

	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	<b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>	<b>F-AC-DBL-007</b>	<b>08-07-2021</b>	<b>B</b>
Dependencia	Aprobado		Pág.	
<b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>	<b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>		<b>i(86)</b>	

<b>AUTORES</b>	Miguel Enrique Pedrozo Torres, Edinson Camilo Amaya Carrascal		
<b>FACULTAD</b>	<b>Ingenierías</b>		
<b>PLAN DE ESTUDIOS</b>	<b>Ingeniería Civil</b>		
<b>DIRECTOR</b>	Katerine Carreño García		
<b>TÍTULO DE LA MONOGRAFIA</b>	Análisis del impacto de los cambios extremos de la temperatura en el comportamiento de pavimentos asfálticos		
<b>TITULO EN INGLES</b>	Analysis of the impact of extreme temperature changes on the behavior of asphalt pavements		
<b>RESUMEN</b>			
<p>La presente monografía se plantea explorar diferentes temáticas relacionadas con la influencia de la temperatura en la infraestructura vial, que abarcan dentro de cada uno de los procesos de pavimentación en Ingeniería Civil, extrayendo así información relevante para comparar dichos estudios realizados que otros autores han desarrollado en la búsqueda de una mejora continua a la solución de dicho fenómeno que se presenta actualmente y que afecta nocivamente a los pavimentos flexibles.</p> <p>Así mismo se enfoca principalmente en el estudio del cambio en el módulo dinámico de pavimentos asfálticos con el incremento o disminución de la temperatura, analizando el efecto de las fallas asociadas a los cambios de temperatura en el comportamiento de fatiga del asfalto, describiendo las propiedades del cemento asfáltico con respecto a su modificación relacionado con la temperatura y el envejecimiento. Mediante el análisis de la variabilidad climática en pavimentos flexibles, se pretende aportar desde un punto de vista crítico.</p>			
<b>RESUMEN EN INGLES</b>			
<p>This monograph aims to explore different issues related to the influence of temperature on road infrastructure, which cover within each of the paving processes in Civil Engineering, thus extracting relevant information to compare these studies carried out that other authors have developed in the search for a continuous improvement to the solution of this phenomenon that currently occurs and that adversely affects flexible pavements.</p> <p>Likewise, it focuses mainly on the study of the change in the dynamic modulus of asphalt pavements with the increase or decrease in temperature, analyze the effect of failures associated with temperature changes on the fatigue behavior of asphalt, describe the properties of the asphalt cement with respect to its modification related to temperature and aging.</p> <p>By analyzing the climatic variability in flexible pavements, it is intended to contribute from a critical point of view.</p>			
<b>PALABRAS CLAVES</b>	fisuración, Baja temperatura, Envejecimiento, Fallas, Pavimentos		
<b>PALABRAS CLAVES EN INGLES</b>	cracking, Low temperature, Aging, Failures, Pavements		
<b>CARACTERÍSTICAS</b>			
<b>PÁGINAS: 86</b>	<b>PLANOS:0</b>	<b>ILUSTRACIONES:25</b>	<b>CD-ROM:0</b>



**Análisis del Impacto de los Cambios Extremos de la Temperatura en el Comportamiento  
de Pavimentos Asfálticos**

**Miguel Enrique Pedrozo Torres & Edinson Camilo Amaya Carrascal**

**Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña**

**Ingeniería Civil**

**MSc. Katerine Carreño García**

**21 de octubre de 2021**

## Índice

<b>Capítulo 1. Generalidades de la monografía.....</b>	<b>1</b>
1.1 Desarrollo del argumento .....	3
1.2 Metodología.....	5
Capítulo I. Estado del arte .....	8
<b>Capítulo 2. Descripción de la problemática hallada.....</b>	<b>11</b>
<b>Capítulo 3. Desarrollo del análisis de la problemática del cambio climático con sus impactos adversos a los pavimentos flexibles. ....</b>	<b>13</b>
3.1 Principales impactos ambientales relacionados con la pavimentación .....	13
3.1.1 Impacto sobre el clima.....	13
3.1.2 Impacto sobre la geología y la geomorfología. ....	13
3.1.4 Impacto sobre los suelos.....	14
3.1.5 Impacto sobre la vegetación. ....	14
3.1.6 Impacto sobre la fauna.....	14
3.1.7 Impacto sobre el paisaje. ....	15
3.1.8 Impacto: Elevación de la temperatura local. ....	15
3.1.9 Impacto: Disminución calidad de aire.....	16
3.1.10 Impacto: Cambios en el microclima. ....	17
3.2 Estudiar el cambio en el módulo dinámico de pavimento asfáltico con el incremento o diseminación de la temperatura.....	17
3.2.1 Estudio de propiedades mecánicas y dinámicas.....	17
3.2.2 Mezclas asfálticas en función de la temperatura .....	18
3.2.3 Temperatura de fabricación de la mezcla asfáltica.....	27
3.2.4 Temperatura ocasionada por la radiación solar en el pavimento asfáltico .....	29
3.3 Analizar el efecto de las fallas asociadas a los cambios de temperatura en el comportamiento de fatiga del asfalto (fisuración, baja temperatura, envejecimiento). ....	32
3.3.1 La influencia de la temperatura y el tipo de mezcla asfáltica en el rendimiento a la fatiga del pavimento flexible.....	32
3.3.2 Afectaciones por los cambios de temperatura en el pavimento asfáltico .....	37
3.3.3 Solicitaciones mecánicas y ambientales .....	38
3.3.4 Cambios extremos de Temperatura .....	39
3.4 Describir las propiedades del cemento asfáltico con respecto a su modificación relacionado con la temperatura y el envejecimiento. ....	41

3.4.1 La influencia de la temperatura en el envejecimiento de los pavimentos flexibles .....	41
3.4.2 Envejecimiento a un menor tiempo .....	45
3.4.3 Ensayo rotatorio de película delgada.....	45
3.5 Proponer estrategias de infraestructura asfáltica que conlleven a mitigar el impacto generado del cambio climático en la mezcla en caliente .....	61
3.5.1 Reducción de la Fuente. ....	61
3.5.2 Reciclaje .....	62
3.5.3 Fase de diseño.....	62
3.5.4 Fase de producción.....	63
<b>Capítulo IV. Análisis de resultados.....</b>	<b>64</b>
<b>Capítulo V. Conclusiones.....</b>	<b>66</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>68</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> .....	18
Diagrama de las propiedades mecánicas y dinámicas de las mezclas asfálticas. ....	18
<b>Figura 2</b> .....	20
Diagrama del modelo de la estructura de pavimentos por metodología empírico – mecanicista.....	20
<b>Figura 3</b> .....	23
Empresa A. ....	23
<b>Figura 4</b> .....	24
Empresa B ....	24
<b>Figura 5</b> .....	24
Empresa c ....	24
<b>Figura 6</b> .....	25
Estructura común de una pavimento asfáltico o flexible.....	25
<b>Figura 7</b> .....	26
Carpeta de rodadura en pavimentos asfálticos. AMSCE, 2016.....	26
<b>Figura 8</b> .....	29
Pavimentación con mezcla asfáltica en caliente. Venta de asfalto, 2021.....	29
<b>Figura 9</b> .....	30
Descripción del efecto de la radiación en el pavimento asfáltico. Pascual, 2012. Estudio del comportamiento térmico de pavimentos de mezcla bituminosa y análisis de un colector solar asfáltico multicapa. p. 38. ....	30
<b>Figura 10</b> .....	32
Tensiones y deformaciones generadas por cargas de tráfico en los recubrimientos asfálticos del pavimento y pavimento fisurado exageradamente por fatiga. ....	32
<b>Figura 11</b> .....	34
Criterio clásico de fallo por fatiga. Ensayo controlado por desplazamiento. b) Ley de Fatiga en ensayos de desplazamiento controlado en mezclas asfálticas ....	34
<b>Figura 12</b> .....	35
Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga. Ensayo de fatiga a flexotracción.....	35
<b>Figura 13</b> .....	49
Probetas tipo Marshall. Lepucv.cl, 2021. ....	49
<b>Figura 14</b> .....	51
Influencia de la temperatura, la granulometría y el agua en la cohesión de mezclas asfálticas. p. 319.....	51
<b>Figura 15</b> .....	51
Influencia de la temperatura, la granulometría y el agua en la cohesión de mezclas asfálticas. p.319.....	51
<b>Figura 16</b> .....	52
Evaluación de la incidencia de la temperatura en el desempeño de las carpetas asfálticas en caliente en El Salvador. p. 122.....	52
<b>Figura 17</b> .....	53
Evaluación de la incidencia de la temperatura en el desempeño de las carpetas asfálticas en caliente en El Salvador. p. 122.....	53

<b>Figura 18.</b> .....	54
Influencia de la temperatura y el tiempo de mezclado en la modificación de un cemento asfáltico. p. 100 .....	54
<b>Figura 19.</b> .....	55
Ensayo de tracción en mezclas asfálticas. ....	55
<b>Figura 20.</b> .....	56
Influencia de la temperatura y el tiempo de mezclado en la modificación de un cemento asfáltico. p. 92. ....	56
<b>Figura 21.</b> .....	59
Gráfico de la ecuación 7. ....	59
<b>Figura 22.</b> .....	60
Resultados módulo de rigidez mezcla asfáltica .....	60

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> .....	28
Clasificación de mezclas asfálticas de acuerdo al rango de temperatura .....	28
<b>Tabla 2.</b> .....	36
Granulometrías de mezclas utilizadas en el estudio experimental .....	36
<b>Tabla 3.</b> .....	44
Comparación propiedades del cemento asfáltico vs su modificación relacionado con la temperatura y el envejecimiento .....	44

## Introducción

En los últimos años se han presentado cambios extremos de temperatura que han traídos consigo impactos negativos en el comportamiento de los pavimentos asfálticos, debido a esto, dicha temperatura ha sido un factor importante, que influye de forma inmediata en el desarrollo de los pavimentos, cambiando así su rigidez, por los elementos que constituyen al pavimento flexible. Además, a medida que aumenta la temperatura, la rigidez de cada capa del pavimento asfáltico disminuye, y cuando disminuye, la rigidez de estas capas aumenta. Dicha consecuencia se denota a gran escala en la capa de la banda de rodadura, dando como resultado el estado de tensión de la fuente de calor, que se superpone al estado de tensión generado por la acción del tráfico, lo que repercute en la durabilidad de la estructura. Sin embargo, con la profundización de la capa de mezcla (como en el caso de la capa base de la mezcla asfáltica), el efecto de la tensión térmica sobre el estado de tensión de la acera es insignificante, y la temperatura en realidad solo afecta la rigidez de la mezcla, lo que se debe a las propiedades de los termoplásticos.

Por otro lado, en los últimos años se realizaron averiguaciones en todo el mundo, integrado Colombia, para aprender la conducta del asfalto frente a diferentes cambios de temperatura, dichos cambios de temperatura están afectando las mezclas asfálticas gracias a diferentes componentes, los cuales son más relevantes para la deformación persistente a altas temperaturas y agrietamiento a bajas temperaturas.

Para realizar el presente estudio, se adquirió como base, fuentes bibliográficas en líneas de artículos científicos, investigaciones experimentales en los cuales cada uno de los autores manifestado estudiar el cambio dinámico de pavimento asfáltico flexible, además de analizar el efecto de dichas fallas las cuales se encuentran asociadas a los cambios extremos de temperatura

y por último proponer estrategias que conlleven a mejorar y a disminuir dichos impactos generados por este tipo de agentes ambientales.

## Capítulo 1. Generalidades de la monografía

Como lo indica Martínez (2017), la presente monografía permite indagar e investigar, sobre el cambio climático y el impacto de este mismo sobre dicha infraestructura vial, para que sea sostenible de acuerdo a unas buenas condiciones meteorológicas.

Está delimitada de la siguiente manera:

Operativa: Se hará revisión bibliográfica para determinar la metodología a utilizar para realizar el análisis del impacto de los cambios extremos de la temperatura en el comportamiento de pavimentos asfálticos, contando con el total apoyo y acceso a base de datos

Conceptual: pavimento, temperatura, variabilidad climática, cambio climático, infraestructura, construcción sostenible, cemento asfáltico, fatiga del asfalto

Geográfica: Zonas tropicales, zonas desérticas, zonas con estaciones.

Temporal. El proyecto de investigación se implementará en un lapso de 8 semanas, a partir de ser aprobada la propuesta de modalidad monografía.

La importancia de la presenta monografía de compilación se enfoca principalmente en analizar pavimentos asfálticos y sus posibles efectos secundarios con respecto a las condiciones climáticas y los diferentes impactos adversos que se pueden generar a raíz de dicha problemática influyendo en ella directa o indirectamente, para lo cual se analizará según investigaciones recientemente realizadas, cómo se puede demostrar que en relación con la temperatura, permeabilidad, densidad, estabilidad, viscosidad y punto de ablandamiento del asfalto, el cambio de temperatura de la mezcla asfáltica provocará problemas de segregación, resistencia y fatiga en la construcción de carreteras.

Así mismo por medio de la presente monografía se planteó, explorar diferentes temáticas relacionadas con la problemática a estudiar, que abarcan dentro de cada uno de los procesos de pavimentación en Ingeniería Civil, extrayendo así información relevante para comparar dichos estudios realizados que otros autores han desarrollado en la búsqueda de una mejora continua a la solución de dicho fenómeno que se presenta actualmente y que afecta nocivamente a los pavimentos flexibles. Las bases de datos para realizar dicho estudio se pueden encontrar a nivel nacional e internacional en bibliografía altamente reconocida, para así poder analizar el comportamiento del asfalto en el tiempo.

A continuación, se presentan los principales objetivos:

Estudiar el cambio en el módulo dinámico de pavimento asfáltico con el incremento o disminución de la temperatura

Analizar el efecto de las fallas asociadas a los cambios de temperatura en el comportamiento de fatiga del asfalto (fisuración, baja temperatura, envejecimiento).

Describir las propiedades del cemento asfáltico con respecto a su modificación relacionado con la temperatura y el envejecimiento.

Mediante el análisis de la variabilidad climática en pavimentos flexibles, se pretende aportar desde un punto de vista crítico, los principales hallazgos que se presentan en la presente propuesta de grado modalidad monografía.

Al ser una metodología poco estudiada a nivel mundial, se enfocará principalmente en investigar dichos hallazgos para así proponer estrategias que ayuden a mejorar el diseño de la infraestructura del pavimento, por ende la monografía pretende aportar a cada uno de sus autores

una aptitud determinada para aplicar una nueva técnica de mejora con respecto a la problemática de estudio, la cual toma como punto de partida la toma de lecturas de diferentes fuentes bibliográficas, para la elaboración de un nuevo texto con una base de datos estrechamente consultada, y como éstos se relacionan y se jerarquizan, para así poder dar a conocer los resultados consultados de la misma. Es así, des esta manera que se plantea la necesidad de aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera de pregrado, para analizar los impactos que se están generando en los pavimientos flexibles debido a la variabilidad climática actual.

### **1.1 Desarrollo del argumento**

Tal como lo indican (Haibin , Deyi , Yinfei , & Xinmin , 2019) el cambio climático y por ende el efecto invernadero en el pavimento de asfalto tiene un albedo solar bajo de menos de 0.1, que es responsable de su alta capacidad de absorción de calor y temperatura del pavimento. Por ejemplo, se informó que la temperatura máxima del pavimento de asfalto en verano puede alcanzar hasta más de 65 ° C. El enrutamiento a alta temperatura es muy fácil de producir cuando el pavimento está sujeto a cargas pesadas de vehículos, las soluciones existentes para la rutina se centran en mejorar la alta temperatura, rendimiento del aglomerante asfáltico y la mezcla, como asfalto de goma, asfalto de alto módulo, semiflexible mezcla de asfalto, etc., más, sin embargo, los materiales generalmente no consideran la influencia significativa de la temperatura del pavimento en el desarrollo de surcos (Haibin , Deyi , Yinfei , & Xinmin , 2019).

Son varios los autores que afirman y estudian cómo influye dichos parámetros climáticos en la mezcla en caliente, por ejemplo Mendoza & Marcos (2017) afirman que:

“La temperatura del pavimento es superior a la temperatura del aire, por lo que provocan fatiga del asfalto y deformaciones estructurales provocadas por el tráfico. Estas deformaciones provocan tensiones en la acera. Si la temperatura de la acera aumenta, el módulo de rigidez disminuirá. por lo que el pavimento aún se deformará y la tensión causada por el tráfico permanecerá sin cambios, por lo que se debe considerar el análisis en el método de diseño para evaluar la sensibilidad de los parámetros. “temperatura del pavimento” (p.7).

Otro claro ejemplo es el proyecto de cambio de temperatura compuesto por cemento asfáltico denso de mezcla en caliente tipo 3 80-100 con una temperatura del asfalto de 80-100. Esto es muy importante en la obra civil porque se utilizan constantemente, por lo que se pueden obtener todo tipo de cargas y caminos en construcción. El impacto del cambio climático que se produce, por lo que un estudio detenido de este factor llegó a la conclusión de que afecta principalmente al rendimiento de la acera y por tanto afecta a su vida útil. La mezcla térmica no se deforma ni se rompe para resistir la fuerza de la carga. La carga varía según la magnitud de la misma. Esta es la razón para el estudio de la resistencia al corte. Se consideran la fricción y la cohesión. Este último está evaluando el desempeño de la mezcla de asfalto. Ahora es el momento básico y seguro (Mena W. , 2013).

Otro aspecto importante por resaltar son los impactos adversos que el cambio climático ejerce sobre los pavimentos flexibles, tales como: el incremento en la humedad del suelo y elevación de nivel freático, siendo éstos cambios esperados, que por ejemplo en Holanda e Inglaterra los principales impactos esperados son los incrementos en lluvias durante el invierno, debido al cambio climático precedido Reyes & Millán (2009).

También, es importante mencionar que no sólo el cambio climático influye en las modificaciones bruscas que sufre un pavimento flexible, además se encuentra en el establecimiento o predilección el deterioro que soportará la vía en un lapso de tiempo determinado, la demanda del tráfico es el factor más importante, sin embargo, debido a los cambios en el firme de la vía, la caracterización de la carga generada por el tráfico en la superficie de la vía es muy complejo, lo que requiere la periodicidad y periodicidad de los vehículos. También implica la interacción entre el vehículo y la acera y la velocidad del tráfico. Estas interacciones y la velocidad del tráfico producirán fenómenos y ejercerán una presión adicional sobre la carga estática del propio vehículo. (Brown et al., 2001).

Por otro lado, también se realiza el cálculo de la Temperatura Media Anual Ponderada del Aire que para hacer esa práctica se parte de la información de las temperaturas medias mensuales del aire – TMM del área más cercana al plan. Principalmente, los estudios se hacen con datos de bastante más de 10 años para lograr evaluar en efecto la conducta de la temperatura en el sector del plan, la cual incluye de manera directa en la conducta estructural y servible de los pavimentos (Higuera, 2011).

## **1.2 Metodología**

La monografía de investigación consta de tres partes. Una parte teórica, donde se recopila información de diferentes autores. Una parte de análisis donde se aplica lo aprendido en los diferentes estudios realizados. Y finalmente un análisis de resultados propios y de otros trabajos relacionados, extrayendo conclusiones que permitan conocer sus ventajas y desventajas.

Se realizó un análisis que tiene como finalidad compilar toda la información que esté disponible en línea, para de esta manera agruparla conforme la estructura del documento para finalmente ser evaluada por herramientas de calidad metodológica.

Se realizó mediante los siguientes pasos:

Búsqueda en línea de base de datos indexada, revisión sistemática, análisis de información recopilada e interpretación y análisis de resultados, realizando una paráfrasis por cada texto que se tome de cualquier investigación encontrada, así mismos aportes intelectuales propios del autor.

El cuerpo del trabajo lleva las siguientes etapas:

Capítulo 1. Generalidades de la monografía

Capítulo I. Antecedentes

Capitulo II. Descripción de la problemática hallada

Capitulo III. Desarrollo del análisis de la problemática del cambio climático con sus impactos adversos a los pavimentos flexibles.

Subcapítulo 1. Estudiar el cambio en el módulo dinámico de pavimento asfáltico con el incremento o disminución de la temperatura

Subcapítulo 2. Analizar el efecto de las fallas asociadas a los cambios de temperatura en el comportamiento de fatiga del asfalto (fisuración, baja temperatura, envejecimiento).

Subcapítulo 3. Describir las propiedades del cemento asfáltico con respecto a su modificación relacionado con la temperatura y el envejecimiento.

Subcapítulo 4. Proponer estrategias de infraestructura asfáltica que conlleven a mitigar el impacto generado del cambio climático en la mezcla en caliente

Capitulo IV. Análisis de resultados.

## Capitulo V. Conclusiones.

## Capítulo I. Antecedentes

Los principales solicitantes de la superficie de la carretera son los lastres ocasionados por el pasar de los vehículos y el estado ambiental en que se encuentra la superficie de la carretera durante la puesta en servicio.

Al establecer o pronosticar el deterioro a la carretera en un período de tiempo determinado, solicitar tráfico es el factor más importante. Sin embargo, no solo por la variabilidad y periodicidad de la carga solicitada, sino también por la interacción entre la acera y el vehículo y la velocidad de dicho vehículo, la caracterización del estrés generado en la vía peatonal es muy complicada.

El trauma del desarrollo climático puede efectuar que el empuje útil del suministro difiera de la vivacidad útil esperada según las condiciones históricas. Si los responsables de la toma de decisiones pueden vislumbrar el supuesto altibajo del ánimo útil del abastecimiento, pueden plantear una planificación de habituación más detallado.

Después de esto, la infraestructura vial se ve perjudicada por diversos eventos climáticos extremos, como inundaciones, olas de calor, sequías, lluvias torrenciales, huracanes, lluvia, heladas, etcétera, y se espera que el trauma del desarrollo climático continúe presentándose en un futuro cercano.

También hay evidencia de que, debido a que la temperatura constantemente ha sido una causa que ha afectado el funcionamiento de los pavimentos, el diseño y la construcción de las carreteras siempre han incluido variables climáticas, pero los desafíos provocados por el cambio climático han obligado al umbral a seguir cambiando. El diseño actual incluso ha producido nuevos métodos para construir infraestructura vial flexible. En los últimos años, se han realizado

varios trabajos para identificar la huella significativa del calentamiento global en la infraestructura vial, por lo general vinculándolo al impacto principal del calentamiento global.

Por otro lado, el estrés ambiental también tiene una gran influencia en las propiedades mecánicas de las aceras. Debido a las propiedades termoplásticas de los materiales que constituyen el lecho asfáltico del firme flexible, se considera que la temperatura es uno de las circunstancias ambientales que inciden bruscamente en el proceder del adoquinado y modifican su parquedad.

Por consiguiente, al aumentar la temperatura, la consistencia de la capa del pavimento asfáltico disminuye y cuando la temperatura desciende, la consistencia de dichos recubrimientos aumenta (Roberts et al., 1996). Esta influencia es producida en considerable medida en la capa de la banda de rodadura, produciendo un estado de estrés de fuente de calor, que se superpone al estado de estrés generado por el comportamiento del tráfico, afectando la perdurabilidad del pavimento (Pérez et al., 2011). No obstante, en el momento en que dichos recubrimientos de la mezcla se profundizan (como en el caso de la capa base de la mezcla de asfalto), el efecto de la tensión térmica sobre el estado de tensión de la acera es insignificante, mientras que la temperatura en realidad solo afecta la rigidez. (Nesnas y Nunn, 2004).

Mientras se incrementa la temperatura, la consistencia de cada recubrimiento del pavimento asfáltico se reduce y una vez que la temperatura reduce, la consistencia de dichos recubrimientos se incrementa (Roberts et al., 1996). Esta predominación se crea en más grande medida en la capa de la banda de rodadura, produciendo un estado de estrés de fuente de calor, que se superpone al estado de estrés creado por la conducta del tráfico, perjudicando la durabilidad de la composición (Pérez et al., 2011). No obstante, mientras la capa de mezcla se profundiza (como en la situación de la capa base de la mezcla de asfalto), el impacto de la

tensión térmica sobre el estado de tensión de la acera es insignificante, mientras tanto que la temperatura en verdad solo perjudica la rigidez. (Nesnas y Nunn, 2004).

Otro aspecto que tiene presente la durabilidad de la composición del pavimento y perjudica el módulo de rigidez de sus capas es el ligante asfáltico que se usa para hacer la mezcla. Los adhesivos con más viscosidad o dureza tienen la posibilidad de ofrecer mezclas más duras, sin embargo, paralelamente más quebradizas, en lo que los adhesivos con menor viscosidad o dureza tienen la posibilidad de ofrecer mezclas más suaves empero menos rígidas (Pérez y Bardesi, 2006). Como se dijo previamente, la temperatura ambiente tiene un efecto importante en la rigidez de la capa de asfalto, además, la magnitud de partícula y el aglutinante usados en la producción de la mezcla perjudicarán su manejo y durabilidad.

## Capítulo 2. Descripción de la problemática hallada

La temperatura es un valor cambiante bastante interesante en las obras civiles y, más igualmente, en esas que permanecen en eterno uso, recibiendo toda variedad de cargas y avíos climatológicos, como es la ámbito de las vías, para finalizar, está circunstancia incide en la interpretación de los pavimentos, la vitalidad adecuado de dichos además se ve dañada, por ende, el cemento asfáltico incumbe a deformarse sin romperse a cobrar esfuerzos debidos a las cargas que varían según su afectación; por ello se estudia la resistencia al corte, tomando en cuenta la adhesión y la cohesión, esta última básico y segura en el instante de calibrar la interpretación de la mezcla asfáltica (Reyes & Millán, 2009, p.14).

Es allí donde la variabilidad climática incide en diferentes impactos adversos en lo que respecta a las carreteras, ya que, en un clima extremo, viene afectando la infraestructura del pavimento y a su vez en nivel de servicio que este ofrece a sus usuarios, esto ocurre debido a las a las condiciones extremas de altas temperaturas es presentada por dicho fenómeno natural. Para lo cual Leiva, Aguiar, & Camacho (2016) infieren:

“Las variaciones en la temperatura afectan principalmente la capa asfáltica del pavimento dado que las propiedades, el comportamiento y la estabilidad de la mezcla asfáltica varían de acuerdo a los cambios de temperatura. Materiales estabilizados con algún agente viscoelástico también son afectados por los cambios térmicos, como las bases estabilizadas con asfalto, así como las losas de concreto y las bases estabilizadas con cemento” (p.23)

Pero, ¿Cómo ha venido afectando los cambios extremos de la temperatura en el comportamiento de pavimentos asfálticos?

Mena (2013) confirma que las mezclas asfálticas son materiales viscoelásticos con características que están sujetas a la temperatura y la frecuencia de arbitrio, esto desea dialogar que a bajas temperaturas se destaca su proceder liga y éste actúa como un sólido, se vuelve mordaz, rompedero y su moderación se incrementa y por lo comentado previamente a altas temperaturas el firme se vuelve aparte jarretera y más viscoso, y el módulo del hormigón asfáltica se disminuye de manera significativa. A efecto de esta mezcla viscoelástica, la calle a altas temperaturas no puede tolerar cargas vehiculares eficazmente como si puede a temperaturas más bajas. A altas temperaturas se incrementa el componente plástico de las deformaciones de la calle, por consiguiente, es propenso a sufrir deformaciones permanentes alce las cargas. A temperaturas mínimas el piso es susceptible a agrietarse dada la rigidización del agregado asfáltico.

Varios autores afirman que el cambio climático es causante del deterioro de estos pavimentos, perdiendo así calidad en su infraestructura, tal y como lo describen Willway et al (2008) “El cambio climático no produce nuevos impactos en los pavimentos, pero si incrementa su deterioro y aumenta la probabilidad de ocurrencia de los efectos bajo la presencia de fenómenos climáticos extremos”.

## **Capítulo 3. Desarrollo del análisis de la problemática del cambio climático con sus impactos adversos a los pavimentos flexibles.**

### **3.1 Principales impactos ambientales relacionados con la pavimentación**

Los principales impactos ambientales relacionados con la pavimentación de vías, son: shock sobre la atmósfera. En esta distancia se incrementa las emisiones a la atmosfera debido a la conveniencia de maquinarias, transporte de equipaje, utilización de canteras y transacción de gentileza (VEGA, 2002)

#### **3.1.1 Impacto sobre el clima.**

Los impactos que produce la construcción y operación de vías sobre el clima son de dos tipos: cambios microclimáticos en las proximidades del corredor vial debido a la distinta retractación del asfalto respecto a la superficie original y la destrucción de la vegetación; y modificaciones mesoclimáticas (superficies extensas) generadas por la creación de pasillos entre valles y el efecto barrero de ciertas infraestructuras que inducen modificaciones al régimen local de los vientos. Estos impactos son difíciles de predecir y cuantifica (Vega, 2002).

#### **3.1.2 Impacto sobre la geología y la geomorfología.**

Las actividades como los movimientos de tierra, la explotación de fuentes y la ocupación de espacios, generan impactos como el riesgo de inestabilidad de laderas, incremento de procesos erosivos, la pérdida de nacimientos de agua. Estos impactos si no son controlados desde la etapa de construcción pueden prolongarse durante la operación y generar afectaciones a los componentes del medio como el biótico y el social (Vega, 2002).

#### **3.1.3 Impacto sobre la hidrología superficial y subterránea.**

Las ocupaciones como el desplazamiento terrestre, desvío de caudales, implementación de aditivos, vertidos accidentales. Producen impactos en los cambios de la calidad del agua, caudales de circulación. Los efectos no se crean en el lugar donde se genera, sino que tienen la posibilidad de generarse en regiones alejadas e inclusive en extensiones bastante gigantes, por lo cual el entorno a tener en cuenta tendrá que ser muchísimo más largo que el sector directo del plan (Vega, 2002).

### **3.1.4 Impacto sobre los suelos.**

Los impactos sobre los suelos se presentan principalmente por la destrucción o compactación de los mismos, por los movimientos de tierra, por la explotación de materiales y por los cambios de uso que el proyecto genera., así como la acumulación de contaminantes transmitidos por vía atmosférica o hidrológica por el arrastre durante la escorrentía. Estos impactos pueden generarse tanto en la etapa de construcción como de operación (VEGA, 2002)

### **3.1.5 Impacto sobre la vegetación.**

El efecto es dependiente del área ocupada por el plan. La tala y los diques, la deforestación y otras ocupaciones tienen la posibilidad de ocasionar la desaparición de especies endémicas, el calentamiento global y los cambios en el paisaje (Vega, 2002).

### **3.1.6 Impacto sobre la fauna.**

La fauna se ve afectada por las ocupaciones como el desplazamiento de materiales, cortes de terraplenes, esto crea un efecto en el cambio de hábitat, la erradicación de regiones de reproducción e ingesta de alimentos (Vega, 2002).

### **3.1.7 Impacto sobre el paisaje.**

Las actividades que afectan al paisaje ante todo son el trecho de arquitectura pues produce un desarrollo en la plantas y morfología de la sede (Vega, 2002).

### **3.1.8 Impacto: Elevación de la temperatura local.**

El microclima del área de conducta se verá afectado por el exterminio de la envoltura semilla y pavimentación superficial, y estos útiles serán parcialmente compensados por la génesis de áreas verdes. El ámbito pelotón barbechará cambios complejos en el microclima, como un empequeñecimiento de la humedad relativa, un incremento de la temperatura y una merma de la velocidad del donaire. La pedantería del caza depende de la escala de colonia, una función directa del número de residentes y su densidad. (González, 2015).

El ordenamiento de suelo arará dos variedades de cambios climáticos: el primero es el recurso micro climático provocado por la distinta refracción del firme con respecto a la envoltura original (tierra) y el cambio meso climático provocado por el asfalto. Al poblar una girola entre valles, si se divide un área con gualdrapa verdura firme, el cambio será más escénico, porque se formará un desequilibrio en el ecosistema, que impactará la escena elegíaca y sufragará a entrenar parches aislados.

La carpeta asfáltica absorbe más calor que la tierra misma, por lo que, al liberar este calor por la tarde y la noche, hará que la temperatura aumente y dure varias horas. Estos Los cambios microclimáticos, pueden generar efectos secundarios en los ecosistemas, como cambios en las condiciones en las lluvias locales, que pueden desencadenar inundaciones o sequías.

Una de las características más importantes de estos proyectos es que cubren más de un ecosistema y tienen múltiples impactos en función del capital que se encuentran en cada

programa. Generalmente se cree que la ocurrencia no es grande, debido a esa muestra, por el contrario, puede rentar características ambientales frágiles en algunas áreas, lo que hace que este cachete sea característico (Hernández et al., 2001).

### **3.1.9 Impacto: Disminución calidad de aire.**

Las condiciones sobre el aire se verán afectados por la emisión de partículas de distintos tipos de índoles generadas por las actividades de fortalecimiento de terrenos, e igualmente por partículas que son utilizadas en los vehículos y equipos, gas residual de combustión y agregados orgánicos volátiles (Gonzáles, 2015).

La utilización de equipos y el correr de los vehículos de carga pesada, generan que las emisiones de fracciones de polvo sean distribuidas al espacio de trabajo, y la magnitud sea congruente a la proporcionalidad de fracciones simples que se hayan en el suelo (Gonzáles, 2015). La función de una planta de asfalto genera emisión de gas, el cual es causado por algunos derivados del petróleo, los cuales son usados para subir la temperatura de la mezcla asfáltica y el vapor del material volátil que escapa de la mezcla (no incinerados de la mezcla).

Estas sustancias se absorben en la atmósfera y transforman en elementos que pueden ser asimiladas por que viven organismos.

Por otro lado, el uso de piedras en la preparación de asfáltica Mezclas aumenta el nivel de emisiones sólidos particulados en suspensión debido a la circulación de estas sustancias. Desde combustión gases, orgánicos volátiles compuestos, y en suspensión sólidos partículas son tóxicos y tienen un directo efecto en humanos de salud, el impacto es extremadamente negativa (Hernandez et al., 2001).

### **3.1.10 Impacto: Cambios en el microclima.**

Los materiales utilizados para el pavimento hidráulico controlar el microclima porque transfieren el calor más rápido que el suelo y, por lo tanto, provocan un aumento de la temperatura cercano. Esto se puede demostrar por el hecho de que, aunque esta temperatura del suelo al mediodía puede ser más alta que la temperatura del hormigón u otros materiales, al último del día, absorberá mucho más calor que el suelo sin pavimentar del mismo volumen o comparable. Este calor se liberará al medio ambiente unas pocas horas después de la puesta del sol, lo que provocará un aumento de la temperatura local o del microclima.

Durante este tiempo, que es también importante a tener en cuenta la longitud de los caminos, porque por la construcción de pasillos que separan estos Ecosistemas, que degradan su calidad y provocan un clima de cambio en un regional o global de la escala, los cuales pueden afectar a una variedad de Ecosistemas. Estos efectos son más notorios en áreas con una cubierta vegetal densa y consistente (más notablemente en sistemas de bosques y sabanas). Como un resultado, el efecto es negativo, y su magnitud puede variar desde insignificantes a mayor, dependiendo del tipo de ecosistema en el que el proyecto se encuentra. (Hernández et al., 2001).

## **3.2 Estudiar el cambio en el módulo dinámico de pavimento asfáltico con el incremento o diseminación de la temperatura**

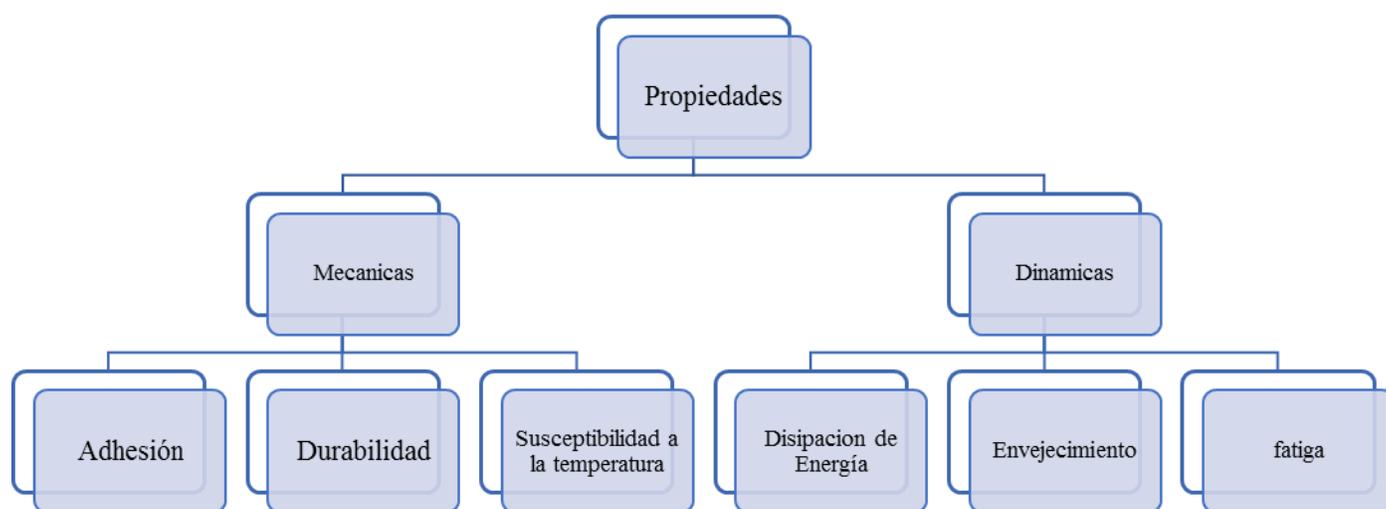
### **3.2.1 Estudio de propiedades mecánicas y dinámicas**

Como sabemos la mayoría de las carreteras se encuentran construidas con asfalto como uno de los principales componentes, por esto se hace fundamental la investigación de sus propiedades mecánicas y dinámicas de manera individual y como parte del asfalto. El asfalto que se pueden utilizar en la mezcla es elegido basado en ambientales condiciones, vehículo velocidad, la carga de peso, la temperatura, la piedra y la adherencia, y otros factores.

Para caracterizar el asfalto se utilizan penetración, viscosidad, punto de ablandamiento, ductilidad, densidad y otras pruebas tradicionales; Sin embargo, más recientemente, con la metodología Superpave, más sofisticadas pruebas han sido utilizados, tales como módulo Complejo, Deformación, Envejecimiento, fatiga, disipada Energía, y así en adelante, todo con el objetivo de seleccionar el apropiado de asfalto para una mejor comportarse asfalto mezcla. (Bonaquist, Christensen, & Stump, 2003).

**Figura 1.**

*Diagrama de las propiedades mecánicas y dinámicas de las mezclas asfálticas.*



### 3.2.2 Mezclas asfálticas en función de la temperatura

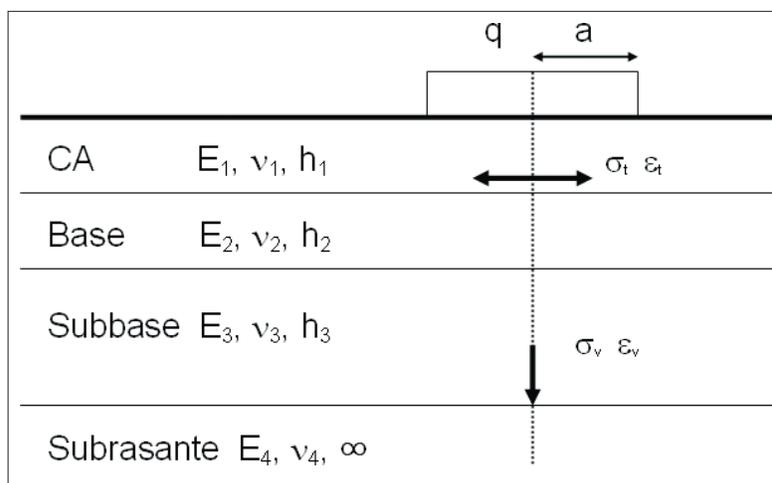
Las mezclas de Asfáltica consiguen tener una conducta directa, o indirecta o viscosa en función de la temperatura ambiente. A menor temperatura la conducta es especialmente elástica

y directa, pero como la temperatura aumenta, se comporta más como un material elástico no lineal, con una viscosa comportamiento que aparece como la temperatura se eleva. En baja temperatura períodos (invierno), no son no plástico deformaciones, su resistencia es elevada, y su conducta es fácilmente elástica. En medias y altas temperaturas, la cohesión de la mezcla baja, debido a cambios en el estado del asfalto, resultante en irreversibles deformaciones y una reducción de sus mecánicas y dinámicas propiedades. (Ruiz & Pérez, 2002).

La vida útil de una estructura de pavimento está determinada por una serie de factores, que incluyen la climatología, la condición del material, el tráfico (actual y proyectado), los ejes de carga, los procedimientos de construcción, el diseño de la capa y, lo más importante, la respuesta de los materiales a estos. factores. Uno de las metodologías de diseño de pavimentos es el método empírico-mecanístico o racional, que considera la estructura del pavimento como un conjunto de capas superpuestas horizontalmente uniformes, en las cuales el módulo de dureza ( $E_i$ ), la relación de Poisson ( $\nu_i$ ) y la magnitud deben ser entendido ( $h$ ). En el otro lado, la transmisión de vehículo de peso para el pavimento estructura se simula como una radio de un (área de la impronta superficie que las hojas del neumático) y una uniformemente distribuida carga. (Reyes F. , 2004)

**Figura 2.**

*Diagrama del modelo de la estructura de pavimentos por metodología empírico – mecanicista.*



Nota. Datos tomados de (Reyes F. , 2004).

Numerosos estudios a nivel nacional e internacional han establecido que el prototipo de asfalto, granulometría y energía de compactación utilizados en la generación de las mezclas asfálticas tienen un impacto significativo en su conducta.; por ejemplo, (Baha & Kuloglu, 2007) descubrieron que el modelo de rigidez de una mezcla asfáltica que utiliza varios asfaltos (AC-5, AC-10, AC-20 y modificado con SBS) posee cambios mayores a 50, especialmente para asfaltos transformados. Por el otro lado, (Ruiz y Pérez, 2002) investigaron el comportamiento de diferentes Mezclas asfálticas construidas con distintos tipos de asfalto y descubrieron importantes disparidades en la tasa de permanente alteración de la Mezcla por un tipo de asfalto que usaron; Del mismo modo, se descubrieron correlaciones entre Penetración, punto de ablandamiento, y otros de asfalto las variables y ahuellamiento.

(Kanitpong & Hussein, 2005) realizaron una investigación con el objetivo de determinar una conexión entre la adherencia y cohesión del asfalto y la resistencia a la tracción indirecta de

mezclas asfálticas construidas con el mismo y probadas a 25 ° C. Ellos descubrieron que no es una relación directa: el mayor de la cohesión y adherencia, la mayor la resistencia a indirecta trazado. El reómetro de corte dinámico se utiliza para determinar la cohesión y la adhesión del asfalto.

(Reyes Ortiz y Camacho, 2008) investigaron el efecto de la granulometría Husing en el ahuellamiento de INVIAS y la UDI (Universidad de Investigación y Desarrollo) asfáltica Mezclas, y descubrieron que, para Muestras compactadas con 50 golpes por cara, la velocidad de deformación sólo se cumple la granulometría MD10 de la UDI en sus usos granulométricos. Además, descubrieron que, para un nivel de energía de compactación de 75 golpes por cara, la asfáltica MD10 Mezcla es ahora la única uno que cumple la Velocidad de Deformación requisito en su granulométrica franja. Por último, pero no menos importante, la mezcla INVIAS MDC-2 en su franja inferior satisface el requisito estándar de velocidad de deformación

Por otra parte, ambientales solicitudes, tienen un importante impacto en la mecánica del comportamiento de la acera. Debido a las propiedades termoplástico de la materia que hace que, hasta las capas asfáltica de pavimento, la temperatura se considera uno de los agentes medio-ambientales que tiene un impacto directo en el comportamiento de la pavimentación, ya que cambia su rigidez. Cuando la temperatura aumenta, la rigidez de las capas de pavimento asfáltico disminuye y, a medida que baja la temperatura, la rigidez de estas capas aumenta (Roberts, Kandhal, Ray, Lee y Kennedy, 1996). Este efecto es más notable en la rodadura gorras, donde se genera atados tensionales estados que se superponen en los producidos por el tráfico de la acción, resultando en un efecto sobre el de la estructura de la durabilidad (Pérez y Bardesi, 2006). Sin embargo, a medida que la mezcla capa se hace más onda, como en el caso de asfáltica base mezcla capas, las tensiones térmicas tienen un efecto indetectable sobre los estados tensionales

del pavimento, incluyendo la temperatura principalmente en la dureza de la mezcla (Nesnas & Nunn, 2004).

Como un resultado, el efecto de matriz la árida que hace que hasta el mineral esqueleto de mezclas asfálticas juega un papel fundamental en la mecánica de la respuesta de mezclas asfálticas de tráfico y factores ambientales. No es una clara influencia de la granulometría utilizado en el comportamiento de los minerales esqueleto de las Mezclas en respuesta a la carga de peticiones, ya que éstos se suman una diferente rigidez a la Mezcla, como, así como una más o menos resistente al comportamiento de fisuras fracasos, de acuerdo a su granulometría. (Jajliardo, 2003).

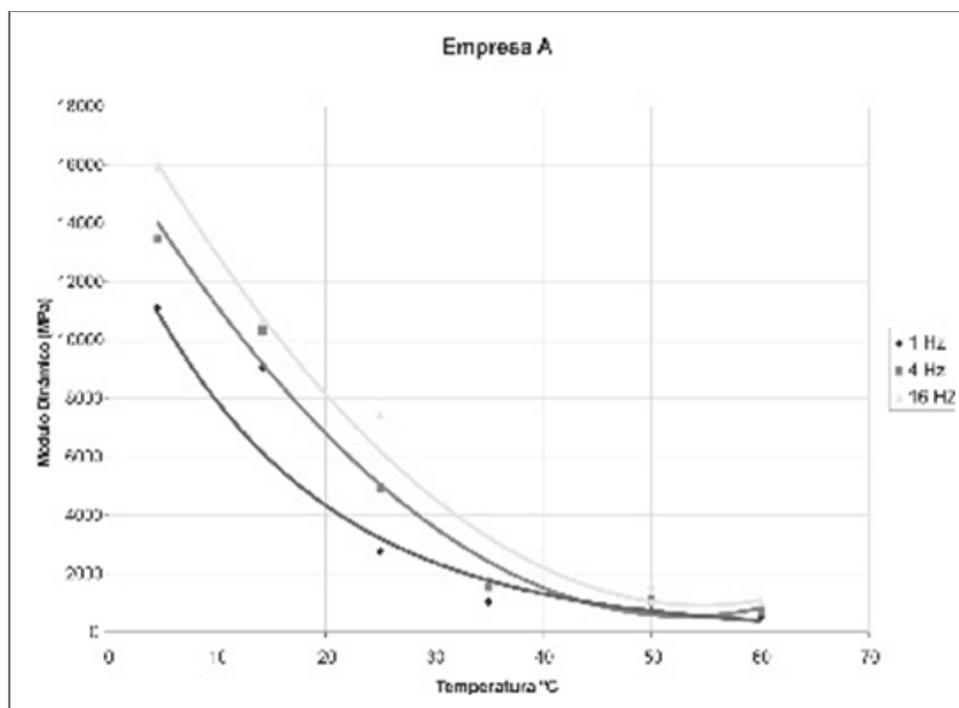
Como anteriormente se ha dicho, ambiente de temperatura tiene un significativo impacto sobre la rigidez de las asfálticas tapas, y la granulometría y ligante utilizado en su fabricación han un impacto en su comportamiento y durabilidad (Valdés, Pérez, y Martínez, 2012).

Debido a que las mezclas asfálticas en caliente han sido las más empleadas a nivel internacional, por propiedades de duración, flexibilidad, uniformidad y resistencia a diferentes fatigas y económicas entre otros factores, ocasionando así estudios y progresos para así mejorar sus atributos mecánicos y dinámicos, por ende muchos de los avances que se enfocan en los procedimientos de construcción y conformación de los archivos de rodadura, que una muestra de ello es el uso de equipos altamente costosos que conservan una temperatura persistente en cada uno de los procesos de compactación y extendido. Por otro lado, el apresurado avance automotriz y el canje de servicios y bienes conducen a edificar vías que sostienen un elevado número de ejes semejantes y la utilización de material modificado con cargas y precisos controles de obra.

Un claro ejemplo es en estudio realizado por Julián Vidal Valencia de la Universidad EAFIT, titulado “comportamiento dinámico en mezclas asfálticas” donde evalúan 3 empresas en el comportamiento del módulo dinámico (Figuras 2,3 y 4 ), por la variación de la frecuencia de aplicación de carga al incrementar la temperatura, donde observaron que en las gráficas el comportamiento de la temperatura vs módulo dinámico, se resalta el módulo dinámico, se resalta el módulo que cambia considerablemente en temperaturas de 25, 35 °C, y en temperaturas iguales o mayores a los puntos de ablandamiento , el módulo dinámico es igual y supremamente bajo; esto quiere decir que el número del módulo en áreas donde la temperatura de la carpeta asfáltica podría ser de 50 °C; puede presentarse en el medio día.

**Figura 3.**

*Empresa A.*



*Nota. Datos tomados de: Vidal (2006).*

Figura 4.

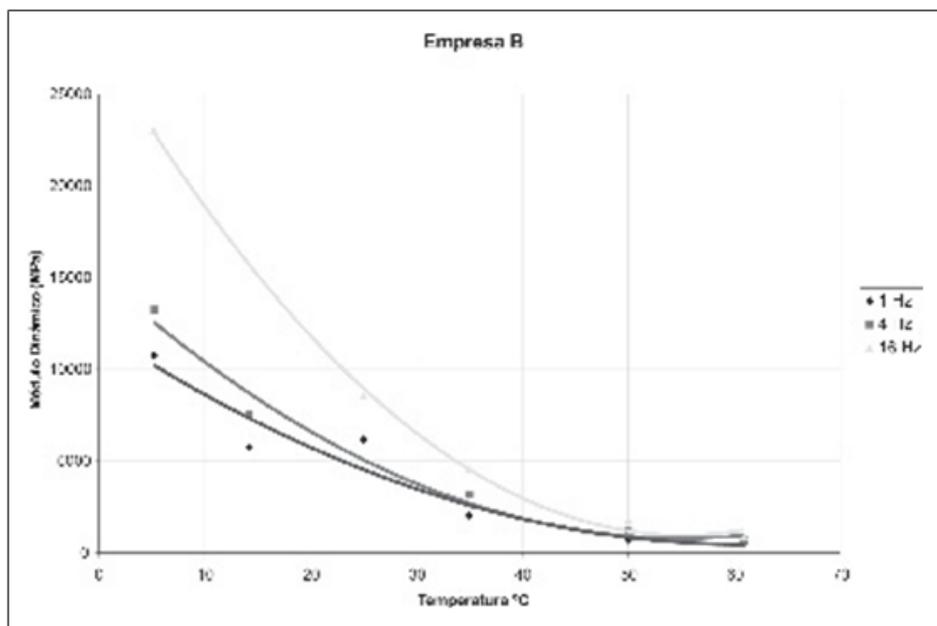
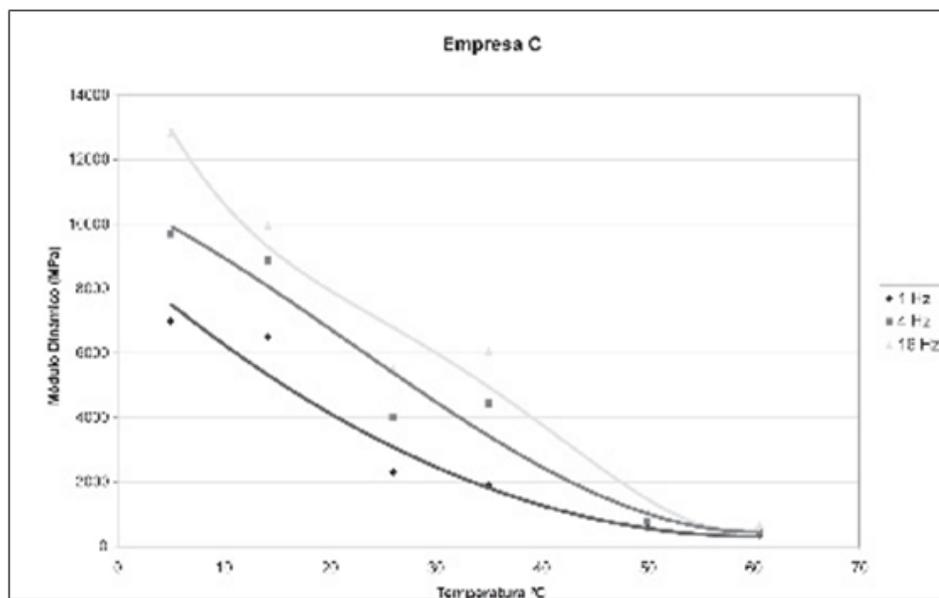
*Empresa B**Nota. Datos tomados de Vidal (2006).*

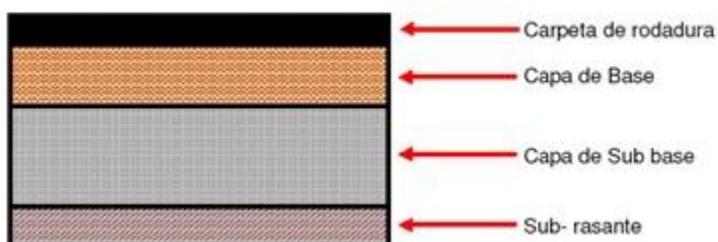
Figura 5.

*Empresa C**Nota. Datos tomados de Vidal (2006).*

Los pavimentos asfálticos, comúnmente denominados como flexibles, corresponden al tipo de estructura más empleada para la construcción de vías. Está compuesta por varias secciones o capas: subrasante, subbase, base, y capa o carpeta de rodadura, como se observa en la figura 1. Los espesores de cada una de estas capas varían de acuerdo a las solicitaciones de tráfico, y a las características de los materiales que las conforman (Aguirre, Calderón, & Salazar, 2009).

**Figura 6.**

*Estructura común de una pavimento asfáltico o flexible.*



*Nota. Datos tomados de:* <https://sites.google.com/site/rafaleon4/2-0-marco-teorico/2-2-marco-referencial>

De todas las capas que conforman un pavimento asfáltico, la superior, es decir, la carpeta de rodadura, es la más vulnerable a los efectos de la temperatura. Esta capa está formada a partir de mezclas asfálticas, las cuales corresponden a la combinación de agregados pétreos (gruesos y finos), llenante mineral, y asfalto (de ahí la denominación de pavimento asfáltico). La proporción más típica en las mezclas asfálticas corresponde aproximadamente a un 90% de agregados pétreos, un 5% de llenante mineral, y un 5% de asfalto. En la figura 2 se observa el aspecto común de la carpeta de rodadura en el pavimento asfáltico (Garzón & Cárdenas, 2013; Aguirre, Calderón, & Salazar, 2009).

**Figura 7.**

*Carpeta de rodadura en pavimentos asfálticos. AMSCE, 2016.*



*Nota. Datos tomados de: <https://www.amsce.es/el-asfalto-en-frio/>*

El asfalto es el componente clave de las mezclas asfálticas, este material es el encargado de mantener unidos los agregados pétreos y la llenante mineral, los cuales en conjunto conforman el mayor porcentaje de la mezcla (aproximadamente un 95%), además, permiten impermeabilizar la estructura del pavimento, impidiendo el paso hacia las capas inferiores. El asfalto corresponde a una mezcla compleja de hidrocarburos, que se caracteriza por ser viscoso, no cristalino y de color negro. Puede ser obtenido por destilación natural, en yacimientos, o de forma artificial en el petróleo (Guerrero, 2019).

Comúnmente el asfalto suele procesarse de tres formas: en emulsiones asfálticas, en asfalto líquido, y en cemento asfáltico. De estas tres, el cemento asfáltico corresponde al material más empleado para la pavimentación, sobre todo con mezclas asfálticas en caliente, con las cuales se

construyen la mayor parte de los pavimentos asfálticos en todo el mundo (Garzón & Cárdenas, 2013).

Para la fabricación de la mezcla asfáltica se hace necesario aplicar determinadas temperaturas, sobre todo para garantizar la fluidez del asfalto y el recubrimiento total de los agregados, lo que representa la primera variación relacionada con la temperatura en el pavimento asfáltico. Después, cuando se finaliza la construcción del pavimento, este queda expuesto a los efectos producidos por la radiación solar, los cuales generan fluctuaciones constantes en la temperatura de la carpeta de rodadura, por tanto, figura como la segunda variación registrada por efectos de temperatura en el pavimento asfáltico, este capítulo se centra en la descripción de estos 2 aspectos (Leiva, Camacho, & Aguiar, 2016; Villamil & Órtiz, 2020).

### **3.2.3 Temperatura de fabricación de la mezcla asfáltica**

De acuerdo a la temperatura aplicada en la mezcla, surge la clasificación más general de las mezclas asfálticas: en frío y en caliente. Las primeras son aquellas donde se emplean emulsiones asfálticas, a temperaturas promedio inferiores a los 100°C; mientras que en las segundas se emplean cementos asfálticos a temperaturas promedio de 150°C, de acuerdo a la viscosidad del asfalto, para su posterior extensión y compactación (Padilla, 2014).

A pesar de que la anterior es la clasificación más extendida sobre las mezclas asfálticas de acuerdo a su temperatura de fabricación, en la actualidad se está promoviendo el uso de una clasificación más específica basada en rangos de temperatura, la cual se detalla en la Tabla 1 (Ortega & Paternina, 2012).

**Tabla 1.**

*Clasificación de mezclas asfálticas de acuerdo al rango de temperatura*

Rango de temperatura	Nombre de la mezcla	Tipo de asfalto
De 25°C a 60°C	En frío	Emulsión asfáltica
De 60°C a 100°C	Semitempladas	Emulsión asfáltica
De 100°C a 135°C	Tibias	Cemento asfáltico
De 135°C a 180°C	En caliente	Cemento asfáltico

*Nota: Adaptado de XXXV Reunión del asfalto, Rosario, Argentina, 2008, citado por Ortega & Paternina, 2012.*

Como se observa en la tabla 1, la clasificación de las mezclas asfálticas se basa en el aumento gradual de la temperatura, por lo que se distinguen 4 tipos de mezclas: en frío, Semitempladas, tibias y en caliente. De forma general, la clasificación hace correspondencia al uso del mismo tipo de asfalto: emulsiones asfálticas para mezclas donde se requieran temperaturas menores a 100 °C, y cemento asfáltico para mezclas donde sea necesario utilizar temperaturas mayores a 100 °C, por lo que esta clasificación está relacionada con los requerimientos energéticos de cada tipo de mezcla, los cuales tienen los valores más altos en el caso de las mezclas en caliente, en la figura 3 se observa el uso de este tipo de mezcla (Ortega & Paternina, 2012).

**Figura 8.**

*Pavimentación con mezcla asfáltica en caliente. Venta de asfalto, 2021*



*Nota. Datos tomados de <http://www.ventadeasfalto-rc-250.com.pe/venta-de-asfalto-en-caliente-en-lima-peru.html>*

**3.2.4 Temperatura ocasionada por la radiación solar en el pavimento asfáltico**

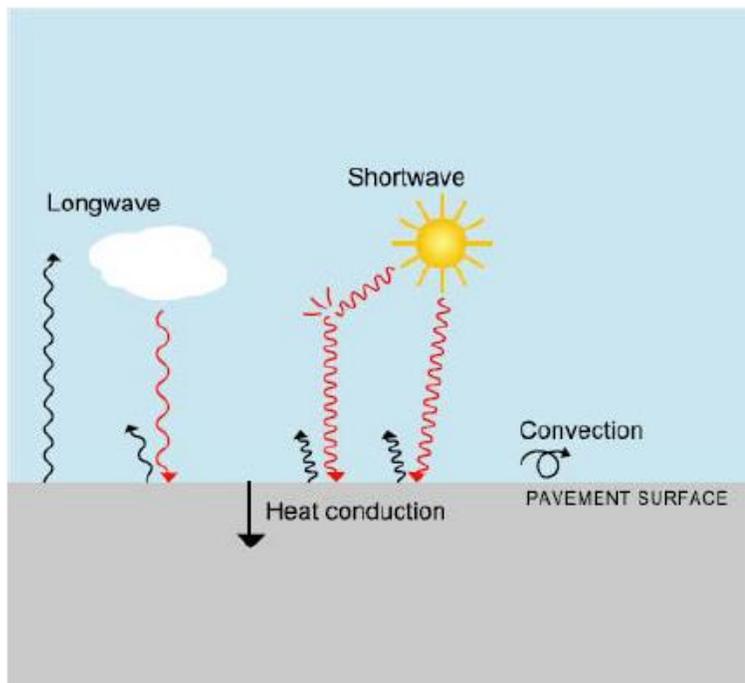
La radiación solar hace referencia al conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. Estas radiaciones son absorbidas por la carpeta de rodadura del pavimento, lo que ocasiona un aumento de la temperatura que supera la temperatura del aire. Se han registrado temperaturas en el pavimento de hasta 70°C (Pascual, 2012).

Existen dos factores que inciden en el efecto de la radiación solar sobre el pavimento, el primero es la posición espacial del sol, la cual está condicionada por las coordenadas, el día y el año, sin embargo, es de resaltar que, en países ecuatoriales como Colombia, la posición del sol tiende a variar con menor efecto que en los países no tropicales. El segundo factor es la cobertura de nubes. Estos dos factores, en conjunto, crean un estado de intercambio de energía por radiación entre la atmosfera y el pavimento, que a su vez incide en el intercambio de calor por convección entre la superficie del pavimento y el aire circundante, así como de calor por

conducción hacia el interior del pavimento. En la figura 4 se ilustra una representación de este proceso (Leiva, Camacho, & Aguiar, 2016; Pascual, 2012).

**Figura 9.**

*Descripción del efecto de la radiación en el pavimento asfáltico. Pascual, 2012. Estudio del comportamiento térmico de pavimentos de mezcla bituminosa y análisis de un colector solar asfáltico multicapa. p. 38.*



*Nota:* Longwave: onda larga; Shortwave: onda corta; Heat conduction: conducción de calor; Convection: convección, y pavement surface: superficie del pavimento.

Se ha demostrado que la relación entre la temperatura del aire (ambiente) y la temperatura que alcanza el pavimento, específicamente la carpeta de rodadura, no es lineal, por lo que se han desarrollado modelos que buscan estimar la temperatura que alcanzara el pavimento en determinadas condiciones. El modelo más aceptado fue el propuesto por los investigadores

Yavuzturk y Ksaibati en el año 2005, con el cual plantearon dos ecuaciones, una para obtener la temperatura del pavimento en su superficie (Ecuación 1), y otra para una profundidad de 20 mm (Ecuación 2) (Mena W. , 2013).

$$T_{Superficie} = -1,56 + 0,72T_{air} - 0,004Lat^2 + 6,26 \log_{10} H + 25 - z * 4,4 + 0,5\sigma^{2^{1/2}}$$

(Ecuación 1)

Dónde:  $T_{Superficie}$ , temperatura del pavimento en su superficie (°C);  $T_{air}$ , temperatura media de los últimos siete días (°C);  $Lat$ , latitud del lugar;  $H$ , profundidad a la superficie (mm);  $z$ , -2,055 para el 98% de confiabilidad; y  $\sigma$ , desviación estándar de la temperatura del aire baja y media.

$$T_{20mm} = (T_{air} - 0,00618Lat^2 + 0,2289Lat + 44,2)(0,9545) - 17,78 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde:  $T_{20mm}$ , temperatura del pavimento a una profundidad de 20 mm (°C);  $Lat$ , latitud del lugar; y  $T_{air}$ , temperatura media de los últimos siete días (°C).

Con estas dos ecuaciones, se busca conocer las temperaturas a las que estará constantemente sometido el pavimento, y cuyos datos resultan de gran interés para ingenieros y diseñadores, en especial para el diseño y construcción de pavimentos en climas cálidos y áridos, donde las variaciones de temperatura resultan más extremas durante todo el año (Mena W. , 2013).

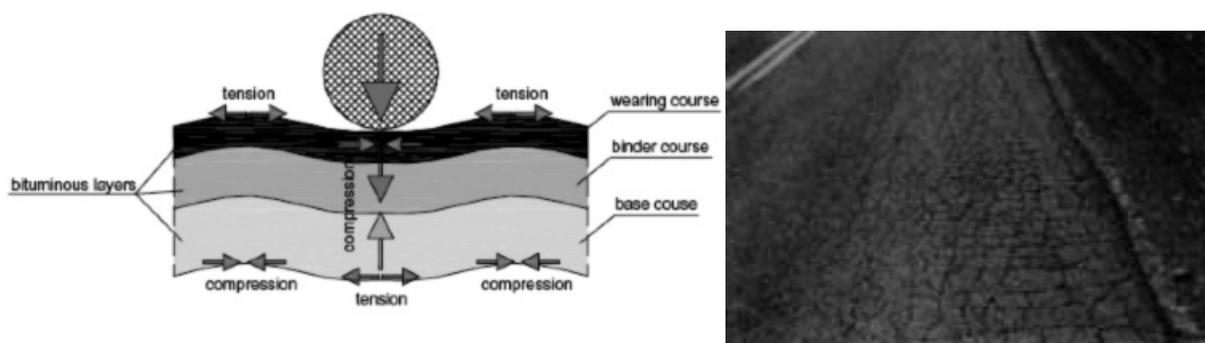
### 3.3 Analizar el efecto de las fallas asociadas a los cambios de temperatura en el comportamiento de fatiga del asfalto (fisuración, baja temperatura, envejecimiento).

#### 3.3.1 La influencia de la temperatura y el tipo de mezcla asfáltica en el rendimiento a la fatiga del pavimento flexible

Uno de los deterioros más comunes en pavimentos asfálticos que afecta su durabilidad a largo plazo es la falla por fatiga, que es reconocida como piel de cocodrilo, como se muestra en la Figura 2. Este tipo de defecto se produce más comúnmente en las extensiones del pavimento sometido a la conmovición de varias y duplicadas repeticiones de tráfico de cargas, especialmente en la de calzada rodada zona, donde la asfáltica Mezcla del inferior casquillo o la capa asfáltica de la Estructura sufre un fatigamiento o pérdida de propiedades estructurales paulatina, producto de las cargas reiteradas que ocasionan situaciones de tensiones y deformaciones en su fibra inferior (FHWA, 2003)

#### Figura 10.

*Tensiones y deformaciones generadas por cargas de tráfico en los recubrimientos asfálticos del pavimento y pavimento fisurado exageradamente por fatiga.*



. Nota. Datos tomados de Racanel et al., 2009

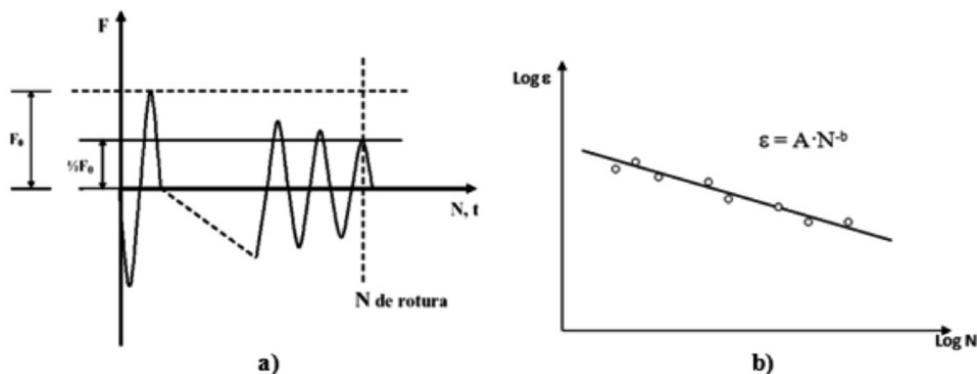
Es un tema de debate en la literatura, ya que algunos investigadores creen que los más rígidos Mezclas, sobre todo cuando expuestos a bajas temperaturas, se comportan con excesiva fragilidad, lo que ellos más susceptibles a una rápida y brusca fisura en la carga de las condiciones que causa la deformación levemente mayor que la admitida (García, García, Buisson, Cortés, & Potti, 2008). Sin embargo, más dúctiles mezclas pueden soportar más deformaciones y, como un resultado de ello, son menos propensos a la fatiga. En el otro lado, otros estudios muestran que cuando se utiliza en pavimento estructuras en los intermedios y de base tapas, o en Liviano tráfico estructuras, que tienen el mejor comportamiento. (Malan, Straus, & Hugo, 1989).

Tradicionalmente, el comportamiento a fatiga ha sido y continúa a ser un tema de estudio en mezclas asfálticas, y que ha sido descrito por una fatigosa regla, que se determina usando los parámetros obtenidos a partir de culminantes pruebas y un predeterminado fallo criterio. La importancia de la fatiga de la ley se deriva a partir del hecho de que él es un crítico herramienta en el dimensionamiento del pavimento estructuras utilizando modernas mecánicas de diseño de métodos (Valdés, Pérez Jiménez, y Martínez, 2012).

Por otro lado, el clásico estándar es uno de los más ampliamente utilizado para caracterizar el comportamiento de mezclas en pruebas laboratorio. La norma considera el daño a la muestra cuando la rigidez de la mezcla alcanza la mitad de su valor inicial. En los experimentos de deformación o desplazamiento, la fractura o destrucción de la muestra ocurre durante el ciclo cuando la carga  $F_0$  inicial se reduce a la mitad de  $F_0 / 2$ , como se muestra en la Figura 11.

**Figura 11.**

*Criterio clásico de fallo por fatiga. Ensayo controlado por desplazamiento. b) Ley de Fatiga en ensayos de desplazamiento controlado en mezclas asfálticas*



*Nota. Datos tomados de Racanel et al., 2009; Pavement Tools Consortium.*

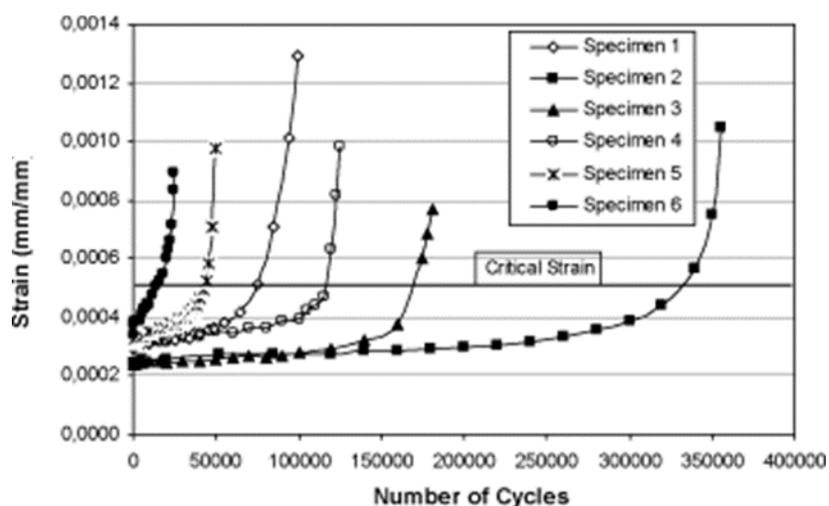
Como un resultado de ello, el objetivo de la fatiga ley es para caracterizar el comportamiento de una específica mezcla asfáltica bajo cíclico de carga, que se obtiene por la realización de múltiples sondas en diferentes desplazamientos y / o de deformación niveles. Cada experimento arroja un punto dentro de la ley de fatiga asfáltica, como se muestra en la Figura 3. Este Último sí determina correlacionando la deformación máxima inicial en el centro de la muestra con el número de ciclos necesarios para reducir la rigidez del asfalto. La exposición se divide en un medio, y los valores correspondientes a varios estudios se obtiene en diferentes amplitudes de Desplazamiento, lo que permite la ley de la fatiga por deformación bajo el control a ser descrito.

En una prueba de desplazamiento de control o fatiga por prueba de tracción, a medida que aumenta el número de ciclos, aumentará la deformación resultante y habrá un cierto grado de deformación. El proceso de fatiga se expandirá rápidamente a partir de este nivel de

deformación, y qué estado de tensión Irrelevante. El estado de la muestra en el proceso de fatiga se muestra en la Figura 4. Esto significa que, si se aplica un esfuerzo elevado, la deformación inicial será baja y aumentará cada vez que sí aplique una carga, hasta que se acelere el proceso de fatiga, hasta que el material de sí rompa. Por otro lado, si una pequeña carga se aplica, la deformación será ser pequeña en primera, pero como la carga se aplica más a menudo, la deformación será aumentar hasta que se alcanza el mismo nivel como el anterior caso (crítico de deformación), en la cual señalar las grietas va creciendo rápidamente hasta el material de ser rasgó aparte.

**Figura 12.**

*Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga. Ensayo de fatiga a flexotracción*



*Nota. Datos tomados de Pérez et al., 2007.*

Además, en un estudio experimental realizado por (Valdés, Pérez Jiménez, & Martínez, 2012), en el cual se utilizaron granulometrías de mezclas, como se muestra en la tabla, y se realizaron con áridos, granulometrías especificadas en la normativa española para tapones de

base asfáltica. Estos eran los que correspondían a los Gruesas y semidensos tipos, con un máximo de árido diámetro de 20 mm, y se denominaron G-20 y S-20, respectivamente (Tabla 1). Ambas mezclas se realizaron con diferentes tipos de ligantes asfálticos, uno con una penetración de 60/70 dm, que se usa comúnmente en mezclas convencionales, y otro con una penetración de 13/22 dm, que se usa con mayor frecuencia en mezclas no convencionales.

**Tabla 2.**

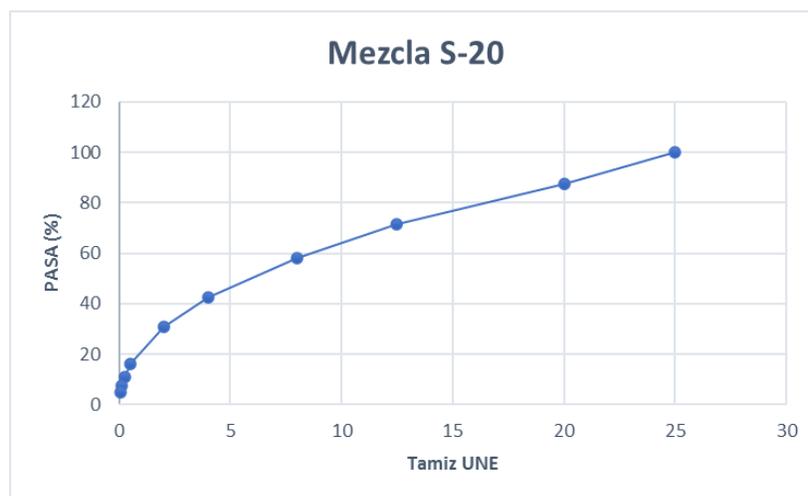
*Granulometrías de mezclas utilizadas en el estudio experimental*

Tamaño Tamiz UNE	Mezcla S-20			Mezcla G-20		
	Banda inf	Banda sup	PASA (%)	banda inf.	Banda sup	PASA (%)
25	100	100	100	100	100	100
20	80	95	87,5	75	95	75
12,5	64	79	71,5	55	75	55
8	50	66	58	40	60	40
4	35	50	42,5	25	42	25
2	24	38	31	18	32	19
0,5	11	21	16	7	18	10
0,25	7	15	11	4	12	7
0,125	5	10	7,5	3	8	6
0,063	3	7	5	2	5	5

Nota. Datos tomados de (Valdés, Pérez, & Martínez, 2012).

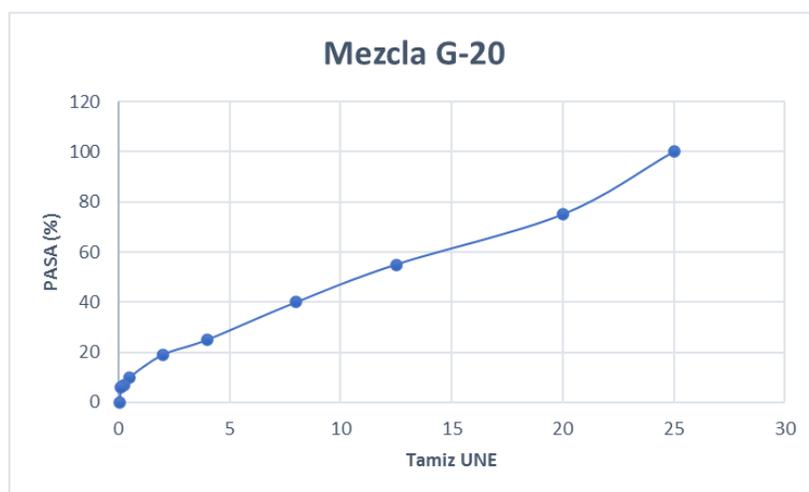
**Grafica de tabla 1.**

*Granulometrías de mezclas utilizadas en el estudio experimental*



### Grafica de tabla 1.

*Granulometrías de mezclas utilizadas en el estudio experimental*



### 3.3.2 Afectaciones por los cambios de temperatura en el pavimento asfáltico

Las dos variaciones de temperatura descritas están asociadas con cambios en el comportamiento del pavimento asfáltico, especialmente en la carpeta de rodadura compuesta por la mezcla asfáltica. Las aceptaciones más generalizadas sobre este aspecto, indican que el pavimento a altas temperaturas, sufre cambios que ocasionan el no poder soportar las cargas vehiculares eficazmente, como si logra hacerlo a temperaturas más bajas. Las altas temperaturas al aumentar el estado plástico del asfalto, principal componente de las mezclas asfálticas, facilitan la generación de deformaciones permanentes ante las cargas del tráfico, aunque también es común que temperaturas extremadamente bajas ocasionen grietas por rigidización (Leiva, Camacho, & Aguiar, 2016; Aguirre, Calderón, & Salazar, 2009).

Por último, se considera que la variación de temperatura ocasionada directamente por la radiación solar, incide en los procesos de evaporación del agua, produciendo movimientos

dentro de la carpeta de rodadura que inciden en una progresiva separación entre los agregados y el asfalto. En los capítulos siguientes se aborda la información cuantitativa que permite verificar estas consideraciones (Pascual, 2012).

### **3.3.3 Solicitaciones mecánicas y ambientales**

Los pavimentos asfálticos se someten a una variedad de mecánicas y ambientales demandas, todo de que causa degradación en el material. Las fisuras debido a la fatiga son uno de la mayoría de los comunes pavimento degradaciones. Diferentes pruebas de laboratorios existen para realizar su evaluación en la mezcla; Sin embargo, estas pruebas requieren una cantidad sustancial de recursos (Tiempo y Coste). Como un resultado de ello, en los últimos años, los investigadores han sido trabajando en el desarrollo de los estudios que permiten a la predicción de mezcla asfáltica comportamiento basado en la evaluación de ligante asfáltico (Hintz, Velásquez, Johnson, y Bahía, 2013).

Muchos investigadores creen que la fatiga es un problema con la estructura del pavimento , mientras que otros creen que es un problema con la mezcla asfáltica .Sin embargo, se está bien conocido entre los dos grupos que la grieta debido a la adversidad se inicia y untar sobre el asfalto; como un resultado, la investigación debe comenzar a partir de las ligante asfáltico (Bahia, Y Otros, 2001).

(Delgado, Ayala y Garnica, 2015) concluyen que el estudio de RCL captura efectivamente la respuesta viscoelástica no lineal de ligantes asfálticos; sin embargo, que es un tiempo de estudio. (aprox. 16,000 ciclos,  $f = 10$  Hz). Como un resultado, los autores llevaron a cabo una comparación de la RCL estudio con el Barrido de amplitud lineal (LAS, corto para lineal de amplitud de barrido), llegando a la conclusión de que el método es consistente con la RCL, como, así como proporcionar la completa ley de la fatiga en a único experimento.

Desde el asfalto es sensible a la temperatura de material, la temperatura del experimento es un importante factor a considerar cuando la evaluación de la fatiga. Sin embargo, las propuestas de estudios no claramente identifican la apropiada temperatura para la evaluación de la fatiga en el ligante asfáltico, haciendo que sea necesario para evaluar el impacto de este parámetro en los análisis predictivos de estudios. (Hossein, Leek, & Nikraz, 2013).

Por el ajuste de la temperatura, un viscoelástico de material puede transición de un líquido viscoso estado a un sólido elástico estado. Como un resultado, no es una necesidad para un parámetro que define la prueba de temperatura mientras que teniendo esta transición en cuenta. (Van Rompu, Benedett, Buannic, Gallet, & Ruot, 2012).

### **3.3.4 Cambios extremos de Temperatura**

Es recurrente hallar carreteras con desprendimientos y esto se debería, primordialmente, a las condiciones de carga y a las altas temperaturas. El clima extremo, así sea bastante frío o bastante caliente, perjudica a la infraestructura de la carretera.

En los últimos años, el calentamiento global fue un componente más a considerar en el mantenimiento de las carreteras. Por dicha razón, la ciencia y la ingeniería se combaten a un nuevo desafío: producir nuevos procedimientos de creación adaptables a el caso climatológica presente.

Y es que una vez que la temperatura supera los 45°C el asfalto se deforma, dando sitio a deformaciones que poseen secuelas evidentes en el tránsito de los vehículos. Una vez que aquellas grietas no se reparan, en los días lluviosos, acumulan agua y se genera el aquaplaning. Además, si esa proporción de agua se filtra en el centro de la vía provoca que el pavimento pierda rigidez.

De esta forma, otro impacto de las altas temperaturas, es la variación del módulo de rigidez del pavimento llegando a ocasionar el agrietamiento e, inclusive, una deformación estructural.

Las grietas en el asfalto además tienen la posibilidad de ser por un desmesurado endurecimiento producido por unos altos índices de relámpago UV y una alta oxidación por las olas de calor.

Una vez que la temperatura rebasa los 45°C se acelera la deformación de la carpeta asfáltica, realizando que aparezcan roderas y ondulaciones bastante inmediatamente. Estas deformaciones poseen secuelas directas en el tránsito de los vehículos, y se debería primordialmente al tipo de mezcla con la cual se construyó la carretera.

En caso de que las deformaciones no se reparen rápido empiezan a juntar agua, la cual crea hidroplaneo en los vehículos, situación que puede comprometer la estabilidad de los usuarios. Por otro lado, si el agua se filtra a las capas de base y sub-base provoca que éstas pierdan su capacidad de soporte gracias a la humedad. Otro impacto de las altas temperaturas en el asfalto es la variación del módulo de rigidez del pavimento, ocasionando sensibilidad en él y por efecto agrietamiento o hasta una deformación estructural.

Las grietas en el asfalto además tienen la posibilidad de ser por un desmesurado endurecimiento producto de elevados índices de relámpagos UV y una alta oxidación por olas de calor.

El valor de conocer esta información acerca del asfalto y las carreteras radica en que esta clase de infraestructura es soporte para la comunicación y transporte de los individuos en nuestro estado. Por consiguiente, su cuidado y mantenimiento es estratégico para un desarrollo social y económico.

### **3.4 Describir las propiedades del cemento asfáltico con respecto a su modificación relacionado con la temperatura y el envejecimiento.**

#### **3.4.1 La influencia de la temperatura en el envejecimiento de los pavimentos flexibles**

El envejecimiento de la superficie flexible de la carretera es uno de los principales problemas que afectan a la calidad y vida útil de la banda de rodadura durante mucho tiempo. Por un lado, las razones relacionadas con las variables internas (como el tipo de agregado, los huecos de contenido y las características de la mezcla asfáltica), así como los factores externos (como la humedad, la temperatura y la radiación), estos factores conducen a daños irreversibles pero controlables. En algunos casos, el efecto resultante corresponde a un modificador de grado químico, es decir, la relación molecular en la mezcla. Generalmente, estos cambios en la estructura molecular del asfalto provocarán un endurecimiento físico, convirtiendo gradualmente la mezcla en una sustancia frágil, propensa a agrietarse y otros fenómenos relacionados a lo largo de su vida útil, por lo que es necesario minimizarlo y modificar la estructura interna del asfalto.

Como resultado, la lignina se considera un contaminante que puede mejorar la estructura interna del asfalto al actuar como antioxidante, ya que su función principal en las plantas es brindar soporte estructural, impermeabilidad y resistencia a los agentes microbianos y al estrés oxidativo. Es un elemento amorfo, un elemento inerte oportunista y es insoluble en agua. Tiene las ventajas de la abundancia natural, por lo que es fácil de obtener debido a su bajo costo de producción, lo que lo hace cada vez más importante en diversas aplicaciones industriales, incluida la pavimentación de carreteras. Dado que uno de los países transporta bienes y servicios, las carreteras se consideran parte fundamental de la sociedad. Dado que la mayoría están hechos de asfalto, sus propiedades mecánicas y dinámicas dependen del rendimiento de la mezcla asfáltica (Reyes y Milán, 2019).

Hace unos cincuenta años, a escala mundial, Herrera Nájera, García, Xiocoténcatl y Medina (2011) realizaron estudios precisos sobre los efectos del envejecimiento en ligantes y mezclas asfálticas.

Los factores internos (también conocidos como variables intrínsecas) se refieren a las propiedades de los materiales que forman parte de la mezcla, como cemento asfáltico, agregados y porosidad (Fernánadez, Rondón y Reyes, 2013), mientras que factores externos o variables externas inciden en la mezcla. proceso, almacenamiento y transporte y la estructura de la estera rodante, estos son la temperatura de producción, humedad, radiación ultravioleta y temperatura ambiente de la mezcla (Vargas & Reyes, 2010).

Aunque investigadores como (Chávez, Hernández y Manzano, 2011) y (Bell, 1989) confirmaron que solo la temperatura tiene un efecto significativo en el envejecimiento, porque el ozono, el oxígeno y los rayos ultravioleta son factores que existen, no han cambiado. Otros entornos Los factores también son interdependientes: la humedad relativa es un indicador de la evapotranspiración y la precipitación, y depende de la temperatura. El cambio de temperatura de día a noche es función del tiempo de radiación térmica y de radiación solar (Chávez, Hernández y Manzano, 2011).

El envejecimiento puede provenir de la primera etapa de producción, como la mezcla en fábricas, durante la construcción de carreteras o más comúnmente durante el uso (Fernánadez, Rondón y Reyes, 2013). Los medios o mecanismos químicos que interfirieron con el proceso finalmente cambiaron la secuencia de química, física, mecánica y reología de la capa de asfalto (Aguilar, 2013). Cambiar la estructura molecular del asfalto para endurecerlo, para que la mezcla se convierta lentamente en un producto frágil, que se daña fácilmente, como: grietas

longitudinales, grietas transversales, grietas, piel de cocodrilo, etc. (Fernández, Rondón, & Reyes, 2013).

Tal y como se decía con anterioridad, hay (3) fases que ayudan en el proceso del envejecimiento (Castillo & Caicedo, 2005). La primera es la destilación de las características de luz asfáltica ocasionada por el aumento en la temperatura de producción del asfalto, almacenamiento, transporte y colocación, minimizando el peso del ligante asfáltico por su evaporación. La segunda es la oxidación durante la vida de servicio que se desarrolla cuando la mezcla se pone en contacto con el ambiente y este modifica las fracciones SARA (Araya, F., et al., 2012) , generado una debilidad y un agrietamiento en pequeña o gran medida. Y la tercera es el endurecimiento estérico generado por el cambio climático cercano a la temperatura del medio ambiente (Orozco & Murillo, 2011).

Este y otros elementos crean que la anomalía de deteriorarse se transforme en disposición de análisis, por su mismo grado de dificultad en la fase de progreso como enfermedad (Yung, 2013). Mientras el periodo de fabricación de la mezcla asfáltica, el pavimento se oxida como resultado de reacción del oxígeno con la temperatura de mezcla obtenida en el instante de la fabricación (Vargas & Reyes , 2010). En otras palabras, al hablar de la oxidación del cemento asfáltico se afirma una modificación en su estructura molecular, el cual origina que se desarrollen moléculas polares de gran tamaño, generando el cambio de sus características reológicas (Rondón, Reyes, & Ojeda, 2008). Por otra parte, la oxidación es reconocida como un fenómeno en el cual el oxígeno actúa sobre los componentes principales más reactivos del asfalto, manifestándose en forma de endurecimiento, pérdida de la consistencia visco elástica, fisuración y agrietamiento, relacionándose en las etapas de producción a causa de factores como presión, temperatura y tiempo (Vacca, Leon, & Ruiz, 2012).

Esto abre la puerta a las primeras etapas de desarrollo como un fenómeno de envejecimiento, el cual, cuando se combina con diversos agentes climáticos, está obligado a presentar en sí como un amplio fenómeno que afecta a los pavimentos (Vargas y Reyes , 2010).

Cuando se refiere al envejecimiento es importante tener en cuenta que hay dos tipos, resaltando por diferentes estudios. El primero que encuentra consecuentemente los elementos entrelazados en el envejecimiento de las mezclas asfálticas, detallando la fabricación y colocación de esta mezcla que pertenece al envejecimiento a un menor tiempo (Reyes Ortíz & Camacho, 2008). El siguiente tiene como objeto el tiempo y uso de vida de utilidad como vía, hablándose aquí del envejecimiento en un tiempo más largo (Chávez, Hernández, & Manzano, 2011).

**Tabla 3.**

*Comparación propiedades del cemento asfáltico vs su modificación relacionado con la temperatura y el envejecimiento*

Comparación propiedades del cemento asfáltico vs su modificación relacionado con la temperatura y el envejecimiento	
Propiedades de impermeabilidad, flexibilidad y durabilidad	El envejecimiento a un menor tiempo, se da en el momento en que se elabora la mezcla en la planta, en el tiempo de la colocación in situ de la mezcla asfáltica (Chávez, Hernández, & Manzano, 2011), que es generado por la oxidación y la minimización de volumen o volatilización del cemento asfáltico; pues se genera una reacción con los hidrocarburos de la atmósfera al aumentarse la temperatura preliminar y al presentarse un contacto directo del oxígeno con el medio ambiente (Vacca, Leon, & Ruiz, 2012). Los asfálticos envejecidos son los que presentan un cambio en las propiedades originales de la mezcla durante el tiempo de servicio por efecto de agentes ambientales (Botasso & Rebollo, 2008). Como un resultado, el envejecimiento está vinculado a la pérdida de volátiles componentes y la oxidación del asfalto (Vacca, Leon, & Ruiz, 2012), Como un resultado de ello, la correcta operación de la parte superior la tapa de la acera

---

por la que se ha diseñado está obstaculizado (Chávez, Hernández, y Manzano, 2011), por lo que es necesario para terminar su económica vida. Como un resultado, que es importante para tener en cuenta el impacto de los cambios en la química y física composición de asfalto de cemento durante el mezclado y secado procesos. Se considera que el envejecimiento es un fenómeno que modifica las propiedades físicas y químicas de la banda de rodadura, este fenómeno provoca que la superficie de la calzada se deteriore con el tiempo, reduciendo su durabilidad (Vargas & Reyes, 2010); esto se debe a la combinación de la mezcla. y factores internos y externos Como resultado de la interacción, los factores internos y externos provocan un endurecimiento considerable e irreversible, que afecta en gran medida el desempeño requerido (Fernánadez, Rondón y Reyes, 2013).

---

### **3.4.2 Envejecimiento a un menor tiempo**

Investigaciones determinan el desempeño dinámico y estable de mezclas asfálticas envejecidas a un menor tiempo por medio de un ensayo en laboratorio Rolling thin Film Oven (ensayo rotatorio de película delgada [RTFO]), el cual aparenta el procedimiento de elaboración y distribución de mezclas asfálticas ocasionando un aumento en la viscosidad del pavimento con endurecimiento de la mezcla. Las investigaciones realizadas infieren que el deterioro de asfalto con el ensayo RFTO aparenta de forma apropiada el envejecimiento originado por elementos reales (Baha & Necati, 2007).

### **3.4.3 Ensayo rotatorio de película delgada**

La prueba de rotación de película propuesta por Pan (Pan, 2013) fue desarrollada para evaluar el envejecimiento a corto plazo del asfalto. El envejecimiento a largo plazo solo ocurre durante el uso del pavimento debido a la oxidación y exposición a las condiciones ambientales, y también ocurre en el campo durante el uso (Castillo & Caicedo, 2005). Puede causar el mismo

daño grave que la oxidación inicial, incluido el aumento de la rigidez, la reducción de la ductilidad y la rotura del producto bajo estrés o carga térmica.

Debido a la reacción de las condiciones ambientales, el aumento de asfalto y componentes aromáticos hace que estos problemas aparezcan en el pavimento, su impacto no es visible en el corto plazo, solo con el paso del tiempo se pueden describir en detalle estas características (Fernández, Rondón y Reyes), 2013).

Sin embargo, el envejecimiento oxidativo a largo plazo puede causar daños tan severos como la oxidación inicial, incluyendo una pérdida de rigidez y ductilidad mucho mayor, y el agrietamiento del producto final bajo estrés térmico o estrés de carga. Actualmente, existe un método para la especificación de materiales asfálticos, que es el resultado de varios estudios a lo largo de la historia: el método Superpave, que mide las propiedades físicas del asfalto sobre asfalto envejecido en laboratorio para crear las condiciones reales de operación de la acera (Pan , 2013).

En el método Superpave, "el potencial de formación de surcos se verifica con la muestra de asfalto original, y luego se verifica con RTFO después del envejecimiento, y el envejecimiento a través del recipiente de envejecimiento a presión (PAV) confirma la posibilidad de agrietamiento (debido a fatiga y cambios térmicos)" .

Al mismo tiempo, (Bell, 1989) estudió el proceso de envejecimiento de los sistemas de asfalto agregado y concluyó que el método más recomendado para evaluar la durabilidad a largo plazo es el envejecimiento en horno, la oxidación presurizada, el tratamiento ultravioleta, el tratamiento de humedad y el envejecimiento a corto plazo. Tratamiento de calentamiento y microondas. Además, también evaluará las pruebas de mezcla de asfalto-agregado en pruebas

destructivas y pruebas no destructivas, estas últimas incluyen módulo dinámico, módulo elástico y pruebas de tracción indirecta” (Vargas & Reyes, 2010).

Asimismo, (Vargas & Reyes, 2010) al analizar mezclas asfálticas modificadas con polímeros envejecidas, se determina que la modificación con polímeros aumentará el módulo del complejo a altas temperaturas y disminuirá a bajas temperaturas, lo que significa que los polímeros reducirán el asfalto. módulo. Fácil de envejecer, reduce la ductilidad. En resumen, se puede determinar que los polímeros industriales y los residuos de polímeros de productos biodegradables son los productos más utilizados en el campo del asfalto modificado (Yung, 2013). Los polímeros de tipo elastómero tienden a deformarse bajo la acción de la fuerza, pero casi vuelven a su forma original cuando se elimina la fuerza. El más famoso de ellos es el copolímero de bloque de estireno-butadieno SBS (Yung, 2013).

#### **3.4.5 Propiedades físico-mecánicas de los pavimentos asfálticos asociadas con los cambios de temperatura**

La vida útil de los pavimentos asfálticos está asociada a que sean capaces de soportar las magnitudes de las cargas impuestas por el tráfico vehicular, sin embargo, la temperatura al afectar directamente la mezcla asfáltica tanto en su proceso de fabricación como en su puesta en servicio, a través de la radiación solar, puede conllevar a afectar la propiedades físico-mecánicas que permiten al pavimento, especialmente a la carpeta de rodadura, cumplir con su función. En este capítulo se abordan las propiedades físico-mecánicas del pavimento asfáltico donde se ha comprobado que los cambios de temperatura producen variaciones (Reyes & Millán, 2009).

### ***3.4.5.1 Cohesión***

La cohesión es una propiedad de las mezclas asfálticas que indica la capacidad que tienen los agregados pétreos y el asfalto de mantenerse unidos. Esta unión resulta de gran importancia ya que garantiza que la mezcla asfáltica, con la cual se conformará la carpeta de rodadura, sea capaz de resistir las sollicitaciones del tráfico vehicular, garantizando que no se produzcan desplazamientos entre los agregados (Aguirre, Calderón, & Salazar, 2009).

Para calcular la cohesión, se hace necesario aplicar el Método Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL), el cual fue desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña. Este método se basa en la realización del ensayo cántabro de pérdida por desgaste, el cual consiste en utilizar probetas tipo Marshall y someterlas al ensayo de desgaste sin ningún tipo de carga abrasiva en la máquina de los Ángeles, con lo cual se busca observar el deterioro que producen determinadas vueltas en la máquina (generalmente 100 o 500 vueltas) en las probetas. En la figura 5 se observa el aspecto general de las probetas tipo Marshall (Albeño, Molina, & Reynoza, 2012).

**Figura 13.**

*Probetas tipo Marshall. Lepucv.cl, 2021.*



. Nota. Datos tomados de <https://www.lepucv.cl/servicios/consultorias>

Durante la realización del ensayo de desgaste se generan desprendimientos de los agregados por el impacto producido por las vueltas dadas en la máquina de los Ángeles. El desgaste se expresa porcentualmente por medio de la ecuación 3 (Reyes & Millán, 2009).

$$P_c = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:  $P_c$ , pérdida al cántabro o por desgaste;  $P_i$ , peso inicial de la probeta; y  $P_f$ , peso final de la probeta.

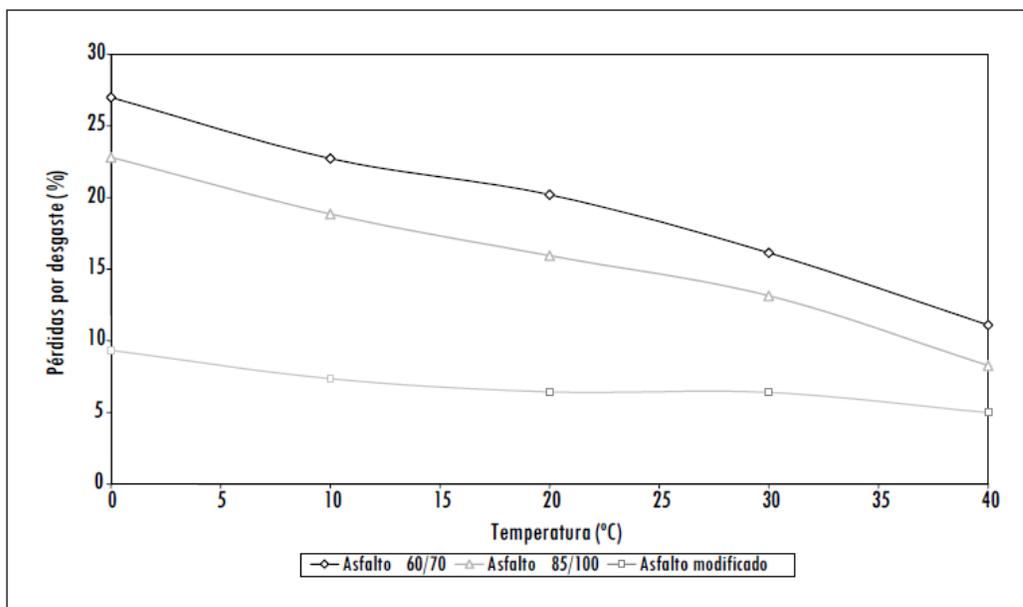
Para correlacionar el ensayo de desgaste con los cambios de temperatura, se someten las probetas previamente a determinadas temperaturas para de esta forma determinar la susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica, este proceso se denomina como curado. El tiempo de curado es mínimo de 15 horas. Las probetas tipo Marshall pueden ser ensayadas secas o húmedas (Tanimoto, 2018).

Las variaciones en la cohesión de las mezclas asfálticas han estado asociadas a las variaciones de temperatura que se registran tanto en la fabricación de la mezcla, como en las generadas por la radiación solar durante su vida en servicio. Para demostrar esto se han realizado diferentes investigaciones (Tanimoto, 2018). (Reyes & Millán, 2009)

Reyes & Millán, 2009, llevaron a cabo un estudio donde sometieron probetas tipo Marshall tanto en estado seco como húmedo, a diferentes temperaturas: 0, 10, 20, 30 y 40°C, con el fin de observar la relación entre el aumento de temperatura y el porcentaje de desgaste de la mezcla. Se elaboraron probetas con 3 tipos de asfaltos: 60/70, 85/100 y modificado. Los resultados de los ensayos se ilustran en la figuras 6 y 7, para las probetas en estado y en estado húmedo, respectivamente (Reyes & Millán, 2009).

**Figura 14.**

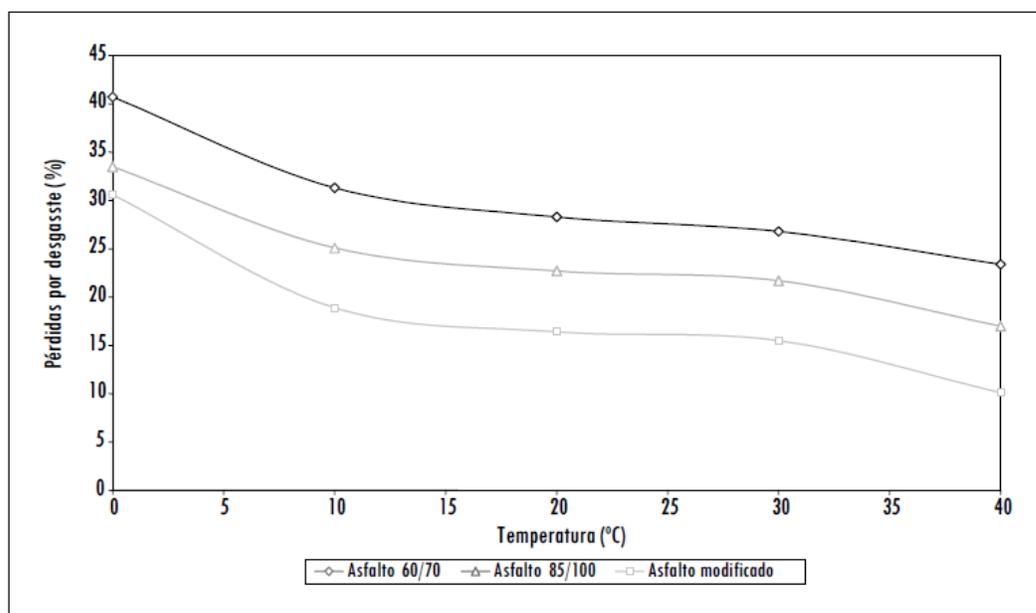
*Influencia de la temperatura, la granulometría y el agua en la cohesión de mezclas asfálticas. p. 319.*



*Nota Resultados ensayos cántabro en estado seco. Reyes & Millán, 2009*

**Figura 15.**

*Influencia de la temperatura, la granulometría y el agua en la cohesión de mezclas asfálticas. p.319*



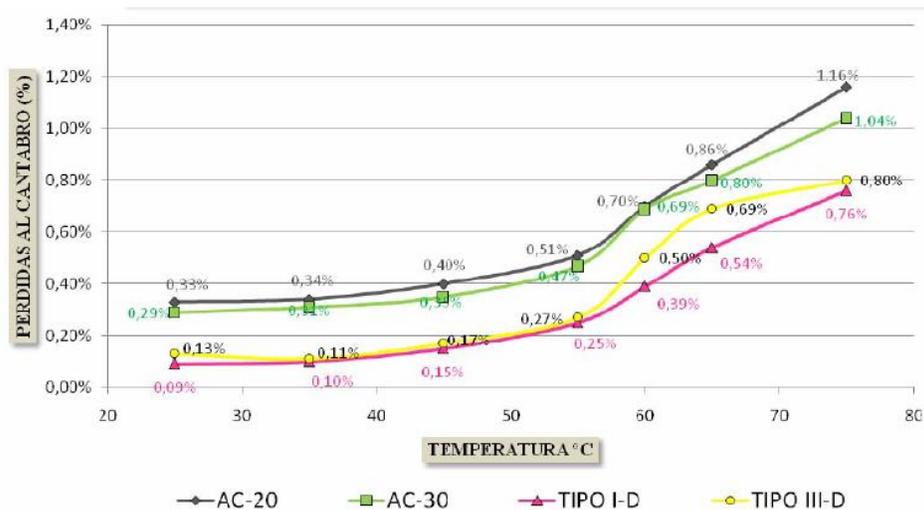
*Nota. Resultados ensayos cántabro en estado húmedo. Reyes & Millán, 2009.*

Los resultados indican que, tanto en estado seco como húmedo, el porcentaje de desgaste de la mezcla asfáltica aumenta conforme sea menor la temperatura, y que el mayor efecto se encuentra en las probetas húmedas. Por otra parte, también se observó que independientemente del tipo de asfalto empleado, se presenta desgaste en la mezcla, aunque los menores efectos se dieron en las mezclas con asfalto modificado (Reyes & Millán, 2009).

La investigación de Reyes & Millán, 2009, resaltan que temperaturas muy bajas, inferiores a los 10°C, tienden a aumentar el desgaste en las mezclas asfálticas. Sin embargo, dado que es más común la exposición a elevadas temperaturas en el pavimento, Aguirre, Calderón, & Salazar, 2009, sometieron probetas tipo Marshall de diferentes tipos de asfalto al ensayo de desgaste a 100 y 300 revoluciones. Las probetas fueron curadas a temperaturas de: 25, 35, 45, 55, 65 y 75°C. Los resultados del estudio se plasmaron en las figuras 15 y 16, para el ensayo de desgaste a 100 y 300 revoluciones, respectivamente (Aguirre, Calderón, & Salazar, 2009).

**Figura 16.**

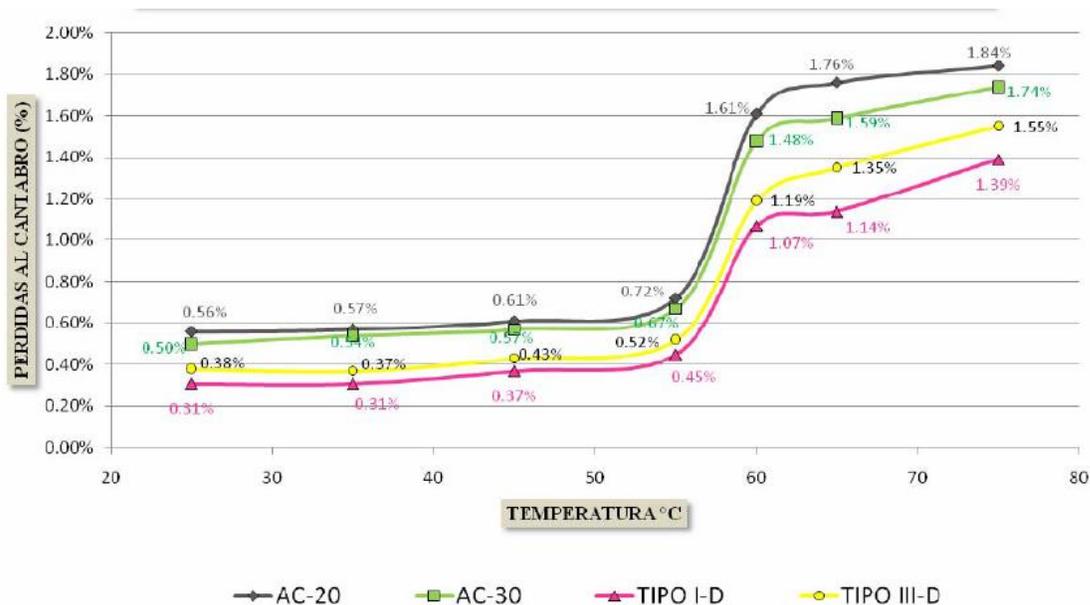
*Evaluación de la incidencia de la temperatura en el desempeño de las carpetas asfálticas en caliente en El Salvador. p. 122.*



*Nota. Resultados ensayo cántabro a 100 revoluciones. Aguirre, Calderón, & Salazar, 2009.*

**Figura 17.**

*Evaluación de la incidencia de la temperatura en el desempeño de las carpetas asfálticas en caliente en El Salvador. p. 122.*



*Nota.*

*Resultados ensayo cántabro a 300 revoluciones. Aguirre, Calderón, & Salazar, 2009.*

Los resultados obtenidos con este estudio, indican que, a mayor aumento de temperatura, mayor porcentaje de desgaste, sin embargo, en este segundo estudio se observa que el efecto de la temperatura es representativo cuando es superior a los 55°C. En términos generales, el aumento del desgaste es una clara evidencia de que a mayor temperatura de servicio, mayor deterioro sufre la carpeta asfáltica, ya que es más vulnerable a la incidencia de la temperatura producto de la radiación solar (Reyes & Millán, 2009).

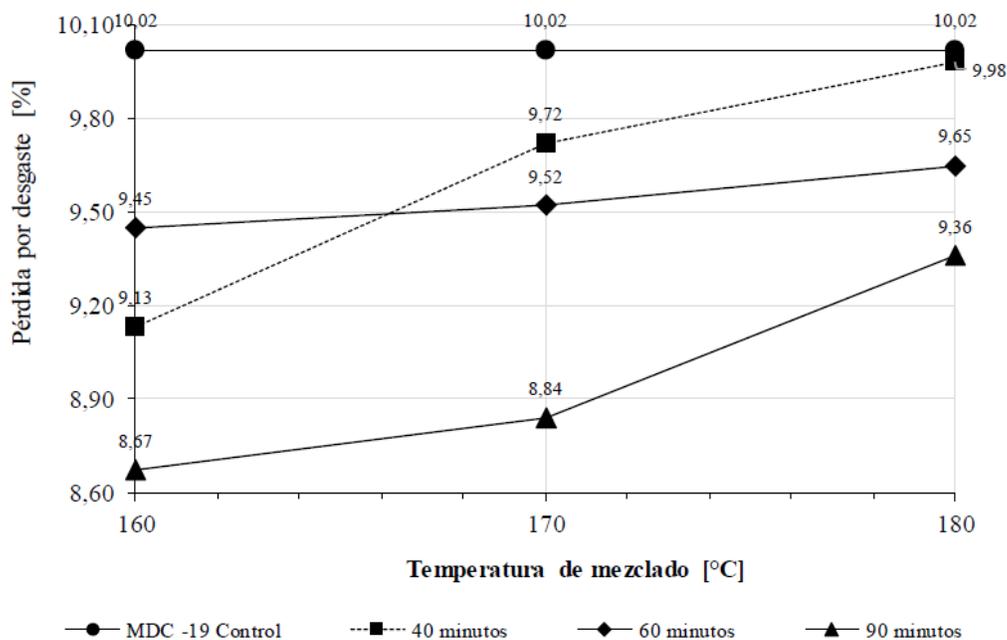
El pavimento asfáltico, sufre mayor desgaste cuando está expuesto tanto a bajas como altas temperaturas, es decir, existe un rango donde la carpeta de rodadura sufre menor grado de afectación, entre 10 a 55°C, temperaturas menores o mayores pueden conllevar a su deterioro

acelerado. Estas investigaciones, evidencian el efecto que ocasiona la radiación solar sobre la cohesión.

Por otra parte, y con el fin de cuantificar el efecto de la temperatura de fabricación en la cohesión de la mezcla asfáltica, Guerrero, 2019, fabricó probetas tipo Marshall elaborando mezclas asfálticas a diferentes temperaturas: 160, 170 y 180°C, además de fabricarlas con diferentes tiempos de mezclado. Tomó como mezcla de control la elaborada a 150°C. El autor indicó que el rango de temperatura para las mezclas asfálticas en caliente es muy amplio, como se mencionó en el capítulo 2, entre 135 a 180°C, por lo que consideró necesario cuantificar el efecto del aumento de la temperatura de fabricación en la cohesión final de la mezcla (Guerrero, 2019).

**Figura 18.**

*Influencia de la temperatura y el tiempo de mezclado en la modificación de un cemento asfáltico. p. 100*



Nota. Resultados ensayos desgaste. Guerrero, 2019.

Los resultados mostrados en la figura 10, verifican la incidencia de la temperatura de fabricación de la mezcla asfáltica, ya que a mayor temperatura de mezclado, mayor desgaste en la mezcla resultante, además, también se demostró, que entre mayor sea el tiempo de mezclado, es decir, entre mayor tiempo se mantenga la temperatura sobre el asfalto y los agregados, mayor efecto resultante se produce en el desgaste, por tanto, se recomienda ajustar la temperatura de mezclado en un rango que no supere los 160°C (Guerrero, 2019).

#### ***3.4.5.2 Módulo dinámico***

A la relación entre el valor del esfuerzo máximo y la deformación unitaria máxima de las mezclas asfálticas se le denomina como módulo dinámico, este valor se calcula directamente en las mezclas asfálticas, para lo cual se deben realizar ensayos a compresión (uniaxial o triaxial), a flexión, o a tracción indirecta, donde deben aplicarse cargas en forma cóncava, en la figura 11 se observa la realización del ensayo de tracción (Higuera, Naranjo, & Cetina, 2011; Rum, S., et al., 2018).

#### **Figura 19.**

*Ensayo de tracción en mezclas asfálticas.*

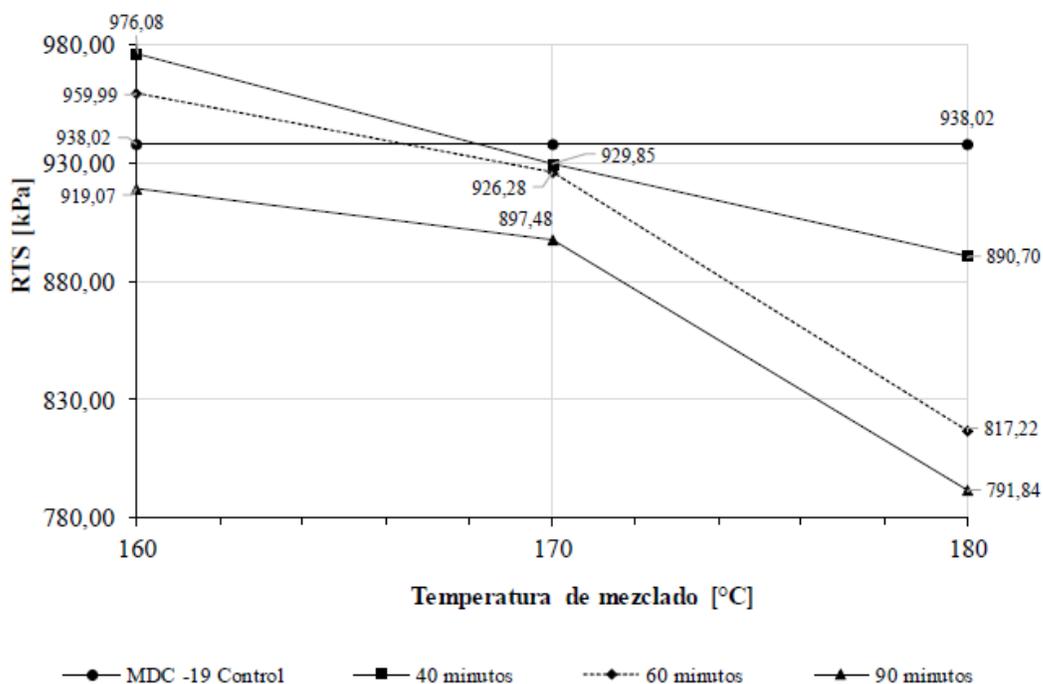


*Nota. Datos tomados de <https://twitter.com/cytems1/status/718402575578611712>*

La I.N.V. E-725 *Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta*, emplea probetas tipo Marshall que son ensayadas mediante la máquina universal. Se aplican las cargas, y se obtiene un esfuerzo denominado como resistencia a la tracción. Este valor, ha sido correlacionado con la temperatura de fabricación de las mezclas asfálticas, como se observa en la figura 12 (Padilla, 2014).

**Figura 20.**

*Influencia de la temperatura y el tiempo de mezclado en la modificación de un cemento asfáltico. p. 92.*



*Nota. Relación entre la resistencia a la tracción y la temperatura de fabricación de la mezcla asfáltica.*

*Guerrero, 2019*

Como se observa en la figura 12, entre mayor sea la temperatura de fabricación de la mezcla asfáltica y el tiempo de mezclado, menor será el valor de la resistencia a la tracción.

Resultados como estos, permitieron que Taha, et al, 2020, correlacionara el efecto de la temperatura del pavimento con el módulo dinámico a partir de la tracción indirecta, para ello partió del procedimiento descrito por Haas & Hudson, 1978, quienes expresaron el módulo dinámico a partir de la ecuación 4 (Taha, M., et al., 2020; Guerrero, 2019).

$$M_{dinámico} = \frac{F(R-0,27)}{LH} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde: F, Fuerza máxima dada en las cargas de repetición, L, longitud de la probeta Marshall, y R, Relación de Poisson.

El valor F, se despeja de la ecuación 5, la cual emplea el valor de la resistencia a la tracción.

$$S_T = \frac{2F}{LD} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Dónde: S<sub>t</sub>, Resistencia a la tracción, L, longitud de la probeta tipo Marshall, y D, diámetro de la probeta tipo Marshall.

Finalmente, el valor de H, se calcula a partir de la ecuación 6.

$$M_{Asfalto} = \frac{H}{D} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde;  $M_{asfalto}$ , módulo elástico del asfalto,  $D$ , diámetro de la probeta tipo Marshall, y  $H$ , es el cambio de forma en la dirección horizontal.

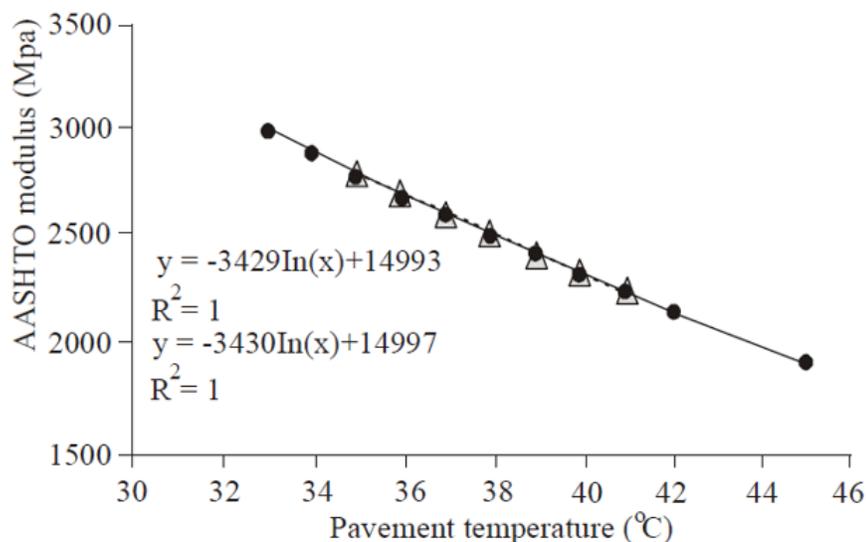
De esta forma, a partir del ensayo de tracción indirecta, se calcula el valor del módulo dinámico. Otra expresión (ver ecuación 7), propuesta por el mismo autor, Taha, et al, 2020, permite calcular el valor del módulo dinámico de la mezcla asfáltica (carpeta de rodadura), a partir de la temperatura registrada en la superficie del pavimento. En la figura 13 se observa la gráfica de esta ecuación (Taha, M., et al., 2020).

$$M_{Dinámico} = 15000 - 7900 * \log t \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde  $t$ , es la temperatura registrada en la superficie del pavimento.

**Figura 21.**

Gráfico de la ecuación 7.



*Nota. Taha, et al., 2020. Study of the effect of temperatura changes on the elastic modulus of flexible pavement layers. p. 5.*

Los resultados de la ecuación 7, ilustrados en el gráfico de la figura 13, muestran una correlación lineal, en la que, a mayor aumento de la temperatura del pavimento, menor es el valor del módulo dinámico, por tanto, el efecto de la radiación solar afecta directamente esta propiedad mecánica de los pavimentos asfálticos.

### 3.4.5.3 Módulo de rigidez

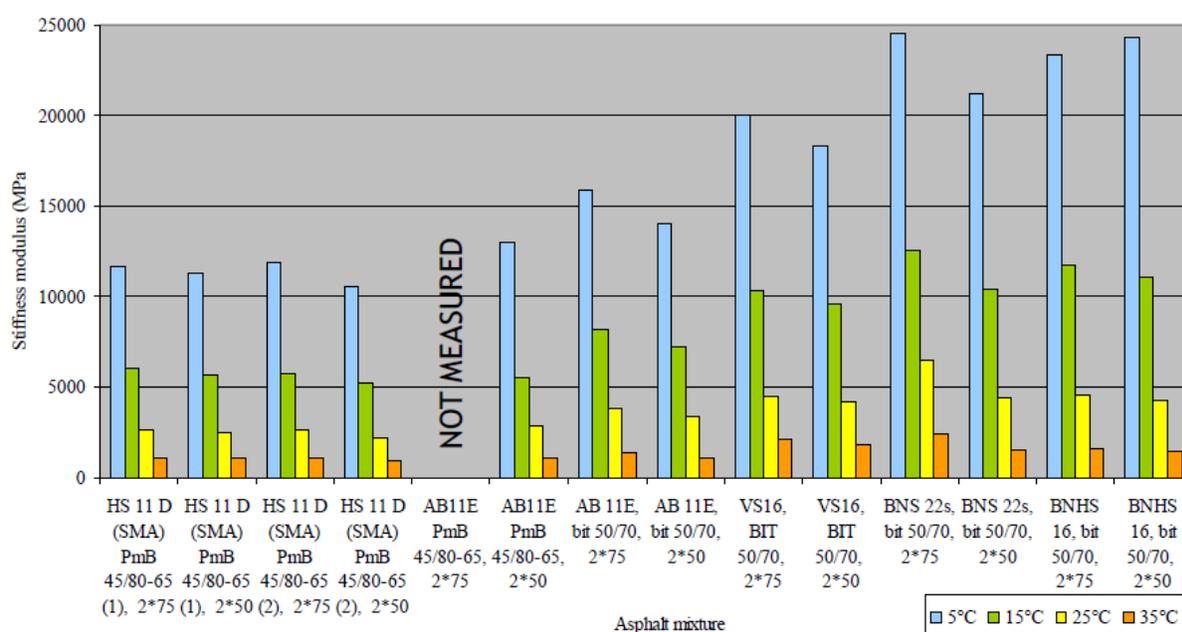
El módulo de rigidez se define como la relación entre el esfuerzo y la deformación en un tiempo dado, para calcular este valor se hace necesario realizar los mismos ensayos que en el caso del módulo dinámico (Sandoval, 2010).

Para comprobar la relación entre la temperatura y esta propiedad, Halle, Rukavina, & Domitrovic, 2012, realizaron ensayos de tracción indirecta a probetas tipo Marshall sometidas a

diferentes temperaturas, emplearon 7 tipos diferentes de asfalto (con diferente grado de penetración), además de compactar las probetas de dos formas diferentes, un conjunto compactado en 2 capas de 50 golpes cada una, y otra de 2 capas con 75 golpes cada una. Los resultados de este ensayo se ilustran en el gráfico de la figura 14 (Halle, Rukavina, & Domitrovic, 2012).

**Figura 22.**

*Resultados módulo de rigidez mezcla asfáltica*



*Nota. Halle, Rukavina, & Domitrovic, 2012. Influence of temperatura on asphalt stiffness modulus. p. 8.*

Los resultados ilustrados en la figura 21 muestran que al aumentar la temperatura disminuye el valor del módulo de rigidez. Aunque existen variaciones entre los valores del módulo para cada tipo de mezcla, todas presentan una tendencia general a disminuir a medida que aumenta la temperatura. Por otra parte se observa que el conjunto de probetas compactadas

con 75 golpes por capa presenta mayores valores del módulo de rigidez a bajas temperaturas, sin embargo, ambos conjuntos presentan valor cercanos cuando la temperatura es de 35°C (Halle, Rukavina, & Domitrovic, 2012).

### **3.5 Proponer estrategias de infraestructura asfáltica que conlleven a mitigar el impacto generado del cambio climático en la mezcla en caliente**

Una de las mejores estrategias para mitigar este impacto es implementar tecnologías limpias para lograr una mayor sostenibilidad ambiental y reducir el efecto ambiental del cambio climático en mezclas calientes: Para el proceso de producción, una producción más limpia implica el ahorro de materias primas y energía, la eliminación de materias primas tóxicas y la reducción de la cantidad y toxicidad de todas las emisiones y desechos antes de abandonar el proceso.

Existen dos métodos fundamentales para lograr una tecnología limpia:

#### **3.5.1 Reducción de la Fuente.**

El primer paso en cualquier plan de minimización de residuos es reducir los desechos en la fuente. Dado que se genera poco o ningún desperdicio, la reducción de la fuente puede aliviar los problemas asociados con el tratamiento y eliminación de desperdicios.

Por lo tanto, esta es la opción más ideal para una tecnología limpia.

El método incluye: buenas prácticas operativas, cambios tecnológicos, cambios de materias primas, mejoras de productos.

### 3.5.2 Reciclaje

El reciclaje incluye la reutilización y la restauración. El reciclaje por reutilización implica devolver los desechos como material de entrada alternativo al proceso de origen o como desechos en otro proceso. Todos los conceptos establecidos tienen un significado único y específico, es decir, a través de la adopción de buenas prácticas y métodos de producción reductores de contaminación para promover la producción de bienes y servicios que satisfagan las necesidades de las personas, reduciendo así el impacto en el medio ambiente.

- Residuos de Construcción y Demolición (RCDs).
- Neumáticos Fuera de Uso (NFUs).
- Desechos Industriales (escorias, cenizas, etc.).
- La optimización del rendimiento energético de los procesos de construcción y Fabricación
- La remodelación de los conjuntos e instalaciones empleados en cada caso
- El trabajo de desechos, ya hablado, que permitan minimizar las materias primas y préstamos necesarios
- El trabajo de combustibles más limpios y energías renovables (ej: biomasa).

Por otro lado, hay otra opción para evitar la oxidación en mezcla en caliente es la siguiente:

### 3.5.3 Fase de diseño

Varias investigaciones han demostrado que la utilización de asfaltos transformados son una estrategia que genera una mejora en el estado de oxidación de las carpetas asfálticas. Por ende, ese observó esto en un estudio que mostró como producto un prototipo de envejecimiento oxidativo de los asfaltos que han sido reformados con caucho (Chipps et al. 2001).

### **3.5.4 Fase de producción**

En dicha etapa, en la actividad de mezclado, se recomienda para prevenir la coquización verificar la elevación del asfalto en los tanques para evitar que éste pueda llegar a elevaciones por debajo de los elementos calentadores, para que así de esta manera no ingresen en contacto directo con el oxígeno.

Una opción estupenda que permita dicho control, que cuando el tanque de asfalto esté dentro, colocar una línea de aspiración una elevación mayor a los elementos calentadores

Dado que la mezcla de proceso produce la mayoría de oxidantes químicos y reacciones, que ésta también recomienda que la temperatura se reduce al más bajo nivel posible, lo que permite para el más corto tiempo posible de la mezcla sin poner en peligro el proceso.

En las últimas dos décadas, empresas como ABL Internacional S.A. producen plantas de asfalto las cuales mediante el alargamiento de los mezcladores para que no se sobrecalienten y controles electrónicos que regulan y vigilan la temperatura de la mezcla impidiendo su oxidación.

Una manera de mitigar este impacto de oxidación bajo dichas condiciones es poner la mezcla en tolva a una temperatura lo más reducida posible, para prevenir, a gran escala la oxidación, también de dominar ingreso de oxígeno a la tolva, por medio de fisuras en las paredes por medio de sellos únicos

## Capítulo IV. Análisis de resultados.

Es importante mencionar que en análisis del impacto de los cambios extremos de temperaturas en el comportamiento de mezclas en caliente, pueden estar ligados a varios factores los cuales se deben a malos procedimientos por parte del trabajador de obra, por implementar temperaturas demasiado altas y éste se ha visto afectado puesto que en el momento de realizar dicha actividad, el pavimento sufre fatigas, grietas, oxidación y demás resultados e impactos negativos que a su vez, viene siendo producto del fenómeno del cambio climático que hoy en día no es un tema ajeno, pero que se puede ir corrigiendo con alternativas sostenibles al medio ambiente, las cuales aportan un beneficio a los pavimentos asfálticos y es la aplicación de tecnologías limpias las cuales dan soporte ambiental y secuencial, dando así solución a diferentes problemáticas en las propiedades asfálticas como en el impacto que generan algunos materiales al medio ambiente, esto conlleva a un desarrollo investigativo para la utilización de estos materiales desechables, alternativos y no convencionales en las mezclas asfálticas.

Generalmente, los asfaltos que son modificados con polímeros mejoran sus propiedades, como tener características de menor susceptibilidad a la temperatura, mayor intervalo de plasticidad, mayor cohesión, mejor respuesta elástica, al igual que tener una mayor resistencia al agua y al envejecimiento por factores alternos, como el ambiente (Camargo Chávez & Suárez Mesa, 2010). Los materiales alternativos se consideran desechos de segunda mano a los cuales se les aporta un nuevo uso en diferentes tareas para generar beneficios excepcionales, en este caso para las ya mencionadas mezclas asfálticas.

Los agregados asfálticos y su comportamiento dependen directamente de las propiedades, composición y caracterización que ofrece el material modificador que se le va a agregar. Por tanto, la razón de modificar las mezclas asfálticas es superar las propiedades del asfalto

convencional mejorando el desempeño a largo plazo, donde la mayoría de estos generan un incremento en el desempeño, durabilidad y resistencia de la mezcla asfáltica (Cárdenas & Fonseca, 2009). Para que así la estructura del pavimento modificado obtenga propiedades mecánicas deseables bajo las condiciones de servicio a las que este se someterá en futuro a cambios en temperatura, clima, zona geográfica y tipo de tráfico (Camargo Chávez & Suárez Mesa, 2010).

## Capítulo V. Conclusiones.

Al estudiar la modificación en el módulo dinámico del pavimento asfáltico, con el aumento o disminución de la temperatura, vemos que el fenómeno de la temperatura es considerada, uno de los factores ambientales que participan de forma directa en la conducta de los pavimentos, que suelen caracterizarse por su reblandecimiento, densidad, permeabilidad entre otras características, que han sido cambiadas en su rigidez, por las propiedades termoplásticas de los componentes, que hacen parte de las cubiertas asfálticas de dichos pavimentos.

Por otro lado, al analizar el efecto de las fallas que se vienen presentando en los cambios bruscos de temperatura en el comportamiento de fatiga del asfalto, se tiene que: a determinadas temperaturas de, el comportamiento de la fatiga del asfalto se ven afectados, puesto que la fatiga determina el tamaño de dichas estructuras y es usado en reglas de rediseño mecánico actuales

En muchos casos, el efecto que se produce corresponde al modificador de grado químico, es decir, la relación molecular de la mezcla. Generalmente, dichas modificaciones del pavimento en la estructura molecular del asfalto se transformarán, haciendo que la mezcla se vaya convirtiendo lentamente en materiales frágiles, que son propensos a agrietarse y otros fenómenos relacionados durante el uso. Por esta razón, al agregar antioxidantes naturales a la estructura interna del asfalto para modificar este mismo, es necesario modificar sus componentes físicos y reológicos, con el fin de cambiar sus propiedades físicas y reológicas, también es necesario formar un método para hacer que la capa de asfalto sea más fuerte ante los elementos que generan la oxidación, minimizando así el proceso de agotamiento.

Y en cuanto a las estrategias de infraestructura asfáltica, que conlleven a mitigar el impacto ambiental, el más resaltado sería la reducción en la fuente, y la reutilización de residuos de

construcción y demolición, puesto que son alternativas ambientalmente sostenibles, y que devengan menos costos y presupuestos al momento de iniciar una nueva obra o construcción.

De forma general se concluye, que los cambios extremos de temperatura si afectan el comportamiento de los pavimentos asfálticos, por lo que se hace necesario desarrollar nuevas estrategias que permitan mitigar el impacto de la temperatura, especialmente debido al creciente cambio climático que se está presentando.

## Referencias

- Aguilar, J. P. (2013). *Uso de materiales de desecho como modificantes de asfalto en costa rica*.  
Obtenido de <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/banco-de-informacion-digital-on-line/07-02-13/2013/>
- Aguirre, R., Calderón, I., & Salazar, I. (2009). *Evaluación de la incidencia de la temperatura en el desempeño de las carpetas asfálticas en caliente en El Salvador*. Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador, Ciudad Universitaria, El Salvador.
- Albeño, H., Molina, V., & Reynoza, S. (2012). *Susceptibilidad térmica de los pavimentos asfálticos utilizados en El Salvador*. Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador, Santa Ana, El Salvador.
- AMSCE. (19 de 09 de 2016). *El asfalto en frío*. Obtenido de AMSCE & Servicios Online: <https://www.amsce.es/el-asfalto-en-frio/>
- Araya, F., et al. (2012). Caracterización reológica avanzada de betunes tradicionales y modificados utilizados actualmente en Chile. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24(3), 198-210.
- Ayala, Y., Garnica, P., & Delgado, H. (2016). Efecto de la temperatura en la evaluación de la fatiga en ligantes asfálticos. *Revista Infraestructura Vial*, 18(31), 5-13.
- Baha, V., & Necati, K. (2007). The effects of different binders on mechanical properties of hot mix asphalt. *International Journal of Science & Technology*, 2(1), 41-48.

- Bahia, H., Hanson, D., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M., & Anderson, R. (2001). *Report 459: Characterization of modified asphalt binders in Superpave Mix Design*. Washington: National Academy Press.
- Bell, C. (1989). *Aging of Asphalt-Aggregate Systems*. EUA: Transportation Research Bureau Press.
- Berrones, G. (2012). *Plan de mantenimiento de la carpeta asfáltica de la sección del paso lateral de ambato comprendida entre huachi gran y el redondel del terremoto*. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Bonaquist, R. F., Christensen, D. W., & Stump, W. (2003). *National cooperative Highway Research Program - NCHRP Report 5013 - Simple performance tester for superpave mix design: first article development and evaluation*. Washington: Transport Research Board.
- Botasso, G., & Rebollo, A. (2008). Utilización de caucho de neumáticos en mezcla asfáltica densa en obras de infraestructura. *Infraestructura Vial*, 4-12.
- Botella, J., & Zamora, Á. (2017). *El meta-análisis: Una metodología para la investigación en educación*. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España.
- Castillo, S., & Caicedo, B. (2005). *Caracterización de asfaltos con tecnología 'superpave' y análisis de ahullamiento*. Bogotá: Departamento de Ingeniería Civil Universidad de los Andes.
- Chávez, L., Hernández, C., & Manzano, A. (2011). Modelación del envejecimiento de los pavimentos asfálticos con la metodología de la superficie de respuesta. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 12(4), 373-382.

Delgado, H., Ayala, Y., & Garnica, P. (2015). *Evaluación de la fatiga en ligantes asfálticos*.

Bariloche, Argentina: XVIII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto. .

Fernández, W. D., Rondón, H., & Reyes, F. (2013). A review of asphalt and asphalt mixture aging. *Ingeniería e investigación*, 5-12.

FHWA. (2003). *Distress Identification Manual for Long-Term Pavement Performance Program*.

USA: Publication N° FHWA-RD-03-031.

García, F. (2006). Los múltiples afloramientos de la organización del conocimiento en el ciclo de la información documental. *Scire*, 9-22.

García, J., García, C., Buisson, J., Cortés, C., & Potti, J. (2008). *Pavimentos de larga duración* .

Valladolid: VIII Congreso Nacional de Firmes.

García, M. (2017). *Efecto de los agregados en el envejecimiento de la mezcla asfáltica*. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana, Santiago de Cali, Colombia.

Garzón, E., & Cárdenas, Á. (2013). *Variación de temperatura de los componentes de una mezcla densa en caliente tipo 3 con cemento asfáltico 80-100*. Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.

Guerrero, E. (2019). *Influencia de la temperatura y el tiempo de mezclado en la modificación de un cemento asfáltico*. Tesis de maestría, Universidad Santo Tomás, Bogotá D.C., Colombia.

Haibin, D., Deyi, D., Yinfei, D., & Xinmin, L. (2019). Using Lightweight Materials to Enhance Thermal Resistance of Asphalt Mixture for Cooling Asphalt Pavement. *Advances in Civil Engineering*, 10.

- Halle, M., Rukavina, T., & Domitrovic, J. (2012). Influence of temperature on asphalt stiffness modulus. *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Estambul, Turquía.
- Hemed, A., et al. (2020). Impact of climate change on pavements. *Web of Conferences*, 150(1008), 1-8.
- Herrera Nájera, R., García, H., Xiocoténcatl, & Medina, L. (2011). Efecto de la composición del bloque elastomerox de sbs y sebes en las propiedades de asfaltos modificados. *Revista mexicana de Ingeniería química*, 133-144.
- Higuera, C., Naranjo, G., & Cetina, J. (2011). Determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica por correlaciones. *Revista Facultad de Ingeniería*, 20(30), 41-54.
- Hintz, C., Velasquez, R., Johnson, C., & Bahia, H. (2013). *Modification and Validation of Linear Amplitude Sweep Test for Binder Fatigue Specification*. USA: Transportation Research Board.
- Hosseini, A., Leek, C., & Nikraz, H. (2013). *Effect of temperature on fatigue life of asphalt mixture*. 15th Australian Asphalt Pavement Association International Flexible Pavements Conference.
- Im, S., Kim, Y., & Ban, H. (2013). Rate and temperature dependent fracture characteristics of asphaltic paving mixtures. *Civil Engineering Faculty Publications*, 4(2), 257-268.
- Jajliardo, A. (2003). *Development of Specification Criteria to Mitigate Top-Down Cracking*. Master Thesis of Engineering. Florida, USA: University of Florida.

- Johanneck, L. A. (2011). *A comprehensive evaluation of the effects of climate in mepdg predictions and of mepdg eicm model using mnroad data*. Minnesota: University of Minnesota.
- Kanitpong, K., & Hussein, H. (2005). Relating adhesion and cohesion of asphalt to the effect of moisture on laboratory performance of asphalt mixtures. *Transport Research Board* 84, 25.
- Leiva, F., Camacho, E., & Aguiar, J. (2016). Simulación de variables climáticas en ensayos de daño acelerado de pavimentos a escala natural. *Revista Infraestructura Vial*, 18(32), 20-29.
- López, T., & Miró, R. (2015). *El envejecimiento en mezclas asfálticas*. Publicación, Plataforma Tecnológica Española de la Carretera (PTC), Madrid, España.
- Malan, G., Straus, P., & Hugo, F. (1989). *A Field Study of Premature Surface Cracking in Asphalt*. Association of Asphalt Paving Technologists.
- Martínez, G. (2017). *Infraestructura vial sostenible*. Barranquilla: Universidad del Norte.
- Mena, W. (2013). *Implementación del modelo climático de la MEPDG "AASHTO 2008" en Colombia para tres condiciones climáticas*. Tesis de pregrado, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Mena, W. (2013). *Implementación del Modelo Climático de la MEPDG "AASHTO 2008" en Colombia para tres condiciones climáticas*. Medellín: Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería.

- Mendoza Sánchez, J. F., & Marcos Palomares, O. A. (2017). *El efecto del cambio climático en los pavimentos carreteros*. Cancún: Congreso mexicano asfalto.
- Nesnas, K., & Nunn, M. (2004). A Model For Top-Down Reflection Cracking in Composite Pavements. *Fifth International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements*, 409-416.
- Orozco , G., & Murillo, J. (2011). *Evaluación del comportamiento de una mezcla densa en caliente modificada con ceniza proveniente de locaciones petroleras*. Bucaramanga: Universidad Pontificia bolivariana.
- Ortega, O., & Paternina, L. (2012). *Propuesta para la implementación de mezclas asfálticas tibias en la ciudad de Medellín*. Tesis de especialización, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.
- Padilla, A. (2014). *Mezclas asfálticas*. UPC.
- Pan, T. (2013). Coniferyl-alcohol lignin as a bio-antioxidant for petroleum asphalt: A quantum chemistry based atomistic study. *Fuel*, 454-456.
- Pascual, P. (2012). *Estudio del comportamiento térmico de pavimentos de mezcla bituminosa y análisis de un colector solar asfáltico multicapa*. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, España.
- Pérez, F., & Bardesi, A. (2006). *Manual para la Caracterización de Ligantes y Másticos Bituminosos*. España: Repsol YPF.

- Pérez, J., & Urrea, P. (2015). Deformaciones permanentes y fatiga en concreto asfáltico (C.A.). *13th LACCEI Annual International Conference*, (págs. 1-8). Santo Domingo, República Dominicana.
- Reyes Ortíz , O., & Camacho, J. (2008). Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas. *Ingeniería & Desarrollo*, 26-42.
- Reyes Ortiz, O., & Millán Montejo , S. (2009). Influencia de la temperatura, la granulometría y el agua en la cohesión de mezclas asfálticas. *Ingeniería y Universidad*, 13-26.
- Reyes, F. (2004). *Diseño racional de pavimentos*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Reyes, O. J., & Millán, S. (2019). Influencia de la temperatura, la granulometría y el agua en la cohesión de mezclas asfálticas . *Ing. Univ*, 309-324.
- Reyes, Ó., & Millán, S. (2009). Influencia de la temperatura, la granulometría y el agua en la cohesión de mezclas asfálticas. *Ing. Univ. Bogotá (Colombia)*, 13(2), 309-324.
- Reyes, Ó., Camacho, J., & Reyes, F. (2005). Influencia de la temperatura y nivel de energía de compactación en las propiedades dinámicas de una mezcla asfáltica. *Revista Facultad de Ingeniería*(36), 121-130.
- Roberts , F., Kandhal, P., Ray, E., Lee, D., & Kennedy, T. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. USA: NAPA Education Foundation, Second Edition.
- Rondón, H., Reyes, F., & Ojeda, B. (2008). Comportamiento de una mezcla densa de asfalto en caliente modificada con desecho de poli cloruro de vinilo (PVC). *ciencia e ingeniería Neogranadina*, 29-43.

- Ruiz , A., & Pérez, I. (2002). *Influencia de los betunes en las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas*. Monografía M-72, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas-CEDEX.
- Rum, S., et al. (2018). The effect of temperature changes on mechanistic performance of hotmix asphalt as wearing course with different gradation types. *Human-Dedicated Sustainable Products and Process Design: Materials, Resources, and Energy*, 5(12), 1-7.
- Sandoval, G. (2010). *Estudio de comportamiento del módulo de rigidez en mezclas asfálticas, determinado mediante ensayos de laboratorio y obtenidos con instrumentación de terreno*. Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- SHELL. (2000). Manual del usuario del programa. *módulo BISAR 3.0*.
- Suárez, J. (2003). *Caracterización de asfaltos con tecnología "superpave" y análisis de ahuellamiento*. Tesis de pregrado, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia.
- Taha, M., et al. (2020). Study of the effect of temperature changes on the elastic modulus of flexible pavement layers. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(5), 1661-1667.
- Tanimoto, R. (2018). *Envejecimiento de mezclas asfálticas, en condiciones de laboratorio*. Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala, San Carlos, Guatemala.
- Vacca, H. A., Leon, M. P., & Ruiz, M. (2012). Evaluación del efecto del envejecimiento del cemento asfáltico 80-100 en el horno de película delgada sobre el comportamiento estático y dinámico de mezclas asfálticas tipo MDC-2. *Ing. Univ*, 379-396.

- Vaitkus, A., et al. (2019). Influence of temperature and moisture content on pavement bearing capacity with improved subgrade. *Materials*, 12(32826), 1-26.
- Valdés, G., Pérez, F., & Martínez, A. (2012). Influencia de la temperatura y tipo de mezcla asfáltica en el comportamiento a fatiga de los pavimentos flexibles. *Revista de la Construcción*, 11(1), 88-101.
- Van Rompu, J., Benedett, H., Buannic, M., Gallet, T., & Ruot, C. (2012). New fatigue test on bituminous binders: Experimental results and modeling. *Construction and Building Materials*, 197-208.
- Vargas, X., & Reyes, F. A. (2010). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería e investigación*, 27-44.
- Vasconcelos, K., Bariani, L., & Chávez, J. (2012). Effect of temperature on the indirect tensile strength test of asphalt mixtures. *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Estambul, Turquía.
- Villamil, E., & Ortiz, S. (2020). *Evaluación de la influencia que tiene la temperatura y el tiempo de mezcla en un asfalto modificado por vía húmeda sobre la resistencia bajo carga monotonica de una mezcla de concreto asfáltico tipo MDC-25*. Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.
- Yung, Y. (2013). *Caracterización, diseño y verificación de una mezcla drenante en caliente modificada con grano de llanta y fibra kaltex*. Medellín: Universidad Nacional de Medellín.

Zhao, X., Shen, A., & Ma, B. (2018). Temperature adaptability of asphalt pavement to high temperatures and significant temperature differences. *Advances in Materials Science and Engineering*, 20(18), 1-16.