

	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>			
	<small>Documento</small> <b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>	<small>Código</small> <b>F-AC-DBL-007</b>	<small>Fecha</small> <b>08-07-2021</b>	<small>Revisión</small> <b>B</b>
	<small>Dependencia</small> <b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>	<small>Aprobado</small> <b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>		<small>Pág.</small> <b>1(72)</b>

### RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

<b>AUTORES</b>	Gladys Patricia Bacca Picón		
<b>FACULTAD</b>	De Ingeniería		
<b>PLAN DE ESTUDIOS</b>	Especialización en Interventoría de Obras Civiles		
<b>DIRECTOR</b>	Esp. Agustín Armando Macgregor Torrado		
<b>TÍTULO DE LA TESIS</b>	Análisis De Los Aspectos Técnicos En La Implementación De Tratamientos Alternativos Para El Desarrollo De Obras De Rehabilitación En Vías De Bajo Flujo Vehicular..		
<b>TITULO EN INGLES</b>	Analysis Of The Technical Aspects In The Implementation Of Alternative Treatments For The Development Of Rehabilitation Works On Roads With Low Vehicular Flow.		
<b>RESUMEN (70 palabras)</b>			
<p>El desempeño de las vías está directamente relacionado con la calidad de la construcción, la cual se ha mejorado con la implementación de nuevas técnicas y métodos en los cuales se incorpora el uso de materiales alternativos para todo tipo de vías, principalmente en aquellas de bajo tráfico. Adicionalmente, es claro que el propósito de la construcción de vías es proporcionar una superficie firme y duradera, capaz de resistir el estrés impartido por el tráfico y las condiciones climáticas.</p>			
<b>RESUMEN EN INGLES</b>			
<p>The performance of the roads is directly related to the quality of the construction, which has been improved with the implementation of new techniques and methods in which the use of alternative materials is incorporated for all types of roads, mainly those with low traffic. . Additionally, it is clear that the purpose of road construction is to provide a firm and durable surface capable of withstanding the stress imparted by traffic and weather conditions..</p>			
<b>PALABRAS CLAVES</b>	Vías, Rehabilitación, Flujo Vehicular, Obras, técnicas.		
<b>PALABRAS CLAVES EN INGLES</b>	Roads, Rehabilitation, Vehicular Flow, Works, techniques		
<b>CARACTERÍSTICAS</b>			
PÁGINAS: 72	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 0	CD-ROM: 0



Análisis De Los Aspectos Técnicos En La Implementación De Tratamientos Alternativos Para El  
Desarrollo De Obras De Rehabilitación En Vías De Bajo Flujo Vehicular.

Gladys Patricia Bacca Picón

Facultad de Ingeniería, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Especialización en Interventoría de Obras Civiles

Esp. Agustín Armando Macgregor Torrado

17 Mayo, 2022

## Índice

<b>Capítulo 1. Tratamientos alternativos y sostenibles en vías de bajo flujo vehicular .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Uso de Cementantes en vías .....</b>	<b>5</b>
<i>1.1.1 Estabilización con cal .....</i>	<i>7</i>
<i>1.1.2 Estabilización con cemento .....</i>	<i>10</i>
<b>1.2 Mezclas en Frio .....</b>	<b>13</b>
<i>1.2.1 Materiales .....</i>	<i>14</i>
<b>1.3 Pavimento Reciclado en frio RAP .....</b>	<b>20</b>
<b>1.4 Asfalto Espumado .....</b>	<b>24</b>
<i>1.4.1 Ventajas de las mezclas asfálticas espumadas .....</i>	<i>25</i>
<i>1.4.2 Consideraciones de Diseño .....</i>	<i>26</i>
<b>1.5 Emulsiones Asfálticas .....</b>	<b>31</b>
<i>1.5.1 Ventajas de las emulsiones de asfalto .....</i>	<i>32</i>
<i>1.5.2 Características de las emulsiones de asfalto .....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
<b>Capítulo 2. Medidas de intervención con tratamientos sostenibles.....</b>	<b>34</b>
<b>2.1 Principios básicos de los tratamientos alternativos .....</b>	<b>34</b>
<b>2.2 Alternativas de tratamientos .....</b>	<b>38</b>
<i>2.2.1 Mantenimiento Vial .....</i>	<i>39</i>
<b>Capítulo 3. Generalidades de los pavimentos y medidas de rehabilitación.....</b>	<b>51</b>
<b>3.1 Pavimentos Flexibles .....</b>	<b>51</b>
<b>3.2 Pavimentos Rígidos.....</b>	<b>52</b>
<b>3.3 selección del tipo de pavimento .....</b>	<b>53</b>
<i>3.3.1 Factores de diseño .....</i>	<i>53</i>
<i>3.3.2 Análisis de costos del ciclo de vida (LCCA) .....</i>	<i>54</i>
<b>3.4 Rehabilitación de pavimentos flexibles.....</b>	<b>55</b>
<i>3.4.1 Reciclaje de superficies in situ.....</i>	<i>56</i>
<b>3.5 Rehabilitación de pavimentos rígidos .....</b>	<b>59</b>

3.5.1	<i>Principales tipos de fallos en pavimentos rígidos</i> .....	59
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Análisis de los aspectos técnicos de los tratamientos alternativos</b> .....	<b>61</b>
<b>Conclusiones</b> .....		<b>62</b>
<b>Referencias</b> .....		<b>64</b>
<b>Apéndices</b> .....		<b>71</b>

## Introducción

El desempeño de las vías está directamente relacionado con la calidad de la construcción, la cual se ha mejorado con la implementación de nuevas técnicas y métodos en los cuales se incorpora el uso de materiales alternativos para todo tipo de vías, principalmente en aquellas de bajo tráfico. Adicionalmente, es claro que el propósito de la construcción de vías es proporcionar una superficie firme y duradera, capaz de resistir el estrés impartido por el tráfico y las condiciones climáticas. Es por ello por lo que cada vez son más los esfuerzos para desarrollar y emplear métodos de tratamientos sostenibles, de bajo costo, que permitan mejorar la calidad de las vías.

Otro de los enfoques de los problemas analizados es el componente ambiental, dado que los métodos convencionales para proporcionar superficies bituminosas en pavimentos flexibles, y la producción de cemento para pavimentos rígidos, requiere un gran consumo energético. En este sentido, la importancia de desarrollar este trabajo de grado es precisamente resaltar la relevancia de implementar estrategias para asegurar la accesibilidad y la transitabilidad de la infraestructura de transporte en el país mediante la implementación de alternativas de tratamientos sostenibles que empleen materiales alternativos de bajo costo que puedan ayudar a la preservación y mantenimiento de las vías de bajo flujo vehicular.

## Capítulo 1. Tratamientos alternativos y sostenibles en vías de bajo flujo vehicular

### 1.1 Uso de Cementantes en vías

El potencial de expansión del suelo y la presión de hinchamiento normalmente se reducen significativamente con el tratamiento con cal (Little, 1995). De hecho, la reducción del PI asociada con prácticamente todos los suelos de grano fino tras la adición de cal es una indicación significativa de la reducción del potencial de expansión debido a la estabilización de la cal.

Las propiedades del material tanto de los suelos estabilizados con cal como de los agregados estabilizados con cal, en relación con su impacto en el desempeño general del pavimento, se pueden dividir en cuatro categorías (Little, 1999):

**Resistencia:** la mejora más obvia en un suelo reactivo a la cal o agregado es la ganancia de fuerza con el tiempo. Los diversos parámetros de resistencia afectados por las reacciones puzolánicas que se producen incluyen la resistencia a la compresión no confinada, la resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión y el CBR (Estabragh, et. al, 2014).

**Módulo resiliente / rigidez:** al mismo tiempo que el fortalecimiento de un suelo provocado por reacciones puzolánicas, hay cambios en la relación tensión-deformación del material (Little, 1999). Los suelos estabilizados con cal fallan a tensiones de desvío mucho más altas que sus contrapartes no estabilizadas y a una deformación mucho menor (típicamente alrededor del 1 por ciento de deformación para la mezcla estabilizada versus aproximadamente el 3 por ciento para el material no estabilizado). Los materiales probados en el laboratorio (pruebas

de tracción indirecta y triaxial de carga repetida) y en el campo (pruebas de deflexión de impulso, pruebas de vibración) confirman aumentos significativos a lo largo del tiempo en las propiedades resilientes de los materiales tratados con cal (Estabragh, et. al, 2014).

**Fractura y fatiga:** la resistencia a la fatiga por flexión está relacionada con el número de cargas que puede soportar un material a un nivel de tensión dado, y es una consideración importante en la evaluación de mezclas de cal-suelo y cal-agregado. Los efectos de aumento de fuerza producidos por las reacciones puzolánicas son a menudo sustanciales para los suelos reactivos (Estabragh, et. al, 2014).

**Durabilidad:** la capacidad de los materiales estabilizados con cal para resistir los efectos perjudiciales de la humedad y el ciclo de congelación-descongelación a lo largo del tiempo se ha evaluado de varias formas, tanto en el laboratorio (por ejemplo, remojo junto con pruebas de resistencia / rigidez, congelación cíclica pruebas de descongelación) y en el campo. Los resultados de estas evaluaciones a menudo han mostrado solo leves efectos perjudiciales del medio ambiente sobre los niveles de resistencia / rigidez producidos por la adición de cal (Estabragh, et. al, 2014).

Se ha descubierto que la cal reacciona satisfactoriamente con suelos de grano medio, moderadamente fino y fino, provocando una disminución de la plasticidad y el potencial de hinchamiento de los suelos expansivos, y un aumento de su trabajabilidad y propiedades de resistencia.

### ***1.1.1 Estabilización con cal.***

La modificación y estabilización de subrasantes de pavimentos de carreteras y aeropuertos utilizando cal es una práctica bien establecida en diferentes países. La adición de cal a los suelos reactivos de grano fino tiene efectos beneficiosos sobre sus propiedades de ingeniería, incluida la reducción de la plasticidad y el potencial de expansión, mejor trabajabilidad, mayor resistencia y rigidez, y mayor durabilidad. Además, la cal se ha utilizado para mejorar las propiedades de resistencia y rigidez de los materiales de base y subbase no unidos (Escamilla, 2002).

La cal se puede utilizar para tratar suelos en diversos grados, dependiendo de las necesidades del proyecto, en pequeñas cantidades esta se suele usar para secar y modificar temporalmente los suelos. De esta forma se logra un área de trabajo con condiciones controladas para la construcción de carreteras temporales. El uso de cal en mayor proporción, con el respaldo de ensayos de laboratorio, diseño y técnicas de construcción adecuadas, produce una estabilización estructural permanente de los suelos.

En general, la mayoría de los estudios de diseño de pavimentos de laboratorio y de campo que involucran aditivos de cal demuestran que, cuando se presta la debida atención al diseño de materiales, durabilidad, diseño estructural y construcción, las subrasantes estabilizadas con cal superan a las secciones que no incorporan cal. El rendimiento mejorado se ve en términos tanto de las características de respuesta de carga como de la cantidad de cargas de tránsito de camiones que se llevan a la falla.

**1.1.1.1 Reacciones suelo-cal.** La cal se usa ampliamente para cambiar las propiedades de ingeniería de suelos de grano fino y las fracciones de grano fino de suelos más granulares. Es más eficaz en el tratamiento de arcillas plásticas capaces de contener grandes cantidades de agua. Las partículas de tales arcillas tienen superficies con cargas muy negativas que atraen cationes libres (es decir, iones con carga positiva) y dipolos de agua. Como resultado, se forma una capa de agua altamente difundida alrededor de las partículas de arcilla, separando así las partículas y haciendo que la arcilla se vuelva débil e inestable. El grado en que esto ocurre depende de la cantidad de agua presente y de la morfología y mineralogía de la arcilla (Little, 1987; NLA, 2004). La adición de cal a un suelo de grano fino en presencia de agua inicia varias reacciones. Las dos reacciones primarias, intercambio de cationes y floculación-aglomeración, ocurren rápidamente y producen mejoras inmediatas en la plasticidad del suelo, trabajabilidad, resistencia sin curar y propiedades de deformación por carga (Escamilla, 2002).

Dependiendo de las características del suelo que se está tratando, también puede ocurrir una reacción puzolánica, lo que resulta en la formación de varios agentes cementantes que aumentan aún más la resistencia y durabilidad de la mezcla. Estas reacciones dependen del tiempo y la temperatura. Por lo tanto, dadas las temperaturas adecuadas, el desarrollo de la resistencia es gradual pero continuo durante largos períodos de tiempo. Temperaturas inferiores a 13 a 16 ° C (55 a 60 ° F) retardan la reacción, mientras que temperaturas más altas aceleran la reacción. Una cuarta reacción que puede ocurrir en la cal es la carbonatación, en la que la cal reacciona con el dióxido de carbono atmosférico para formar un carbonato relativamente insoluble. Esta reacción química es perjudicial para el proceso de estabilización. Puede evitarse

mediante procedimientos de construcción secuenciados y acelerados que eviten la exposición prolongada al aire y / o la lluvia.

**1.1.1.2 Aplicaciones y beneficios.** Los efectos del tratamiento con cal o la estabilización sobre las propiedades pertinentes del suelo pueden clasificarse como inmediatos y a largo plazo. Los efectos de modificación inmediata se logran sin curar y son de interés principalmente durante la etapa de construcción. Se atribuyen a las reacciones de intercambio catiónico y de floculación-aglomeración que tienen lugar cuando la cal se mezcla con el suelo. Los efectos de estabilización a largo plazo tienen lugar durante y después del curado, y son importantes desde el punto de vista de la resistencia y durabilidad. Si bien estos efectos se generan en cierta medida por el intercambio de cationes y la floculación-aglomeración, son principalmente el resultado de la ganancia de fuerza puzolánica (Osorno, 2010).

El tratamiento de los suelos de la subrasante con cal facilita el trabajo de construcción de tres formas principales. Primero, la adición de cal al suelo disminuye el límite líquido y aumenta el límite plástico, lo que da como resultado una reducción significativa del PI. Esta reducción de PI significa un marcado aumento de la trabajabilidad, lo que, a su vez, agiliza la manipulación y colocación del suelo tratado (Sandoval, et. al, 2012). La segunda forma en que se facilita la construcción es a través de un cambio en la relación humedad-densidad del suelo, como resultado de la adición cada vez mayor de cal. El cambio refleja la nueva naturaleza del suelo y está marcado por una disminución en la densidad seca máxima y un aumento en el contenido óptimo de humedad (García, 2016). La tercera forma principal en la que se facilita la

construcción mediante la adición de cal al suelo es mediante el aumento inmediato de la resistencia del suelo y las propiedades de deformación (Castello, et. al, 2016).

Estas mejoras, que son en gran parte el resultado de la estructura de partículas floculadas, aumentan la movilidad de los vehículos con ruedas involucrados en las operaciones de construcción y ayudan a proporcionar una plataforma de trabajo estable para todos los equipos de construcción (Sandoval, et. al, 2012).

### ***1.1.2 Estabilización con cemento.***

El American Concrete Institute (ACI) define el cemento para suelo como una mezcla de suelo y una cantidad medida de cemento y agua mezclados a una alta densidad (25). El cemento para suelos se ha definido clásicamente como un suelo estabilizado en el que el agregado grueso, tamaño de la arena y mayor (más grueso de 75  $\mu\text{m}$ ) está rodeado y adherido por una matriz de pasta de cemento y partículas finas de suelo (Dash y Hussain, 2012). El objetivo del diseño de la mezcla para este tipo de suelo es hacer flotar el agregado grueso en la matriz.

La durabilidad de esta matriz se determina mediante pruebas de durabilidad como AASHTO T 135 y T 136 (o por sus equivalentes ASTM D 559 y D 560) o mediante pruebas de resistencia a la compresión (Amu, et. al, 2011). Sin embargo, el cemento Portland también se ha utilizado con éxito para estabilizar suelos arcillosos y limosos de grano fino. De hecho, la estabilización con cemento de suelos limosos proporciona quizás la mejora más dramática de cualquier tipo de suelo (cuando las propiedades del suelo limoso tratado con cemento se

comparan con las propiedades del suelo no tratado). Sin embargo, la cantidad de cemento requerida para estabilizar suelos de grano fino puede ser sustancialmente mayor que la requerida para estabilizar suelos de grano grueso debido a la mayor superficie de los suelos de grano fino (Cherian y Arnepalli, 2015).

La transición de limo a arcilla significa que el área de la superficie de las partículas aumenta en órdenes de magnitud. Sin embargo, en realidad, el cemento no necesita recubrir todas las partículas para una estabilización exitosa y una mejora sustancial de los suelos de arcilla moderadamente plástica, se han logrado índices de plasticidad por debajo de 30 con aproximadamente la misma cantidad de cemento Portland que se requeriría de la cal hidratada (Dash y Hussain, 2012). Esto se debe principalmente a que el cemento forma una matriz estabilizada alrededor de aglomerados de partículas de arcilla. Obviamente, si la integridad de la matriz de cemento que rodea a los aglomerados se ve comprometida, la durabilidad de la matriz comenzará a degradarse (Amu, et. al, 2011).

La capacidad de estabilizar suelos con índices de plasticidad superiores a 20 con cemento se basa en la capacidad de mezclar íntimamente el cemento con el suelo hasta un grado que produzca una matriz estabilizada razonablemente homogénea y continua de los aglomerados. Esto requiere una cierta eficacia de mezclado, que a su vez está asociada con la energía impartida al suelo por el equipo y por el lapso de tiempo durante el cual ocurre la mezcla (Afrin 2017).

La limitación asociada con la mezcla de cemento Portland con suelos de arcilla plástica es el corto tiempo de fraguado inicial del cemento, por lo general no se proporcionan más de 2

horas para mezclar antes de la compactación (Zhao, et. al, 2015). Sin embargo, este tiempo de mezcla se ha ampliado en determinadas circunstancias. Durante el período prolongado de maduración, la liberación de cal libre durante la hidratación del cemento altera la plasticidad y las propiedades de textura del suelo arcilloso, lo que puede mejorar la trabajabilidad.

Adicionalmente, el mezclado después de esta maduración prolongada debe realizarse con un equipo que tenga la capacidad de impartir suficiente energía para mezclar el suelo y el cemento después de que el cemento haya alcanzado un fraguado final, lo que normalmente ocurre dentro de las 8 horas. Debe entenderse, cuando se adopta la suavización prolongada, que toda la fuerza perdida durante la remezcla puede no recuperarse con un curado adicional (Afrin 2017).

Las mezclas de cemento para suelo endurecido deben soportar condiciones ambientales adversas. Otros objetivos de estabilización incluyen reducir el índice de plasticidad, aumentar el límite de contracción, cumplir con los umbrales de resistencia y mejorar el módulo de resiliencia (Dash y Hussain, 2012). El cemento para suelos puede proporcionar un soporte fuerte y uniforme para las capas de pavimento y brindar una plataforma de trabajo firme y estable para la construcción. En resumen, la mayoría de los tipos de suelo, excepto aquellos con alto contenido orgánico, arcillas altamente plásticas y suelos arenosos de mala reacción, son susceptibles de estabilización con cemento Portland. Las especificaciones generales de gradación limitan el tamaño máximo nominal a 2 pulgadas con al menos el 55 por ciento pasando el no. 4 tamices. Para materiales de clasificación uniforme, la adición de finos no plásticos como cenizas volantes, filtros de agregados, cemento y polvo de horno de cal puede ayudar a llenar los vacíos en la estructura del suelo y ayudar a reducir el contenido de cemento requerido (Afrin 2017).

La estabilización de cemento es ideal para agregados bien clasificados con una cantidad suficiente de finos para llenar de manera efectiva el espacio de vacíos disponible y hacer flotar las partículas de agregado grueso. Las pautas generales para la estabilización son que el índice de plasticidad debe ser inferior a 30 para materiales arenosos. Para suelos de grano fino, suelos con más del 50 por ciento en peso que pasa el tamiz de 75  $\mu\text{m}$ , las pautas generales de consistencia son que el índice de plasticidad debe ser inferior a 20 y el límite de líquido (LL) debe ser inferior a 40 para garantizar una mezcla adecuada. (6). En la siguiente ecuación se proporciona una pauta general más específica basada en el contenido de finos que define el límite superior de P.I. para seleccionar suelo para la estabilización del cemento (Asgari, et. al, 2015).

El cemento es apropiado para estabilizar suelos de grava con no más del 45 por ciento retenido en el n. 4 tamices. La Administración Federal de Carreteras recomienda el uso de cemento en materiales con menos del 35 por ciento de aprobación no. 200 tamiz y un índice de plasticidad (PI) inferior a 20 (18). Con base en este sistema, los suelos con clasificaciones AASHTO A-2 y A-3 son ideales para la estabilización con cemento, pero ciertamente el cemento también se puede usar con éxito para estabilizar suelos A-4 a A-7. La Asociación de cemento Portland (PCA) estableció pautas para estabilizar una amplia gama de suelos, desde gravas hasta arcillas (Asgari, et. al, 2015).

## **1.2 Mezclas en Frio**

Los concretos asfálticos mezclados en frío se están convirtiendo en materiales comunes de reparación de pavimentos asfálticos. El asfalto de mezcla fría se usa a menudo debido a la falta de disponibilidad del asfalto de mezcla en caliente en las cercanías del proyecto y también se usa para parches temporales. Esta revisión de la literatura se centrará en la información existente con respecto a los materiales de parcheo de mezcla en frío y su consideración de diseño, técnicas de reparación y eficiencia laboral, además de sus implicaciones en el medio ambiente (Robinette y Epps, 2010).

### ***1.2.1 Materiales.***

**1.2.1.1 Agregados.** Dado que los materiales de parcheo de mezcla fría estarán sujetos al mismo estrés ambiental y asociado al tráfico que el asfalto de mezcla en caliente, parecería que las especificaciones de calidad de los agregados deberían ser estrictas para todo tipo de mezclas. El tipo y la calidad de los agregados que se utilizan para parchear las mezclas son los mismos que para la construcción bituminosa normal; incluyendo piedras trituradas y gravas, arenas naturales, arenas de piedra y cargas minerales. Las propiedades de los agregados críticas para una buena mezcla de parches son la clasificación del tamaño máximo de los agregados, la angularidad y la forma de los agregados, la textura de la superficie y la compatibilidad con el aglutinante (Marcozzi, 2010).

Respecto a los agregados, Ganung y Kloskowski (1981) encontraron que la clasificación de agregados juega un papel importante en el desempeño de la mezcla bituminosa de parcheo. Además. Llegaron a la conclusión de que un material de parcheo bituminoso ideal debería

consistir en una clasificación abierta con un tamaño máximo de agregado de 9.5 mm y menos del 2% de finos.

En la investigación realizada por Anderson et al (2001), también se encontró que la clasificación de agregados y el recuento de aplastamiento de agregados son factores importantes para determinar la estabilidad de la mezcla. La investigación mostró además que una mezcla de agregado triturado de grado abierto con menos del 2% que pasa por el tamiz No. 200 y con un tamaño máximo de partícula de 9.5 mm se requiere para una mezcla óptima (Anderson et. al, 2001),

Anderson et al (2008) también encontraron que el agregado debe contener partículas angulares trituradas y un máximo de 1% a 2% fino y el tamaño máximo del agregado debe ser menor de 13 mm. Una mezcla de clasificación abierta proporciona suficiente espacio para películas aglutinantes gruesas que contribuyen a la trabajabilidad y resistencia al agua.

La mezcla de grado de un solo tamaño es un agregado muy grueso y contiene muy poco material más fino que el tamiz de 4.75mm. En mezclas de parches de agregados de un solo tamaño, la resistencia se obtiene principalmente a través del enclavamiento de agregados como el macadán, y el aglutinante se usa esencialmente como impermeable. Esta clasificación tiene una viabilidad razonable. Cura bastante rápido después de la compactación porque contiene una gran cantidad de huecos, lo que permite un escape relativamente rápido de los volátiles (Anderson et. al, 2008),

Una clasificación densa más fina no tendrá una buena trabajabilidad y puede reducir la adhesividad de la mezcla. Sin embargo, si está hecho predominantemente de áridos de un solo tamaño, el problema se reduce. Kandhal y Mellot (2003) han mencionado las ventajas de una clasificación que consiste en pasar al 100% el tamiz de 9,5 o 4,75 mm, estas son las siguientes:

- La mezcla es flexible y viable.
- Debido al aumento de superficie, se puede incorporar más aglutinante bituminoso a la mezcla para mejorar la durabilidad.
- La mezcla permanece flexible durante un período prolongado de tiempo y continúa densificándose fácilmente bajo el tráfico y continuará adaptándose a la geometría cambiante del bache. Esta característica aumenta sus posibilidades de supervivencia. (Anderson et. al, 2008).

**1.2.1.2 Forma y textura de la superficie.** La forma y textura superficial de los áridos influyen en la trabajabilidad, los agregados angulares de superficie rugosa pueden reducir esta propiedad. Las mezclas de parcheo preferidas a menudo se componen de agregado grueso de superficie rugosa angular y arena natural redondeada. El agregado grueso angular contribuye a la estabilidad, mientras que las arenas naturales redondeadas más suaves ayudan a mejorar la trabajabilidad. Kandhal y Mellot (2003) argumentan que el agregado de piedra triturada angular es un material ideal para el parcheo y cuando se usa la clasificación más fina de un solo tamaño, el efecto de la angularidad del agregado sobre la trabajabilidad de la mezcla es mínimo.

**1.2.1.3 Aglutinantes bituminosos.** Los aglutinantes bituminosos en los materiales secantes de mezcla en frío deben poder mantener la trabajabilidad sin la ayuda de temperaturas cálidas por encima de la temperatura ambiente. También debe poder aumentar su consistencia con bastante rapidez una vez que la mezcla esté compactada y debe tener autoadhesión. Hay dos tipos de aglutinantes bituminosos que se utilizan comúnmente en la mezcla de materiales de parcheo de mezcla fría; Estos son emulsión bituminosa y bitumen reducido (Echevarría, 2012).

**1.2.1.3.1 Emulsiones bituminosas.** Las emulsiones poseen dos componentes, uno disperso a través del otro. El componente disperso no es soluble en el componente continuo. Las emulsiones bituminosas son normalmente del tipo aceite en agua. El pavimento se dispersa por toda la fase acuosa continua en forma de glóbulos discretos, típicamente de 0,1 micrones a 5 micrones de diámetro que se mantienen en suspensión por cargas electrostáticas estabilizadas por un emulsionante (Echevarría, 2012).

El contenido de pavimento depende de la aplicación prevista de la emulsión, pero rara vez es inferior al 30% o superior al 70%. El grado de dureza depende del método de fabricación, el pavimento, el emulsionante y el almacenamiento y manipulación (Echevarría, 2012). Hay cuatro clases de emulsiones bituminosas, que son; emulsión aniónica, emulsión catiónica, emulsión no iónica y emulsiones estabilizadas con arcilla. Para las emulsiones aniónicas, el emulsionante es de tipo aniónico y las gotas de pavimento tienen carga negativa, mientras que, para las emulsiones catiónicas, el emulsionante es de tipo catiónico y las gotas de pavimento tienen carga positiva (Shell Betumen, 1990).

El pavimento de las emulsiones no iónicas es neutro. Estos tipos se utilizan a veces cuando se requieren emulsiones extremadamente estables, principalmente para mezclas frías que contienen grandes cantidades de finos (Akzo Nobel, 1999). Las emulsiones estabilizadas con arcilla se utilizan principalmente para aplicaciones industriales como techos y sellado de bajos de la carrocería y usan arcilla activada y bentonitas como sistema emulsionante.

Los emulsionantes tanto de tipo catiónico como aniónico se basan en sales de moléculas grasas de cadena larga, que pueden ser sintéticas o derivados de ácidos grasos como los que se encuentran en aceites y grasas. El ion emulsionante se orienta sobre la superficie de la gota de pavimento de manera que la cadena de hidrocarburos se une firmemente al pavimento con la porción iónica ubicada en la superficie (Shell Betumen, 1990).

Los emulsionantes aniónicos se basan en ácidos grasos; estos se hacen reaccionar con una base como potasa cáustica o sosa cáustica (KOH o NaOH) para formar una sal. Esta sal es el emulsionante activo. Los emulsionantes catiónicos se basan en sales ácidas de aminas preparadas a partir de ácidos grasos. Estos pueden ser diaminas grasas, compuestos grasos de amonio cuaternario o derivados etoxilados. El tipo de emulsionante determina el número de cargas que hay en la superficie del pavimento.

La estabilidad de la emulsión bituminosa se caracteriza por lo bien que se dispersa, la carga superficial y el tamaño de las partículas bituminosas. Los mecanismos de estabilidad de las emulsiones bituminosas son el asentamiento, la floculación, la coalescencia y la inversión (atrapamiento de agua).

El asentamiento de una emulsión determina cuánto tiempo puede almacenarse. El asentamiento en una emulsión se debe a la fuerza de la gravedad y a la diferencia entre las dos fases. Incluso si la diferencia es pequeña, el asentamiento puede tener lugar si la emulsión contiene gotas grandes y el contenido de pavimento es inferior al 65% (Akzo Nobel, 1999). La ley de Stokes describió la tasa de asentamiento como proporcional a la densidad de la fase dispersa y al cuadrado del radio de la partícula. La tasa de asentamiento disminuye con la reducción del tamaño de partícula como una función al cuadrado, es decir, si el tamaño de partícula se reduce a la mitad, el asentamiento se reducirá en un factor de 4.

La floculación es un proceso en el que las gotas comienzan a adherirse entre sí. Cuando dos partículas se acercan entre sí, pueden ocurrir varios tipos de interacciones. Hay dos formas principales en que las interacciones coloidales influyen en la floculación. La primera es la eficiencia de la colisión, que es la probabilidad de que un par de partículas en colisión provengan de una agregación y la segunda es la fuerza de tales agregaciones. Las partículas floculadas actúan como si fueran partículas más grandes y se sedimentan más rápido según la ley de Stokes (Echevarría, 2012).

La coalescencia es un proceso en el que las gotas de pavimento en una emulsión se fusionan para formar gotas más grandes. La floculación es una función de la carga superficial, del cizallamiento y la temperatura. La coalescencia se puede iniciar debido a una acción mecánica como agitación, bombeo o vibración. Ocurre en el proceso de rotura y depende del tipo de agregado (Akzo Nobel, 1999). En inversión, las partículas de la emulsión se juntan

tan rápidamente que el agua queda atrapada. Esto ocurre solo en sistemas de coalescencia rápida, especialmente en emulsiones de aglutinante muy alto.

La emulsión debe ser estable durante el almacenamiento y el transporte, pero cuando se aplica a agregados minerales o superficies de pavimento, debe romperse a una velocidad predeterminada. Los principales mecanismos de rotura son la floculación / coalescencia y la interacción del agregado, el último es importante ya que describe la interacción química entre la emulsión y el agregado. La velocidad de rotura depende principalmente del tipo y contenido de emulsionante; otros factores son el tipo de agregado, la temperatura y otras condiciones climáticas (Akzo Nobel. 1999).

El curado de la emulsión bituminosa se confunde a menudo con la rotura. El curado es simplemente la pérdida de agua de la emulsión y la mezcla. La velocidad de curado depende del contenido de agua, la velocidad de evaporación y la difusión del agua a través del aglutinante de curado. En sistemas con fuertes diferencias de energía entre la superficie del agregado y el aglutinante emulsionado, existe una fuerza impulsora adicional para alejar el agua de la interface agregado / aglutinante. El cemento se usa a menudo para mejorar esto.

### **1.3 Pavimento Reciclado en frío RAP**

Con una mayor demanda y un suministro limitado de agregados y aglutinantes, los productores de asfalto de mezcla en caliente (Hot Mix Asphalt - HMA) descubrieron que el pavimento de asfalto recuperado (RAP) es un componente valioso en HMA. Como resultado, ha

habido un renovado interés en aumentar la cantidad de RAP utilizada en HMA. Si bien varios factores impulsan el uso de RAP en pavimentos asfálticos, los dos factores principales son los ahorros económicos y los beneficios ambientales. El RAP es una alternativa útil a los materiales vírgenes porque reduce el uso de áridos naturales y la cantidad de aglutinante de asfalto que se requiere en la producción de HMA (Mora, 2020).

El uso de RAP reduce en gran medida la cantidad de escombros de construcción que van a los vertederos y no agota los recursos naturales no renovables como el agregado virgen y el aglutinante de asfalto. En última instancia, el reciclaje de asfalto crea un ciclo de reutilización que optimiza el uso de los recursos naturales y sostiene la industria del pavimento asfáltico.

El uso más generalizado de mayores cantidades de RAP en mezclas de asfalto requiere el apoyo de los departamentos de transporte estatales y la industria de HMA. Los departamentos de transporte estatales han expresado su preocupación por la falta de orientación sobre el uso de altos porcentajes de mezclas, así como la falta de información sobre su desempeño. Como resultado, existe la necesidad de una guía nacional sobre las mejores prácticas al usar pavimento reciclado e información documentada sobre su desempeño a largo (Méndez, 2015).

Más del 90 por ciento de las carreteras y caminos de los EE. UU. Están construidos con mezcla de asfalto en caliente (HMA). A medida que envejece la infraestructura de EE. UU, estas carreteras y caminos deben mantenerse y rehabilitarse, de acuerdo con la política de materiales reciclados de la Administración Federal de Carreteras (FHWA): Los mismos materiales utilizados para construir el sistema de carreteras original se pueden reutilizar para repararlos,

reconstruirlos y mantenerlos. Cuando sea apropiado, el reciclaje de agregados y otros materiales de construcción de carreteras tiene un sentido económico, ambiental y de ingeniería sólido (Méndez, 2015).

Con una mayor demanda y una oferta limitada de agregados y aglutinantes, los productores de HMA han comenzado a utilizar pavimento de asfalto recuperado (RAP) como un componente valioso en HMA. Como resultado, ha habido un renovado interés en aumentar la cantidad de RAP utilizada en HMA (Méndez, 2015).

Si bien varios factores influyen en el uso de RAP en pavimentos asfálticos, los dos factores principales son los ahorros económicos y los beneficios ambientales. El RAP es una alternativa útil a los materiales vírgenes porque reduce el uso de áridos vírgenes y la cantidad de aglutinante de asfalto virgen que se requiere en la producción de HMA. El uso de RAP también conserva la energía, reduce los costos de transporte necesarios para obtener agregados vírgenes de calidad y preserva los recursos (Méndez, 2015). Además, el uso de RAP disminuye la cantidad de escombros de construcción que se colocan en los rellenos sanitarios y no agota los recursos naturales no renovables como el agregado virgen y el aglutinante de asfalto. En última instancia, el reciclaje de asfalto crea un ciclo que optimiza el uso de los recursos naturales y sostiene la industria del pavimento asfáltico (Mora, 2020).

Para que tenga éxito, el pavimento de asfalto reciclado debe ser rentable, funcionar bien y ser respetuoso con el medio ambiente. Para garantizar que se cumplan estos requisitos, FHWA promueve lo siguiente:

- El uso de material reciclado en la construcción de carreteras en la máxima medida económica y práctica posible con igual o mejor desempeño.
- El uso de RAP en HMA porque RAP puede tener un gran impacto económico, ambiental y de ingeniería en el reciclaje de pavimentos.

Los materiales de pavimento de asfalto existentes se eliminan comúnmente durante las operaciones de repavimentación, rehabilitación o reconstrucción. Una vez retirado y procesado, el material del pavimento se convierte en RAP, que contiene un valioso aglomerante de asfalto y agregado. A principios de la década de 1990, la FHWA y la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. Estimaron que más de 90 millones de toneladas de pavimento asfáltico se recuperaban (es decir, se convertían en material adecuado para su uso) cada año, y se reciclaba más del 80 por ciento de RAP, lo que hacía que el asfalto fuera el más material frecuentemente reciclado. (2) pavimento reciclado se usa más comúnmente como agregado y sustituto de aglutinante de asfalto virgen en pavimentos de asfalto reciclado, pero también se usa como base o subbase granular, agregado de base estabilizada y material de terraplén o relleno. También se puede utilizar en otras aplicaciones de construcción. El RAP es un material valioso y de alta calidad que puede reemplazar los agregados y aglutinantes vírgenes más costosos (Mora, 2020).

Hay cuatro categorías principales de costos de producción de asfalto: (1) materiales, (2) producción de la planta, (3) transporte por camión y (4) colocación (es decir, construcción). Los materiales son la categoría de costos de producción más cara, y comprenden aproximadamente el 70 por ciento del costo de producción de HMA (Mora, 2020). El material más caro y

económicamente variable en una mezcla de asfalto es el aglutinante de asfalto. Se usa más comúnmente en las capas intermedias y superficiales de pavimento flexible para proporcionar resistencia a la tracción para resistir la distorsión, proteger la estructura del pavimento de asfalto y la subrasante de la humedad, y proporcionar una superficie de conducción suave y antideslizante que resiste el desgaste del tráfico. (3) Como resultado, el uso más económico de RAP es en las capas intermedias y superficiales de pavimentos flexibles donde el ligante menos costoso de RAP puede reemplazar una porción del ligante virgen más costoso (Mora, 2020).

#### **1.4 Asfalto Espumado**

El uso de asfalto espumado, un procedimiento alternativo de mezcla en frío, también ha tenido una aplicación limitada en la construcción de pavimentos de carreteras. Sin embargo, no se dispone de ningún procedimiento de diseño de mezcla estandarizado. Aunque el proceso de pavimento espumado se desarrolló hace más de 40 años y fue elogiado por investigadores de todo el mundo, se cree que la falta de procedimientos de diseño estandarizados ha contribuido a la implementación limitada de esta tecnología, y los profesionales están a favor de métodos más familiares y bien documentados productos (García, et. al, 2018).

El término "asfalto espumado", se refiere a una mezcla de agregados de construcción de pavimentos y pavimento expandido. Dicho pavimento se produce mediante un proceso en el que se inyecta agua en el pavimento caliente, lo que produce una espuma espontánea. Las propiedades físicas del pavimento se alteran temporalmente cuando el agua inyectada, al entrar en contacto con el pavimento caliente, se convierte en vapor que queda atrapado en miles de

diminutas burbujas de pavimento. Sin embargo, la espuma se disipa en menos de un minuto y el pavimento recupera sus propiedades originales. Para producir asfalto espumado, el pavimento debe incorporarse a los agregados mientras aún se encuentra en su estado expandido (García, et. al, 2018).

#### ***1.4.1 Ventajas de las mezclas asfálticas espumadas.***

Las siguientes ventajas del asfalto espumado están bien documentadas:

- El aglutinante espumado aumenta la resistencia al cizallamiento y reduce la susceptibilidad a la humedad de los materiales granulares. Las características de resistencia del asfalto espumado se acercan a las de los materiales cementados, pero el asfalto espumado es flexible y resistente a la fatiga.
- El tratamiento con espuma se puede utilizar con una gama más amplia de tipos de agregados que otros procesos de mezcla en frío.
- Reducción de los costos de aglutinante y transporte, ya que el asfalto espumado requiere menos aglutinante y agua que otros tipos de mezclado en frío.
- Ahorro de tiempo, porque el asfalto espumado se puede compactar inmediatamente y puede transportar tráfico casi inmediatamente después de que se completa la compactación.
- Conservación de energía, ya que solo es necesario calentar el pavimento mientras se mezclan los áridos en frío y húmedo (sin necesidad de secado).

- Se evitan los efectos secundarios ambientales resultantes de la evaporación de volátiles de la mezcla ya que el curado no da como resultado la liberación de volátiles. Mezclas de asfalto espumado CR98 / 077 - Procedimiento de diseño de mezcla 3
- El asfalto espumado se puede apilar sin riesgo de escurrimiento de ligante o sanguijuelas. Dado que el asfalto espumado se puede trabajar durante períodos muy prolongados, se evitan las limitaciones de tiempo habituales para lograr la compactación, el modelado y el acabado de la capa.
- Se pueden construir capas de asfalto espumado incluso en algunas condiciones climáticas adversas, como en clima frío o lluvia ligera, sin afectar significativamente la trabajabilidad o la calidad de la capa terminada (García, et. al, 2018).

#### ***1.4.2 Consideraciones de Diseño.***

El objetivo de un diseño de mezcla de asfalto espumado es seleccionar las proporciones de la mezcla, una de las cuales es el contenido de pavimento, para lograr:

- valores óptimos para propiedades medidas en laboratorio;
- los requisitos estructurales y funcionales de la combinación en servicio, y
- Retención de las propiedades de ingeniería relevantes en condiciones de servicio de temperatura, humedad y condiciones de carga.

Las pruebas de laboratorio realizadas sobre asfalto espumado deben evaluar la resistencia a la deformación, así como las variaciones de cohesión y resistencia con la humedad y la temperatura. Como la resistencia de las mezclas de asfalto espumado es extremadamente sensible a las condiciones de humedad, estas deben tenerse en cuenta en los métodos de prueba. Debido a que las mezclas de asfalto espumado pueden adquirir características que van desde materiales granulares hasta materiales asfálticos de alta calidad, el método de prueba seleccionado debe poder manejar una amplia gama de tipos de materiales (Miranda, et. al, 2014).

**1.4.2.1 Propiedades del asfalto expandido.** El asfalto expandido, es un aglutinante bituminoso caliente que se ha convertido temporalmente de un estado líquido a un estado de espuma mediante la adición de un pequeño porcentaje de agua (típicamente 2 por ciento). Dicho pavimento se caracteriza en términos de relación de expansión y vida media. La relación de expansión de la espuma se define como la relación entre el volumen máximo alcanzado y el volumen final del aglutinante una vez que la espuma se ha disipado (Miranda, et. al, 2014).

**1.4.2.2 Potencial de formación de espuma.** Las características de formación de espuma del asfalto juegan un papel importante durante la etapa de mezcla de la producción de asfalto expandido. Se puede esperar que las relaciones de expansión maximizadas y las vidas medias promuevan la dispersión del aglutinante dentro de la mezcla. Castedo Franco y Wood (1983) encontraron que cualquier pavimento, independientemente de su grado u origen, podía espumarse con una combinación adecuada de tipo de boquilla, agua, aire y presión de inyección de pavimento. Sin embargo, Abel (1978) encontró que:

- El pavimento que contenía siliconas podría tener una capacidad de formación de espuma reducida;
- Los asfaltos con viscosidades más bajas formaron espuma más fácilmente y tenían relaciones de espuma y vidas medias más altas que aquellos con viscosidades más altas, pero el uso los asfaltos de alta viscosidad dio como resultado un recubrimiento de agregado superior;
- Los agentes anti-decapado intensificaron la capacidad de formación de espuma de los asfaltos
- La formación de espuma aceptable solo se logró a temperaturas superiores a 149 ° C.

**1.4.2.3 Condiciones de Curado.** Los estudios han demostrado que las mezclas de asfalto espumado no desarrollan toda su resistencia después de la compactación hasta que se pierde un gran porcentaje de la humedad de la mezcla. Este proceso se denomina curado. El curado es el proceso por el cual el asfalto espumado gana fuerza gradualmente con el tiempo acompañado de una reducción en el contenido de humedad. Ruckel et al (1982) concluyeron que el contenido de humedad durante el período de curado tuvo un efecto importante en la resistencia final de la mezcla. Sin embargo, Lee (1980) proporcionó evidencia experimental que sugería que la pérdida de humedad no era un requisito previo para ganar resistencia en mezclas de asfalto espumado (Miranda, et. al, 2014).

Cualquiera que sea el caso, un procedimiento de diseño de mezcla de laboratorio necesitaría simular el proceso de curado en el campo para correlacionar las propiedades de las

mezclas preparadas en el laboratorio con las de las mezclas de campo. Dado que el curado de las mezclas de asfalto espumado en el campo ocurre durante varios meses, no es práctico reproducir las condiciones reales de curado en el campo en el laboratorio. Se requiere un procedimiento de curado de laboratorio acelerado, en el que las características de ganancia de resistencia se pueden correlacionar con el comportamiento del campo, especialmente con las resistencias tempranas, intermedias y últimas alcanzadas. Esta caracterización es especialmente importante cuando se requiere un análisis de capacidad estructural, basado en valores de resistencia medidos en laboratorio (Miranda, et. al, 2014).

La mayoría de las investigaciones anteriores han adoptado el procedimiento de curado de laboratorio propuesto por Bowering (1970), es decir, curado en horno de 3 días a una temperatura de 60 ° C. Este procedimiento da como resultado que el contenido de humedad se estabilice en aproximadamente 0 a 4 por ciento, lo que representa un estado más seco en campo. Las características de resistencia de las muestras curadas de esta manera son representativas del estado en servicio aproximadamente un año después de la construcción (Maccarrone, 1995). Se han expresado preocupaciones sobre el envejecimiento del aglomerante que puede ocurrir a una temperatura de curado de 60 ° C. Además, dado que esta temperatura está por encima del punto de ablandamiento de los asfaltos comunes para carreteras, es posible que se produzcan cambios en la dispersión del pavimento dentro de la mezcla durante el curado. . Estos problemas se abordarán durante la fase de validación de laboratorio de este estudio. Un enfoque alternativo sugerido por Lewis (1998) sería secar en horno el asfalto espumado a una masa constante, a una temperatura más baja (40 ° C).

**1.4.2.4 Condiciones de Temperatura.** La temperatura de mezcla óptima de los agregados para mezclas asfálticas espumadas se encuentra en el rango de 13 ° C a 23 ° C, dependiendo del tipo de agregado. Temperaturas por debajo de este rango dan como resultado mezclas de mala calidad (Bowering y Martin, 1976). Las mezclas de asfalto espumado también se pueden preparar con agregados calentados que aumentarán la dispersión del aglutinante dentro de la mezcla y ayudarán en el recubrimiento de los agregados más grandes (Miranda, et. al, 2014).

**1.4.2.5 Propiedades de Ingeniería.** Todos los resultados de estudios previos confirman que los parámetros de resistencia como el módulo de resiliencia, CBR y la estabilidad se optimizan con un contenido intermedio particular de aglutinante. El método más común utilizado en la selección del contenido de aglutinante de diseño fue optimizar la estabilidad Marshall y minimizar la pérdida de estabilidad en condiciones de humedad empapada. Las principales funciones del tratamiento con pavimento espumado son reducir la susceptibilidad a la humedad, aumentar la resistencia a la fatiga e incrementar la cohesión del agregado sin tratar a niveles aceptables. El contenido de pavimento espumado de diseño también podría seleccionarse como la cantidad mínima (no necesariamente óptima) de aglutinante que daría como resultado una mezcla adecuada (Miranda, et. al, 2014).

**1.4.2.5.1 Rigidez – Modulo resiliente.** Al igual que con todos los materiales bituminosos viscoelásticos, la rigidez del asfalto espumado depende de la velocidad de carga, el nivel de tensión y la temperatura (Miranda, et. al, 2014). Generalmente, se ha demostrado que la rigidez aumenta a medida que aumenta el contenido de finos. En muchos casos, se ha

demostrado que los módulos resilientes de las mezclas asfálticas espumadas son superiores a los de las mezclas asfálticas equivalentes en caliente a altas temperaturas (por encima de 30 ° C). El asfalto espumado puede alcanzar rigideces comparables a las de los materiales tratados con cemento, con las ventajas adicionales de flexibilidad y resistencia a la fatiga (Ramanujam y Fernando, 1997).

### **1.5 Emulsiones Asfálticas**

El uso de emulsiones asfálticas se inició a principios del siglo XX. En la actualidad, del 5% al 10% del asfalto para pavimentación se usa en forma emulsionada, pero el grado de uso varía ampliamente entre los países. Estados Unidos es el mayor productor mundial de emulsión asfáltica. Las ventajas en comparación con el asfalto caliente y los aglutinantes recortados están relacionadas con la baja temperatura de aplicación, la compatibilidad con otros aglutinantes a base de agua como el látex de caucho y el cemento y el bajo contenido de solventes (Ronald, 2016).

Los últimos 20 años han visto un progreso considerable en la comprensión de cómo la química de la emulsión influye en el rendimiento. En consecuencia, se pueden desarrollar formulaciones para optimizar el rendimiento del material de construcción o el proceso de construcción en lugar de simplemente cumplir con las especificaciones estándar. El resultado ha sido tratamientos de superficie de fraguado más rápido, capas pegajosas de secado rápido, imprimaciones de emulsión penetrantes que son superiores a los recortes y materiales mezclados en frío con propiedades mejoradas (López et. al, 2019).

### ***1.5.1 Ventajas de las emulsiones de asfalto.***

Con viscosidades en el rango de 0.5-10 Poise a 60 ° C, la emulsión asfáltica tiene una viscosidad considerablemente menor que el asfalto en sí (100-4.000 Poise), lo que permite su uso a temperaturas más bajas. Las técnicas de construcción y mantenimiento a baja temperatura reducen las emisiones, reducen el consumo de energía, evitan la oxidación del asfalto y son menos peligrosas que las técnicas que utilizan asfalto caliente. También son más económicas y respetuosas con el medio ambiente que las técnicas en frío que utilizan asfaltos recortados (Du, 2014).

El beneficio ambiental de la emulsión asfáltica es particularmente positivo cuando se usa para técnicas in situ o in situ que evitan el uso de energía y las emisiones asociadas con el calentamiento, el secado y el transporte de áridos. Se ha calculado que la construcción de una calzada con técnicas en frío consume aproximadamente la mitad de energía que una de similar capacidad portante realizada con mezcla asfáltica en caliente (HMA). Se ha aplicado una técnica de análisis de impacto ambiental (EIA) denominada “ecoficiencia” a las técnicas de mantenimiento de emulsión (micro-superficie y sellado de virutas) y se concluyó que el sistema de emulsión tenía menos impacto ambiental que una capa fina de mezcla en caliente (Du, 2014).

Las emulsiones son a base de agua y, en muchos casos, se pueden diluir más con agua para aplicaciones como control de polvo e imprimación. También son compatibles con aglutinantes hidráulicos como cemento y cal, así como con dispersiones de polímeros a base de agua como látex natural y sintético. Cuando se curan mezclas de cemento, látex y emulsión

asfáltica, se produce un aglutinante compuesto con una estructura que no se puede duplicar con asfalto caliente y con propiedades significativamente mejoradas en comparación con el asfalto puro (Du, 2014).

## Capítulo 2. Medidas de intervención con tratamientos sostenibles

### 2.1 Principios básicos de los tratamientos alternativos

El sector vial produce el mayor nivel de gases de efecto invernadero, directamente, a través de la energía fósil utilizada en minería, transporte y pavimentación e indirectamente de las emisiones provenientes de los vehículos. De hecho, el aumento constante del número de vehículos de carretera, y por tanto del tráfico, genera un aumento sustancial de la contaminación y las perturbaciones acústicas (Chavarro y Molina, 2015).

Además, al sector de la construcción de carreteras plantea grandes retos como una producción, construcción y por supuesto mantenimiento más baratos y mejores, Como el resto de sectores, el sector de la construcción de carreteras necesita enfrentar el desafío de la sustentabilidad, en la medida que las materias primas escasean y las leyes medioambientales son cada vez más estrictas en cuanto a contaminación atmosférica y perturbaciones acústicas.

La sostenibilidad es la capacidad de satisfacer nuestras necesidades sin comprometer la capacidad de las próximas generaciones para satisfacer las suyas. Este concepto integra los aspectos económicos, sociales y medioambientales. La sostenibilidad también se puede definir como una forma de utilizar un recurso para que este último no se agote o se dañe permanentemente (Santos y Luna, 2012).

Las razones por las cuales es necesaria la sostenibilidad, son bastante claras: la población en general está aumentando (para 2050, la ONU predice que la población mundial alcanzará los 9,7 mil millones) y la cantidad de recursos naturales como el petróleo crudo, los agregados o el núcleo de hierro es finita. En este sentido, parece todo un desafío alcanzar la sostenibilidad en la construcción de carreteras, ya que esta última, por la naturaleza de su actividad, genera mucha energía y consume muchos recursos fósiles.

Como parte de los esfuerzos desarrollados para alcanzar la sostenibilidad se desarrollaron conceptos como las autopistas verdes o sostenibles, el cual es un sistema de carreteras que limitan al mínimo su impacto en el medio ambiente a través de diferentes prácticas sostenibles. El objetivo es maximizar la vida útil de una carretera al tiempo que se restringen sus emisiones. Entre las diferentes técnicas constructivas, encontramos el uso de materiales reciclados, el establecimiento de una gestión eco sistémica, la implementación de acciones de reducción de energía o sistemas de recuperación de aguas pluviales (Caro y Caicedo, 2017).

En Europa, el Programa Europeo de Evaluación de Carreteras (EuroRAP) tiene como objetivo, a través de una evaluación constante de los riesgos viales, construir un sistema vial más seguro y reducir el número de muertes en la vía. En 2010, la Road Safety Foundation (organización benéfica del Reino Unido) publicó los resultados de EuroRAP Star Rating en el Reino Unido para demostrar la eficiencia de un diseño y trazado de carreteras bien pensados en la protección de los usuarios de la carretera. Según los resultados de la clasificación por estrellas EuroRAP de las carreteras principales de Inglaterra, la mitad de las autopistas tienen una

clasificación de 4 estrellas. Este es un ejemplo de cómo se puede implementar la sostenibilidad en un contexto de construcción de carreteras (Lindov, et. al, 2012).

Estados Unidos también está muy comprometido a la hora de implementar acciones “verdes” en el sector vial. De hecho, la mayoría de los sistemas de calificación de carreteras verdes del mercado han sido iniciados por EE. UU. Algunos tienen orígenes académicos, mientras que otros provienen de departamentos de transporte locales. Entre esos sistemas de clasificación, podemos encontrar Greenroads (Universidad de Washington), GreenLITES (Estado de Nueva York), I-LAST (Estado de Illinois), INVEST (Administración Federal de Carreteras), STEED. Este último, cuyo acrónimo significa Ingeniería de Transporte Sostenible y Environmental Design, ha sido iniciado por HW Lochner, que proporciona servicios de ingeniería civil y estructural, ambientales y de construcción para proyectos de transporte en los EE. UU (Chavarro y Molina, 2015).

La sostenibilidad también se puede alcanzar mediante el uso de materiales reciclados (como el hormigón triturado, por ejemplo), lo que implica una reducción en el consumo de energía necesaria para importar nuevos materiales además de los obvios beneficios del uso de materiales reciclados.

Entre los materiales reciclados y renovables se pueden encontrar:

Los componentes de materiales reciclados (RMC), que se generan a partir de subproductos industriales, pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y ser realmente rentables.

- Pavimentos asfálticos recuperados (RAP)
- Agregado de hormigón reciclado (RCA)
- Productos de combustión de carbón (CCP), derivados de la combustión del carbón en plantas de carbón (cenizas volantes, escorias de calderas...).
- Concreto ecológico (EFC), que minimiza el uso de cemento Portland (el tipo de cemento más común utilizado en todo el mundo).
- Micro algas: utilizadas por los científicos para producir asfalto y, por tanto, para crear una alternativa al petróleo. Se mezclan con resinas para mejorar sus propiedades viscosas.
- Nuevo material de superficie: el material a base de asfalto está siendo reemplazado por carreteras de resina orgánica ecológicas como Eco-Pave.
- Puzolanas, rocas volcánicas a partir de las cuales se producía el cemento antes de la llegada del cemento Portland y que pueden sustituir al cemento. (Lindov, et. al, 2012).

Aparte de los materiales reciclados, existen otras prácticas sostenibles como el uso de:

- Materias locales
- Pavimento de larga duración

- Bioswales (elementos del paisaje diseñados para limpiar el agua de
- escorrentía superficial de la hendidura y la contaminación) en la gestión de aguas pluviales LID (Low Impact Development)
- Caucho asfáltico de mezcla terminal
- Diseño de pavimentos mediante pavimentos perpetuos. (Lindov, et. al, 2012).

Otras prácticas incluyen:

- Reciclaje de escombros in situ
- Capacitar a los trabajadores de la construcción de carreteras para identificar los posibles problemas ambientales y, por lo tanto, las mejores prácticas a adoptar.
- Disminuir el consumo de energía de combustibles fósiles por equipos de construcción no viales.
- Usar medidas de control de polvo
- Uso del diseño de carreteras para lograr ahorros de energía, especialmente a través de la mitigación de la congestión (con señales de tráfico o ensanchando los arcenes en caso de una emergencia): disminuir la congestión de la carretera reduce la energía consumida y las emisiones liberadas por los vehículos. (Lindov, et. al, 2012).

## **2.2 Alternativas de tratamientos**

El mantenimiento consiste en conservar la carretera en buenas condiciones y prolongar la vida útil de la carretera mediante la reparación constante de problemas menores cuando aparecen.

El mantenimiento de carreteras es un trabajo de rutina que se realiza para mantener el pavimento, bordillos y otras instalaciones proporcionadas a los usuarios de la carretera, lo más cerca posible de sus condiciones de construcción en condiciones normales de tráfico y fuerzas de la naturaleza. El mantenimiento es esencial para obtener un servicio óptimo de la estructura del pavimento durante su período de vida (Ullidtz et al, 2010).

Todos los pavimentos requieren mantenimiento ya que están sujetos a los efectos del tráfico y medioambientales. El mantenimiento ayuda a preservar la superficie del pavimento y evita la rehabilitación prematura. Las carreteras no selladas se deterioran a un ritmo más rápido en comparación con las carreteras selladas y, por lo tanto, necesitan mayor atención. También es necesario prestar especial atención al mantenimiento del perfil transversal (para un drenaje adecuado de la superficie) y la reparación de los baches. Los requisitos de mantenimiento también dependen del tráfico, el terreno, el tipo de suelo, etc. (Ullidtz et al, 2010).

### ***2.2.1 Mantenimiento Vial***

El Mantenimiento vial, es el conjunto de actividades que se realiza para conservar en buen estado las condiciones físicas de la carretera y preservar el capital invertido en la rehabilitación y el mejoramiento, incluyendo las obras complementarias y conexas. Entre los

objetivos del mantenimiento vial, está la preservación de las inversiones efectuadas en las labores de construcción o rehabilitación, asegurando la transitabilidad permanente, de modo cómodo y seguro; reduciendo los costos de operación y mantenimiento de los vehículos usuarios de la vía (Cárdenas, Gaviria y Meléndez, 2005).

El objetivo básico del mantenimiento de carreteras está implícito en la propia palabra, se hace para garantizar que la carretera que se ha construido o mejorado se mantenga en la medida de lo posible en su estado original. Todas las carreteras requieren mantenimiento, ya que están sujetas al tráfico y las fuerzas del clima, incluso con la más alta calidad de construcción posible, el mantenimiento es esencial para obtener un servicio óptimo de la estructura de la carretera durante su período de vida. Al aplicar el mantenimiento preventivo, se puede frenar el deterioro de la vía y todos sus componentes y así posponer la necesidad de costosas inversiones en rehabilitación (Cárdenas, Gaviria y Meléndez, 2005).

Los requisitos de mantenimiento dependen de una serie de factores externos, como el tráfico, el terreno, los tipos de suelo y el clima. La necesidad de mantenimiento también está muy determinada por los diseños técnicos originales aplicados durante la construcción de la carretera, y la calidad de las obras realizadas durante las obras de construcción. Dependiendo de estos parámetros, es posible idear soluciones de mantenimiento y los correspondientes sistemas de gestión que optimizan los costes y esfuerzos de mantenimiento (Cárdenas, Gaviria y Meléndez, 2005).

Las vías terciarias constituyen la mayoría de los caminos de la red nacional en la mayoría de los países, normalmente atienden a un volumen de tráfico limitado y, por lo tanto, requieren diseños técnicos relativamente poco sofisticados. Sin embargo, debido a su gran número y amplia distribución geográfica, crean desafíos muy distintos para su gestión y operación. Independientemente de los diseños técnicos que se elijan, todas las carreteras, desde las principales carreteras hasta las carreteras locales de grava, requieren un mantenimiento regular y oportuno para garantizar una vida útil razonable de la inversión en construcción (Ullidtz et al, 2010).

Es importante hacer una distinción clara entre trabajos de mantenimiento y reparación. El mantenimiento adecuado está claramente vinculado al tiempo y, para ser eficiente, se lleva a cabo antes de que se produzcan daños importantes. Se trata de actividades relacionadas con la supervisión y seguimiento de los activos viales, incluso cuando aún se encuentran en buenas condiciones. También requiere que las autoridades viales sean lo suficientemente receptivas y capaces de tomar medidas cuando sea necesario, a diferencia de una respuesta en términos de reparación de la carretera cuando finalmente se ha cortado el acceso (Ullidtz et al, 2010).

El mantenimiento oportuno y regular requiere asegurar fondos suficientes antes de que las reparaciones y el mantenimiento se conviertan en un problema urgente. La forma más eficaz de mantenimiento se logra cuando una organización es capaz y está preparada para llevar a cabo las intervenciones adecuadas en una etapa temprana de deterioro y así limitar el alcance de los daños. Esto implica que la autoridad responsable cuente con los recursos humanos y financieros

necesarios para gestionar eficazmente todas las facetas de las obras de mantenimiento (Ullidtz et al, 2010).

**2.2.1.1 Clasificación del mantenimiento** La organización eficaz del mantenimiento se basa en el concepto de control de daños, con intervenciones oportunas basadas en inspecciones periódicas de la red de carreteras, las obras se planifican y ejecutan en una etapa temprana para contrarrestar los efectos perjudiciales del tráfico y el clima. Una parte central de las obras de mantenimiento de carreteras es sacar el agua de la estructura de la carretera de la forma más rápida y eficiente posible. Las medidas efectivas contra los efectos adversos deben instalarse en una etapa temprana durante el diseño original y la construcción de la carretera (Pradena y Echaveguren, 2008).

Una de las funciones principales de las obras de mantenimiento es garantizar que el sistema de drenaje siga funcionando con eficacia. Las actividades de mantenimiento se clasifican comúnmente en dos grupos distintos. Las obras fuera de la calzada están relacionadas principalmente con el mantenimiento del sistema de drenaje y la detención de cualquier daño a los componentes de la carretera fuera de la superficie de la carretera. Esto significa que los taludes laterales, todos los desagües y estructuras de desagües transversales se mantienen en buenas condiciones que permiten la escorrentía libre pero controlada del agua fuera de la carretera (Pradena y Echaveguren, 2008).

El segundo grupo de actividades de mantenimiento se relaciona con la reparación de la superficie de la carretera. Este trabajo consiste principalmente en mantener una buena superficie

de rodadura en la calzada, libre de obstrucciones y desperfectos y con la caída transversal necesaria para asegurar un correcto drenaje de la superficie. En términos de asegurar una larga vida útil de los caminos rurales, el tipo de mantenimiento más importante está relacionado con la protección del sistema de drenaje, la mayor parte del cual se encuentra fuera de la calzada. En las carreteras, donde los volúmenes de tráfico son más intensos, también se utiliza una cantidad sustancial de recursos para mantener la superficie de la carretera. En comparación con las carreteras principales, las vías terciarias reciben bajos niveles de tráfico y las obras en la superficie de las carreteras constituyen una proporción menor del mantenimiento requerido. Para estas vías las prioridades de mantenimiento están claramente vinculadas a la provisión y mantenimiento del sistema de drenaje (Pradena y Echaveguren, 2008).

**2.2.1.1.1      *Mantenimiento de Rutina*** El mantenimiento de rutina es una actividad recurrente. La sincronización cuidadosa de los insumos de trabajo forma una parte importante de un programa de mantenimiento eficiente. El objetivo primordial a la hora de programar las obras de mantenimiento es conseguir que las obras se realicen como medidas preventivas, en una fase temprana cuando el deterioro y los daños viales aún son limitados. Por tanto, las obras se programan en intervalos estratégicos cuando se espera que la necesidad de actuación sea imprescindible. Por esta razón, el momento en que se realizan los trabajos de mantenimiento regulares o de rutina suele estar relacionado con la época del año en que se producen las lluvias (Barajas y Buitrago, 2017).

Las actividades de mantenimiento más habituales son:

- Control de erosión en arcenes y pendientes;
- Limpiar los desagües para permitir el paso libre del agua;
- Despejar alcantarillas y otras vías fluviales;
- Reparaciones menores a alcantarillas y estructuras de contención;
- Reparar y reemplazar las marcas de socavación;
- Reparar, rellenar y compactar baches y surcos;
- Desbroce de césped y arbustos;
- Reparar las señales de tráfico.

El mantenimiento de rutina de las vías terciarias son una actividad muy dispersa que requiere pequeñas aportaciones de recursos en un gran número de ubicaciones geográficamente dispersas. Por esta razón, esta operación es muy adecuada para métodos de trabajo basados en la mano de obra, por lo que depende en gran medida solo de los recursos disponibles localmente (Barajas y Buitrago, 2017).

**2.2.1.1.2      *Mantenimiento de Periódico*** Además del mantenimiento de rutina que se lleva a cabo cada año, la carretera necesitará una revisión más extensa después de un cierto número de años. Este mantenimiento periódico implica actividades más completas y costosas, como remodelación de la superficie de la carretera, repavimentación y reparación o reconstrucción importante de estructuras de drenaje transversal. Dependiendo de la calidad de la carretera y del nivel de desgaste, los trabajos de mantenimiento periódico se programarían a intervalos de 3 a 7 años (Barajas y Buitrago, 2017). El mantenimiento periódico incluye actividades como:

- Reparaciones importantes de estructuras;
- Remodelación antes de la repavimentación;
- Reenvío / repavimentación de toda la carretera;
- Localizar la mejora / rehabilitación de las secciones defectuosas;
- Instalación de nuevas alcantarillas;
- Almacenamiento de grava para su uso durante el mantenimiento de rutina.

**2.2.1.1.3      *Mantenimiento de emergencia*** Además de las actividades de mantenimiento programadas, las agencias de obras viales deben tomar medidas para la ocurrencia de daños imprevistos en la red vial. Esto podría ser causado por inundaciones o lluvias excesivas, deslizamientos de tierra u otras condiciones anormales. Por definición, el mantenimiento de emergencia no se puede pronosticar y, por lo tanto, no figura en los programas de trabajo anuales. Sin embargo, es posible reservar una cierta cantidad de fondos para este propósito. Igualmente, las autoridades viales deben establecer planes de contingencia ante tales incidentes, lo que les permitirá reaccionar oportunamente, con el fin de reabrir el acceso en la vía y limitar la extensión de los daños (Barajas y Buitrago, 2017).

El mantenimiento de emergencia incluye actividades como:

- reparación o reconstrucción de estructuras de drenaje transversal dañadas debido a inundaciones o vehículos con sobrepeso,

- reparación o reconstrucción de tramos de carreteras dañados debido a deslaves, erosión o inundaciones,
- reparación o reconstrucción de daños a la protección contra la erosión, resultantes de flujos excesivos de agua o deslizamientos de tierra,
- limpieza de deslizamientos de tierra, árboles o rocas de la calzada de la carretera

La industria de la construcción es una de las industrias de más rápido crecimiento en todo el mundo. En esta industria, el concreto juega un papel inherente y es el material de construcción artificial más utilizado. El concreto seguirá siendo el material de construcción líder en todo el mundo debido a sus propiedades versátiles y ventajosas, como buena resistencia a la compresión, alta capacidad de moldeado, plástico y maleable en estado fresco, además de ser duradero, impermeable y resistente al fuego cuando está endurecido (Rodríguez y Fernández, 2010).

El concreto tiene aplicaciones avanzadas, técnicas de diseño y construcción, como la construcción de viviendas, puentes, presas, pavimentos, estadios, estructuras de contención, aeropuertos y rascacielos. Sin embargo, el concreto tiene algunas propiedades indeseables como ser débil en tensión, fragilidad, menor resistencia al agrietamiento, baja resistencia al impacto y un gran peso específico, por lo que en ocasiones es necesario mejorar las propiedades de este (Garcia Diaz, 2019).

El cemento Portland es el material aglutinante convencional en el concreto y es el ingrediente más caro. La fabricación de cemento es un proceso de alto consumo energético, que implica un consumo intensivo de combustible para la fabricación de clínker y produce la emisión de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en grandes cantidades y otros trazadores como el metano (CH<sub>4</sub>), las principales causas del calentamiento global. En realidad, el proceso de producción de cemento produce alrededor de una tonelada de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de cemento producida y, por lo tanto, es responsable de alrededor del 5% al 8% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> (Castaldelli, et al., 2013). Este problema ambiental probablemente aumentará debido a la demanda exponencial de cemento Portland. Para 2050, se espera que la demanda aumente en un 200% desde los niveles de 2010, alcanzando los 6000 millones de toneladas / año (Restrepo, et al., 2014).

En este contexto, durante la Cumbre de Copenhague celebrada en 2009, diferentes países coincidieron en la necesidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> para 2020. Estados Unidos, por ejemplo, hizo un pacto para reducir sus emisiones totales en aproximadamente un 17% a partir de 2010 con respecto a los niveles de 2005 (Castaldelli, et al., 2013). Por lo tanto, varias

actividades de investigación se han dirigido a la sustitución parcial o total del cemento Portland por diversos materiales, incluidos los subproductos agrícolas, industriales y agroindustriales en la producción de concreto, sin comprometer la calidad del mismo (Azhagarsamy & Jaiganesan, 2016). La utilización de dichos materiales no solo conserva el medio ambiente, sino que también reduce el costo de construcción y minimiza la emisión de desechos.

Ahora bien, desde hace mucho tiempo se reconoce que los aditivos son componentes importantes del concreto que se utilizan para mejorar su rendimiento. El uso original de aditivos en mezclas cementosas no está bien documentado. Se cree que la introducción de algunos de estos materiales puede haber sido parte de rituales u otras ceremonias. Se sabe que el cemento mezclado con materia orgánica se aplicó como una capa superficial con fines de resistencia al agua o tintes. Los materiales utilizados en el concreto y la mampostería tempranos incluían leche y manteca de cerdo por los romanos; huevos durante la edad media en Europa; pasta de arroz glutinoso pulido, laca, aceite de tung, melaza y extractos de olmo empapado en agua y plátanos hervidos por los chinos; y en Mesoamérica y Perú, jugo de cactus y látex de plantas de caucho (Cubas Gálvez, 2019).

El propósito de estos materiales es ampliamente desconocido. Se sabe que los mayas usaban extractos de corteza y otras sustancias como retardadores de fraguado para mantener el estuco viable durante un largo período de tiempo. Más recientemente, se han utilizado aditivos químicos para ayudar a los productores de concreto a cumplir con los requisitos de sostenibilidad que son necesarios para la construcción moderna. Para el concreto, estos requisitos pueden estar relacionados con ciclos de vida extendidos, uso de materiales reciclados, manejo de aguas

pluviales y uso reducido de energía. Los aditivos químicos se utilizan para facilitar el mayor uso de materiales cementosos suplementarios, reducir la permeabilidad y mejorar la durabilidad a largo plazo del concreto.

Los aditivos se han utilizado en el concreto y mortero desde al menos el Imperio Romano. Los romanos encontraron que ciertos materiales como la leche, la sangre y la manteca de cerdo, así como los materiales orgánicos como la melaza, los huevos y la pasta de arroz permiten una mayor trabajabilidad en las mezclas cementosas. Si bien la primera patente para el cloruro de calcio en el concreto se remonta a 1873 en Alemania, la tecnología de aditivos moderna comenzó con agentes incorporadores de aire básicos, retardadores, aceleradores y reductores de agua en la década de 1930 en América del Norte. Sin embargo, no fue hasta la década de 1950 que este tipo de productos comenzaron a tener un uso generalizado en el concreto. ASTM publicó por primera vez su estándar C494 en 1962, ahora titulado "Estándar histórico: Especificación estándar para aditivos químicos para concreto". Que establecen criterios de rendimiento para cinco tipos de aditivos: A, B, C, D y E. Los tipos F y G, aditivos reductores de agua de alto rango, no se agregaron a la norma C494 hasta 1980. En 1962, solo 36 estados requerían o permitían el uso de aditivos en concreto (Gelardi, et. al., 2016).

Gelardi, et. al. (2016) señalaron que los aditivos abarcan un campo muy amplio en el área de la construcción. Los reductores de agua generalmente denominados plastificantes, retardadores y superplastificantes son de interés reciente. Se desarrollaron específicamente en Japón y Alemania alrededor de 1970. Más tarde, se hicieron populares en EE. UU. Y Europa, incluso en Oriente Medio. Hoy en día, los aditivos son componentes importantes y necesarios

para la tecnología moderna del concreto y las propiedades de este pueden mejorarse tanto en estado fresco como endurecido.

### **Capítulo 3. Generalidades de los pavimentos y medidas de rehabilitación**

La principal diferencia estructural entre un pavimento rígido y flexible es la forma en que cada tipo de pavimento distribuye las cargas de tráfico sobre el subnivel. Un pavimento rígido tiene una rigidez muy alta y distribuye las cargas en un área relativamente amplia de subrasante: una parte importante de la capacidad estructural es aportada por la propia losa.

La capacidad de carga de un verdadero pavimento flexible se deriva de las características de distribución de carga de un sistema en capas (Yoder y Witczak, 1975).

#### **3.1 Pavimentos Flexibles**

Una estructura de pavimento flexible se compone típicamente de varias capas de material con materiales de mejor calidad generalmente colocados en la parte superior donde la intensidad de la tensión de las cargas de tráfico es alta y materiales de menor calidad en la parte inferior donde la intensidad de la tensión es baja. Los pavimentos flexibles se pueden analizar como un sistema multicapa bajo carga.

Una estructura de pavimento flexible típica consiste en el curso de superficie y los cursos de base y subbase subyacentes. Cada una de estas capas contribuye al soporte estructural e, idealmente, mantiene un drenaje adecuado.

Cuando se utiliza asfalto de mezcla en caliente (HMA) como curso de la superficie, generalmente es la capa más rígida (medida por módulo elástico) y puede contribuir más

(dependiendo del grosor) a la resistencia del pavimento. Las capas subyacentes son menos rígidas, pero siguen siendo importantes para la resistencia del pavimento, así como para el drenaje y la protección contra las heladas.

Las secciones HMA más gruesas y/o las secciones con bases estabilizadas se comportan como un sistema semirrígido bajo carga de tráfico, por lo que las cargas se distribuyen en mayor grado sobre la subrasante natural que los pavimentos flexibles convencionales. Consulte "Características del pavimento rígido y flexible" más arriba.

Cuando se utiliza una capa de sellado como curso de la superficie, la base generalmente es la capa que más contribuye a la rigidez estructural. Un diseño estructural típico da como resultado una serie de capas que disminuyen gradualmente en calidad del material con la profundidad.

### **3.2 Pavimentos Rígidos**

Una estructura de pavimento rígido se compone de un curso de superficie de concreto de cemento hidráulico y cursos de base y subbase subyacentes (si se utilizan). Otro término comúnmente utilizado es pavimento de concreto de cemento Portland (PCC), aunque con los aditivos puzolánicos de hoy, los cementos ya no pueden clasificarse técnicamente como "Portland".

El curso de la superficie (losa de hormigón) es la capa más rígida y proporciona la mayor parte de la resistencia. Las capas de base o subbase son órdenes de magnitud menos rígidas que

la superficie de PCC, pero aun así hacen contribuciones importantes a la uniformidad del soporte, el drenaje del pavimento y la protección contra las heladas, y proporcionan una plataforma de trabajo para equipos de construcción.

Los pavimentos rígidos son sustancialmente "más rígidos" que los pavimentos flexibles debido al alto módulo de elasticidad del material PCC, lo que resulta en deflexiones muy bajas bajo carga. Los pavimentos rígidos pueden ser analizados por la teoría de placas. Los pavimentos rígidos pueden tener acero de refuerzo, que generalmente se usa para manejar tensiones térmicas para reducir o eliminar las juntas y mantener anchos de grietas estrechos.

### **3.3 selección del tipo de pavimento**

Seleccionar un tipo de pavimento es una decisión importante. Al igual que otros aspectos del diseño de pavimentos, la Guía de la Asociación Americana de funcionarios de Carreteras y Transporte Estatales (AASHTO) de 1993 afirma: "La selección del tipo de pavimento no es una ciencia exacta, sino una en la que el ingeniero de carreteras debe hacer un juicio sobre muchos factores variables..."

#### ***3.3.1 Factores de diseño***

Los principales factores para considerar en el proceso de selección son:

- Tráfico

- Características de los suelos
- Tiempo
- Consideraciones de construcción
- Oportunidades de reciclaje
- Comparación de costos.

Los factores secundarios para considerar en el proceso de selección son:

- Actuación de pavimentos similares en la zona
- Pavimentos adyacentes existentes
- Conservación de materiales y energía
- Disponibilidad de materiales locales o capacidades de contratistas
- Seguridad vial
- Incorporación de características experimentales
- Estimulación de la competencia
- Preferencia municipal, participando de la preferencia del gobierno local.

Los factores de decisión considerados para el tipo de diseño del pavimento se incluirán en el informe sobre el diseño del pavimento.

### ***3.3.2 Análisis de costos del ciclo de vida (LCCA)***

LCCA es un análisis económico de ingeniería que permite a los ingenieros cuantificar los costos diferenciales de las opciones de inversión alternativas para un proyecto determinado.

LCCA se puede utilizar para comparar tipos de pavimento alternativos (flexible versus rígido) en proyectos de nueva construcción y proyectos de rehabilitación. LCCA considera todos los gastos de la agencia a lo largo de la vida útil de la instalación, no solo la inversión inicial, y permite comparar los costos de las opciones con diferentes vidas de diseño y costos de usuario potencialmente diferentes para ser comparados sobre una base equivalente.

LCCA es solo uno de los muchos procesos para seleccionar un tipo de pavimento. La fiabilidad de la salida de cualquier LCCA es una función de la fiabilidad de los datos de entrada y dependerá en gran medida del tipo seleccionado y la frecuencia de las actividades de construcción posteriores a la inicial que prolongan la vida útil del pavimento hasta el final del período de análisis seleccionado. Puede ser beneficioso evaluar los costos de los usuarios por separado de los costos de la agencia cuando se analizan diferentes opciones estructurales.

### **3.4 Rehabilitación de pavimentos flexibles**

El desarrollo de un diseño de rehabilitación generalmente requiere una investigación exhaustiva sobre la condición de la estructura del pavimento existente, el historial de rendimiento y las pruebas de laboratorio de los materiales para establecer la idoneidad de los materiales existentes y propuestos para su uso en el diseño de rehabilitación. La investigación de campo requerirá un estudio de deflexión, un estudio de drenaje y tal vez estudios adicionales de pruebas no destructivas (END), como radar de penetración en el suelo (GPR), penetrómetro de cono

dinámico (DCP) y herramientas sísmicas. El examen de los datos de peligro y conducción del Sistema de Información de Gestión de Pavimentos (PMIS) de varios años mostrará problemas relacionados con el rendimiento. Una vez que se realizan estos estudios preliminares, se pueden establecer ubicaciones para el muestreo de materiales. Además, para los proyectos en los que se está considerando la recuperación a profundidad completa, se deben tomar muestras de la estructura a intervalos que no excedan las 0,5 millas. Estas muestras se evaluarán en el laboratorio para verificar las conclusiones de la encuesta de campo y establecer las propiedades básicas necesarias para cuantificar la susceptibilidad a la humedad, la compatibilidad con estabilizadores, los requisitos de mezcla, etc.

La estrategia de rehabilitación preferida debe considerar:

- rentabilidad,
- reparación de los problemas específicos del pavimento existente,
- prevención de problemas futuros, y
- cumpliendo con todas las limitaciones existentes del proyecto.

### ***3.4.1 Reciclaje de superficies in situ***

#### **3.4.1.1 Reciclaje en caliente**

Esta técnica de rehabilitación está destinada a abordar la falla de la superficie de concreto asfáltico y los problemas de textura solamente; por lo tanto, las capas base subyacentes deben

ofrecer un soporte adecuado tanto para el tren de pavimentación HIR como para el tráfico futuro proyectado. Los procedimientos están cubiertos por el artículo 358 de las Especificaciones Estándar.

El proceso HIR implica reciclar la capa superficial de asfalto existente calentando, escarificando y agregando un agente de reciclaje. Hay tres procesos básicos de HIR:

- Reciclaje: calentamiento, escarificación, rejuvenecimiento, nivelación, reperfilamiento y compactación.
- Remezcla: calentamiento, escarificación, rejuvenecimiento, mezcla (adición de agregado virgen o nueva mezcla en caliente), nivelación, reperfilado y compactación.
- Repavimentación: combina el reciclaje o la remezcla con una superposición de HMA nueva colocada inmediatamente después de la mezcla reciclada. La nueva capa HMA se coloca directamente sobre la capa reciclada, y ambas se compactan simultáneamente.

Un tren especializado se utiliza para calentar la superficie del pavimento a 200 - 350 ° F, lo que permite que la parte superior de 1 a 2 pulgadas de material se escarifique, rejuvenezca, remezcle y reemplace en un proceso in situ de varios pasos. Se pueden realizar correcciones menores de pendiente cruzada y gradación agregada. También se puede agregar mezcla en caliente virgen para corregir las deficiencias del pavimento asfáltico reciclado (RAP) como en el caso del proceso de remezcla. El corte de la superficie existente del pavimento de hormigón

asfáltico (ACP) es necesario para determinar las propiedades del material del pavimento asfáltico existente. Esto permitirá la evaluación de cualquier ajuste necesario a la gradación de agregados para desarrollar los vacíos requeridos en agregados minerales (VMA) y la selección del aglutinante de cemento asfáltico (AC) apropiado.

#### **3.4.1.2 Reciclaje en frío**

Al igual que con el proceso de calor en el lugar, esta técnica de rehabilitación está destinada a abordar la angustia dentro de la parte bituminosa de la estructura del pavimento, pero puede alcanzar una profundidad de 4 a 6 pulgadas. Por lo tanto, la base también debe ser sólida, con reparaciones realizadas en ubicaciones que han fallado o muestran potencial de falla. El proceso también involucra un tren especializado con una fresadora en frío, una unidad de trituración / criba y una unidad de mezcla que es capaz de recuperar el asfalto viejo, triturar (cribar y dimensionar) el RAP y mezclar el RAP con agregado virgen (si es necesario) y emulsión.

Más recientemente, el asfalto espumado se ha utilizado como agente aglutinante, reemplazando la emulsión en algunos trabajos en otros estados (Caltrans y otros). Se pueden usar otros aditivos, como la cal, las cenizas volantes y el cemento, para mejorar la susceptibilidad a la humedad y las propiedades de resistencia temprana. La extracción de muestras de la superficie ACP existente es necesaria para determinar las propiedades del material del pavimento asfáltico existente para diseñar adecuadamente las proporciones de agregado virgen, emulsión y rejuvenecedor, si es necesario. Los núcleos también se inspeccionan para detectar la presencia de

variaciones en las capas del pavimento, delaminaciones y si los vacíos están saturados. La industria no recomienda pavimentos que hayan sido surcados, muy parcheados o excesivamente sellados con astillas como buenos proyectos candidatos. Por lo general, se requerirá una capa de sellado o una superposición adicional después de un curado adecuado, ya que la mezcla reprocesada en frío tiene proporciones de vacío más altas y es más difícil de compactar que la mezcla en caliente. La aplicación de este procedimiento se ha abordado a través de especificaciones especiales.

### **3.5 Rehabilitación de pavimentos rígidos**

El pavimento rígido, si se diseña y construye correctamente, proporciona un excelente rendimiento a largo plazo con poco mantenimiento requerido. Sin embargo, por varias razones, se producen angustias y la reparación / rehabilitación se vuelve necesaria. En comparación con la reparación / rehabilitación del pavimento flexible, la reparación / rehabilitación del pavimento rígido cuesta más y, si no se hace correctamente, se desarrollarán problemas similares en las proximidades, y se requerirá reparación / rehabilitación adicional. El desarrollo de estrategias óptimas de reparación / rehabilitación requiere la comprensión de las causas y los mecanismos de la angustia. El número de tipos de socorro en el pavimento rígido es limitado y las causas se comprenden bastante bien. En este capítulo, se describen los tipos de peligro de pavimento que requieren estrategias específicas de reparación / rehabilitación junto con los procedimientos de reparación.

#### ***3.5.1 Principales tipos de fallos en pavimentos rígidos***

A partir de los recorridos realizados se identificaron 9 tipos de fallos en los pavimentos rígidos del municipio de Tibú que corresponden a:

- Desprendimiento articular
- Fallas
- Agregados Pulidos
- Agrietamiento por contracción
- Bombeo
- Ponche
- Agrietamiento lineal
- Agrietamientos de durabilidad
- Descanso de esquina

#### **Capítulo 4. Análisis de los aspectos técnicos de los tratamientos alternativos**

En el desarrollo de este capítulo se elaboró un documento a modo de informe respecto a los diferentes tipos de tratamientos alternativos que pueden ser usados en vías de bajo flujo vehicular, este informe corresponde al apéndice 1.

## Conclusiones

Son diversos los estudios e investigaciones sobre métodos y alternativas para la rehabilitación y mantenimiento de vías con bajo flujo vehicular, a través del aprovechamiento de recursos naturales y la implementación de nuevos materiales con características favorables para lograr un equilibrio económico, técnico y ambiental. Dichos avances surgen a raíz de la necesidad de desarrollar nuevos métodos de carácter sostenible que contribuyan a la reducción del impacto ambiental que el sector de la construcción genera. Entre ellos los más comunes está el reciclaje de pavimentos (RAP), el uso de pavimento natural como la Mapia, las mezclas en frío, las emulsiones asfálticas, Asfaltos espumados y el uso de aditivos y agentes cementantes.

Respecto a los pavimentos reciclados (RAP) permiten la construcción de estructuras de pavimento empleando materiales producto del fresado de pavimentos que normalmente serian desechados. En el caso de la Mapia, este es una mezcla de tipo natural a partir de la cual es posible realizar una explotación, elaboración, transporte, colocación y compactación de una o mas capas de mezcla asfáltica natural, en la cual es consumo energético e impacto ambiental es muy reducido. Las mezclas en frío por su parte tienen la ventaja de que se constituyen a partir de asfaltos líquidos que no recurren al calentamiento de los agregados, además es ideal para la pavimentación de vías con un bajo volumen de tránsito.

Las emulsiones asfálticas por otro lado al emplear ligantes fríos, evita los costos y consecuencias de utilizar ligantes que deben almacenarse y distribuirse en caliente, y en el caso de las emulsiones catiónicas se permite dar el servicio casi de inmediato. Y por último en el caso de los asfaltos espumados, se requiere de un reducido consumo energético en comparación de los

métodos convencionales de mezclas asfálticas en caliente, además de poseer una alta compatibilidad con un amplio rango de agregados.

Además de los tipos de tratamientos analizados y que fueron abordados en la guía, es importante resaltar que para conservar y mantener las condiciones de las vías es necesario desarrollar intervenciones de mantenimiento y rehabilitación, dependiendo del estado actual y las necesidades futuras de la vía. Es indispensable reconocer los elementos que constituyen y afectan la vía y la forma en que evoluciona su deterioro, en función de la repetición de las cargas de tránsito, el paso del tiempo y la acción del clima, puesto que el deterioro de las condiciones funcionales y estructurales de las vías, genera incrementos de los costos de operación vehicular. En este sentido, son diversos los métodos de construcción y mantenimiento vial que pueden brindar soluciones técnicas que alcancen una mayor durabilidad, con un menor costo inicial y una reducción del mantenimiento futuro para pavimentos en vías de bajos volúmenes de tránsito.

Finalmente, sea cual sea el tratamiento sostenible que se emplee para el mantenimiento y reparación de vías, existen un conjunto de características y recomendaciones particulares que deben ser seguidas para asegurar que las obras ejecutadas se mantengan en el tiempo, y las vías puedan mantener unas condiciones adecuadas.

## Referencias

- Abdel Aziz, A. M. (2007). Successful delivery of public-private partnerships for infrastructure development. *Journal of construction engineering and management*, 133(12), 918-931.
- Afrin, H. (2017). A review on different types soil stabilization techniques. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 3(2), 19-24.
- Amu, O. O., Bamisaye, O. F., & Komolafe, I. A. (2011). The suitability and lime stabilization requirement of some lateritic soil samples as pavement. *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol*, 2(1), 29-46.
- Angulo, C., Benavidez, J. Carrizosa, M. Et al. (2012). *Comision de infraestructura. Informe*. Bogota, Colombia.
- Asgari, M. R., Dezfuli, A. B., & Bayat, M. (2015). Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(3), 1439-1452.
- Barajas, E., y Buitrago, B. (2017). Análisis comparativo del sistema de gestión de los pavimentos o mantenimiento vial de la ciudad de Bogotá con la ciudad de sao paulo. (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15235/1/AN%C3%81LISIS%20COMPARATIVO%20DEL%20SISTEMA%20DE%20GESTI%C3%93N%20DE%20LOS%20PAVIMENTOS%20O%20MANTENIMIENTO%20VIAL%20DE%20LA%20CIUDAD%20.pdf>
- Beato, P. (2007). *Road Concessions: Lessons Learned from the Experience of Four Countries*. USA: Sustainable Development Department
- Benavides J. (2010), Reformas Para Atraer La Inversión Privada En Infraestructura Vial en Colombia 2010- 2014: Propuestas De Política Pública. *Fedesarrollo*, 1, 279-320.

- Bitran, E., Nieto-Parra, S., & Robledo, J. S. (2013). Opening the black box of contract renegotiations. *OECD Development Centre Working Papers*, 1(317), 2-45  
<https://doi.org/10.1787/18151949>
- Calderón, C. y Servén, L. (2010). The Effects of Infrastructure Development on Growth and Income Distribution, Central Bank of Chile. *Working papers*, 270(1), 115-125.
- Cámara Colombiana de la Infraestructura (2010). Una Política Pública: Maduración de Proyectos, Matriz de Riesgos, Buenas Prácticas Contractuales. Bogotá, Colombia: CCI.
- Cárdenas, M., Gaviria, A., & Meléndez, M. (2005). La infraestructura de transporte en Colombia. *Fedesarrollo*.
- Caro, S., & Caicedo, B. (2017). Tecnologías para vías terciarias: perspectivas y experiencias desde la academia. *Revista de ingeniería*, 45(3), 12-21.
- Castelló, J. D. B., Justo, J. L., & Neyra, P. D. (2016). Estudio del comportamiento de los suelos arcillosos tratados con cal ante cambios de humedad. In *Reconocimiento, tratamiento y mejora del terreno: 10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica: A Coruña*, 19, 20 y 21 de octubre de 2016 (pp. 641-650). Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica.
- Chavarro Acuña, W. E., & Molina Pinzón, Y. C. (2015). *Evaluación de alternativas de pavimentación para vías de bajos volúmenes de tránsito* (Tesis de Especialización) Universidad de Católica de Colombia.
- Cherian, C., & Arnepalli, D. N. (2015). A critical appraisal of the role of clay mineralogy in lime stabilization. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(1), 8.
- Daheshpour, K., & Herbert, S. (2018). *Infrastructure project failures in Colombia*.

- Dash, S. K., & Hussain, M. (2012). Lime stabilization of soils: reappraisal. *Journal of materials in civil engineering*, 24(6), 707-714.
- DNP. (2016). *Lineamientos de Política para la gestión de la Red Terciaria (Documento CONPES 3857)*. Bogotá D.C.: Departamento Nacional de Planeación. Recuperado de: [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Economicos/3857\\_RedTerciaria.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Economicos/3857_RedTerciaria.pdf)
- Du, S. (2014). Interaction mechanism of cement and asphalt emulsion in asphalt emulsion mixtures. *Materials and structures*, 47(7), 1149-1159.
- Echevarría, M. J. M. (2012). Estudio del procedimiento de compactación en laboratorio para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa. Universidad de Granada.
- Escamilla, G. (2002). *Análisis del tiempo óptimo de reacción en la estabilización de un suelo arcilloso tratado con cal* (Tesis de Pregrado). Universidad Autónoma de Querétaro. Recuperado de: <http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/4987/1/RI004432.pdf>
- Estabragh, A. R., Rafatjo, H., & Javadi, A. A. (2014). Treatment of an expansive soil by mechanical and chemical techniques. *Geosynthetics International*, 21(3), 233-243.
- Ferreya Pereyra, J. C. (2014). Actividades de mantenimiento rutinario y periódico en una carretera del Perú. (Tesis de Maestría). Universidad de Piura. Lima, Perú. Recuperado de: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1996/MAS\\_ICIV-L\\_020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1996/MAS_ICIV-L_020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Figueroa, A. S., Flórez, C. F., León, M. P., Muñoz, É. E., Ojeda, B. J., Reyes, F. A., y Rodríguez, J. A. (2007). *Manual para el mantenimiento de la red vial secundaria (pavimentada y en afirmado)*. Bogotá D.C.: Ministerio de Transporte.
- Forcada, N., Alvarez, A. P., Love, P. E., & Edwards, D. J. (2017). Rework in urban renewal projects in Colombia. *Journal of Infrastructure Systems*, 23(2), 04016034.

- García Hernández, F., Delgado Alamilla, H., & Campos Hernández, D. E. (2018). Influencia de variables de diseño en las propiedades mecánicas de una base estabilizada con asfalto espumado. *Infraestructura Vial*, 20(35), 5-11.
- García, A. (2015). Determinación de la resistencia de la subrasante incorporando cal estructural en el suelo limo arcilloso del sector 14 Mollepampa de Cajamarca, 2015. (Tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte. Cajamarca, Perú. Recuperado de: <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/7327/Garc%C3%ADa%20Gonzales%20Anabel%C3%A9n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Imanbayev, Y., Ongarbayev, Y., Tileuberdi, Y., Krivtsov, E., Golovko, A., & Mansurov, Z. (2017). Cómo citar Buscar Thermogravimetric Study of Cracking Products of Natural Bitumens *Journal of the Mexican Chemical Society*, vol. 61, no. 4, 2017 Sociedad Química de México AC. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 61(4).
- Jaimés, J. P. (2014). *Análisis de la conservación de la red vial terciaria del departamento de Boyacá en la actualidad*. (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia. Bogotá.
- Lindov, O., Zolj, A., & Alikadic, A. (2012). Possibilities of Road Safety Assessment using EuroRaP Methodology on the Road Network in Urban Areas. *Suvremeni Promet-Modern Traffic*, 32(3-4).
- López, C., González, A., Thenoux, G., Sandoval, G., & Marcobal, J. (2019). Stabilized emulsions to produce warm asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1461-1472.
- Lopez, D. R. (2017). Mejoramiento de la carpeta asfáltica a base de escoria siderúrgica para pavimentos flexibles (mezcla asfáltica). (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador.

- Mallela, J., Quintus, H. V., & Smith, K. (2004). Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. *The National Lime Association*, 200, 1-40.
- Marcozzi, R. G. (2010). Nuevas tecnologías sustentables aplicadas a la pavimentación asfáltica: *Anales LEMIT*. 3(1) 3-16.
- Matallana Camacho, E. (2009). *Manual de Contratación de la Administración Pública, Reforma de la Ley 80*. Bogotá, Colombia: Universidad Externado de Colombia.
- Méndez, A. A. (2015). *Evaluación técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas*. (Tesis de Especialización). Universidad Militar Nueva Granada. Colombia.
- Miranda-Argüello, F., Aguiar-Moya, J. P., & Loría-Salazar, L. G. (2014). ESTABILIZACIÓN DE BASES MEDIANTE LA TÉCNICA DE ASFALTO ESPUMADO. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Mora, J. A. (2020). *Aprovechamiento de reciclado rap: para mejoramiento de las vías terciarias en Colombia*. (Tesis de Especialización). Universidad Católica. Colombia.
- Napaico, K. I. (2019). Aplicación del Índice de Rugosidad Internacional “IRI” en la Gestión De Conservación Vial Urbana. (Tesis de pregrado). Universidad Peruana Los Andes. Huancayo, Perú.
- Narváez, L. (2017). Vías terciarias: Motor del desarrollo económico rural. *Revista de ingeniería*, (45), 80-87.
- Osorno, H., & Osorno, L. (2010). Determinación de los requerimientos de cal. *Suelos ecuatoriales*, 41(1), 29-35.
- Pradena, M., y Echaveguren, T. (2008). Gestión de calidad en el Mantenimiento Vial basada en el principio de enfoque al cliente. *Revista de la Construcción*, 7(2), 102-108.

- Pedroza Villegas, Katherinne (2016). *Caracterización financiera de los contratos de concesiones viales en Colombia. Estudio de caso* (Tesis de maestría), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia.
- Perafán, W. J. (2013). Guía para el mantenimiento Rutinario de vías no pavimentadas. (Tesis de Especialización). Universidad de Medellín. Colombia. Recuperado de:  
<https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/163/Gu%C3%83%C2%ADa%20para%20el%20mantenimiento%20rutinario%20de%20v%C3%83%C2%ADas%20no%20pavimentadas.pdf?sequence=1>
- Quiroz Vargas, W. F. (2017). Comparación entre la estabilización de suelos con emulsión asfáltica, y la estabilización de suelos con asfalto y diésel para determinar cuál estabilización proporciona mayor densidad aparente y relación de soporte CBR (Tesis de Pregrado) Universidad Técnica de Ambato. Ecuador.
- Robinette, C., y Epps, J. (2010). Energy, emissions, material conservation, and prices associated with construction, rehabilitation, and material alternatives for flexible pavement. *Transportation research record*, 2179(1), 10-22.
- Ronald, M., & Luis, F. P. (2016). Asphalt emulsions formulation: State-of-the-art and dependency of formulation on emulsions properties. *Construction and Building Materials*, 123, 162-173.
- Sandoval, C., Cristancho, J. y Naranjo, O. (2012). Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. *Facultad de Ingeniería*, 21(32), 21-40.
- Santos, D. A. y Luna, R. A. (2012). *Asfaltos naturales: La "Mapia" y "Asfaltita" alternativas de construcción en obras de infraestructura vial en el contrato ruta del sol tramo 1*. (Tesis de especialización). Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga. Colombia.

Recuperado de: [https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2067/digital\\_24322.pdf?isAll owed=y&sequence=1](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2067/digital_24322.pdf?isAll owed=y&sequence=1)

Takamura, K., & James, A. (2015). Paving with asphalt emulsions. In *Advances in asphalt materials* (pp. 393-426). Woodhead Publishing.

Ulate-Castillo, A. (2017). *Estabilización de suelos y materiales granulares en caminos de bajo volumen de tránsito, empleando productos no tradicionales*. Universidad de Costa Rica.

Recuperado de:

<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/908/ESTABILIZACI%C3%93N%20DE%20SUELOS%20Y%20MATERIALES%20GRANULARES.pdf?sequence=1>

Ullidtz, P., Harvey, J., Basheer, I., Jones, D., Wu, R., Lea, J., & Lu, Q. (2010). CalME, a mechanistic–empirical program to analyze and design flexible pavement rehabilitation. *Transportation research record*, 2153(1), 143-152.

Valderrama, E. C. (2017). El rol de las vías terciarias en la construcción de un nuevo país. *Revista de ingeniería*, (45), 64-71.

Wettenhall, R. (2003). The rhetoric and reality of public-private partnerships. *Public organization review*, 3(1), 77-107.

Zamora Fandino, N., & Barrera Reyes, O. L. (2013). *Diagnóstico de la infraestructura vial actual en Colombia*. (Tesis de Pregrado) Universidad EAN, Colombia.

Zhao, H., Liu, J., Guo, J., Zhao, C., & Gong, B. W. (2015). Reexamination of lime stabilization mechanisms of expansive clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(1), 04014108.

## Apéndices

**Apéndice 1.** Análisis de los aspectos técnicos en la implementación de tratamientos alternativos para el desarrollo de obras de rehabilitación en vías de bajo flujo vehicular.