradas, principalmente en regiones de clima tropical y en carreteras sometidas a tráfico pesado lento.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*Las muestras modificadas con SBS tuvieron una mayor resistencia a la fatiga; así como una reducción en la penetración, aumento considerable de la viscosidad y aumento en el punto de ablandamiento.*

*A menor grado de penetración aumenta la rigidez y disminuye el ángulo de fase; por lo tanto, la resistencia a la deformación permanente es mayor. Por otro lado, al aumentar el punto de ablandamiento se reduce la sensibilidad a los daños por elevadas temperaturas.*

---

### **Tabla 43.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E28*

---

**Título:** **E28:** Evaluation the effects of nanoclay on permanent deformation behavior of stone mastic asphalt mixtures

---

**Autor (es):** M.Ameri, R. Mohammadi, M. Vamegh y M. Molayem

---



---

**Año:** 2017

---

**País:** Irán

---

**Objetivo:** Investigar los efectos de la nanoarcilla sobre las propiedades viscoelásticas de dos categorías distintas de mezclas de asfalto – masilla de piedra (SMA), con fibras y polímeros.

---

### **Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Se hizo uso de un betún puro de grado 60/70, agregados de piedra caliza, fibras de celulosa y polímero de estireno butadieno estireno (SBS); además de diferentes dosis de partículas de nanoarcilla de montmorillonita. Para la preparación de aglutinantes modificados con polímeros, se añadieron las cantidades correspondientes de SBS en un mezclador de alto cizallamiento y se realizó el proceso de mezclado por 45 min a una velocidad de 5000 rpm y temperatura de 175 °C . Para los aglutinantes asfálticos nano – modificados, se añadieron las partículas de nanoarcilla al asfalto modificado en dosis de 1 % ; 2 % ; 3 % y 4 % en peso del bitumen; el proceso de mezclado duró 30 min a 6000 rpm y 160 °C de temperatura.

Para determinar el ligante óptimo de asfalto se aplicó la metodología Marshall (ASTM D 1599) y para fabricar las probetas se utilizó un compactador giratorio Superpave, el cual ejerció una presión vertical de 600 kPa y 100 giros a 170 °C de temperatura; antes de mezclar de acuerdo con el diseño, los agregados debieron calentarse a 180 °C y las nanoarcillas a 140 °C. Si las mezclas eran con aglutinante no modificado se le agregaron fibras orgánicas con una temperatura de 140 °C al 0,4 % del peso de los agregados.

Para evaluar cuantitativamente la resistencia de las diferentes mezclas asfálticas frente a la deformación plástica, se realizó la prueba de fluencia dinámica; además, para estudiar la resistencia a la formación de surcos de todas las muestras realizadas, se aplicó la prueba de pista de ruedas de Hamburgo. Para la prueba de estabilidad de almacenamiento se colocaron

---

en un horno las muestras de 32 mm de diámetro y 160 mm de altura, a una temperatura de 163 °C durante 48 h , para luego dejar enfriar a temperatura ambiente y efectuar las mediciones; también se realizaron pruebas de viscosidad rotacional y la prueba de Marshall.

Como resultados se obtuvo que la adición de nanoarcilla puede reducir considerablemente la diferencia entre los puntos de ablandamiento de los ligantes asfálticos; es decir, la mezcla se vuelve más estable. En la prueba de viscosidad rotacional se observó que el betún modificado al 5 % tuvo mayor viscosidad que el betún puro; así mismo, se observó que la adición de arcilla contribuyó al aumento de la viscosidad. La prueba de Marshall arrojó que las muestras que contienen fibras tienen más flujo que las modificadas con polímeros; también, se observó que las mezclas con contenido más bajo de nanoarcilla tuvieron un flujo de Marshall mayor que las que tienen dosis más altas. Las mezclas que tuvieron ligantes modificados con polímeros tuvieron una mayor resistencia a las deformaciones plásticas y menos profundidad de surcos en comparación con las que tuvieron fibras; además, la adición de nanoarcilla hasta un 3 % mejoró dichas propiedades.

Se concluyó que la mezcla de SMA con ligante modificado y 3 % de nanoarcilla tuvo mayor resistencia a la deformación permanente.

---

### **Aporte a la investigación**

*En la prueba de estabilidad de almacenamiento, cuantos menores sean las diferencias entre los valores de punto de ablandamiento, mayor estabilidad presentará el asfalto; por ende, un mejor comportamiento del pavimento asfáltico ante las variaciones de temperatura durante su vida útil.*

---

**Tabla 44.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E29*

<b>Título:</b>	<b>E29:</b> Experimental investigation on storage stability and phase separation behaviour of polymer-modified bitumen
<b>Autor (es):</b>	Jiqing Zhu, Xiaohu Lu y Niki Kringos
<b>Año:</b>	2016
<b>País:</b>	Suecia
<b>Objetivo:</b>	Capturar y analizar el proceso de separación de fases en los betunes modificados con polímeros (PMB) inestables.

#### **Metodología, Resultados y Conclusión**

Se utilizaron cuatro aglutinantes base, todos con grado de penetración 70/100, de diferentes fuentes para preparar el asfalto modificado con polímeros; respecto al modificador SBS utilizado, fue un tribloque lineal (Kraton ® D-1101CU). Para la preparación de los PMB, se mezcló cada uno de los 4 aglutinantes base con 5 % de SBS (en peso de la mezcla) a 180 °C y se le aplicó agitación de 500 rpm durante 3 h .

Luego de la preparación, se realizaron pruebas a los aglutinantes, incluyendo penetración y punto de ablandamiento; además de la prueba de tubo, en la que se almacenaron los PMB en un horno a 180 °C durante 3 días y luego se hicieron las mediciones correspondientes, siendo considerados estables si la diferencia entre el punto de ablandamiento de la parte superior e inferior del tubo no supera los 5 °C . De igual forma, se utilizó un microscopio de fluorescencia Olympus® BX51 para observar su morfología, teniendo en cuenta que bajo este instrumento la fase rica en SBS se observa mucho más clara que la fase rica en betún.

Para la preparación de las muestras se utilizó el “método de película fina” que consistió en preparar una muestra de película delgada esparciendo una gota de muestra en un portaobjetos

---

de vidrio; dicha muestra estuvo almacenada en un horno durante varias horas y luego se dejó enfriar a temperatura ambiente. La primera parte de la observación fue de la morfología de cada muestra a temperatura de almacenamiento (180 °C); la segunda parte fue capturar el proceso de separación de fases en los PMB inestables también a 180 °C , pero como se trató de muestras inestables, ya se había visto una separación, por lo que se observaron a una temperatura mayor a la de almacenamiento (200 °C).

Se obtuvo que a 180 °C , los aglutinantes modificados 1 y 4, tuvieron estructuras binarias y las otras 2 estructuras muy homogéneas; es decir, la separación de fases se dio en los aglutinantes 1 y 4 (la fase rica en SBS se presentó continua en la muestra 1 y en gotitas en la muestra 4). Además, en la prueba de tubo se corroboraron estos resultados, debido a que la diferencia entre puntos de ablandamiento de las muestras 1 y 4 superaron lo estándar; lo que indicó que dichas muestras tienden a separarse durante el almacenamiento a alta temperatura; así mismo, luego de observar las muestras después del acondicionamiento recocado isométrico a 180 °C se obtuvo que las muestras 2 y 3 son estables incluso después de un tiempo de almacenamiento a alta temperatura.

La morfología de los PMB observada con microscopía de fluorescencia fueron consistentes con las pruebas de tubo de estabilidad, por lo que se generó la hipótesis de que la influencia de la gravedad debido a la diferencia de las densidades del polímero y el betún acelera la separación de fases.

Los criterios basados en SARA pueden dar evaluaciones inexactas y conclusiones engañosas de la compatibilidad del asfalto – polímero.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*La separación del polímero del asfalto durante la etapa de almacenamiento y transporte es un proceso de separación entre las fases rica en polímero y rica en betún; lo cual es un problema*

---

---

*de inestabilidad de almacenamiento en el asfalto modificado, que puede ser resultado de una diferencia de densidades entre los componentes de este.*

*En el ensayo de estabilidad de almacenamiento, cuanto menor sea la diferencia entre los valores de puntos de ablandamiento tomados en una muestra, mayor estabilidad tendrá el asfalto estudiado; se considera estable si esta diferencia no supera los 5 °C .*

---

**Tabla 45.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E30*

<b>Título:</b>	<b>E30:</b> Fatigue life prediction of the modified asphalt mixtures with ANFIS modeling
<b>Autor (es):</b>	M. Tiğdemir y S.F.Kalyonuoglu
<b>Año:</b>	2017
<b>País:</b>	Turquía
<b>Objetivo:</b>	Evaluar el efecto de la modificación de Estireno – Butadieno – Estireno (SBS) sobre las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente en términos de características de fatiga; así como presentar la confiabilidad del aparato de prueba de carga repetida controlado por computadora.

---

**Metodología, Resultados y Conclusión**

Para la elaboración de probetas se utilizó asfalto base AC 60/70 y piedra caliza triturada; se realizaron 87 ejemplares preparados según las pruebas de estabilidad de Marshall (altura media de 63 mm y 101,6 mm de diámetro). En el caso de clasificación densa, la cantidad óptima de asfalto fue de 5,15 % y para ligante asfáltico modificado de 4,5 % . Se prepararon las muestras en dos gradaciones diferentes: cuatro contenidos de polímero que contuvieron tres polímeros distintos (6 % ; 5 % ; 3,5 % y 2 %) y seis contenidos de asfalto diferentes (5,65 % ; 5,15 % ;

---

---

5 % ; 4,65 % ; 4,5 % y 4 %); el polímero se mezcló con asfalto haciendo uso de un motor eléctrico a 1500 rpm a 180 °C para garantizar una mezcla homogénea. El contenido óptimo del aglutinante fue de 0,5 % por peso de gradación 2 % y 5,15 % por peso de agregado de gradación 1, que se determinó mediante la prueba de Marshall y se eligió  $\pm 0,5$  % del porcentaje óptimo de asfalto para otros contenidos. Se aplicó la prueba repetida de tracción indirecta de carga y fatiga a dichas muestras, usando un aparato probador de asfalto de la Universidad de Suleyman Demirel (SDU); además, se analizaron los efectos de la gradación, porcentaje de betún, carga y tipo de polímero sobre el comportamiento a la fatiga. Para el análisis de los resultados de la prueba se aplicó la regresión lineal y el sistema de inferencia neuro difusa adaptativa (ANFIS). La modificación de asfaltos tuvo un efecto significativo en la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas; además, fue de suma importancia determinar los porcentajes óptimos de asfalto con precisión. La modificación de asfalto con polímeros mejoró el rendimiento a la fatiga en un 189 % en promedio.

---

### **Aporte a la investigación**

*Las propiedades físicas de penetración y punto de ablandamiento son factores que influyen en el rendimiento a la fatiga del asfalto. Se encontró que el aumento del porcentaje de polímero SBS en el asfalto incrementa parcialmente los valores de resistencia a la fatiga.*

---

#### **Tabla 46.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E31*

---

<b>Título:</b>	<b>E31: Impacts of high modulus agent and anti-rutting agent on performances of airfield asphalt pavement</b>
<b>Autor (es):</b>	Feipeng Xiao, Denghui Ma, Jiayu Wang, Degou Cai
<b>Año:</b>	2019

---

---

**País:** China

---

**Objetivo:** Investigar los rendimientos a altas temperaturas y las resistencias a la formación de surcos en el pavimento de los aeródromos.

---

### **Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Los dos aglutinantes de control utilizados fueron el aglutinante modificado SBS y el #70. En el estudio se utilizaron dos agentes de módulo alto (HM-1 y HM-2) y un agente anti-formación de surcos (ARA). Se preparó un total de 14 tipos diferentes de aglutinantes de asfalto. Los aditivos (HM y ARA) se mezclaron con aglutinantes de asfalto caliente A y B en contenedores de metal durante 1 h a alta velocidad (5500 rpm – 6500 rpm) a una temperatura de 170 °C – 180 °C y luego se almacenaron a 150 °C por 1 h , para lograr una mezcla homogénea.

Se obtuvieron las propiedades reológicas de los aglutinantes a temperaturas bajas, intermedias y altas, considerándose los estados de envejecimiento RTFO y PAV. Los ensayos de penetración (25 °C) y punto de ablandamiento se realizaron teniendo en cuenta las normativas correspondientes. El rendimiento de los asfaltos a alta temperatura se caracterizó por tres parámetros: factor de formación de surcos, cumplimiento de fluencia no recuperable (Jnr) y porcentaje de recuperación (R%); para medir dichos parámetros se utilizó un reómetro de cizallamiento dinámico Malvern (DSR).

A las mezclas se les realizó ensayos de resistencia al surco, mediante la prueba de la rueda de Hamburgo a 60 °C, midiendo la deformación permanente y calculando la estabilidad dinámica para obtener los rendimientos a altas temperaturas; además, se realizaron ensayos de susceptibilidad a la humedad, rendimiento a baja temperatura, etc.

La penetración inicial del aglutinante A fue 1 mm menor que la del aglutinante B, pero la tasa de disminución del aglutinante B fue mayor que la del aglutinante A, cuando se utilizó el mismo

---

modificador y dosis. El aditivo adicional causó un aumento en el punto de ablandamiento y estos incrementaron conforme la dosis de modificador fue aumentando.

El factor de formación de surcos aumentó con la mayor cantidad de polímeros modificadores; el aumento en el asfalto virgen fue mayor que en el asfalto modificado con SBS. Con el experimento MSCR se observó que el proceso de envejecimiento influyó en las propiedades de recuperación elástica de los asfaltos modificados y el SBS puede debilitar la influencia. Los modificadores afectaron de forma negativa el rendimiento a bajas temperaturas; sin embargo, los asfaltos modificados con polímeros múltiples tuvieron una mejor adherencia con los agregados y exhibieron una mejor resistencia a la formación de surcos a comparación del aglutinante original.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*El grado de penetración ayuda a determinar la consistencia del asfalto; a medida que aumenta el porcentaje de aditivo, disminuye el grado de penetración, por lo que el asfalto modificado tiene una resistencia mucho mejor a la deformación permanente a alta temperatura. El punto de ablandamiento es un indicador de consistencia, así como de resistencia ante la deformación permanente. A mayor porcentaje de polímero SBS, mayor punto de ablandamiento.*

---

### **Tabla 47.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E33*

---

<b>Título:</b>	<b>E33: Laboratory Evaluation of Aging Behaviour of SBS Modified Asphalt</b>
<b>Autor (es):</b>	Jie Wang, Yongchun Qin, Songchang Huang y Jian Xu
<b>Año:</b>	2017
<b>País:</b>	China

---



---

**Objetivo:** Proporcionar una base teórica para mejorar la vida útil del pavimento de asfalto modificado con SBS y reciclar la mezcla asfáltica modificada con SBS de descarte.

---

### **Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Se realizó la preparación de la muestra, la cual consistió en calentar la matriz de asfalto a 165 °C y se le añadió el aceite de caucho según el contenido preestablecido; luego se agregó el polímero SBS. La mezcla se agitó de manera uniforme a una velocidad de 1100 rpm durante 7 h aproximadamente a 180 °C , después se agregó el estabilizador en lotes y se continuó agitando durante 2 h para obtener una muestra de asfalto modificado con SBS. La producción de asfalto modificado y temperatura de construcción se controla generalmente entre 160 °C y 180 °C y las temperaturas de prueba de envejecimiento de TFOT se fijaron en 163 °C ; 173 °C y 183 °C , y el tiempo de envejecimiento a 3 h ; 5 h ; 7 h y 10 h . Las propiedades macroscópicas evaluaron principalmente la penetración (25 °C), punto de reblandecimiento, la ductilidad (5 °C), la viscosidad Brookfield y la tenacidad y; las propiedades microscópicas se centran en la característica por fluorescencia. Esta última se utilizó principalmente para el análisis de apariencia y cuantitativo del asfalto modificado.

Se observó que, con el aumento del tiempo de envejecimiento, la penetración y la ductilidad del asfalto modificado se redujo gradualmente; es decir, cuando la temperatura llegó a 173 °C y 183 °C , la ductilidad fue 0 después de 10 h , situándose cerca de la fractura frágil. Además, la diferencia de penetración y punto de reblandecimiento se incrementó progresivamente bajo diferentes temperaturas de envejecimiento. Cuando el tiempo de envejecimiento fue menor a 5 h y la temperatura de envejecimiento fue de 163 °C a 173 °C , el polímero SBS continuó realizando la reacción de hinchamiento, por ende, el segmento de la cadena molecular SBS en el asfalto aumentó; lo que condujo al incremento del área de partículas y la relación de área, así

---

como el efecto de restricción del polímero en el asfalto; por lo cual, las propiedades macroscópicas mostraron mayor dureza y tenacidad. Cuando la temperatura de envejecimiento superó los 173 °C , el polímero SBS tuvo una serie de reacciones, como la degradación y la escisión de la cadena y; el área de partículas y la relación del área disminuyeron, lo que lleva a la reducción del efecto de restricción en el asfalto.

Se concluyó que el envejecimiento tuvo una influencia significativa en las propiedades del asfalto modificado, pues se produjo una disminución de la penetración y la ductilidad y; un aumento del punto de reblandecimiento y la viscosidad. Las características microscópicas mostraron que la relación de área de partículas de SBS tuvo una correlación significativa con la tenacidad a medida que cambió la temperatura de envejecimiento.

---

### **Aporte a la investigación**

*El proceso de envejecimiento influyó de manera notable en los ligantes con SBS, esto se evidenció mediante la reducción de las propiedades como la penetración y la ductilidad y; a través de un incremento de la viscosidad y punto de reblandecimiento. A medida que el tiempo de envejecimiento fue mayor, la diferencia de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad aumentaron a diferentes temperaturas.*

---

### **Tabla 48.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E35*

---

<b>Título:</b>	<b>E35:</b> Modificación de la mezcla asfáltica mediante la incorporación de polímeros SBS en la Av. Canta Callao, entre la Av. Naranjal y la Av. Alisos
<b>Autor (es):</b>	Acosta Mestre Kenyi Manuel
<b>Año:</b>	2019
<b>País:</b>	Perú

---

---

**Objetivo:** Determinar la influencia de la incorporación de polímeros SBS (BETUTEC IC) en el comportamiento mecánico de una mezcla convencional PEN 60/70; dar a conocer si la incorporación de polímeros elastómeros mejora las propiedades mecánicas de una mezcla de asfalto convencional.

---

### **Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Se realizaron 2 diseños de mezcla asfáltica, en el primero se usó una mezcla de asfalto convencional PEN 60/70 y en el segundo diseño se utilizó el espécimen de betún modificado con SBS; a través del método de Marshal se analizaron las condiciones y propiedades mecánicas de ambas mezclas.

Para determinar la resistencia de la mezcla PEN 60/70 y la mezcla bituminosa con SBS (BETUTEC IC), fue necesario diseñar la mezcla bituminosa por el método de Marshall. Se utilizó la misma cantidad de porcentaje para los agregados, filler y el aditivo mejorador Amina – adhesol 5000 en ambas mezclas bituminosas, incorporando el aditivo a la mezcla. Se separaron 4 grupos de 3 briquetas cada uno y se colocó un porcentaje diferente de asfalto (5 % ; 5,5 % ; 6 % y 6,5 %) en los diseños de betún PEN 60/70 y BETUTEC IC. En la determinación de cantidad óptima de asfalto fue seleccionado el 4 % de vacíos y luego un 6 % como porcentaje de asfalto. El ensayo de compresión de la mezcla de asfalto se realizó después de haber concluido el ensayo Marshall, para lo cual se usaron 6 briquetas de betún habitual, en 2 grupos de 3 muestras, el primer conjunto se ensayó sin sumergir en agua y el segundo si se sumergió en agua; luego se sacó los promedios.

Se obtuvo que la cantidad óptima de betún para la mezcla bituminosa tradicional fue del 6 % y para la modificada fue de 5,8 % . Los especímenes de asfalto PEN 60/70 presentaron una estabilidad de 2516 lb en cuanto a la resistencia a la deformación; mientras que los de asfalto modificado con SBS, 2569 lb . Además, se presentó un flujo en los especímenes de PEN 60/70

---

de 0,0119, y de asfalto BETUTEC IC dieron un promedio 0,0123. En cuanto a la prueba de adhesividad el betún PEN 60/70 no cumplió con el requerimiento de porcentaje mínimo, pues tuvo un valor inferior de 95 % y; el asfalto BETUTEC IC contiene más que el 95 % , ubicándose en el grado 4. En el ensayo de dureza del asfalto PEN 60/70 se obtuvo un valor de 3785 kg/cm y las muestras de BETUTEC IC mostraron un promedio de 3718 kg/cm , logrando una reducción de 1,77 % , lo cual lo ubica dentro de lo establecido. En la prueba de resistencia a la compresión se presentó una resistencia de la mezcla sin sumergir de 28,6 kg/cm<sup>2</sup> y una cifra de 22,6 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia sumergida; mientras que el betún modificado con SBS presentó una resistencia de 35,5 kg/cm<sup>2</sup> sumergida y 40,2 kg/cm<sup>2</sup> sin sumergir. Referente al porcentaje de vacío, los especímenes PEN 60/70 mostraron un flujo de 0,0119 y los especímenes de BETUTEC IC una media de 0,0123.

Se concluyó que el SBS incorporado en la mezcla tradicional PEN 60/70, produjo notablemente una mejora en cuanto a sus propiedades mecánicas analizadas, como la resistencia a la compresión, flujo, adherencia y estabilidad; además, el porcentaje de asfalto necesario disminuyó en un 2 % . Por lo cual se evidenció que la mezcla BETUTEC IC puede sobrellevar de manera competente las cargas que se aplican sobre el terreno y que presentará una resistencia mejorada en cuanto a la fatiga; es decir, el tiempo de vida útil será mucho más largo, trayendo consigo la reducción de costes debido al mantenimiento que se requieren. Así mismo, se logró el incremento de la adherencia del cemento asfáltico con los agregados, excluyendo la utilización de aditivos mejoradores, así como la disminución del valor de rigidez al añadir SBS en la mezcla PEN 60/70.

---

### **Aporte a la investigación**

---

---

*El SBS aumenta el intervalo de plasticidad, por lo que la mezcla tiene una mejor respuesta al tipo de falla llamada "deformación permanente"; además, aumenta la cohesión entre el agregado y el cemento asfáltico, eliminando el uso de aditivo mejorador de adherencia.*

*El valor del índice de rigidez resulta a partir de la relación de estabilidad/flujo, obtenidos por el ensayo que lleva el mismo nombre. Al reducirse la rigidez de la mezcla de asfalto, se reduce el peligro de que se produzca falla por agrietamiento; además de mejorar la elasticidad de la mezcla asfáltica, lo que conlleva a que tenga una mejor respuesta ante la falla de deformación permanente.*

*Al adicionar polímeros SBS a la mezcla asfáltica convencional PEN 60/70, esta mejora de manera significativa sus propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, adherencia, estabilidad y flujo) y se reduce el porcentaje de asfalto requerido en un 2 %.*

---

**Tabla 49.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E36*

---

<b>Título:</b>	<b>E36: Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders</b>
<b>Autor (es):</b>	Ali Behnood y Mahsa Modiri Gharehveran
<b>Año:</b>	2018
<b>País:</b>	Estados Unidos
<b>Objetivo:</b>	Realizar una revisión sobre la reología, la morfología y las propiedades mecánicas de los asfaltos modificados con polímeros.

---

**Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Se procedió a realizar la prueba de mezcla en seco, colocando el polímero en estado sólido junto con el ligante bituminoso, el cual fue derretido a temperaturas altas de cizallamiento de entre 150 °C y 180 °C a una rapidez de 1500 rpm y 4500 rpm alrededor de 45 min y 180 min ,

---

---

mediante fuerzas de corte; luego el nanomaterial fue añadido al compuesto para ser cortado en condiciones de elevadas temperaturas; posteriormente se evaluaron sus propiedades reológicas. Otro método utilizado es por una fusión de solventes, en el cual el querosene y los nanomateriales se fusionan junto a un aglutinante bituminoso, a través de un cizallador a una temperatura media superior, hasta observar que el solvente se va evaporando lo necesario. Realizar el método de la fusión con disolvente produce una mejor dispersión a comparación de la prueba en seco, empero este último es más costoso que el primero y necesita un mayor contenido de disolvente, con el fin de dispersar una cantidad menor de nanomaterial en el aglutinante bituminoso, lo cual puede ser dificultoso para ser aplicado a escala industrial.

Se obtuvo que la dispersión de SBR y SBS en el ligante de betún fue mejorada debido a los nanomateriales; estos pueden generar que los polímeros con los ligantes bituminosos se dispersen gracias al tamaño pequeño de las partículas que poseen y a su superficie en el área, provocando la compatibilidad mayor en los sistemas; así mismo condujo a una mejora en cuanto a la reología de los ligantes bituminosos y su desenvolvimiento mecánico. Además, se descubrió que si se comparan los efectos de los diversos nanomateriales se obtiene que la nanosílice reduce la cifra de penetración e incrementa la temperatura del índice de reblandecimiento, mientras que la nanoarcilla eleva la cifra de penetración y reduce la temperatura del índice de reblandecimiento. El sistema polímero – betún, en su compatibilidad se condiciona por varios elementos diferentes: el tamaño y contenido de asfaltos y de moléculas del polímero y; la aromaticidad del malteno. Los resultados de las pruebas revelaron que el asfalto no era miscible con el copolímero en sus dos bloques, entre tanto el malteno sí lo fue; además, la correlación asfalto a SEBS establece la separación de fases en el compuesto betún/SEBS, y el contenido de malteno influye sobre una parte pequeña de la estructura en donde tienen predominancia los polímeros. El desempeño frente al ahuecamiento y

---

agotamiento del ligante asfáltico con nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) o nanotubos de carbono (CNT) agregados en un porcentaje, resultó en que la adición de menos del 3 % de MWCNT tuvo una influencia negativa respecto a la resistencia de formación de surcos del ligante de betún. Además, el ligante asfáltico modificado con 5 % CNT dosificado con nano-SiO<sub>2</sub>, presentó una mejor resistencia al ahuellamiento que el modificado solo con 5 % de CNT. Las moléculas de SBS fueron dispersadas conforme incrementó el tiempo en el que se produjo la mezcla. Al añadir azufre se produjo una estructura más flexible y las propiedades de la reología y la capacidad térmica de SBS-modificado, mejoró notablemente. Cuando se añadió a altas temperaturas el polietileno al betún, se produjo un incremento conforme se redujo el punto de fluidez del polietileno; en tanto, a temperatura inferiores, la inestabilidad e incompatibilidad del esparcimiento acrecentaron con la depreciación del polietileno, lo que conllevó a una reducción del rendimiento del asfalto modificado. La morfología del ligante asfáltico con SBS y azufre, resultantes después del proceso de envejecimiento, promovieron el desgaste del polímero y se incrementó la viscosidad del betún modificado. Por otra parte, se observó una variación del betún en su composición y se elevó el contenido de sus compuestos endurecidos, como las resinas y los asfaltenos; haciendo que su rendimiento a temperaturas superiores se optimice en cuanto a su capacidad de flexibilidad y la reducción de la sensibilidad térmica.

Se concluyó que las propiedades mecánicas y reológicas del aglutinante influyeron de manera notable en el trabajo de las mezclas bituminosas a lo largo de su vida útil; así mismo, los polímeros generaron un incremento de la viscosidad de los aglutinantes a temperaturas superiores e incremento de su ductilidad a temperaturas inferiores. La elección de un polímero adecuado para ser utilizado como modificador, tiene una respuesta positiva frente al tema económico y de ingeniería; además, los copolímeros de estireno-butadieno-estireno (SBS)

---

generan un incremento de la resistencia de las mezclas de asfalto frente a la formación de surcos, agrietamiento por desgaste, así como daños por humedad. Los polímeros de uso común generalmente se agregan en una concentración de 4 % a 6 % en peso de ligante asfáltico y mejoran las propiedades del asfalto.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*La incorporación de polímeros SBS a los aglutinantes bituminosos, logró una mejoría en cuanto a las propiedades básicas tales como grado de penetración y punto de ablandamiento; disminuyendo los valores del primero y aumentando los valores del segundo. Así mismo, presentó una respuesta positiva en otras propiedades como la viscoelasticidad, debido al tamaño de las partículas de polímero, ya que a más de 10  $\mu\text{m}$ , se incrementa la viscosidad del ligante de asfalto; además que se genera una resistencia superior frente al proceso de envejecimiento, una mejor adhesión con los agregados, una resistencia al ahuellamiento mejorada y presentan un desempeño óptimo en las propiedades de fluencia y rigidez.*

---

#### **Tabla 50.**

Ficha resumen correspondiente al estudio E38

---

<b>Título:</b>	<b>E38: Performance Evaluation of Bituminous Concrete Mixes Modified with SBS Polymer and Warm mix Additive</b>
<b>Autor (es):</b>	Harpreet Singh, Tanuj Chopra, Sahil Kamotra, Sambhav Jain y Amandeep Kaur
<b>Año:</b>	2019
<b>País:</b>	India
<b>Objetivo:</b>	Investigar el efecto del polímero SBS y el aditivo de mezcla tibia en el desempeño de las mezclas de concreto bituminoso.

---



---

## Metodología, Resultados y Conclusión

---

Se utilizó un betún de grado de viscosidad VG30 como asfalto base y se mezcló con polímero SBS al 3 % ; 5 % y 7 % , haciendo uso de una mezcladora capaz de mantener una temperatura constante y una velocidad de mezcla uniforme; se realizó la mezcla a temperaturas de 170 °C a 180 °C durante 2 h a 4000 rpm . Además, se utilizó aditivo Zycotherm con una dosificación del 0,1 % ; en lo que respecta a agregados, se utilizaron agregado de piedra caliza y agregado de lecho de río.

Se realizó la prueba de grado de penetración haciendo uso de la norma ASTM D5 para determinar la consistencia del material; así mismo se realizó la prueba de punto de ablandamiento haciendo uso de la normativa ASTM D36 para indicar la tendencia del material a fluir a altas temperaturas. Para las pruebas reológicas, como el módulo de corte complejo ( $G^*$ ) y el ángulo de fase, se utilizó un reómetro de cizallamiento dinámico (DSR) MCR52 para caracterizar el comportamiento viscoso y elástico del ligante a diferentes temperaturas; en la prueba se le aplicó un esfuerzo cortante sinusoidal al aglutinante bituminoso intercalado entre dos placas paralelas a una frecuencia de 10 rad/s (80 km/h de velocidad de tráfico) y la viscosidad se obtuvo haciendo uso de DSR MCR 52 a una velocidad de cizallamiento de 4 (1/s) con temperatura entre 60 °C y 12 °C . Finalmente, para el ensayo mecánico se evaluó la prueba de Marshall y la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla. El contenido óptimo de asfalto se definió realizando la prueba de Marshall, en la que la temperatura de mezcla estuvo entre 160 °C y 170 °C ; la muestra se compactó con un apisonador aplicando 75 golpes en cada lado. Se realizaron todas las mezclas con el porcentaje óptimo de asfalto, pero con variación en el contenido de polímero; además, se realizó la prueba de resistencia a la tracción indirecta (ITS), lo que se puede relacionar con propiedades de agrietamiento del pavimento bituminoso.

---

---

Como resultado se tuvo que con un aumento de SBS de 3 % al 7 % se observó una disminución gradual del grado de penetración y un aumento en el punto de ablandamiento; así mismo, con un aumento del SBS del 5 % al 7 % , el grado de penetración y punto de ablandamiento se comenzaron a estabilizar; para evitar una separación de fases del polímero, se sugirió un 5 % de SBS en el asfalto. Además, se pudo observar que el aditivo Zycotherm redujo la viscosidad del aglutinante; es decir, aumentó el grado de penetración.

Por otro lado, hubo un aumento en el valor de  $G^*/\text{Sin}\ddot{\gamma}$  , lo que indicó un aumento en el rendimiento de resistencia a la formación de surcos del ligante bituminoso; además, el aditivo Zycotherm no influyó en dicha propiedad.

Según el método de Marshall, para la piedra caliza se debe utilizar 5,3 % de ligante, mientras que para el agregado de lecho de río 5,26 % ; así mismo, con el aumento del contenido de SBS, se evidenció un incremento en el valor de la estabilidad y disminución en el valor de flujo. Por otro lado, se obtuvo que el betún modificado tuvo mayor resistencia a la tracción que el betún convencional.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*Se observó una disminución del grado de penetración con la adición de polímero SBS al asfalto, esto es positivo ya que un valor de penetración más alto indica una consistencia más suave del aglutinante; es decir, a mayor valor de penetración, menor consistencia.*

*El punto de ablandamiento indica la tendencia del asfalto a fluir a elevadas temperaturas. En el presente estudio se observó un aumento del punto de ablandamiento con la adición de polímero SBS al asfalto; también se recomendó no superar el 7 % de SBS para conservar la estabilidad en la mezcla, ya que al utilizar mayor dosis de polímero, este puede experimentar una separación de fases.*

---

**Tabla 51.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E42*

<b>Título:</b>	<b>E42:</b> Rehabilitación de carreteras pavimentadas utilizando mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros
<b>Autor (es):</b>	Josué Ariel Velásquez Mayen
<b>Año:</b>	2016
<b>País:</b>	Guatemala
<b>Objetivo:</b>	Ser una guía que amplíe los conocimientos sobre la rehabilitación de una carretera, utilizando asfalto modificado con polímeros y que justifique el uso de un polímero de estireno butadieno en el asfalto. Determinar qué propiedades se mejoran al incluir modificadores polímeros en el asfalto.

---

**Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Se utilizaron 2 métodos para establecer el punto de reblandecimiento, los cuales fueron el de anillo y bola (BA) y el de Kraemer-Sarnov (KS). En el primer método BA, se procedió a colocar el material bituminoso líquido y se dejó enfriar a temperatura ambiente, para después situarlo sobre el disco del material y con la ayuda de una bola de acero, se introdujo en un envase con agua, calentándose a 5 °C por 60 s . Cuando la temperatura marcó a través del termómetro que fue sumergido en el agua, se estableció el punto de reblandecimiento al instante en el que la bola (al arrastrar la mezcla asfáltica) alcanzó a la placa ubicada bajo la probeta, a unos 25 mm .

Para el método KS, a través de un tubo de vidrio se colocó un tampón de betún de 25 g en el fondo; después se puso 5 g de mercurio en el tubo, para que gravite sobre el betún. Posteriormente, el tubo fue introducido en baño maría, calentándose a una temperatura de 2 °C alrededor de 60 s , hasta observarse que se precipitó en el fondo o pasó a través del material de mercurio. La prueba de ductilidad ASTM D-113, fue realizada a través de un ductilómetro, en la cual una

---

probeta fue colocada en un recipiente con agua y se sometió a una fatiga de tracción a 25 °C por 5 cm/min de manera constante; se realizaron 4 repeticiones de este proceso. La cohesión fue evaluada haciendo uso de un cubo de acero con una de sus caras estriada (10 mm de lado), en el que se colocó una capa del cemento de asfalto (cantidad de 1 mm) sobre un soporte de acero en un área de 1 cm<sup>2</sup> y con un péndulo, se golpeó después de haber girado 180 °C ; luego, a través de una aguja se midió la energía que fue desprendida con el impacto.

Se encontró que los asfaltos utilizados en el diseño de las vías, tuvieron índices de penetración en un rango de -1 y +1: fueron menores a -1, los compuestos asfálticos newtonianos, indicando susceptibilidad a temperaturas inferiores y; presentaron más de +1, los asfaltos oxidados y los modificados con SBS, evidenciando menor susceptibilidad a las variaciones de temperatura. La evaluación del comportamiento de un cemento asfáltico en comparación de los demás, es establecido mediante el punto de reblandecimiento; sin embargo, este no indica una alteración de manera concreta respecto a las propiedades a una temperatura específica.

Se concluyó que la respuesta mecánica de las propiedades de un cemento de asfalto, a cierta temperatura, se condiciona por la perdurabilidad a la que es sometida a las ruedas de los vehículos. En campo, los cementos de asfalto son utilizados con viscosidades bajas, producidas de manera general por el calentamiento al que se somete el material, con la finalidad de generar el envolvimiento y mojado. Luego, cuando ya se encuentran enfriados vuelven a su estado inicial, y se unen para formar la estructura que da la resistencia apropiada que permite tolerar el movimiento vehicular; sin embargo, cuando el betún es colocado, ante la variación de la temperatura de su entorno debe preservar su consistencia, pues si esto no sucede y la temperatura se reduce más de lo usual; al volverse a incrementar, el betún sufrirá alteraciones debido al tráfico pesado, se volverá rígido, débil y propenso al agrietamiento. Cuando se produce la mezcla bituminosa en caliente, la absorción y floculación demoran una cantidad de tiempo en efectuarse; si el agregado

---

frío tuviera contacto con la mezcla bituminosa caliente, la temperatura se reduciría de manera veloz, produciéndose tensiones en la superficie que llegarían a separar el asfalto del agregado. Por lo cual se debe calentar el agregado pétreo con el fin de evitar las tensiones; ya que al ir temperándose el betún, irá tomando una consistencia correcta, y trayendo consigo una buena resistencia.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*La elección del tipo de polímero elastómero SBS como modificador bituminoso, posee una influencia positiva en la mejora de las propiedades físico – mecánicas de la mezcla, mediante la generación de reacción entre iones de forma superficial cuando se encuentran en una fase caliente, lo que aumenta la capacidad de adherencia de la materia pétreo y el cemento bituminoso, aún en presencia de agua; además, ofrecen un comportamiento mejorado frente a cargas inferiores y frente a la susceptibilidad a temperaturas. La temperatura de ablandamiento del betún modificado se incrementó y el índice de penetración se redujo, haciéndolo más rígido y soportando largos períodos de carga sin presentar deformaciones; además su capacidad de recuperación elástica fue superior, su alta viscosidad lo hizo más resistente y se redujo el riesgo de fluir a altas temperaturas (ahuellamiento).*

---

### **Tabla 52.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E43*

---

<b>Título:</b>	<b>E43:</b> Revised Penetration Method Based on Evaluate High Temperature Property of SBS Modified Asphalt
<b>Autor (es):</b>	Sen Han, Pei Sun, Yamin Liu, Wei Li
<b>Año:</b>	2017
<b>País:</b>	China

---

---

**Objetivo:** Proponer condiciones apropiadas de prueba de penetración para asfalto modificado con SBS en condiciones de laboratorio.

---

### **Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Los ligantes bases utilizados fueron el SK90#, ESSO90# y SL90# y; como modificadores se utilizaron cuatro SBS, numerados como L-1, L-2, S-1 y S-2. Además, se eligió un estabilizador de dosis de 2,6 % . La temperatura de prueba estándar fue de 30 °C , el peso de 150 g y el tiempo de inyección de 5 s . También fueron seleccionados 3 tipos de pesos de penetración (de 50 g a 150 g) y 4 tipos de temperatura (de 15 °C a 35 °C). Luego de hacer las pruebas de penetración en 15 tipos de muestras de asfalto modificado con SBS, se observó que con el aumento regular de la dosis de SBS, algunos cambios en la penetración fueron irregulares y que en otros casos no fueron considerables o no existieron cambios.

La prueba de penetración existente no pudo evaluar realmente el rendimiento a alta temperatura de la mezcla modificada con SBS; cuando la temperatura subió de 15 °C a 35 °C , la penetración se incrementó y la viscosidad disminuyó. A menor temperatura la diferencia entre las penetraciones de los asfaltos fue corta; al aumentar la temperatura, la diferencia fue mayor.

A raíz de todo esto, se concluyó que, para el mismo asfalto (con el aumento de la temperatura y el peso de penetración), la diferencia de penetración de diferentes dosis de SBS se hizo mayor.

El estudio presentó un método que modificó la prueba de penetración estándar a un peso de 150 g , una temperatura de 30 °C y un tiempo de inyección de 5 s . En una de las muestras ensayadas, al modificar de 3,5 % a 4,5 % la dosis de SBS, la penetración se duplicó; mientras en condiciones estándar no se evidenció un aumento considerable. Así mismo, las muestras ensayadas en las que las penetraciones no sufrían variación respecto a las pruebas estándar, con las nuevas condiciones experimentaron una diferencia de penetraciones de 9 dmm .

---

---

Con el nuevo método de prueba de penetración descrito, se puede señalar con precisión la relación entre penetración del asfalto modificado con SBS y el rendimiento de la mezcla a altas temperaturas.

---

### Aporte a la investigación

---

*A mayor temperatura, el grado de penetración aumenta. Al comparar dos muestras de asfalto, si están expuestas a temperaturas que se diferencia a más de 30 °C , entonces se notarán diferencias grandes en sus grados de penetración.*

---

**Tabla 53.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E44*

---

<b>Título:</b>	<b>E44: Studying the Properties of SBS/Rice Husk Ash-Modified Asphalt Binder and Mixture</b>
<b>Autor (es):</b>	Zhen Lu, Aimin Sha, Wentong Wang y Junfeng Gao
<b>Año:</b>	2020
<b>País:</b>	China
<b>Objetivo:</b>	Estudiar las propiedades del ligante y la mezcla de poliestireno-butadieno-estireno (SBS) y asfalto modificado con RHA.

---

### Metodología, Resultados y Conclusión

---

Se seleccionó el asfalto n.º 70 como asfalto virgen; después se obtuvo la ceniza de cáscara de arroz (RHA) a través de la combustión en un horno de mufla a 700 °C durante 2 h . Luego, el RHA se tomó y se vertió en la bandeja para ser enfriado a temperatura ambiente; este se trituroó con humedad en un molino por 15 min , obteniéndose la RHA altamente activa. Después, fue tamizado con el tamiz de 0,075 mm en una superficie de 0,61 m<sup>2</sup>/g , y la proporción de sílice activa fue del 88,3 % . A continuación, se procedió a mezclar el RHA con asfalto modificado

---

---

SBS, calentando el asfalto virgen a 180 °C y añadiéndole SBS, para ser homogenizados a través del mezclador de cizalla de alta velocidad a 3000 rpm a una temperatura de 180 °C por 15 min . Posteriormente, se añadió al asfalto modificado con SBS, la RHA altamente activa a 150 °C por 10 min en el mezclador de cizalla a una velocidad de 5000 rpm ; luego, esta mezcla fue vertida en el horno a 135 °C por 1 h . Se eligió una concentración de SBS de 1 % del aglutinante total en peso y la cantidad de ceniza de cascarilla de arroz fue de 0 % ; 2 % ; 5 % ; 10 % y 15 % del aglutinante total en peso; por lo cual, el ligante de asfalto modificado con SBS/RHA fue designado como SR0, SR2, SR5, SR10 y SR15.

Los ensayos convencionales como la penetración, el punto de reblandecimiento y la ductilidad se ejecutaron mediante los métodos de prueba de betún estándar. La prueba de viscosidad rotacional fue realizada con el viscosímetro rotacional Brookfield, a temperaturas de 90 °C ; 135 °C ; 150 °C y 175 °C con velocidades de 10 rpm ; 20 rpm y 50 rpm ; así mismo, en la prueba de barrido se prepararon aglutinantes con 2 % ; 5 % ; 10 % y 15 % en cantidades de RHA.

El aglutinante no envejecido, tuvo una deformación controlada del 12 % y el envejecido con RTFO del 10 % . Se realizó la prueba de barrido a temperaturas de 52 °C ; 58 °C ; 64 °C ; 70 °C ; 76 °C y 82 °C en una frecuencia de 10 rad/s . Después se realizó la prueba de ahuellamiento, colocando las muestras a 60°C y para las temperaturas de -10 °C  $\pm$  0,5 °C se hizo la prueba de viga de flexión.

Se observó que al agregar SBS/RHA la penetración del ligante asfáltico virgen se redujo y conforme la cantidad de RHA incrementaba, la penetración se reducía aún más. Las penetraciones de SR0 presentaron un 70,3 dmm , las SR5 y SR15 fueron de 68,2 dmm y 58,6 dmm , respectivamente y la reducción de SR5 y SR15 fueron de 2,9 % y 16,6 % a comparación con SR0. La mezcla incorporada de SBS/RHA logró mejorar el punto de



---

ablandamiento del ligante asfáltico virgen; al comparar con SR0, el punto de reblandecimiento de los ligantes con SBS/RHA SR2, SR5, SR10 y SR15 incrementaron en 4,7 % ; 6 % ; 8,3 % y 9,3 % ; por lo cual se comprobó que la capacidad del ligante asfáltico modificado mejoró en cuanto a la deformación elevadas temperaturas. La ductilidad del ligante sin envejecer disminuyó de manera leve con el 2 % al 10 % de RHA y fue mucho mayor cuando la cantidad de RHA fue del 15 % . Al añadir SBS/RHA la viscosidad del ligante asfáltico base aumentó y se elevó debido al incremento del contenido de RHA sin importar las velocidades de rotación. El 15 % de ceniza de cascarilla de arroz hizo que el ligante asfáltico tuviera una consistencia más dura que los otros ligantes. La capacidad de resistencia de formación de surcos del ligante disminuyó de 52 °C a 64 °C y fue muy lento con temperaturas mayores a 64 °C . La adición de SBS/RHA incrementó la estabilidad dinámica y redujo la profundidad de formación de surcos a los 60 min . La profundidad de ahuellamiento a los 60 min tuvo el mismo efecto con la adición de RHA, indicando así que la mezcla asfáltica modificada tiene una mejor resistencia a temperaturas altas. La mezcla asfáltica modificada con SBS/ RHA tuvo una deformación máxima por tracción y una resistencia a la tracción más bajas que la mezcla asfáltica virgen, lo que indicó que el rendimiento a baja temperatura disminuyó ligeramente con la adición de SBS/RHA.

Se concluyó que la incorporación de SBS/RHA mejora algunas propiedades del ligante asfáltico base, pues se logró una disminución en cuanto a la penetración y en el punto de reblandecimiento del ligante asfáltico inicial. Sin embargo, la ductilidad del ligante asfáltico modificado sin envejecer tuvo una ligera disminución en un porcentaje menor y conforme este incrementaba la disminución fue más drástica. En cuanto a la viscosidad, el ligante asfáltico base logró un incremento debido a la adición de SBS/RHA, y a su vez la viscosidad se incrementó conforme aumentó el contenido de ceniza de cascarilla de arroz; también se

---

optimizó la estabilidad dinámica y redujo la profundidad de formación de surcos, desempeñándose de manera positiva frente al calor; sin embargo, aminoró de manera leve la estabilidad a la humedad y a temperaturas bajas.

---

### Aporte a la investigación

---

*El punto de ablandamiento del asfalto modificado aumentó, lo que significa que se mejoró la capacidad del ligante frente a deformaciones en condiciones de alta temperatura. Por otro lado, la penetración mide la consistencia que tiene el asfalto; dicha propiedad se vio reducida al adicionarse el polímero al asfalto base, por lo que se evidenció una consistencia más dura.*

---

### Tabla 54.

Ficha resumen correspondiente al estudio E46

---

<b>Título:</b>	<b>E46:</b> Study on Styrene-Butadiene-Styrene Modified Asphalt Binders Relaxation at Low Temperature
<b>Autor (es):</b>	Sylwia Dziadosz, Mieczyslaw Slomik, Filip Niwczyk y Marcin Bilski
<b>Año:</b>	2021
<b>País:</b>	Polonia
<b>Objetivo:</b>	Evaluar la relación entre tasa de crecimiento y el parámetro de Glover-Rowe y analizar la influencia del proceso de envejecimiento de la radiación UV en los ligantes asfálticos con diferentes modificadores.

---

### Metodología, Resultados y Conclusión

---

El asfalto de rango de penetración 50/70 se calentó a una temperatura de 140 °C , además de un concentrado a 190 °C , convirtiéndose en estado líquido de manera total. Luego ambos fueron preparados de manera proporcional y se colocaron en recipientes de aluminio, obteniendo asfaltos modificados con un 33,3 % del peso de SBS en cantidades de: 3 % ;

---

---

4,5 % ; 6 % y 7,5 % del peso de la mezcla y 50 % ; 66,7 % y 83,3 % de cantidad del aglutinante modificado concentrado. Después, se usó un mezclador especializado para homogenizar las mezclas y se cubrió cada mezcla con una tapa de aluminio, que fue almacenado en un tablero dentro de un área oscura con el fin preservar los resultados obtenidos.

Se realizaron las pruebas de penetración y punto de reblandecimiento de anillo y bola a una temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , con 7 repeticiones por cada muestra. El proceso de envejecimiento a corto plazo RTFOT fue llevado a cabo en el horno de película delgada rodante (RTFOT) y las muestras sin envejecer fueron tomadas y colocadas en envases cilíndricos de vidrio e introducidas dentro de un horno a  $163\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 75 min . La prueba de relajación se hizo a través del uso del ductilómetro con un sistema de refrigeración, en el cual se estableció la temperatura de  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$  . Después del enfriamiento, la temperatura disminuyó a  $-16\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  , y las muestras de ligante, se pusieron en el baño del ductilómetro. Luego se colocaron las muestras en reposo por 30 min y se procesaron mediante el software. Los modelos universales de Maxwell con 4; 6 y 8 parámetros fueron utilizados para describir el proceso de relajación. Se observó que la penetración se redujo debido al endurecimiento del aglutinante asfáltico mediante la simulación en el RTFOT y; la temperatura del punto de reblandecimiento se incrementó luego del proceso de envejecimiento a corto plazo, pero los valores empezaron a reducirse, aun producida la optimización de la cantidad de elastómero en las muestras estudiadas. También se produjo un ciclo polimérico continuo para aquellos asfaltos muy modificados (con 6 % ; 7,5 % SBS y 9 % concentrado), que responde a las diferencias originadas en cuanto al punto de reblandecimiento. Los datos que se obtuvieron en el ensayo de la prueba de relajación al comienzo se ubicaron por encima de 50 N , pero se consideró insignificante su influencia en los datos finales. El promedio de la diferencia máxima en los ligantes estudiados al final del proceso de estirado fue de 4,5 N ; los datos que se obtuvieron

---

servieron para elaborar las curvas de relajación, a 1200 s a 16 °C , con esto se mostró que la tensión de tracción se reduce de manera muy rápida luego de que se logra la fuerza de 50 N . También se pudo evidenciar que mientras la cantidad de copolímero SBS es superior, la relajación de tensión se produjo con mayor rapidez. Para el betún 50/70, los resultados difirieron en un 38 % ; pero en las muestras que presentaban una cantidad de 7,5 % de SBS, la curvas se superpusieron en un 3 % . Esto tuvo una relación con la modificación en la estructura del ligante luego de pasar el límite del 6 % de SBS, el polímero pasó a ser una fase que se dispersa. Las muestras envejecidas y no envejecidas a corto plazo difirieron a través de la disminución conforme se iba incrementando la cantidad de SBS de 7,9 N para 50/70 a 1,1 N para el preparado concentrado, el cual posee 9 % de SBS; esto nos indicó que con el aumento de la cantidad porcentual de SBS en la mezcla, la desigualdad de peso entre los especímenes se va reduciendo. Produciéndose una respuesta negativa al envejecimiento a corto plazo, respecto a la reducción del incremento del valor de la tensión de tracción y sobre la relajación. De acuerdo con el proceso de envejecimiento a corto plazo de RTFOT, los aglutinantes asfálticos modificados en 6 % y 7,5 % de la cantidad de SBS, se diferenciaron por un rendimiento mejorado a comparación de los aglutinantes clásicos modificados con SBS, que presentaron un 3 % y 4,5 % de la cantidad de SBS.

Los tiempos de relajación cortos de los asfaltos de grado de penetración 50/70 y su aumento en el caso de ligantes analizados que contienen copolímero SBS, se originaron por una estructura diferente del asfalto 50/70 y ligantes modificados. En el caso de los betunes modificados, se pudieron diferenciar entre diversos grados de saturación de polímeros del aglutinante; y se produjo una fase constante de polímeros en los asfaltos modificados, debido a que el aglutinante forma una estructura más uniforme.

---

Se concluyó que, el copolímero SBS logró reducir el desgaste generado por las alteraciones de las propiedades reológicas de los aglutinantes sometidos al proceso de envejecimiento. La relajación se produjo más rápidamente, cuando la cantidad de copolímero SBS fue mayor en el aglutinante y al incrementar la cantidad de SBS sobre el rango establecido no influirá de manera negativa en el fenómeno de relajación. Además, la prueba de envejecimiento simulado en el horno de película rodante generó que la relajación se reduzca. La tensión de tracción en ninguno de los ensayos de aglutinantes se redujo al valor de cero en el tiempo de 1200 segundos de medición establecido, debido a que presentaron una mejor respuesta a la degradación y se caracterizaron por una mayor resistencia al agotamiento producido en el proceso de envejecimiento.

En consecuencia, se espera que los asfaltos que son incorporados con aglutinantes modificados sean más durables a través del tiempo. El proceso de envejecimiento influyó sobre la alteración de las propiedades del asfalto inicial, además del desgaste del SBS; sin embargo, puede cambiar dependiendo de la cantidad de copolímero SBS en el aglutinante asfáltico modificado.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*El SBS incorporado en el aglutinante generó un enfoque positivo en cuanto a la aceleración del fenómeno de relajación y a la susceptibilidad a la temperatura.*

*La incorporación de SBS como modificador optimizó la capacidad de relajación del betún a bajas temperaturas; esto es importante, pues ayudó a la prevención de la tensión acumulada en las capas de asfalto del pavimento, sobrepasando la resistencia al agrietamiento a baja temperatura. El proceso RTFOT a corto plazo, tuvo una participación significativa en las cifras de los ligantes ensayados; por lo cual es importante seguir analizando el efecto del SBS incorporado con rellenos en la capacidad de los aglutinantes bituminosos a temperaturas inferiores.*

**Tabla 55.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E47*

<b>Título:</b>	<b>E47:</b> Suscetibilidade de ligantes asfálticos modificados com sbs e ppa à deformação permanente: uma avaliação à luz da evolução dos parâmetros da especificação superpave
<b>Autor (es):</b>	Matheus David I. Domingos y Adalberto Leandro Faxina
<b>Año:</b>	2019
<b>País:</b>	Brasil
<b>Objetivo:</b>	Evaluar la susceptibilidad de ligantes asfálticos modificados con copolímero de estireno-butadieno-estireno (SBS) y ácido polifosfórico (PPA) a la deformación permanente.

#### **Metodología, Resultados y Conclusión**

Se procedió a elegir como base el material CAP 50/70 y el proceso de envejecimiento fue simulado en la prueba de horno rotatorio de película delgada (RTFOT). Se utilizó un DSR modelo AR-2000ex para ejecutar las pruebas MSCR (AASHTO, 2014b) y en régimen oscilatorio (ASTM, 2008). Por cada formulación se elaboraron dos repeticiones y, a través de la media aritmética se obtuvieron resultados de cada muestra por separado. Además, se calcularon también el parámetro  $G^*/\sin\delta$  y el de Shenoy (2004) a diversas temperaturas. La prueba de penetración (ASTM, 2006a) y el punto de reblandecimiento (ASTM, 2006b) de ligantes asfálticos fueron determinados mediante un penetrómetro universal Solotest y en un equipo automático RB 36-5G, de manera respectiva, y a través de cuatro repeticiones por formulación.

Se observó que la mezcla con mayor resistencia a la deformación permanente fue la de CAP+PPA y el compuesto con menor resistencia fue el de CAP+SBS. Esto fue corroborado de

---

acuerdo con los datos que se obtuvieron en el estudio y en el RTOFT, pues las mezclas CAP+SBS+PPA revelaron incrementos de 44 % a 57 % en la variable ( $G^*/\sin\dot{\gamma}$ ) e incrementos de 49 % a 75 % en la variable de Shenoy (2004) en referencia con CAP+SBS; así como una disminución del 10,3 % en cuanto a la penetración de CAP+SBS+PPA en referencia de CAP+SBS. De manera global, el ensayo con menor susceptibilidad a la deformación permanente fue la de CAP+PPA con un valor de 1,08 en referencia con la consistencia y elasticidad de los aglutinantes asfálticos, después le siguió el valor de 2,08 de la mezcla de CAP+SBS+PPA, luego el 2,8 de CAP +SBS y por último el valor de 4,00 del CAP 50/70. La baja sensibilidad de la deformación de CAP+SBS referente con CAP+PPA y CAP+SBS+PPA tendría un efecto en PG de acuerdo con los requisitos que especifica Superpave , en la que la cifra mínima es de 2,2 kPa para ( $G^*/\sin\dot{\gamma}$ ). No se observó un incremento en la recuperación del aglutinante asfáltico a través de la adición de SBS con PPA en el ensayo CAP+SBS+PPA; por el contrario, las disminuciones del parámetro R fueron del 11 % al 28 % de acuerdo con la temperatura y rango de voltaje, lo cual da la idea de que existe una limitada capacidad entre el CAP y modificador polimérico.

La adición de PPA en CAP + SBS y la disminución de la cantidad de SBS de las variables de RTOTF provocaron un efecto principalmente en el incremento de la rigidez del CAP. Lo contrario sucedió en los ensayos PPA, SBS y SBS+PPA ya que, CAP+PPA fue el material menos susceptible a la deformación permanente, después le siguió CAP+SBS+PPA y por último CAP+SBS. Aunque CAP+PPA tiene efectos positivos, en la escala de aglutinante asfáltico, puede ser que no suceda lo mismo en la escala de mezcla asfáltica y al menos solo los asfaltos modificados alcanzan la clasificación S a la temperatura de 70 °C . En cuanto al MSCR, CAP+PPA fue el ensayo con menor a la susceptibilidad de la deformación permanente a 100 Pa y 3200 Pa , indicando que presenta un promedio igual a 1,83 , siguiéndole el ensayo

---

CAP+SBS+PPA con una cifra media de 2,39, CAP+SBS con una cifra media de 2,67 y por último CAP puro 50/70 con una cifra media de 3,06. En el protocolo MSCR se pudo resaltar que CAP 50/70 fue superior a CAP+SBS en cuanto a la sensibilidad al aumento de voltaje. El ensayo CAP+PPA se posicionó como el de menor susceptibilidad a la deformación permanente, luego le siguió CAP+SBS+PPA, CAP+SBS y al final CAP 50/70.

Se concluyó que la incorporación de PPA, SBS y SBS+PPA en CAP 50/70 (PG 64-22), logró una mejoría notable en cada una de las diversas propiedades que se asocian con la consistencia, elasticidad y daño, que refiere a la susceptibilidad de la deformación permanente. El ensayo menos susceptible a la deformación permanente fue CAP+PPA, seguido de CAP+SBS+PPA y CAP+SBS. Con esto se vio que el asfalto base y los asfaltos modificados por lo menos se ubican dentro de la clasificación de tránsito estándar (S) de pavimentos, en la cual la temperatura experimental es de 64 °C y; únicamente los asfaltos modificados se ubican en la misma clasificación (S) con una temperatura de 70 °C . Los betunes modificados que sobresalen por resistir tráfico pesado son E (CAP+PPA) y V (CAP+SBS y CAP+SBS+PPA) a una temperatura de 64 °C y S (CAP+SBS) y H (CAP+ PPA y CAP+ SBS+PPA) a una temperatura de 70 °C . Si es que la temperatura del suelo alcanza un 76 °C , los únicos que cumplen con la clasificación S son CAP+PPA y CAP+PPA+SBS.

---

### **Aporte a la investigación**

*La modificación de un asfalto base convencional trae consigo mejoras significativas en propiedades asociadas a la elasticidad, consistencia y susceptibilidad a las deformaciones permanentes. A menor penetración, se tiene asfaltos más consistentes y con menores deformaciones.*

---



**Tabla 56.**

*Ficha resumen correspondiente al estudio E48*

<b>Título:</b>	<b>E48: Temperature Sensitivity Characteristics of SBS/CRP-Modified Bitumen after Different Aging Processes</b>
<b>Autor (es):</b>	Rui He, Shuhua Wu, Xiaofeng Wang, Zhenjun Wang y Huaxin Chen
<b>Año:</b>	2018
<b>País:</b>	China
<b>Objetivo:</b>	Mejorar la sensibilidad a la temperatura y la capacidad anti envejecimiento del betún

---

**Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Se empleó como modificador el polímero SBS, en un porcentaje de 4,5 % en peso de asfalto. Además, se usó polvo de caucho con una malla de 40 a 60 l a través de la preparación de asfalto modificado con SBS/RP a una temperatura de 180 °C . Al asfalto original, se le agregaron de manera sucesiva los suavizantes, los agentes anti envejecimiento, el polvo de caucho, los auxiliares y el SBS; después, se colocó en una cizalla de 5000 rpm , observándose el tiempo que transcurrió.

A través de una prueba de horno de película delgada (TFOT), se obtuvo asfalto envejecido a una temperatura de 163 °C por 5 h y a 100 °C alrededor de 20 h bajo aire de 2,1 MPa . Los estándares de ASTM D 36, ASTM D 5, ASTM D 113 y ASTM D 6925 fueron utilizados para probar cada una de las propiedades de las muestras de asfalto como la penetración a 25 °C , la viscosidad a 135 °C , el punto de reblandecimiento y la ductilidad a 15 °C ; se probó cada muestra tres veces para obtener el promedio como resultado de cada prueba.

Mediante un reómetro de corte dinámico se probaron las propiedades reológicas dinámicas del asfalto usando la prueba de barrido del asfalto, controlándose a una temperatura de -20 °C a

---

---

80 °C y en una frecuencia de 10 rad/s ; además, por minuto transcurrido la temperatura aumentaba en 2 °C . Se utilizó una placa de un diámetro de 8 mm y las placas tuvieron un espacio de 2 mm entre las muestras a temperatura bajo 20 °C ; una vez que la temperatura subió más de los 20 °C, la placa aumento de diámetro en 25 mm y el área disminuyó en 1 mm .

Antes y después del proceso de envejecimiento, se procedió a evaluar a través de la prueba de reómetro de haz de flexión (BBR), el agotamiento a temperaturas bajas del asfalto inicial, del asfalto añadido con SBS y del asfalto con SBS/CRP; se hizo por 3 repeticiones la prueba obteniéndose un promedio que fue usado para los resultados. El módulo de rigidez y la velocidad de fluencia del asfalto fueron calculados a los 8 s ; 15 s ; 30 s ; 60 s ; 120 s y 240 s . Después del envejecimiento los asfaltos probados fueron evaluados por TFOT a corto plazo y el envejecimiento por presión PAV se evaluó mediante espectroscopia infrarroja. El rango de longitud de onda de la espectroscopia infrarroja fue de 400 cm<sup>-1</sup> a 4000 cm<sup>-1</sup> y la temperatura de prueba fue de 20 °C.

Se observó que el asfalto modificado con incorporación de SBS y es asfalto SBS/CRP se incrementaron en un 58,2 % y 75,8 % respecto al punto de reblandecimiento. En cuanto a la penetración se redujo en un 19,4 % y 23,1 % de manera respectiva.

El incremento del punto de reblandecimiento, la reducción de la penetración y el aumento de la viscosidad de los asfaltos modificados se debió de manera principal a la incorporación de los modificadores SBS Y SBSB/CRP. De manera individual, la viscosidad del asfalto modificado con SBS/CRP incrementó notablemente cuando la temperatura se redujo. El punto de reblandecimiento del asfalto base se incrementó en un 12,6 % ; la penetración se redujo en un 46,2 % ; y la viscosidad se incrementó 2 veces a 175 °C, luego del envejecimiento a corto plazo. El punto de reblandecimiento del asfalto con SBS y el asfalto con SBS/CRP se redujeron en un 12,4 % y 9,5 % ; la viscosidad fue 1,2 y 1,9 veces la del asfalto base y; la penetración se redujo

---

un 65,6 % y 37,4 % , de manera respectiva. La parte viscosa en este grado de temperatura fue alta y; si la temperatura es baja, la viscosidad de los asfaltos evaluados luego del envejecimiento es demasiado alta, lo cual lo hace estar cerca de convertirse en elástico-plástico. Luego del envejecimiento a largo plazo, la rigidez de los tres asfaltos se incrementó de manera significativa. La disminución de la flexibilidad fue ocasionada por la degradación del modificador, el cual disminuye con el envejecimiento a largo plazo y el endurecimiento del asfalto inicial es predominante.

Se concluye que la incorporación de modificadores logró un aumento en cuanto al punto de reblandecimiento y la viscosidad; además de reducir la penetración del asfalto inicial. La ductilidad de los tres tipos de betún envejecido a largo plazo disminuyó obviamente y aumentó la viscosidad. El punto de reblandecimiento del asfalto inicial envejecido y del asfalto incorporado con SBS envejecido se incrementaron levemente; sin embargo, el punto de reblandecimiento del asfalto con SBS/CRP no se redujo notablemente, lo cual probó que el asfalto con SBS/CRP tiene una capacidad fuerte anti-envejecimiento debido a que su estabilidad y estructura se encuentran en condiciones óptimas luego del envejecimiento a largo plazo.

---

### **Aporte a la investigación**

*La adición de modificadores al asfalto afecta considerablemente al punto de ablandamiento, la penetración y la viscosidad del asfalto original.*

*El punto de ablandamiento por ejemplo aumentó en un 58,2 % y la penetración disminuyó en un 19,4 % . Esto debido a la formación de una estructura de red en el ligante a causa de la adición de modificadores y la mejor interacción entre las moléculas del asfalto; además, la viscosidad aumentó porque el modificador absorbe los componentes livianos del asfalto base y la estructura de este se vuelve más resistente al viscosímetro. .*

---

**Tabla 57.**

*Fichas resumen correspondiente al estudio E50*

<b>Título:</b>	<b>E50:</b> Understanding the low temperature properties of Terminal Blend hybrid asphalt trough chemical and thermak analysus methods
<b>Autor (es):</b>	Pemg Lin, Weidong Huang, Naipeng Tang, Feipeng Xiao y Yi Li
<b>Año:</b>	2018
<b>País:</b>	China
<b>Objetivo:</b>	Realizar una revisión sobre la reología, la morfología y las propiedades mecánicas de los asfaltos modificados con polímeros.  Evaluar las propiedades reológicas y químicas del aglutinante híbrido TB y TSRST (ensayo de probeta restringida por estrés térmico) para estimar las propiedades de la mezcla a baja temperatura.  Evaluar y comparar los efectos de diferentes modificadores y aditivos en las propiedades a baja temperatura mediante la prueba BBR.

---

**Metodología, Resultados y Conclusión**

---

Para fabricar el asfalto modificado se seleccionó un aglutinante base, un modificador SBS, un modificador de caucho granulado, azufre elemental y un modificador de ácido polifosfórico (PPA). Primero, se agregó caucho granulado fino al ligante base y fue mezclado en un tanque sellado, por 6 h a 260 °C ; cuando la velocidad alcanzó 400 rpm , fue incorporado el SBS y el PPA al ligante a 180 °C por 4000 rpm durante 30 min , en una cizalla de velocidad alta. Después, el ligante fue mezclado por 1 h a 400 rpm mediante un agitador y, por último, fue agregado el agente de reticulación y se alargó el proceso de mezclado por 90 min más.

La prueba de separación se ejecutó para cada muestra en un tubo de aluminio con 50 g ± 0,5 g de ligante a 163 °C por 48 h ; se conservaron, para la prueba del punto de reblandecimiento,

---

las partes superior e inferior del tubo, que fueron utilizadas para estimar la estabilidad al almacenamiento. Para la prueba de reómetro de haz de flexión (BBR), las muestras elegidas se llevaron al proceso de envejecimiento RTFOT y luego al proceso de envejecimiento PAV. Finalmente, las muestras de betún envejecido se probaron mediante BBR a bajas temperaturas de 18 °C y 24 °C, en dos repeticiones. Utilizando un espectrómetro Bruker TEN SOR FT-IR equipado con un ATR de diamante de reflexión, se obtuvieron los datos de los espectros infrarrojos. Se diluyeron 20 mg de ligante virgen con tetrahidrofurano (thf) en un recipiente con volumen de 10 ml por 24 h antes de realizar la prueba de solubilidad y la prueba de gel; después, en un tubo de 0,5 ml fue filtrado y centrifugado, luego se colocó al horno a 35 °C por 12 h, hasta que se volatilizara el thf. Se utilizó la bomba y el detector de índice de refracción la prueba GPC THF (grado HPLC), para la cromatografía de alta presión. Para la prueba de calorimetría diferencial de barrido se realizaron tres repeticiones por tipo de aglutinante asfáltico; registrando datos de 70 °C a 100 °C a un nivel de calentamiento de 10 °C por 1 min. El TSRST se llevó a cabo de acuerdo con el procedimiento de AASHTO; las pruebas se realizaron en el aparato MTS y se controlaron a una temperatura de más de 5 °C alrededor de 2 h.

Se obtuvo que conforme se incrementaba la incorporación de caucho granulado, el tiempo de relajación se reducía abruptamente; cuando la cantidad de caucho granulado fue constante, el tiempo de relajación se redujo notablemente con el incremento de la cantidad de SBS. Sin embargo, cuando el PPA fue agregado, el tiempo de relajación se incrementó, alcanzando una mínima cifra cuando se añadió PPA en un porcentaje de 0,4 %.

El caucho triturado tuvo predominancia en la capacidad de relajación del ligante híbrido TB, el SBS mejoró levemente, en tanto que el PPA presentó un efecto desfavorable. En la prueba GPC, al incorporar SBS se produjo un incremento importante en la composición del polímero,

---

pero en los asfaltenos aparentes el dominio fue discreto; al añadir PPA de manera adicional se observó un que los polímeros pesados se convertían en ligeros; aun así, la reacción que se produjo de asfalto híbrido PPA y TB requiere ser más estudiada. La cantidad de caucho granulado fue el componente de las propiedades a temperaturas bajas del asfalto híbrido TB. Se encontró un efecto positivo del SBS en las propiedades a baja temperatura y una leve mejora; por otro lado, se mostró a través de los resultados que la cantidad óptima de PPA que se añade al asfalto híbrido TB fue 0,4 % . A través de la prueba ftir, el grupo aromático funcional presentó leves modificaciones, empero, el grupo alifático presentó un cambio importante. Los valores de alifáticos del betún híbrido TB fueron mayores que los del ligante inicial, pues se incrementaron de manera notable con el incremento de la cantidad de caucho granulado, mostrando así que el grupo alifático fue predominante entre los componentes que se liberaron en el proceso de degradación del caucho triturado. La incorporación de SBS produjo una reducción del indicador alifático y de cadena larga; esto se debe a que el SBS a cierta longitud de cadenas alifáticas absorbió componentes alifáticos. Respecto a lo que se obtuvo en las pruebas FTIR y GPC, la cantidad de aromáticos no difirió, esto nos indica que el compuesto alifático liberado en el proceso de degradación del caucho condujo a que la Tg se redujera, produciéndose así una respuesta positiva diversas propiedades.

Se concluyó que los modificadores influyeron de diversas maneras sobre las propiedades a baja temperatura del asfalto híbrido TB. El compuesto predominante de las propiedades a bajas temperaturas fue el caucho desmenuzado; mientras que el SBS mejoró las propiedades del asfalto a baja temperatura. La cantidad óptima alcanzó un 0,4 % de PPA añadido al híbrido TB asfalto. La mezcla asfáltica híbrida TB en comparación con la mezcla asfáltica modificada SBS, presentó una temperatura más baja, empero, aunque la resistencia del compuesto de asfalto modificado con SBS fue superior, se puede decir que el pavimento de asfalto híbrido TB se

---

desempeñó a una temperatura más inferior debido a que la tensión que se indujo de manera térmica para la mezcla de betún TB fue menos que la del betún modificado con SBS.

---

### **Aporte a la investigación**

---

*La penetración y punto de ablandamiento son indicadores para la estabilidad del asfalto; si la diferencia de los valores tomados en la parte superior e inferior de las muestras es mínima o está dentro del rango establecido, entonces la mezcla será estable; es decir, no habrá problemas de separación entre el asfalto y el polímero SBS.*

*En China, se admite hasta 2,5 °C de diferencia entre el valor de punto de ablandamiento tomado en la parte superior e inferior de la muestra, para considerarse un material con buena estabilidad de almacenamiento; dicha prueba es muy importante para la aplicación del material en campo.*

---