

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**ANÁLISIS DEL USO DEL RECICLADO CON ASFALTO ESPUMADO**  
**PARA LA REHABILITACION DE PAVIMENTOS EN ZONAS**  
**URBANAS**

**TESIS**  
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**  
**INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. LIMO PASTUSO, RICHARD FRANCO**

**Bach. NEIRA YEPEZ, CESAR JOSE ANTONIO**

**ASESOR: Dr. Ing. SUELDO MESONES, JAIME PÍO**

**LIMA - PERÚ**  
**2020**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mi padre, Richard y mi madre Roxana, mis abuelos Rosa y Asterio, a mis hermanos Sophia, Alba y Leonardo, familiares y amigos quienes me brindaron consejos, apoyo y conocimientos a lo largo de este camino que falta mucho por recorrer.

Richard Franco Limo Pastuso

A mi madre, Milagros, por ser el apoyo y el soporte para seguir aún en los momentos más difíciles. A mis tíos, mi abuela, mi papá, mis hermanos, amigos y todas aquellas personas especiales que han ayudado a hacer llevadero este trabajo con su ayuda y paciencia. Para todos ellos mi gratitud y aprecio.

Cesar José Antonio Neira Yépez

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestro sincero agradecimiento a nuestra alma mater, por habernos brindado los conocimientos de esta maravillosa carrera; a nuestros padres y familiares con su incondicional apoyo en toda nuestra etapa de pregrado; y a todas las personas que de alguna manera nos apoyaron en el desarrollo de la tesis, entre ellos docentes, familiares y amigos.

Richard Limo y Antonio Neira

## INDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiv</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>3</b>
1.1 Descripción y Formulación del Problema General y Específico .....	3
1.1.1 Problema general .....	14
1.1.2 Problemas específicos.....	14
1.2 Objetivos .....	15
1.2.1 General.....	15
1.2.2 Específicos.....	15
1.3 Delimitación de la Investigación: Temporal Espacial y Temática.....	15
1.4 Justificación e Importancia .....	18
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>36</b>
2.1 Antecedentes del Estudio de Investigación.....	36
2.1.1 Investigaciones Nacionales .....	36
2.1.2 Investigaciones Internacionales.....	41
2.2 Bases Teóricas.....	46
2.2.1 Pavimento .....	46
2.2.1.1 Generalidades.....	46
2.2.1.2 Tipos de Pavimento .....	47
2.2.1.2.1 Pavimento rígido .....	47
2.2.1.2.2 Pavimento flexible.....	48
2.2.1.2.3 Pavimento semi-rígido.....	49
2.2.1.2.4 Pavimento articulado.....	49
2.2.1.3 Componentes del Pavimento .....	50
2.2.1.4 Mezclas Asfálticas para el Pavimento .....	54
2.2.1.4.1 Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA - Hot Mix Asphalt) .....	54
2.2.1.4.2 Mezcla Asfáltica en Tibio (WMA- – Warm Mix Asphalt) .....	55
2.2.1.4.3 Mezcla Asfáltica en Frío (CMA - Cold Mix Asphalt) .....	56
2.2.1.5 Ciclo de Vida del Pavimento .....	57
2.2.1.6 Factores de Deterioro del Pavimento.....	58

2.2.1.6.1 Condiciones Ambientales.....	59
2.2.1.6.2 Cargas del Tráfico .....	63
2.2.1.7 Fallas en el pavimento .....	69
2.2.1.7.1 Falla Superficial .....	71
2.2.1.7.2 Falla Estructural .....	81
2.2.1.8 Tipos de Mantenimiento Vial .....	93
2.2.1.8.1 Mantenimiento Rutinario .....	94
2.2.1.8.2 Mantenimiento Periódico .....	96
2.2.1.8.3 Mantenimiento Temporal .....	97
2.2.1.8.4 Mantenimiento de Emergencia.....	97
2.2.1.8.5 Rehabilitación.....	98
2.2.1.9 Actividades de Rehabilitación y Mantenimiento .....	100
2.2.1.9.1 Rehabilitación Superficial .....	101
2.2.1.9.2 Rehabilitación Estructural .....	104
2.2.2 Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) .....	107
2.2.2.1 Generalidades.....	107
2.2.2.2 Antecedentes .....	109
2.2.2.3 Métodos de Reciclado .....	110
2.2.2.4 Clasificación del RAP .....	112
2.2.3 Asfalto Espumado.....	114
2.2.3.1 Antecedentes .....	114
2.2.3.2 Generalidades.....	115
2.2.3.3 Proceso de Espumado .....	116
2.2.3.4 Ventajas de la Aplicación de Asfalto Espumado .....	117
2.2.3.5 Propiedades de la Espumación.....	120
2.2.3.6 Factores que influyen en la Espumación.....	121
2.2.3.6.1 Adición de Agua.....	122
2.2.3.6.2 La Temperatura .....	123
2.2.3.7 Estructura del Material.....	125
2.3 Definición de términos .....	127
2.3.1 Reciclado de Pavimentos.....	127
2.3.2 Reciclado en Frío.....	127

2.3.3 Asfalto Espumado .....	128
2.3.4 Fresado .....	128
2.3.5 Escarificación .....	128
2.3.6 Estabilización de Suelos .....	129
2.3.7 Economía Circular .....	129
2.3.8 Medio Ambiente .....	130
2.3.9 Desarrollo Sostenible.....	130
<b>CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS .....</b>	<b>131</b>
3.1 Hipótesis.....	131
3.1.1 Hipótesis Principal.....	131
3.1.2 Hipótesis Secundaria .....	132
3.2 Variables .....	132
3.2.1 Definición Conceptual de las Variables .....	132
3.2.2 Operacionalización de las Variables .....	134
<b>CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>135</b>
4.1 Tipo y Nivel .....	135
4.2 Diseño de Investigación .....	136
4.3 Población y Muestra.....	136
4.3.1 Relación entre Variables.....	137
4.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	138
4.4.1 Tipos de <i>Técnicas</i> e Instrumentos .....	138
4.4.2 Criterios de Validez y Confiabilidad de los instrumentos.....	138
4.4.3 Procedimiento para la Recolección de datos .....	139
4.5 Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos .....	139
<b>CAPÍTULO V: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>140</b>
5.1 Reciclado en Frío con Asfalto Espumado .....	140
5.1.1 Generalidades .....	140
5.1.2 Tipo de Reciclado en frío .....	141
5.1.2.1 Reciclado en Planta.....	142
5.1.2.2 Reciclado In-Situ .....	144
5.1.3 Proceso del Reciclado en Frío .....	146
5.2 Aplicación de Mezcla Asfáltica en Caliente .....	152

5.2.1 Marco Situacional del Proyecto: .....	153
5.2.2 Descripción Geográfica .....	154
5.2.3 Proceso de Rehabilitación del Pavimento Flexible .....	156
5.2.3.1 Rehabilitación del pavimento.....	160
5.2.3.2 Maquinaria usada en el proyecto de Av. Ferrero .....	172
<b>CAPÍTULO VI: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>177</b>
6.1 Resultados de la Investigación .....	177
6.1.1 Ventajas Técnicas de la Aplicación de Asfalto Espumado .....	177
6.1.2 Ventajas en el Tiempo la Aplicación de Asfalto Espumado .....	179
6.1.3 Ventajas Ambientales de la Aplicación de Asfalto Espumado .....	181
6.2 Análisis e Interpretación de los resultados .....	186
6.2.1 Ventajas Técnicas de la Aplicación de Asfalto Espumado .....	186
6.2.2 Ventajas en el Tiempo la Aplicación de Asfalto Espumado .....	188
6.2.3 Ventajas Ambientales de la Aplicación de Asfalto Espumado .....	189
6.3 Discusión de resultados.....	194
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>196</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>201</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>203</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>211</b>

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Actividades para la conservación y mantenimiento de pavimentos flexibles. ....	7
<b>Tabla 2</b> Estado de la red vial nacional por superficie de rodadura a diciembre del 2019 .....	8
<b>Tabla 3</b> Cuadro comparativo en el aumento de la Red Vial Nacional y la cantidad de kilómetros asfaltados .....	9
<b>Tabla 4</b> Porcentaje de vías en buen estado y en estado regular-malo en el periodo 2010-2019.....	13
<b>Tabla 5</b> Producción y tasas de Asfalto Reciclado en diferentes países .....	20
<b>Tabla 6</b> Deterioros o fallas de los pavimentos flexibles .....	70
<b>Tabla 7</b> Nivel de severidad de los baches en el pavimento.....	76
<b>Tabla 8</b> Actividades de mantenimiento rutinario.....	95
<b>Tabla 9</b> Actividades de mantenimiento periódico. ....	97
<b>Tabla 10</b> Comparación estabilización con Asfalto espumado frente a HMA .....	118
<b>Tabla 11</b> Límites mínimos aceptables para parámetros del asfalto espumado.....	123
<b>Tabla 12</b> Matriz de operacionalización de variables .....	134
<b>Tabla 13</b> Vértices del Área del Proyecto.....	155
<b>Tabla 14</b> Especificaciones del Cemento Asfáltico Clasificado por Penetración.....	164
<b>Tabla 15</b> Requisitos de Material Bituminoso Diluido de Curado Medio.....	165
<b>Tabla 16</b> Requisitos de Material Bituminoso Diluido para Curado Rápido (AASHTO M-81.....	166
<b>Tabla 17</b> Rangos de Temperatura de Aplicación (°C .....	168
<b>Tabla 18</b> Maquinaria total empleada en el método del reciclado y el método convencional con mezcla asfáltica en caliente .....	178
<b>Tabla 19</b> Actividades para la rehabilitación del pavimento en la Av. Raúl Ferrero.....	179
<b>Tabla 20</b> Cuadro comparativo en las actividades de rehabilitación con el método convencional y el asfalto espumado.....	180
<b>Tabla 21</b> Variación normativa EPA según el tamaño del motor.....	182
<b>Tabla 22</b> Estándar de emisiones según EPA. (Agencia de Protección Ambiental).....	183
<b>Tabla 23</b> Emisiones de cada maquinaria durante el proceso de Ampliación de Av. Raúl Ferrero	184
<b>Tabla 24</b> Emisiones de cada maquinaria con el proceso de asfalto espumado de Ampliación de Av. Raúl Ferrero .....	185
<b>Tabla 25</b> Tabla de actividades.....	197
<b>Tabla 26</b> Comparación de emisiones entre la técnica convencional y asfalto espumado .....	199

**Tabla 27** Comparación de emisiones de la durante su proceso constructivo de la técnica convencional y asfalto espumado.....200

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Diversas fallas presentes en el pavimento flexible.....	4
<b>Figura 2</b> Producción total de mezclas en caliente y tibio en Europa en el periodo 2000-2017.....	5
<b>Figura 3</b> Uso del asfalto en la UE después de su vida útil.....	10
<b>Figura 4</b> Evolución de la condición del pavimento en el periodo 2010-2019 .....	14
<b>Figura 5</b> Plano de ampliación realizada de la Av. Raúl Ferrero ejecutada en el año 2006 ..	16
<b>Figura 6</b> Mapa de la Av. Raúl Ferrero .....	17
<b>Figura 7</b> Destrucción en vías por el fenómeno del niño en el año 2017 .....	19
<b>Figura 8</b> Accidentes de Tránsito debido a la Infraestructura Vial .....	22
<b>Figura 9</b> Porcentaje de accidentes de tránsito cuyas causas son originados por el mal estado de la infraestructura vial .....	23
<b>Figura 10</b> Tasa de accidentes de tránsito generados por malas condiciones de la infraestructura vial por cada 100 mil habitantes .....	24
<b>Figura 11</b> Tasa de accidentes de tránsito generados por malas condiciones de la infraestructura vial por cada 100 mil habitantes previstas para el periodo 2016-2030 .....	25
<b>Figura 12</b> Estimación de aumento de vehículos al 2030.....	27
<b>Figura 13</b> Consumo de CO2 según el tipo de combustible .....	28
<b>Figura 14</b> Comportamiento de diversos agentes estabilizadores para el pavimento.....	30
<b>Figura 15</b> Red vial vecinal en el departamento de Lima en el 2018.....	31
<b>Figura 16</b> Red vial departamental en el departamento de Lima en el 2018.....	32
<b>Figura 17</b> Población según datos censales y proyección poblacional al 20130 en el Perú ..	33
<b>Figura 18</b> Población según datos censales y proyección poblacional al 20130 en la Región de Lima.....	34
<b>Figura 19</b> Estructura típica de un pavimento rígido .....	47
<b>Figura 20</b> Estructura típica de un pavimento flexible .....	48
<b>Figura 21</b> Estructura típica de un pavimento semirrígido.....	49
<b>Figura 22</b> Estructura típica de un pavimento articulado o adoquinado .....	50
<b>Figura 23</b> Transferencia de cargas en la estructura del pavimento flexible.....	51
<b>Figura 24</b> Clasificación de las mezclas asfálticas de acuerdo con su temperatura.....	57
<b>Figura 25</b> Proceso de formación de la lluvia ácida.....	60

<b>Figura 26</b> Efectos medioambientales sobre el pavimento.....	61
<b>Figura 27</b> Daño en el pavimento a causa de la intrusión de agua .....	63
<b>Figura 28</b> Constante y variado tránsito en una avenida de la ciudad Lima .....	65
<b>Figura 29</b> Descripción grafica del proceso de deterioro por desprendimiento del pavimento .....	74
<b>Figura 30</b> Baches en el pavimento.....	77
<b>Figura 31</b> Fisuras transversales en el pavimento .....	80
<b>Figura 32</b> Falla por fisuramiento tipo piel de cocodrilo en el pavimento .....	84
<b>Figura 33</b> Esquema descriptivo de la fisuración longitudinal en el pavimento.....	86
<b>Figura 34</b> Falla por hundimiento en el pavimento.....	89
<b>Figura 35</b> Falla por ahuellamiento en el pavimento .....	91
<b>Figura 36</b> Reparaciones o parchados en el pavimento .....	93
<b>Figura 37</b> Derrumbes y daños en las vías a causa de desastres naturales. ....	98
<b>Figura 38</b> Vida útil, mantenimiento y rehabilitación de pavimentos.....	100
<b>Figura 39</b> Recapeo asfaltico.....	102
<b>Figura 40</b> Proceso de remoción y reemplazo de la capa de rodadura.....	103
<b>Figura 41</b> Proceso de remoción y reemplazo de la capa de rodadura.....	104
<b>Figura 42</b> Proceso de reconstrucción de la estructura del pavimento.....	106
<b>Figura 43</b> Proceso de reciclado y estabilización de capas granulares del pavimento .....	107
<b>Figura 44</b> EI del reciclado de pavimento.....	109
<b>Figura 45</b> Clasificación del RAP en activo o inactivo según sus parámetros.....	113
<b>Figura 46</b> Producción de asfalto espumado en cámara de expansión.....	117
<b>Figura 47</b> Vida media y razón de expansión del espumado de asfalto.....	121
<b>Figura 48</b> Contenido óptimo de agua para espumado en relación con la vida media y razón de expansión.....	122
<b>Figura 49</b> Comparación de los resultados del espumado conservando la temperatura y a temperatura.....	125
<b>Figura 50</b> Tipos de unión en la mezcla del material RAP con asfalto espumado .....	126
<b>Figura 51</b> Relación entre las variables .....	137
<b>Figura 52</b> Esquema del reciclado en frío.....	141
<b>Figura 53</b> Planta de reciclaje en frío de pavimento .....	144

<b>Figura 54</b> Tambor de corte y Cámara de mezclado.....	145
<b>Figura 55</b> Recicladora Wirtgen y componentes.....	149
<b>Figura 56</b> Tren de reciclado y compactación primaria.....	150
<b>Figura 57</b> Tren de perfilado y compactado.....	151
<b>Figura 58</b> Temperatura máxima y mínima durante el año en Lima Este (Santiago de Surco – La Molina) .....	156
<b>Figura 59</b> Refuerzo asfáltico .....	159
<b>Figura 60</b> Nuevo espesor de 5 centímetros.....	160
<b>Figura 61</b> Fallas en la Etapa I - Sector La Molina: Km. 1+280 Al Km. 1+900 .....	161
<b>Figura 62</b> Maquinaria empleada para la remoción de la carpeta asfáltica .....	172
<b>Figura 63</b> Tren de Asfalto .....	174
<b>Figura 64</b> Motoniveladora y Compactadora.....	176
<b>Figura 65</b> Franjas divisorias en la avenida Raúl Ferrero para reciclado con asfalto espumado.....	177
<b>Figura 66</b> Proceso de compactado de material reciclado con asfalto espumado.....	187
<b>Figura 67</b> Tramo de remoción y colocación MAC en la av. Raúl Ferrero.....	193

## RESUMEN

La presente investigación, difunde la técnica del reciclado in-situ del pavimento con asfalto espumado para vías urbanas, debido a las ventajas mostradas en diversos estudios alrededor del mundo. Dado que el aumento de la contaminación, el cambio climático y el ahorro de recursos afectan directamente al desarrollo y crecimiento del país. La investigación es de enfoque cuantitativo de acuerdo con los tipos de datos analizados en diversos documentos, en donde se empleó el método deductivo y un alcance descriptivo para especificar propiedades y características del proceso, además el diseño es de carácter transversal y no experimental.

Para el desarrollo de la investigación se evaluó la rehabilitación del pavimento llevado a cabo en la avenida Raúl Ferrero en el año 2006. En esta obra se ejecutaron trabajos de mantenimiento, rehabilitación y ampliación de dicha avenida, centrando la investigación de la presente tesis en la rehabilitación del pavimento.

A través de diversos documentos como tesis, artículos y manuales se pudo establecer un posible cronograma de trabajo, así como una estructura de desarrollo y ejecución para con ello llegar a determinar la secuencia constructiva, la maquinaria que interviene y los rendimientos dados por partida, con lo que se pudo determinar los tiempos máximos por actividad. Además, teniendo la maquinaria total que se empleó tanto para la rehabilitación como la que usualmente se emplea en la ejecución del reciclado in-situ, es que obtuvimos los valores para las emisiones que se producen durante su utilización.

**Palabras clave:** reciclado de pavimento, asfalto espumado, emisiones de gases, procesos constructivos

## ABSTRACT

This research disseminates the technique of in-situ recycling of pavement with foamed asphalt for urban roads, due to the advantages shown in various studies around the world. Since the increase in pollution, climate change and saving of resources directly affect the development and growth of the country. The research is of a quantitative approach according to the types of data analyzed in various documents, where the deductive method and a descriptive scope were used to specify properties and characteristics of the process, in addition the design is cross-sectional and not experimental.

For the development of the research, the rehabilitation of the pavement carried out on Raul Ferrero avenue in 2006 was evaluated. In this work, maintenance, rehabilitation and expansion works of said avenue were carried out, focusing the investigation of this thesis on the rehabilitation of the pavement.

Through various documents such as theses, articles and manuals, it was possible to establish a possible work schedule, as well as a development and execution structure to thereby determine the construction sequence, the machinery involved and the yields given by item, with which could determine the maximum times per activity. In addition, having the total machinery that was used both for the rehabilitation and the one that is usually used in the execution of on-site recycling, we obtained the values for the emissions that occur during its use.

**Keywords:** recycling of pavement, foamed asphalt, gas emissions, construction processes

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha tomado mayor conciencia a los procesos constructivos que contempla el mantenimiento de una vía o carretera, ya que el consumo de recursos naturales aumentó de manera exponencial, junto con los requerimientos de equipos y maquinarias para la gestión y ejecución de un proyecto.

A lo largo de muchos países, se ha reciclado asfalto como alternativa frente a la deficiencia de recursos tales como el petróleo, agregados áridos, entre otros. El reciclaje en frío con asfalto espumado como ligante es una tecnología que se ha implantado en el mundo entero y que cobra cada vez más importancia tanto para las autoridades de construcciones viales como para empresas constructoras dedicadas al saneamiento y la construcción de carreteras (Wirtgen, 2019)

La implementación de normas ambientales y la importancia que ha tomado la conservación del entorno hace del reciclado del pavimento la alternativa más viable al reducir la cantidad de agregados vírgenes que se emplean en la producción de una nueva mezcla, prolongar la vida útil del pavimento, evitar la generación de residuos sólidos y disminuir la cantidad de emisiones de gases contaminantes al disminuir el tiempo de trabajo de las maquinarias.

Esta tesis tiene como objetivo difundir la técnica del reciclado in-situ de pavimento con asfalto espumado en la rehabilitación de pavimentos en vías urbanas. Para ello, se presenta un análisis técnico, ambiental y temporal.

Para realizar este análisis, se recolectaron documentos como guías, reglamentos, informes, normas, tesis nacionales e internacionales para realizar un contraste frente a la técnica tradicional para remoción de carpeta asfáltica y posterior pavimentación de vías, se tuvo como caso de estudio la “Ampliación de la Av. Raúl Ferrero en La Molina – Santiago de Surco” realizada en el año 2006.

La presente tesis cuenta con la siguiente estructura:

En el Capítulo I, llamado “Planteamiento del problema”. Se abordó la problemática, reconociendo, aspectos generales hasta delimitar y formular de manera específica, así

como también los objetivos de la investigación, importancia, justificación y limitaciones espaciales y temporales.

En el Capítulo II, llamado “Marco Teórico”, se detallaron los conceptos básicos que esclarecen los objetivos y temas a tratar en la investigación, para este análisis.

El capítulo III corresponde al sistema de hipótesis. En este capítulo se estudió y analizó la hipótesis de estudio para verificar su viabilidad en el proyecto y su factibilidad de comprobación.

El capítulo IV aborda la metodología de la investigación. Se hace un análisis detallado de la investigación, sus alcances y limitantes, así como el estudio de las variables e indicadores mediante los cuales se analiza y estudia la investigación.

El capítulo V recoge el análisis efectuado a los indicadores de acuerdo a distintos autores y fuentes para el diseño planteado.

El capítulo VI recoge los resultados obtenidos al efectuar el estudio de las fuentes, se presentan los análisis y discusiones sobre las hipótesis planteadas y su verificación.

Por último, a través de las conclusiones, se determina que la rehabilitación con asfalto espumado es factible para el escenario de vías urbanas, de manera que se reducen tiempos, maquinarias y mitiga la contaminación al medio ambiente.

# CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1 Descripción y Formulación del Problema General y Específico

Gran parte del desarrollo de un país está basado en la construcción de las vías que conectan tanto sus distintas ciudades como sus calles dentro de una determinada ciudad, es por ello por lo que la construcción de estas vías es fundamental para el desarrollo económico y social. Solo en la UE la “infraestructura de carreteras es sin duda uno de los activos públicos más importantes, que consta de 5,5 millones de km con un valor estimado de más de 8 000 millones de euros” (EAPA, 2019).

Una vez que se han construido ya las vías, es necesario que, como a todo proyecto de ingeniería, se le brinde un adecuado mantenimiento para su conservación y asegurar así la transitabilidad durante toda la vida de la vía. Cuando el mantenimiento es insuficiente, o por diversos motivos la carretera se ha deteriorado y no cumple ya con los objetivos deseados, es menester que esta sea reparada con prontitud.

“Los esfuerzos necesarios para mantener la superficie unida y conservar un adecuado nivel de servicio tienden a escalar hasta el punto en el que tiene más sentido económico rehabilitar todo el pavimento en lugar de abordar áreas localizadas de problemas.” (Wirtgen, 2012, p. 12)

La rehabilitación de pavimentos se realiza de acuerdo con la condición en el que se encuentre, según el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de República Dominicana (2016), El proceso de falla y colapso de un pavimento flexible o rígido se genera a través de un proceso gradual, de acuerdo con el tipo de falla, se opta por una técnica para evaluar su condición, la causa de este deterioro y la alternativa a usar. Los modos de falla más comunes en los pavimentos flexibles son las deformaciones permanentes, agrietamientos, desintegraciones, daños por exudaciones o daños generados por el exceso de intervenciones, mientras que, en los pavimentos rígidos, se encuentran los defectos de superficie, los defectos estructurales, defectos en las juntas y daños por mantenimiento.

## Figura 1

*Diversas fallas presentes en el pavimento flexible*



*Nota:* las imágenes de las fallas del pavimento has sido extraída del manual de carreteras, mantenimiento o conservación vial y muestran baches, grietas longitudinales y transversales y hundimiento en el pavimento. (MTC, 2016)

“El objetivo principal de la conservación de carreteras es lograr la transitabilidad de las vías, que permita conectar las poblaciones rurales con los núcleos desarrollados del país para lograr la competitividad interna y asimismo darle seguridad al usuario y a su vez obteniendo incremento del volumen de tráfico de vehículos, reducción de tiempo de viaje, reducción de costos de operación vehicular, reducción en el costo de los pasajes, y generación de empleo local” (Espinoza y Vildoso, 2014, p. 25)

Los países realizan diversos esfuerzos para mantener sus vías en las condiciones adecuadas que garanticen una conducción segura y cómoda. Es por ello por lo que, en Madrid, a fines del 2017, se implementó la Estrategia de Conservación de Carreteras 2018 - 2021, en donde se han invertido más de 160 millones de euros para la mejora de carpetas asfálticas, reparación de estructuras, alumbrado, señalización, barreras y plantaciones a lo largo de más de 2500 kilómetros de vías de todo el territorio madrileño, este proyecto se ha contemplado hasta el 2021.

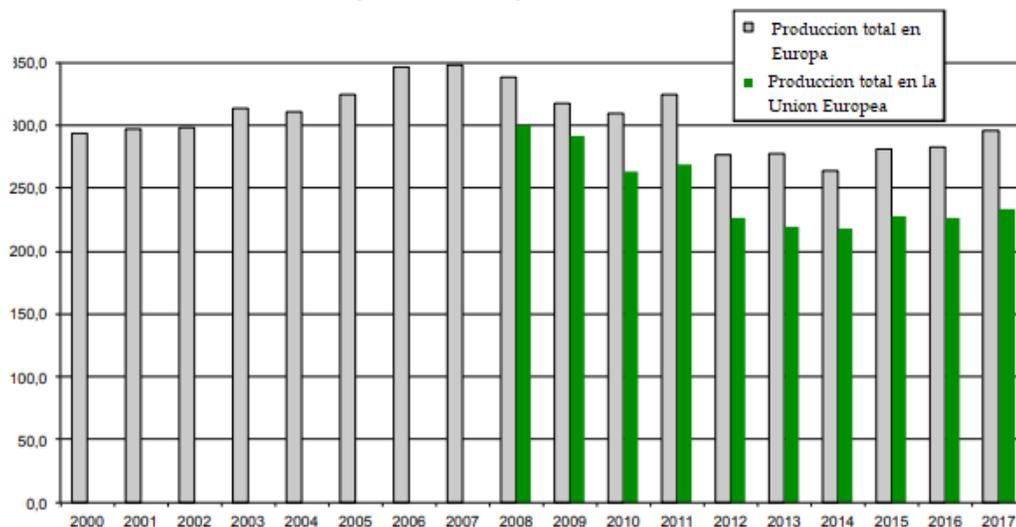
Una vía en mal estado conlleva, además, el deterioro de los vehículos que transitan por ella, generando indefectiblemente daño al medio ambiente. Esto se puede traducir en el hecho de que una vía en mal estado ocasiona retraso en los viajes y por ende mayores emisiones de CO2 a la atmósfera; asimismo, ocasiona daño en los neumáticos de los vehículos, acuciando el hecho de que la vida útil de los mismos disminuya, generando desperdicios. La European Asphalt Pavement Association (2019) afirma que:

“Los estudios científicos han demostrado que el mantenimiento adecuado para reemplazar las superficies del pavimento que muestran condiciones de superficie "malas" o de bajo rendimiento por superficies lisas de carreteras con propiedades "buenas" conduciría a reducciones en el uso de combustible y menores emisiones de CO2 de hasta 5%.”

A nivel mundial, el uso de asfalto para la construcción de vías es el producto por excelencia; solo en la Unión Europea, en el 2014, “alrededor de 950 mil millones de toneladas de asfalto se incorporaron a la red de carreteras” (EAPA, 2014, p. 4). Sin embargo, este producto vital para la construcción y el mantenimiento de los pavimentos flexibles se ha visto drásticamente afectado.

**Figura 2**

*Producción total de mezclas en caliente y tibio en Europa en el periodo 2000-2017.*



*Nota:* la figura muestra la producción total de asfalto tanto para toda Europa (blanca)) como para los países miembros de la Unión Europea (verde) en millones de toneladas. Se tiene que en el 2017 la producción de asfalto en Europa fue de poco menos de 300 millones de toneladas. Extraído de (EAPA, 2017, p. 3)

“El precio del asfalto líquido ha aumentado drásticamente en la última década, de \$250 por tonelada en 2004 a \$550 por tonelada en 2019. Las refinerías están disminuyendo la producción de asfalto (del 3,2% del petróleo crudo a menos del 2%) al convertir su aglutinante de asfalto en Combustible sintético que utiliza tecnología de coquización, lo que provoca una escasez de aglutinante asfáltico y un aumento de su precio”. (NCHRP IDEA Program, 2020, p. 126).

En el Perú, “la conservación vial es definida como el conjunto de actividades de obras de ingeniería vial, que requieren realizarse de manera preventiva para evitar el deterioro prematuro de los elementos que conforman la vía” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), 2016, p. 21). A su vez, la conservación vial para vías pavimentadas se divide en rutinaria y periódica (tabla N°1); es dentro de esta última, que se encuentran las obras de fresado de carpeta asfáltica, microfresado de carpeta asfáltica, sellos asfálticos, entre otros.

**Tabla 1**

*Actividades para la conservación y mantenimiento de pavimentos flexibles.*

Sellado de fisuras y grietas en calzada	Rutinaria
Sellado de fisuras y grietas en bermas	Rutinaria
Parchado superficial en calzada	Rutinaria
Parchado profundo en calzada	Rutinaria
Bacheo de bermas en material granular	Rutinaria
Nivelación de bermas con material granular	Rutinaria
Parchado superficial de bermas con tratamiento asfáltico	Rutinaria
Parchado profundo de bermas con tratamiento asfáltico	Rutinaria
Sellos asfálticos	Periódica
Recapeos asfálticos	Periódica
Fresado de carpeta asfáltica	Periódica
Microfresado de carpeta asfáltica	Periódica
Reconformación de base granular en bermas	Periódica
Imprimación reforzada en bermas con material granular	Periódica
Nivelación de bermas con mezcla asfáltica	Periódica

*Nota:* en la tabla se muestran las diversas actividades de mantenimiento para los pavimentos flexibles, clasificándolas en rutinaria y periódica. Extraído del manual de carreteras, mantenimiento o conservación. (MTC, 2016, p. 25)

Si nos centramos solo en las rutas de la red vial nacional que atraviesa Lima, a diciembre del 2019 contaba con una extensión de 1685.76 km de los cuales 1352.71 corresponde a vías pavimentadas, lo que supone un total de aproximadamente el 80% de las vías que se encuentran pavimentadas (Provias Nacional, 2019). Esto, claramente demanda por parte del estado estrategias de conservación para preservar el patrimonio vial existente evitando así que en el futuro se tengan que invertir grandes cantidades de dinero en la reconstrucción de las vías.

**Tabla 2**

*Estado de la red vial nacional por superficie de rodadura a diciembre del 2019.*

DEPARTAMENTO	EXISTENTE POR TIPO DE SUPERFICIE DE RODADURA							TOTAL EXISTENTE	PROYEC- TADA	TOTAL	% PAVI- MENTADA
	PAVIMENTADA			NO PAVIMENTADA							
	Asfaltada	Solución Básica	SUB TOTAL	Afirmada	Sin Afirmar	Trocha	SUB TOTAL				
<b>TOTAL</b>	<b>14,996.38</b>	<b>7,176.10</b>	<b>22,172.49</b>	<b>3,049.87</b>	<b>674.19</b>	<b>1,157.18</b>	<b>4,881.24</b>	<b>27,053.72</b>	<b>1,805.22</b>	<b>28,858.94</b>	<b>82</b>
AMAZONAS	324.91	527.93	852.84			3.5	3.50	856.34	31.86	888.20	100
ANCASH	900.16	485.37	1385.53	475.54	4.35	24.02	503.91	1889.44	66.32	1955.76	73
APURIMAC	553.16	421.62	974.78	253.68	40.99	11.58	306.25	1281.03		1281.03	76
AREQUIPA	1125.33	90.24	1215.58	97.16	184.31		281.48	1497.05		1497.05	81
AYACUCHO	708.28	1021.72	1729.99	70.34			70.34	1800.33		1800.33	96
CAJAMARCA	1038.28	464.23	1502.51	166.77	57.58	13.09	237.44	1739.94		1739.94	86
CALLAO	45.16		45.16				0.00	45.16	1.54	46.70	100
CUSCO	1044.36	581.66	1626.02	329.14	74.18	4.74	408.06	2034.07	404.92	2438.99	80
HUANCAVELICA	365.82	825.40	1191.22	167.83		87.19	255.01	1446.24		1446.24	82
HUANUCO	410.52	392.13	802.64	184.15	13.71	317.29	515.16	1317.80	96.95	1414.75	61
ICA	608.18	75.07	683.25	11.96		2.09	14.05	697.30	5.78	703.08	98
JUNIN	791.58	244.89	1036.46	297.95	62.00	378.46	738.40	1774.87	24.00	1798.87	58
LA LIBERTAD	635.82	287.12	922.93	266.08	5.17	67.63	338.87	1261.81	88.30	1350.11	73
LAMBAYEQUE	386.20	64.62	450.82	10.40	7.83		18.23	469.05	44.90	513.95	96
LIMA	1078.64	274.27	1352.91	246.87	68.20	17.79	332.85	1685.76		1685.76	80
LORETO	49.81	38.80	88.61	5.43		34.83	40.26	128.87	166.40	295.27	69
MADRE DE DIOS	399.28		399.28				0.00	399.28	457.69	856.96	100
MOQUEGUA	469.25		469.25				0.00	469.25		469.25	100
PASCO	185.92	177.04	362.96	188.09		37.74	225.83	588.80		588.80	62
PIURA	1090.29	492.69	1582.98	2.33	69.75	79.54	151.62	1734.60	45.27	1779.87	91
PUNO	1305.93	497.23	1803.16	121.17	74.53	19.18	214.88	2018.04		2018.04	89
SAN MARTIN	613.42	139.26	752.68		11.60	58.50	70.10	822.78	196.52	1019.30	91
TACNA	506.86	73.53	580.39	50.99			50.99	631.38		631.38	92
TUMBES	138.47		138.47				0.00	138.47	11.77	150.25	100
UCAYALI	220.77	1.30	222.06	104.01			104.013	326.08	163.00	489.08	68

*Nota:* en la tabla se aprecia que para el departamento de Lima se tiene pavimentada el 80% de la red vial nacional; mientras que a nivel nacional se tiene un 82% del total.

Extraído de Provias Nacional, 2019, p. 15)

Además, si se aprecia la evolución que ha sufrido la red vial nacional durante estos últimos 30 años (1990 – 2020), se puede ver que se ha ido incrementando gradualmente, exceptuando los años 2005 y 2019 como se puede apreciar en la tabla N°3; sin embargo, y a pesar de ello, la cantidad de kilómetros de vía pavimentada no ha ido de la mano con este crecimiento, teniéndose en muchos casos años en los que el porcentaje de kilómetros pavimentados es menor al 50%. Esta tendencia se ha revertido desde el año 2010, en donde a pesar del aumento de la red vial nacional, la cantidad de kilómetros pavimentados se ha mantenido por encima del 50%.

**Tabla 3**

*Cuadro comparativo en el aumento de la Red Vial Nacional y la cantidad de kilómetros asfaltados.*

AÑOS	Pavimentado (Km)	% de aumento	TOTAL, de RVN (Km)	% de aumento	% Pavimentada
1990	5740	-	15692	-	37
1995	6477	12.84	16519	5.27	39
2000	8523	31.59	17053	3.23	50
2005	8731	2.44	16857	-1.15	52
2006	8911	2.06	17857	5.93	50
2007	11178	25.44	23838	33.49	47
2008	11370	1.72	23903	0.27	48
2009	11500	1.14	24500	2.50	47
2010	12445	8.22	23596	-3.69	53
2011	13640	9.60	23319	-1.17	58
2012	14748	8.12	24593	5.46	60
2013	15906	7.85	25005	1.68	64
2014	17411	9.46	25789	3.14	68
2015	18420	5.80	26436	2.51	70
2016	19682	6.85	26683	0.93	74
2017	20368	3.49	26792	0.41	76
2018	21434	5.23	27110	1.19	79
2019	22172	3.44	27054	-0.21	82

*Nota:* Adaptado de Provias Nacional (2019)

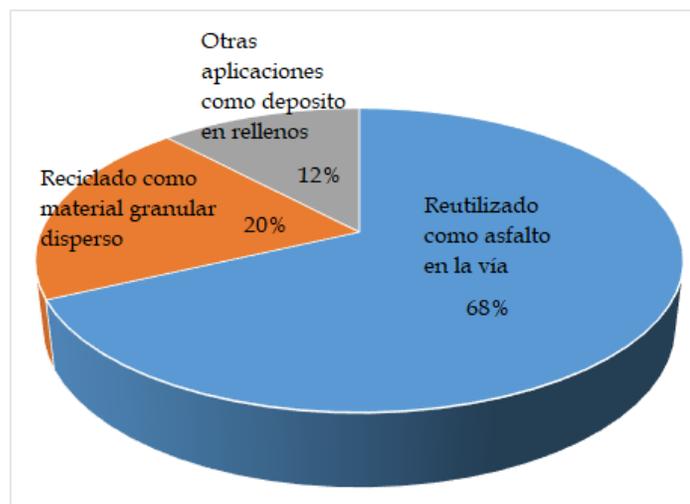
En busca de mejoras en las actividades de mantenimiento periódico, para que sean más amigables con el medio ambiente, es que se apuesta por el reciclado de la carpeta asfáltica. El Instituto Mexicano del Transporte (2018) afirman al respecto:

“Al implementar el uso del material reciclado de asfalto, RAP por sus siglas en inglés, es posible reutilizar la capa de rodadura e incluso los materiales existentes en la estructura de pavimento, lo que representa economía en el mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos en servicio”. (p. 3)

El asfalto 100% reciclado ha demostrado ser una alternativa de solución económica y técnicamente viable. Además de promover la no eliminación de residuos, se plantean alternativas como la disminución de la temperatura en el proceso de estabilización de la vía, medida que no solo influye positivamente en el medio ambiente al disminuir la cantidad de gases contaminantes vertidos a la atmósfera, sino que además se promueve un entorno de trabajo más saludable para nuestra fuerza laboral. En la Unión Europea se viene trabajando para lograr este propósito de reutilización total del asfalto. Ya un 68% del mismo se reutiliza para la construcción de la vía y un 20% está destinado a otras capas del pavimento (figura N°2). Se debe dejar de lado la concepción de que nuevo es mejor que reutilizado y aplicar correctamente las regulaciones en cuanto a la eliminación de residuos. (EAPA, 2019)

### Figura 3

*Uso del asfalto en la UE después de su vida útil*



*Nota:* en la figura se ven los porcentajes de uso del material de pavimento que ha cumplido con su vida útil. Así, puede reutilizarse o eliminarse en rellenos. Extraído de EAPA, 2019.

La universidad de Costa Rica (2016) señala las ventajas que tiene el reutilizar la carpeta asfáltica: 1) se puede reutilizar hasta el 100% de los materiales existentes, 2) se disminuye al máximo la cantidad de material virgen que debe ser usado en la

construcción y 3) se disminuye la cantidad de gases emitidos en el transporte de los materiales al sitio de construcción.

Este procedimiento constructivo que consiste en la reutilización de la carpeta asfáltica viene aplicándose en los Estados Unidos desde la década de 1930 (Texas A&M Transportation Institute, 2016) y ya en el año 2011, la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), detallaba que

“El proceso de FDR ha sido utilizado por 34 estados y por al menos 14 estados durante más de diez años. Veintidós estados usan FDR en 50 millas de carril por año, seis estados para 50-100 millas de carril y dos estados informan el uso a más de 100 millas de carril por año”.

El material del pavimento recuperado necesita un agente estabilizador como parte del proceso constructivo. Este estabilizador tiene como función generar una adhesión entre los componentes del material recuperado y así pueda ser puesto en funcionamiento en la vía.

“El reciclaje en frío con betún espumado como ligante es una tecnología que se ha implantado en el mundo entero y que cobra cada vez más importancia tanto para las autoridades de construcciones viales como para empresas constructoras dedicadas al saneamiento y la construcción de carreteras” (Wirtgen, 2019).

La tecnología del espumado de asfalto, como lo dice Deza, Díaz, Miranda y Velázquez (2017), es el resultado de aplicar una cantidad de agua fría medida cuidadosamente e introducida dentro del asfalto en caliente, formándose una espuma e incrementando su volumen y su energía superficial. Este método de estabilización con asfalto espumado viene desarrollándose desde los años 70, en donde el incremento en los precios de crudo de petróleo y una mayor preocupación por la conservación del medio ambiente ha incrementado su popularidad. (Texas A&M Transportation Institute, 2016).

A pesar de que se presenta como alternativa en muchos países, en el Perú solo dos obras han empleado la estabilización con asfalto espumado. La primera obra, ejecutada en el departamento de Ancash, provincias de Bolognesi y Huaricon y con una inversión total de S/.62 951 527,46, se llevó a cabo en la intervención de las

carreteras de La Oroya – Chicrín – Huánuco – Tingo María – Dv. Tocache y Conococha – Yanacancha en los años del 2007 al 2013. Dicho monto incluye ya el reciclado del pavimento y su estabilización con asfalto espumado. La segunda obra se ejecutó en el año 2015 y tenía como finalidad la Gestión, Mejoramiento y Conservación Vial por Niveles de Servicio del Corredor Vial: Emp. AR-105 (Acoy) - Andamayo - Viraco - Dv. Machaguay - Andagua - Ayo - Huambo - Cabanaconde - Chivay - Vizcachane - Emp. PE-34A (Dv. Vizcachane), con un monto estimado de S/. 273 210 414,20. Y, por último, el proyecto ejecutado en la conservación vial de la carretera Conococha – Huaraz - Caraz en el año 2011. En dicho proyecto se ejecutaron 144 km de vía. “el uso de esta tecnología a más de 4,000 m.s.n.m (Conococha) y en Callejón de Huaylas y a término de contrato del proyecto se ha obtenido buenos resultados” (Abad H., 2016, p. 4).

Sin embargo, según los datos de Provias Nacional, a diciembre del 2019, se tiene la mayor cantidad de la red vial nacional asfaltada y en buen estado de conservación. Es por ello por lo que las obras de mantenimiento vial cobran mayor importancia en la medida que se pueda garantizar que las vías se mantendrán en óptimas condiciones durante toda su vida útil; y después de ello, reutilizar el pavimento existente en la vía. Si se toma en cuenta que una carretera tiene dos carriles como mínimo de 3.60 metros de ancho como mínimo y tomando en cuenta que al 2017 se tiene 27054 km de vía pavimentada, se tiene un total de 194.788 km<sup>2</sup> de pavimento que puede ser reutilizado.

Para el año 2016, solo en la red vial nacional, se tenía el 94% de sus vías en buen estado, cambiando esta situación para el año 2017 (tabla N°4). Esto se debe a dos factores básicamente; el primero es el aumento en la red vial nacional y el segundo el fenómeno del niño acontecido a principios del año 2017.

**Tabla 4**

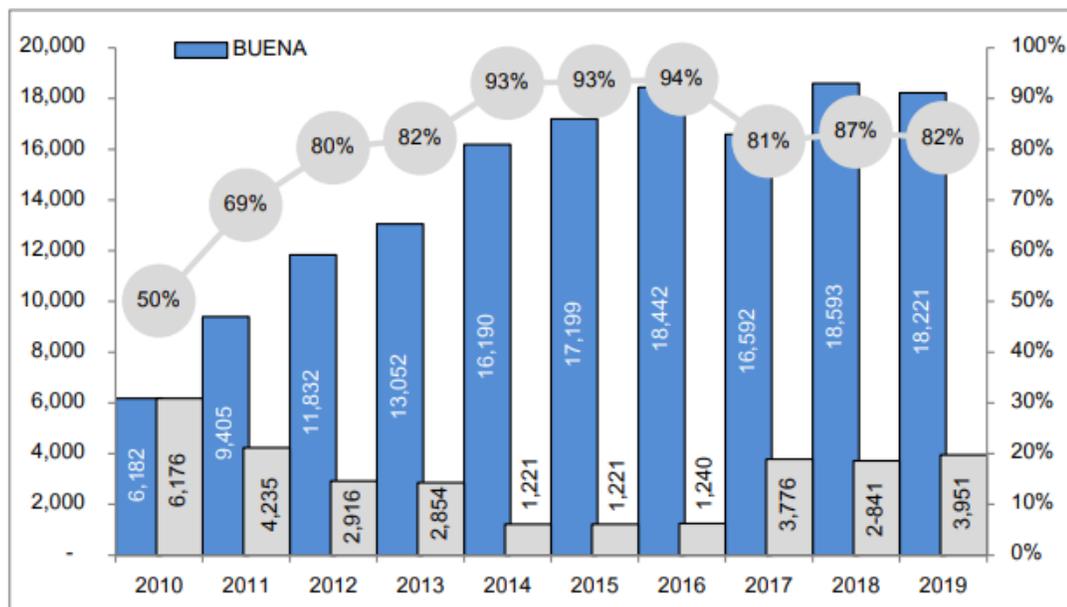
*Porcentaje de vías en buen estado y en estado regular-malo en el periodo 2010-2019*

AÑOS	Buena	Regular y mala	RVN Pavimentado	% Bueno	% Regular y malo
2010	6182	6176	12445	50	50
2011	9405	4235	13640	69	31
2012	11832	2916	14748	80	20
2013	13052	2854	15906	82	18
2014	16190	1221	17411	93	7
2015	17199	1221	18420	93	7
2016	18442	1240	19682	94	6
2017	16592	3776	20368	81	19
2018	18593	2841	21434	87	13
2019	18221	3951	22172	82	18

*Nota:* en la tabla se puede ver cómo ha variado el porcentaje de vías pavimentadas en buen estado a lo largo del periodo 2010-2019. En el mismo periodo se aprecia que se ha tenido un incremento en promedio de 6.81% en la red vial nacional. Adaptado de Provias Nacional (2019).

**Figura 4**

*Evolución de la condición del pavimento en el periodo 2010-2019*



*Nota:* en la figura se aprecia una disminución considerable del estado “bueno” en el año 2017, esto a consecuencia del fenómeno del niño. Extraído de (Provias Nacional, 2019, p. 18)

### **1.1.1 Problema general**

¿En qué medida el uso del reciclado con asfalto espumado genera mejoras en la rehabilitación de pavimentos en el proyecto “Ampliación de la Av. Ferrero (La Molina – Santiago de Surco) ejecutado en el año 2006”?

### **1.1.2 Problemas específicos**

- ¿Qué diferencias técnicas existen en la aplicación del reciclado con asfalto espumado en la rehabilitación de pavimentos en el proyecto “Ampliación de la Av. Raúl Ferrero (La Molina – Santiago de Surco) ejecutado en el año 2006”?
- ¿Qué diferencias se pueden dar en los plazos de ejecución de obra con el reciclado con asfalto espumado en la rehabilitación de pavimentos en

el proyecto “Ampliación de la Av. Raúl Ferrero (La Molina – Santiago de Surco) ejecutado en el año 2006”?

- c) ¿Qué beneficios ambientales aporta la aplicación del reciclado con asfalto espumado en la rehabilitación de pavimentos en el proyecto “Ampliación de la Av. Raúl Ferrero (La Molina – Santiago de Surco) ejecutado en el año 2006”?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

Analizar las mejoras que se dan con la aplicación del reciclado de pavimentos con asfalto espumado en el proyecto “Ampliación de la av. ferrero (La Molina – Santiago de Surco) ejecutado en el 2006”

### **1.2.2 Específicos**

- a) Diferenciar los aspectos técnicos que existen en la aplicación del reciclado con asfalto espumado para la rehabilitación de pavimentos en el proyecto “Ampliación de la av. ferrero (La Molina – Santiago de Surco) en el periodo 2020
- b) Medir las diferencias en los plazos de ejecución que se tienen con el asfalto espumado, en la intervención Ampliación de la Av. Ferrero (La Molina – Santiago de Surco) en el periodo 2020
- c) Describir los beneficios ambientales que se tienen al rehabilitar el pavimento reciclado con asfalto espumado.

## **1.3 Delimitación de la Investigación: Temporal Espacial y Temática**

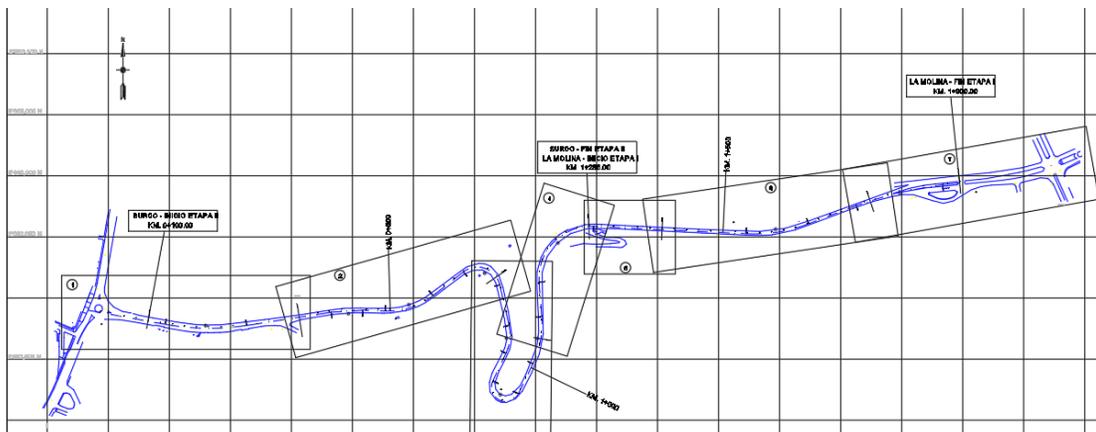
Si bien el uso de asfalto espumado para el reciclado de pavimentos y/o estabilización de estos, se ha intensificado mucho en los últimos años en diversos países, en el Perú la tecnología del asfalto espumado para el reciclaje in-situ es prácticamente nula. Esto conlleva a que las fuentes que se deban tomar sean prácticamente en su totalidad extranjeras, a fin de estudiar los resultados obtenidos en la utilización del asfalto espumado para el reciclado de pavimentos. Al no ser una tecnología de uso en el Perú, los datos de laboratorio son exiguos para medir el desempeño de mezclas asfálticas reutilizadas con la adición de asfalto espumado,

teniendo que recurrir a normas y tratados e investigaciones extranjeras que regulan el uso de la técnica, es por ello por lo que en este estudio no se abordará el diseño de mezclas asfálticas, ni los parámetros que lo rigen. La presente investigación tampoco contemplará el análisis de costos unitarios de proceso constructivo a estudiar, por lo que, no se harán partidas ni presupuestos del asfalto espumado.

En este estudio se abordará el análisis de la técnica del reciclado de pavimentos flexibles con asfalto espumado, estudiando sus características, así como sus ventajas y desventajas a través de un análisis comparativo con las técnicas usadas tradicionalmente. Como base, se tomará el proyecto “Ampliación de la Av. Ferrero (La Molina – Santiago de Surco)” en donde se han rehabilitado unos tramos de pavimento de la avenida Raúl Ferrero en el año 2006.

### Figura 5

Plano de ampliación realizada de la Av. Raúl Ferrero ejecutada en el año 2006

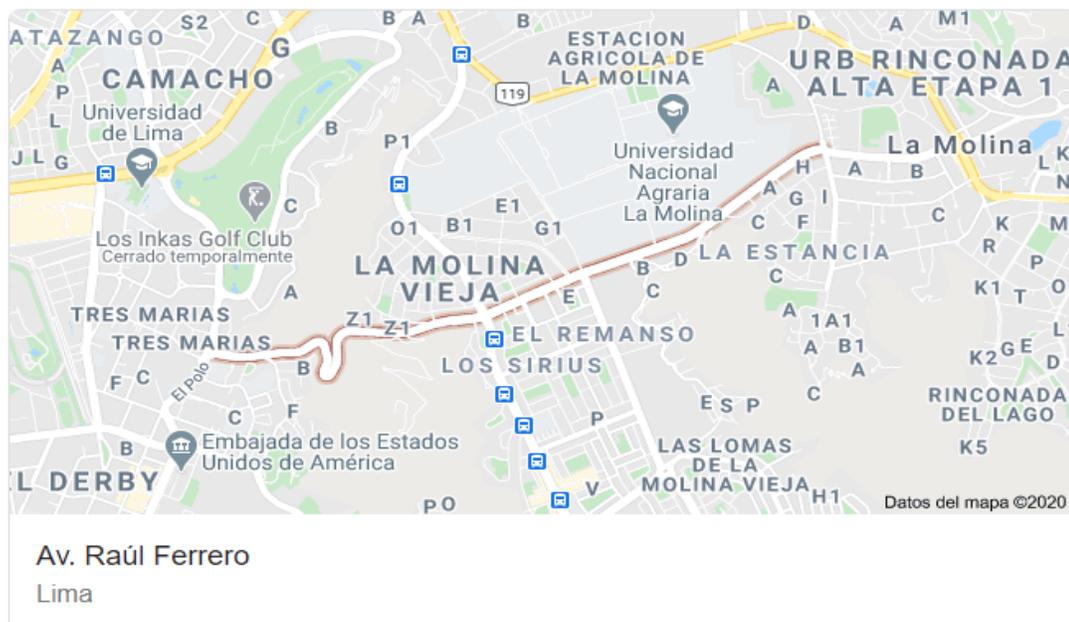


*Nota:* El plano muestra los dos tramos a ejecutar, uno es el lado de Santiago de Surco dónde se realizó ampliación de la calzada y construcción de muros de contención, mientras que el otro es el lado de La Molina donde se rehabilitó el pavimento. Tomado de Actualización del Expediente Técnico: Ampliación de la Av. Ferrero (La Molina – Santiago de Surco), 2006, Empresa Municipal Administradora de Peaje de Lima – EMAPE, la Oficina de Servicios para Proyectos de las Naciones Unidas – UNOPS.

La avenida en estudio “Raúl Ferrero”, es una de las más importante de Lima Este, ya que conecta a lo largo de su extensión de 2.04 Km, a los distritos de Santiago de Surco y La Molina, mediante una calzada que bordea el cerro Centinela. La importancia de esta radica en que es un punto de encuentro entre ambos distritos, siendo una de las vías con mayor congestión vehicular durante las horas punta.

## Figura 6

*Mapa de la Av. Raúl Ferrero*



*Nota:* El plano muestra la avenida Raúl Ferreros, la cual conecta los distritos de La Molina y Santiago de Surco. Extraído de Google Maps.

Así mismo, la pandemia del Covid-19 ha ocasionado dificultades en aspectos económicos, políticos, ambientales, entre otros, a lo que las entidades se encuentren cerradas o, en su defecto, operen al 50% de su capacidad, generando retrasos en la entrega de información o la imposibilidad de acceder a la misma. Por este motivo es que el estudio se realizará tomando como base un proyecto ejecutado en el año 2006 en la avenida Raúl Ferrero, no siendo este impedimento para que los resultados del estudio sean válidos en el contexto actual y a futuro.

Es importante recalcar que el Perú cuenta con una variada geografía y una gran cantidad de climas para diversas zonas, esto hace que sea muy difícil predecir el comportamiento del asfalto espumado para diversas regiones del país.

#### **1.4 Justificación e Importancia**

La creciente demanda en las carreteras en nuestro país, sumado esto a una geografía accidentada y en muchos casos remota, la disminución de los fondos presupuestarios y la necesidad de proporcionar un sistema de carreteras seguro, eficiente y rentable ha llevado a un aumento dramático en la necesidad de buscar soluciones de rehabilitación de los pavimentos existentes. “No se debe dejar que las carreteras en buen estado se deterioren hasta un estado en el que tengan impactos negativos en lo ambiental, social y económico” (EAPA, 2019).

“La causa fundamental del deterioro de la infraestructura vial y su equipamiento complementario, estaría dado, no solo por el escaso planeamiento, administración y gestión de la infraestructura, mala calidad de los proyectos y obras, sino también por el escaso nulo mantenimiento-rehabilitación para su puesta en operación. Esta situación es muy generalizada en las administraciones regionales y municipales, ya que realizan inversiones con serias deficiencias en el diseño geométrico de las vías, limitaciones para el libre acceso y circulación de los peatones con discapacidad, y baja calidad de los materiales constructivos, permitiendo su obsolescencia en pocos periodos de tiempo, al que tenderán a reponerla nuevamente” (Consejo de Seguridad Vial, 2017, p. 34)

El Perú, es uno de los tantos países afectados periódicamente por el fenómeno conocido como “El Niño”. Se denomina así al “incremento de la Temperatura Superficial del agua del Mar (TSM) en el litoral de la costa oeste de Sudamérica con ocurrencia de lluvias intensas” (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), 2014, p.9). Este inusual calentamiento de la superficie marina genera que las lluvias se intensifiquen, desencadenando con ello

lluvias torrenciales, desbordes de ríos e inundaciones y huaicos. Solo en el 2017, el saldo de carreteras dañadas que dejó el fenómeno del niño fue de 3231 km de carreteras nacionales (Provias Nacional, 2019).

### **Figura 7**

*Destrucción en vías por el fenómeno del niño en el año 2017*



Nota: en la figura se aprecia la devastación generada a causa de las intensas lluvias ocurridas en febrero-marzo del año 2017. Imagen recuperada de una nota de RPP (27 de octubre del 2017). URL: <https://rpp.pe/politica/gobierno/estas-son-las-cifras-oficiales-que-dejo-la-emergencia-por-el-nino-costero-a-nivel-nacional-noticia-1085350?ref=rpp>.

El reciclaje y la recuperación de asfalto cumplen con el objetivo de dar nueva vida a un producto ya utilizado, sin que con ello disminuya su calidad, ya que como lo señala la European Asphalt Pavement Association (2014):

“Es muy poco probable que los agregados en el asfalto recuperado se vean significativamente afectados por el envejecimiento en el uso y el reprocesamiento para su reutilización, y habiendo sido utilizados satisfactoriamente en una carretera, es más que probable que sigan siendo satisfactorios después de la actividad de reciclaje” (p. 14).

El asfalto reciclado es el material más reusado junto con el concreto en el sector de la construcción para el desarrollo de muchos países según (Margaritis & Van den bergh, 2018), uno de estos es Bélgica, el cual posee una de las tasas más altas de explotación de asfalto reciclado, esta data incluye a Flandes, Valona y Bruselas. En la tabla N°5, se muestra los mayores usos donde se aplica el asfalto reciclado:

**Tabla 5**

*Producción y tasas de Asfalto Reciclado en diferentes países.*

	<b>Bélgica</b>	<b>Francia</b>	<b>Países Bajos</b>	<b>EE. UU.</b>	<b>Japón</b>
Producción de mezclas en caliente (10 <sup>6</sup> ton)	3.3	35.4	9.7	331	55
Cantidad disponible de Asfalto reciclado (10 <sup>6</sup> ton)	2	7	4.5	69.7	41.9
Explotación de asfalto reciclado disponible en mezclas (%)	43%	64%	76%	91%	No hay data
Mezclas que contienen asfalto reciclado	58%	65%	70%	No hay data	No hay data
Contenido de Asfalto Reciclado promedio estimado (%)	45%	19.50%	50.40%	20.40%	47%

*Nota:* Bélgica es uno de los países que posee una alta cantidad de asfalto reciclado para su superficie de 30528 km<sup>2</sup>, a comparación de países como Estados Unidos y Francia, tiene un altísimo porcentaje de explotación y aplicación en sus pavimentos asfálticos. Esto demuestra que la investigación e inversión del estado han sido parte de este gran resultado. Extraído de “Evaluation of flemish bituminous mixtures’ performance containing rap” (p.2), por A. Margaritis, W. Van den bergh, 2018, Universidad de Antwerp, Bélgica.

Con la construcción de vías se satisfacen las necesidades de movilidad de viajeros y de carga, lo que las convierte en elementos imprescindibles para el desarrollo económico y social de una ciudad o país. Entre sus muchos beneficios está la

disminución del tiempo de viaje, además de generar la adecuada integración y comunicación entre las distintas zonas que atraviesa la vía.

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones, nos dice que para la conservación vial se debe tomar en cuenta que:

“La tecnología es evolutiva y es actualizada continuamente utilizando nuevos procedimientos, materiales y equipamientos; y en la práctica, los procedimientos serán utilizados compartiendo nuevas tecnologías con las antiguas en la medida que el conjunto permita optimizar los resultados en tanto se adapten a las diferentes realidades de las redes viales” (MTC, 2016, p. 33).

Este concepto involucra un constante monitoreo de la vía a fin de subsanar cualquier falla que esta sufra. Sin embargo, es también necesario determinar la alternativa de solución más oportuna para así, demandar la menor cantidad de recursos en la realización del proyecto de mantenimiento vial.

Para las vías, el mantenimiento y la prevención constituyen una parte crucial a lo largo de toda la vida útil del proyecto, ya que el avance del deterioro genera pérdidas económicas y lleva como consecuencia que la vía tenga que ser nuevamente construida. En tal sentido, el (MTC, 2016, p. 38), en el Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial RD N° 08 – 2014 – MTC/14, nombra los aspectos relevantes del propósito preventivo de la conservación:

“Mantener la continuidad del servicio ofrecido por la infraestructura vial, de tal manera que sea posible la transitabilidad en cualquier condición climática.

Mantener la continuidad del servicio ofrecido durante el periodo de operación de la carretera, con un nivel de servicio adecuado, en cuanto a seguridad y confort para los usuarios.

Adaptar las estructuras de los pavimentos en función al incremento de los vehículos pesados. En este aspecto se consideran los recapados o refuerzos asfálticos que no impliquen ensanches de la calzada o bermas.”

Una vía en mal estado puede ser la causante de una cantidad considerable de accidentes de tránsito. Esto se puede ver en las estadísticas dadas por el Consejo Nacional de seguridad Vial (2017), en donde se aprecian las estadísticas de accidentes de tránsito generados por malas condiciones en la infraestructura vial. Estos accidentes responden a dos factores principalmente a un mal estado de la vía y una señalización defectuosa. En el periodo correspondiente a 1990-2012, se aprecia que este factor tiene una incidencia creciente en la generación de accidentes de tránsito, siendo el mal estado de la vía la principal causa con 1500 accidentes en promedio por año.

**Figura 8**

*Accidentes de Tránsito debido a la Infraestructura Vial.*



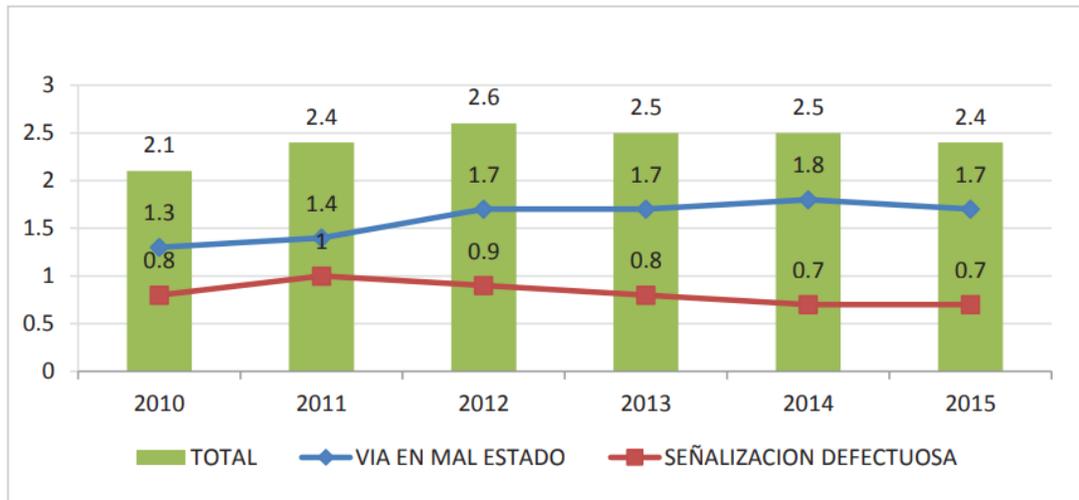
*Nota:* la figura muestra la variación de la cantidad de accidentes debido a una deficiente infraestructura vial. Si bien ambos muestran una tendencia creciente, el mal estado de la pista tiene una incidencia mayor. Extraído de (Consejo de Seguridad Vial, 2017, p. 24). URL: [https://www.mtc.gob.pe/cnsv/documentos/PENsv\\_2017-2021.pdf](https://www.mtc.gob.pe/cnsv/documentos/PENsv_2017-2021.pdf).

Si analizamos los datos provistos por el Consejo de Seguridad Vial (2017) en el periodo 2010-2015, el promedio de accidentes cuya causa se debe a un mal estado en la infraestructura vial es de aproximadamente 2.5% (Figura 9). este porcentaje corresponde a la unión de los dos factores (mal estado de la vía y una señalización

defectuosa), siendo el mayor porcentaje el de mal estado de la vía con 1.6% aproximadamente.

### Figura 9

*Porcentaje de accidentes de tránsito cuyas causas son originados por el mal estado de la infraestructura vial*

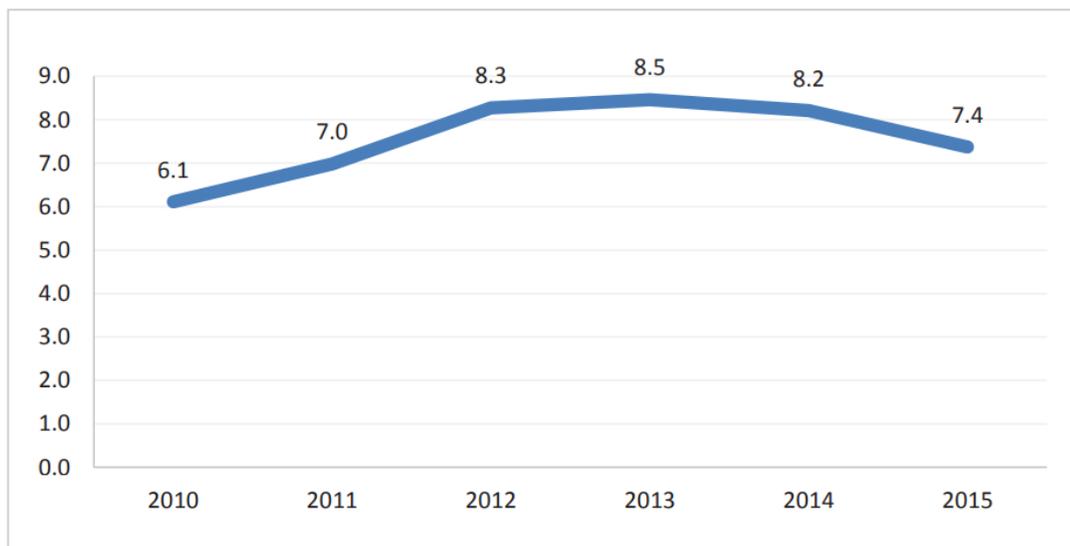


*Nota:* la figura muestra la variación de los porcentajes de accidentes debido a una deficiente infraestructura vial en el periodo 2010-2015. Si bien ambos muestran una tendencia creciente, el mal estado de la pista tiene un porcentaje mayor. Extraído de (Consejo de Seguridad Vial, 2017, p. 34).

Así mismo, la tasa de accidentes generada por una deficiente infraestructura vial por cada 100 mil habitantes en el periodo 2010-2015 fue de 7.6% en promedio (figura 10). Si bien ya para el año 2015 experimento un leve descenso, esta cifra aún se mantiene alta, por lo que la meta es la reducción gradual de esta tasa para el año 2030, habiendo llegado a finales del 2021 con una reducción del 30%. Estas previsiones implican un mejoramiento de las vías, dando prioridad al mantenimiento y prevención de daños en las carreteras a fin de evitar gastos excesivos y salvaguardar el patrimonio vial.

### Figura 10

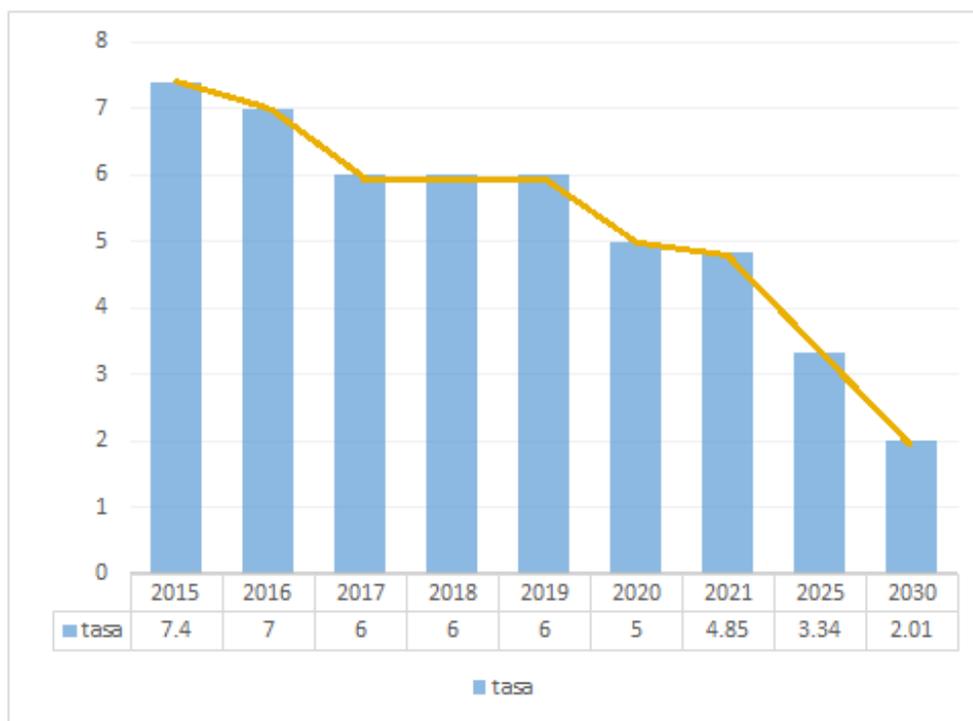
*Tasa de accidentes de tránsito generados por malas condiciones de la infraestructura vial por cada 100 mil habitantes.*



*Nota:* la figura muestra la tasa de accidentes debido a una deficiente infraestructura vial en el periodo 2010-2015. El 2013 es el año con la mayor tasa registrado en ese periodo, mostrándose una ligera baja hacia el año 2015. Extraído de (Consejo de Seguridad Vial, 2017, p. 33).

**Figura 11**

*Tasa de accidentes de tránsito generados por malas condiciones de la infraestructura vial por cada 100 mil habitantes previstas para el periodo 2016-2030.*



*Nota:* la figura muestra las previsiones hechas hasta el año 2030 tomando como base los datos del año 2016. Adaptado de (Consejo de Seguridad Vial, 2017).

Una vía en mal estado tiene una directa implicancia en las condiciones de mantenimiento de los vehículos que transitan por ella, además de ser la responsable de incrementar la cantidad de tiempo que un vehículo se tome en transcurrirla, lo que genera una mayor emisión de gases a la atmosfera producto de la combustión del combustible en los vehículos.

“El pavimento de la carretera influye directamente en el consumo de combustible del vehículo a través de las pérdidas por rodadura que experimenta un vehículo que circula sobre él. Las pérdidas por rodadura incluyen tanto las pérdidas de energía en el sistema de suspensión debido a

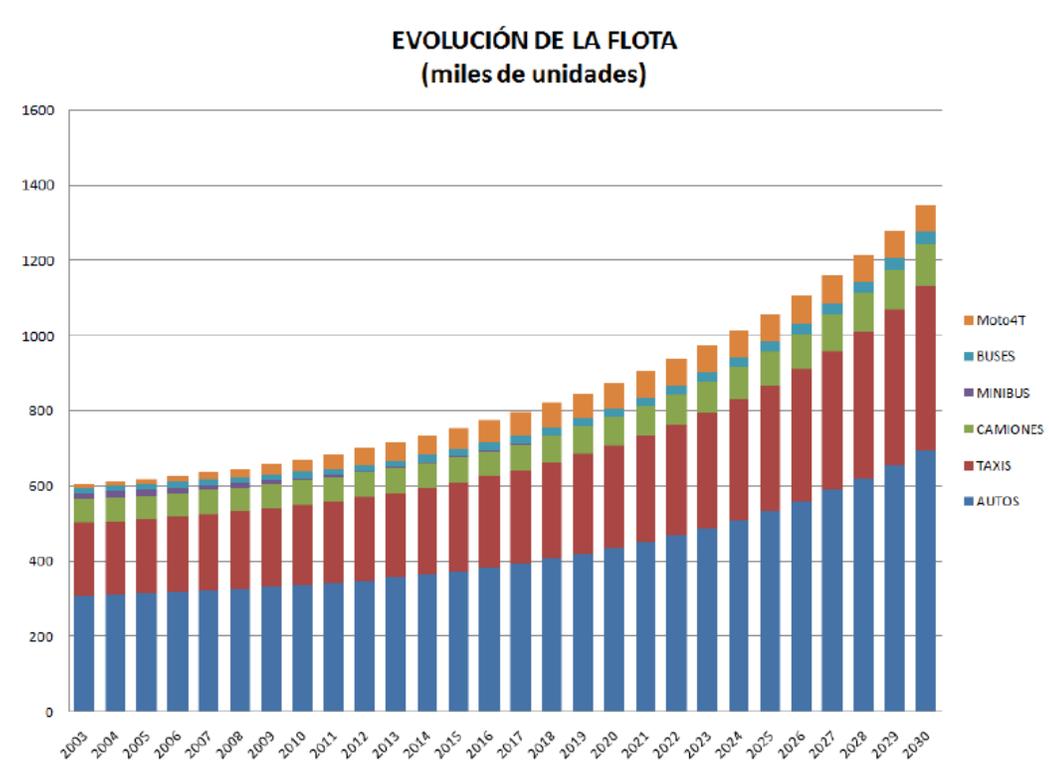
un camino irregular como las pérdidas en el nivel de contacto entre el neumático y el pavimento. Diversos aspectos de la calidad de la calzada influyen en las pérdidas por rodadura: uniformidad, surcos, baches y juntas deterioradas. Otros factores, como las características del pavimento, también pueden influir en las pérdidas por rodadura” ((EAPA, EUPAVE y FEHRL, 2018), 2018).

En el año 2014, el SENAHMI preparó un informe donde se presentan los agentes emisores de mayor contaminación en Lima Metropolitana y su proyección hasta el 2030, de acuerdo con el tipo de vehículos más usados en la capital. En las siguientes figuras N° 1 y N° 2 se puede ver la estimación.

Este dato cobra relevancia, ya que ante el aumento previsto de vehículos en el país es necesario mantener y conservar las vías en óptimo estado para asegurar la máxima disminución de emisiones de gases a la atmosfera. Una vía en buen estado resistirá las cargas generadas por el constante tránsito de los vehículos evitando así que el pavimento falle y quede expuesto a factores medioambientales.

**Figura 12**

*Estimación de aumento de vehículos al 2030*



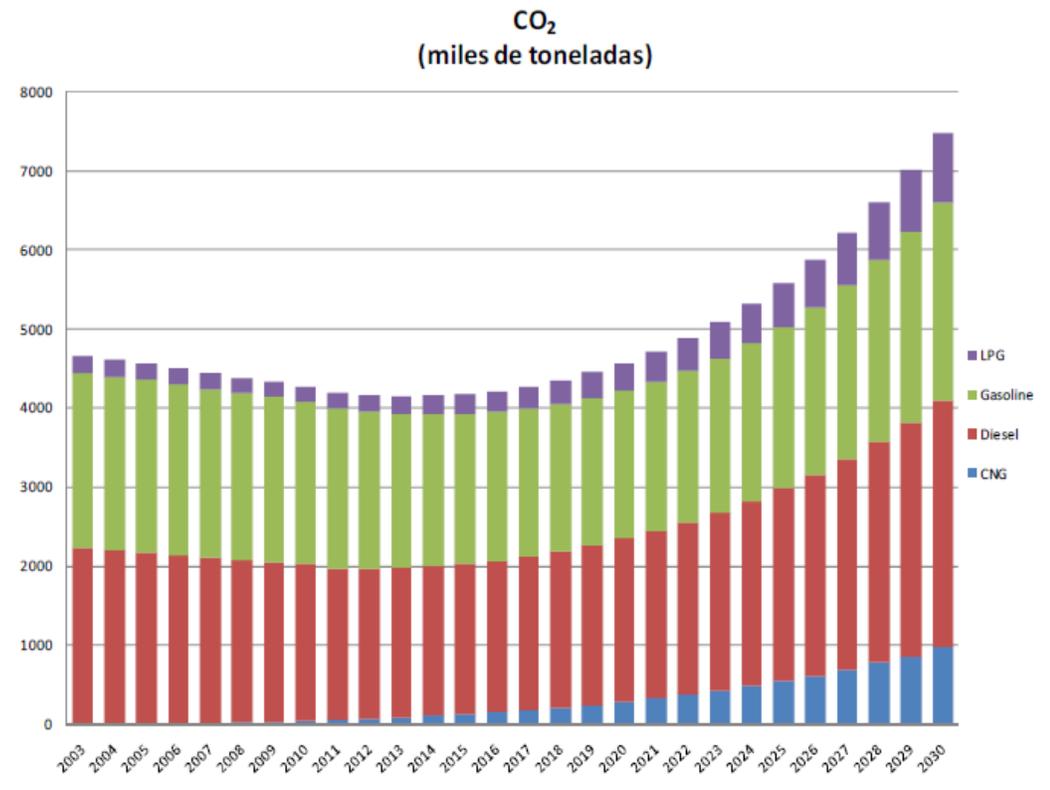
*Nota:* la figura muestra un aumento gradual y constante en la cantidad de vehículos. Se puede apreciar que el mayor aumento se da en los autos y taxis. Recuperado del reporte *Estimación de emisiones vehiculares en Lima Metropolitana* (p. 26), por L. Dawidowski, O. Sánchez – Ccoyllo, N. Alarcón, 2014, SENAEMI

El masivo aumento de vehículos particulares y colectivos en la ciudad de Lima generará un mayor deterioro en las avenidas, calles, pistas a lo largo de los años, en donde muchas veces el mantenimiento que se les brinda no es el adecuado, a su vez, el aumento del parque automotor incrementa la emisión de gases contaminantes hacia la atmosfera. Esta emisión de gases a la atmosfera se ve agravada en la medida que las vías se van deteriorando, por lo que se forma una secuencia cíclica de daños: a mayores vehículos, mayor daño en la vía; y a mayor daño en la vía, mayor emisiones de gases contaminantes a la atmosfera.

Mientras que en la figura N° 13 se muestra la estimación a futuro en donde la gasolina generará un aproximado de más de 6000 millones de toneladas de CO2 para el 2030, mientras que el consumo de Diesel ocasionará más de 4000 millones de toneladas de CO2.

**Figura 13**

*Consumo de CO2 según el tipo de combustible*



*Nota:* el gráfico adjunto fue recuperado del reporte Estimación de emisiones vehiculares en Lima Metropolitana (p. 30), por L. Dawidowski, O. Sánchez – Ccoyllo, N. Alarcón, 2014, SENAEMI.

El reciclado de pavimentos ofrece grandes ventajas frente a la extracción y eliminación como lo son: la conservación del material (agregados y ligante asfáltico), la conservación de energía y recursos, así como el mejoramiento de la base estructural para el pavimento, la preservación del medio ambiente y la disminución de recursos económicos en la conservación de las vías. Además, el uso de asfalto espumado como agente estabilizador se presenta como una alternativa económica y ambientalmente más amigable. Wirtgen (2012) nos da mayores alcances de las principales características de la estabilización con asfalto espumado:

“Un aumento significativo de la cohesión en relación con la del material granular parental, sin una reducción significativa del ángulo de fricción.

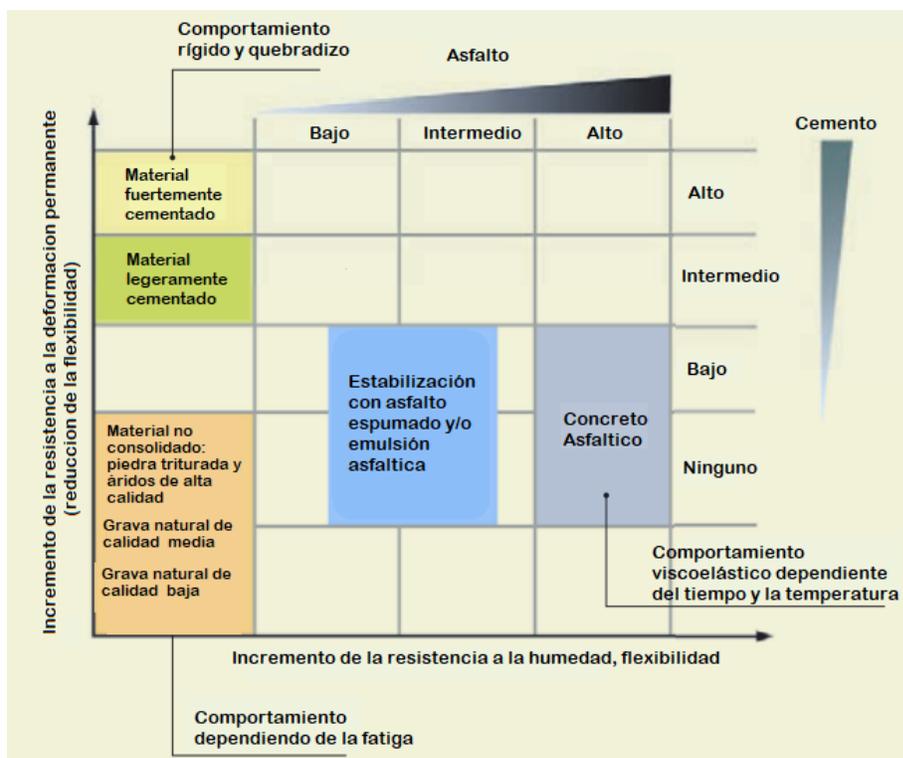
Adquisición de resistencia a la flexión debido a las propiedades viscoelásticas del betún.

Mayor resistencia a la humedad y durabilidad en relación con el material granular original” (p. 108)

Existen más técnicas para la estabilización de pavimentos además del asfalto espumado, entre los que se encuentran la estabilización con emulsión asfáltica y con cemento. El Manual de Reciclado en Frio (2012) toma como similares las características entre la estabilización con asfalto espumado y con emulsión asfáltica. Los efectos entre uno u otro agente estabilizador pueden verse en la figura 14.

**Figura 14**

*Comportamiento de diversos agentes estabilizadores para el pavimento.*



*Nota:* la estabilización con asfalto tiene la cualidad de aumentar la cohesión en relación con el material granular sin la reducción del ángulo de fricción, así como una mayor resistencia a la flexión, humedad y durabilidad. Extraído de (Wirtgen, 2012, p. 109)

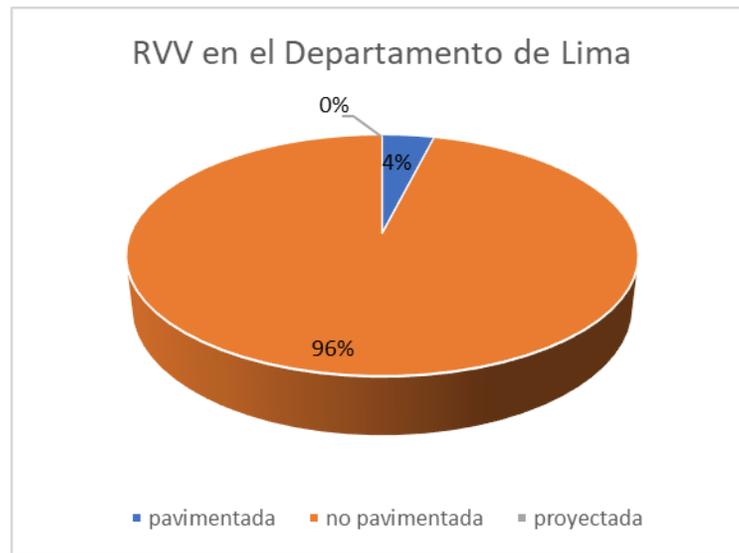
En el Perú, la utilización de la técnica del reciclado del pavimento con asfalto espumado es casi nula, y solo se ha empleado en dos obras ejecutadas en el departamento de Anchas y Arequipa, a pesar de que la utilización de esta en países como Canadá y España han dado excelentes resultados en términos de rapidez y confiabilidad, siguiendo las normas y estudios internacionales que abordan ampliamente el tema.

Según datos del ministerio de, a finales del 2018 el departamento de Lima contaba con 166.3 km de vías vecinales asfaltadas de un total de 4251.3 km; en el caso de la red vial departamental, se tienen pavimentadas 160.4 km de vía de un total de

1726.3 km. Esto nos da una idea clara de la necesidad de prestar mayor atención a nuestras carreteras, su colocación y mantenimiento la cual proporciona calidad a las vías y entrega la misma a las vías que por uno u otro motivo hayan visto mermada su condición y transitabilidad a través de los años.

### Figura 15

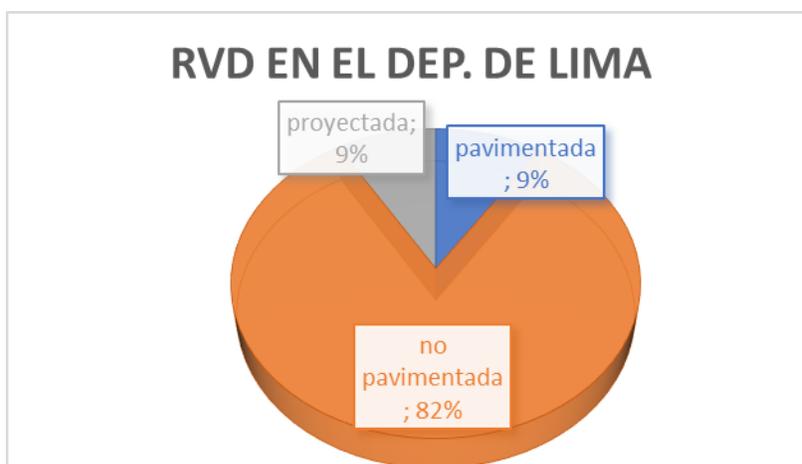
*Red vial vecinal en el departamento de Lima en el 2018.*



*Nota:* el 96% corresponde a vías no pavimentadas, siendo solo el 4% el total de vías de la red vial vecinal en Lima que están pavimentadas. Adaptado de MTC - OGPP - Oficina de Estadística, 2018.

## Figura 16

*Red vial departamental en el departamento de Lima en el 2018*

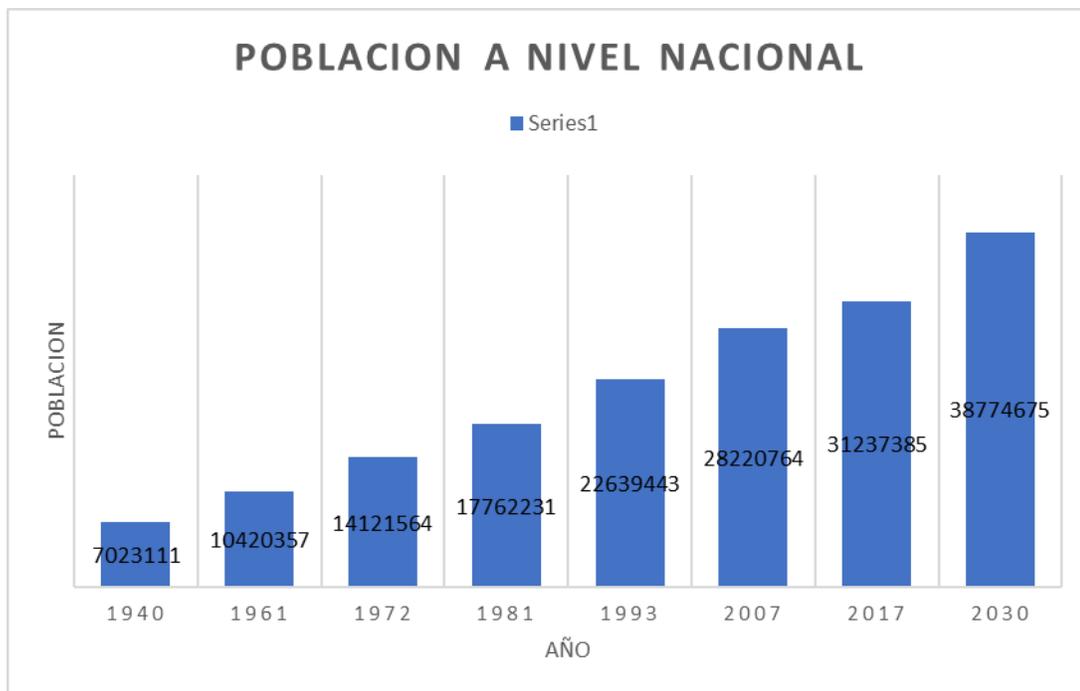


*Nota:* el 82% corresponde a vías no pavimentadas, siendo solo el 9% el total de vías de la red vial departamental en Lima que están pavimentadas. Las vías no pavimentadas incluyen a vías afirmadas, sin afirmar y trocha. Las vías proyectadas corresponden al 9% restante. Adaptado de MTC - OGPP - Oficina de Estadística, 2018.

Además, según los resultados del censo del 2017 elaborado por el INEI, en el Perú, al 2017, se cuenta una población de 31237385 habitantes. Si comparamos los datos que se tienen de la población en los anteriores censos podemos establecer una tasa de crecimiento promedio anual de 68% al 2030, lo que nos un total de población a nivel nacional de 38774675 de habitantes. Si centramos nuestros datos solo en el departamento de Lima, se tiene una tasa de crecimiento anual, en base a los resultados de los censos anteriores, de 2,61%. Este resultado pone a la capital del Perú como uno de los departamentos de mayor crecimiento con un aumento estimado de 4 millones de habitantes en los próximos 10 años, por lo que es de suponer que tendremos vías más transitadas y sometidas a mayores esfuerzos.

**Figura 17**

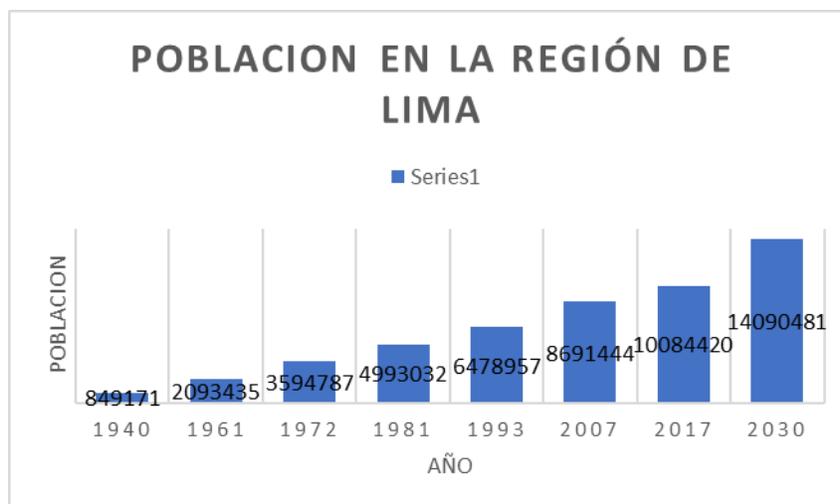
*Población según datos censales y proyección poblacional al 20130 en el Perú*



*Nota:* los datos muestran las proyecciones hechas para la población a nivel nacional en el año 2030. Los datos muestran que en el periodo 2017-2030 la población aumentara en un 24% aproximadamente. Elaboración propia.

## Figura 18

*Población según datos censales y proyección poblacional al 20130 en la Región de Lima*



Nota: los datos muestran las proyecciones hechas para la población a nivel regional en Lima en el año 2030. Los datos muestran que en el periodo 2017-2030 la población aumentara en un 40% aproximadamente. Elaboración propia.

Dentro de la coyuntura actual generada por la pandemia del Covid-19, el Programa Arranca Perú, que, mediante inversión pública, permitirá la ejecución de diversas obras de infraestructura, dentro de las que se cuenta el mantenimiento vial. Al respecto, el entonces ministro de Transporte Carlos Lozada precisó que “Con esta inversión se busca reactivar la ejecución de trabajos de mantenimiento en más de 60 mil kilómetros de vías nacionales y vecinales de todo el país. El tipo de intervención es una rehabilitación menor y servicio de conservación rutinaria y periódica. El programa comprende un año de duración” (Quinde B., agosto - 2020 Número 65, p. 16)

Esta tesis se busca estudiar y difundir la técnica del reciclado in-situ con asfalto espumado, evaluando sus beneficios y viabilidad de su uso en vías urbanas de gran demanda, tomando como referencia a la avenida Raúl Ferrero, una de las principales vías de acceso al distrito de la Molina y que conecta a este distrito con el de Santiago de Surco a través del cerro Centinela.

Cabe mencionar, que durante el 2020 en medio de la pandemia COVID-19, hubo una reducción de contaminación atmosférica, hídrica, sonora, visual durante los meses de marzo a junio, sin embargo, la reactivación de actividades económicas ha vuelto a generar las mismas emisiones que van aumentando paulatinamente

**APORTE:** El reciclado de pavimentos en frío in-situ ofrece grandes ventajas frente a la extracción y eliminación del pavimento como lo son: la conservación del material (agregados y ligante asfáltico), la conservación de energía y recursos, así como el mejoramiento de la base estructural para el pavimento, la preservación del medio ambiente y la disminución de recursos económicos en la conservación de las vías. En el Perú, no hay la debida investigación para estos procesos constructivos y su respectiva difusión, ya que la sostenibilidad se continúa implementando en la conservación de vías urbanas y rurales.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes del Estudio de Investigación**

#### **2.1.1 Investigaciones Nacionales**

Para esta tesis se reconoce a las siguientes personas y/o organizaciones que compartieron experiencias y/o proporcionaron asistencia, información, documentación o materiales respecto a investigaciones sobre el asfalto espumado.

Espinoza P. y Vildoso J. (2014). en su tesis de grado, mostraron las ventajas del reciclado con asfalto espumado respecto a técnicas convencionales similares en la etapa de post - intervención entre las carreteras de La Oroya – Chicrín – Huánuco – Tingo María – Dv. Tocache y Conococha – Yanacancha en los años del 2007 al 2013.

De acuerdo con lo investigado por los autores, el rendimiento diario que se obtuvo al aplicar la Técnica del RPAE, en las carreteras de estudio, fue alto y favorable en comparación a la aplicación de una Técnica Convencional, ya que se empleó aproximadamente la mitad del tiempo.

Simultáneamente, la demora en apertura del tránsito no fue un obstáculo durante la ejecución del mantenimiento en la carretera Conococha-Yanacancha, ya que su proceso constructivo no interfirió con el paso de los vehículos por media calzada debido al mayor ancho de la vía, por otro lado, la carretera La Oroya – Chicrín – Huánuco-Tingo María - Dv. Tocache permitió la apertura todas las tardes después de la jornada sin inconvenientes para el reciclado recién trabajado, ya que la vía era de menor ancho. De esta manera, fue posible reducir la interrupción del tráfico

En consecuencia, debido al alto rendimiento de la Técnica RPAE, el tiempo de ejecución para las dos obras en estudio fue mucho menor con respecto a la Técnica Convencional, lo cual generó un ahorro notable en gastos generales. La carretera La Oroya–Chicrín–Huánuco–Tingo María–DV. Tocache consiguió un ahorro de aproximadamente S/.4,001,012.00 en

gastos generales y la carretera Conococha-Yanacancha alcanzó un ahorro de S/7,207,807.86.

En la investigación de Deza S., Díaz, C., Miranda, L. y Velázquez, M. (2017), que lleva por título, Aplicación de nuevas tecnologías a la conservación de la red vial de Arequipa Caso corredor vial: Cañón del Colca - Valle de los Volcanes, se realizó análisis comparativo de tiempo de obra y costos de acuerdo a la técnica convencional y la aplicación de asfalto espumado.

En esta tesis se muestra las ventajas de la aplicación del asfalto espumado para la conservación vial en la carretera Cañón del Colca – Valle de los Volcanes en Arequipa, donde se estudia su viabilidad y se realiza la comparación con otras alternativas propuestas para el proyecto, se hizo un análisis de costo y tiempo. Se presentó un análisis de la conservación vial en el Perú desde los años 80, donde la inversión para las carreteras era precaria debido a problemas políticos y económicos, sin embargo, en la siguiente década hubo una transición y mayor inversión a este sector y se rehabilitaron alrededor de 6000 Km de carreteras. Y no es hasta el año 2007, que, en el Proyecto Perú, se da a conocer que no había una política dirigida a la conservación vial del país.

La innovación en los procesos constructivos está en constante evolución, el Perú no puede ser ajeno a estos cambios, más aún cuando en estos tiempos se busca proteger al medio ambiente. Se buscó evaluar la situación del tramo en estudio, presentar las nuevas técnicas para conservación vial y examinar sus tiempos y costos de ejecución. El tramo que estudiaron comienza en Dv. Patahuasi en la Ruta Nacional PE-34E hasta el Dv Vizcachane (Km 23+850).

Las ventajas del asfalto espumado son: reactivar el tráfico inmediatamente, con maquinarias modernas se obtienen grandes rendimientos, se pueden

tratar materiales in situ y con porcentajes altos de humedad, al añadir cemento se aumenta la resistencia retenida.

Se concluyó que el asfalto espumado permitió reducir hasta en un 27.8 % los plazos de ejecución de las obras, se disminuyó un 11.5 % el costo del proyecto, debido al ahorro de materiales; cuando no se da un mantenimiento periódico o rutinario, origina fallas prematuras y superficiales que conllevan a futuras fallas estructurales que requieren mayor inversión.

En la tesis de Ccoyllo Huamán, J. (2019) de la Universidad de Huancayo, se plantea como alternativa de solución, el asfalto espumado para mejorar las mezclas asfálticas en los pavimentos flexibles de Lima.

En Lima, existen muchos proyectos viales donde se aplica el pavimento flexible, sin embargo, se sigue optando por las técnicas tradicionales que a lo largo de su vida útil termina siendo más costoso su mantenimiento y rehabilitación, las mezclas asfálticas en caliente requieren altas temperaturas para poder conseguir alta viscosidad en la mezcla, de acuerdo al MTC en el 2018, la Red Vial Nacional se encontraba pavimentada en un 75 % y para el bicentenario del país, en el 2021, debía llegar al 100%. Para el diseño de mezclas asfálticas solo se usa el Manual de Carreteras especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013, sin embargo, este no contempla la técnica del asfalto espumado como base estabilizadora, el cual es beneficioso en condiciones mecánicas, económicas y beneficioso con el medio ambiente.

En el diseño del asfalto espumado, se explican 2 procesos, el directo e indirecto, el primero consiste en la inyección de agua fría de manera directa en la mezcla caliente dentro de una cámara de expansión, y en la segunda, incluye materiales como la zeolita sintética, que posee agua en su estructura molecular, la cual ocasiona micro espuma en la mezcla. Se usaron agregados de las canteras “Jicamarca” y “La Gloria”, cemento asfáltico PEN

60/70; a cada uno se le hizo sus respectivos ensayos para conocer sus propiedades y posterior dosificación en el diseño de la mezcla.

Se concluyó que la técnica del asfalto espumado aumenta las propiedades estructurales, brinda mejores costos de producción y mitiga el impacto ambiental. Los resultados mostraron un que 1 m<sup>3</sup> de asfalto espumado cuesta hasta un 6.85% menos que las mezclas asfálticas convencionales; recomiendan medir las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO Y SO<sub>2</sub> durante la fabricación de las mezclas para un análisis más detallado.

En la tesis de Gonzales Remond, M.H (2017) de la Universidad Católica de Santa María de la región de Arequipa, se propone el método del asfalto espumado como mejora para los pavimentos asfálticos.

En la actualidad, la conservación de la red vial utiliza tecnologías cuyos parámetros de costo y tiempo pueden ser optimizados a través de la utilización de nuevas propuestas, sin disminuir la calidad del trabajo. Esto evitaría mayores sobrecostos al estado que es el impulsor y financia las labores de conservación.

La tesis se enfoca en el tradicional diseño de mezcla asfáltica en caliente y la mezcla asfáltica espumado, para realizar una comparación y contrastar aspectos económicos, técnicos y ambientales. Se comenzó recogiendo información, para obtener un propósito y una justificación del estudio del asfalto espumado; se usaron muestras de la cantera “KM 19 – MTC” para los agregados finos y gruesos, ubicada en el distrito de Uchumayo, Arequipa, Arequipa, a los cuales se les realizaron los ensayos correspondientes. En la M.A.C. se usó cemento asfáltico PEN 85/100 de la empresa PetroPerú. Mientras que, en el asfalto espumado, el proceso de espumado se realizó de manera empírica, ya que no contaban con la máquina de laboratorio (Wirtgen WLB 10S).

Se concluye que el asfalto espumado puede prescindir de cementos asfálticos especiales, aditivos, para un buen rendimiento, en el presupuesto planteado para M.A.C. es S/. 785540.16, el asfalto espumado es S/.663126.96, una diferencia de S/. 122 413.20, esta diferencia se debe al ahorro de combustible y maquinaria. Se emanaron 38150 Kg gases nocivos al aire en la producción del asfalto espumado como material estabilizador. La difusión de esta técnica debe ser prioridad para un preservar mejor los recursos que un país posee y a la vez ser amigables con el medio ambiente.

En la tesis de Abad Quito, H. (2016) se plantea el uso de recursos no renovables para la rehabilitación de carreteras, se busca implementar una técnica moderna que genere altos rendimientos y tenga impactos mínimos en el medio ambiente, el proyecto a estudiar es la carretera de Conococha – Huaraz.

Las técnicas convencionales para el mantenimiento de carreteras generan demasiados residuos sólidos, por eso se ha optado por el Reciclado en frío, la cual permite reducir, reciclar y reutilizar los agregados a trabajar, en este caso particular se propone el método de asfalto espumado, se estudian las ventajas aportadas en el proceso de conservación periódica en la carretera Conococha – Huaraz en los años 2010-2011.

El asfalto espumado es usado como un agente estabilizador donde los agregados suelen ser piedras chancadas, de buena procedencia y agregados reciclados también. El reciclado en frío in situ se basa en la reutilización de los materiales que provienen del pavimento existente, se hace el fresado, mezclado y homogeneización de la mezcla, al hacer esto, se reutiliza en su totalidad el pavimento envejecido. De acuerdo con el análisis de ventajas ambientales y mediciones hechas en campo, se obtuvo que al usar la técnica convencional se usaría 167 194.80 m<sup>3</sup> de material granular para la base, mientras que al usar el asfalto espumado se usaría solo 109 81.27 m<sup>3</sup>, la gran diferencia se debe a que se pudo reutilizar todos los materiales del pavimento existente y no fue necesario explotar más canteras para la

extracción de material granular. En el aspecto del mantenimiento periódico realizado en el 2010, la técnica del asfalto espumado resultó más económica, donde su valor fue de \$ 155000 por Km de carretera, mientras que la mezcla asfáltica en caliente varía entre \$380 000-420 000 por Km.

Se concluye que el rendimiento final al aplicar el asfalto espumado fue de 760 metros de carretera en una jornada normal, la resistencia estructural representada superó los límites mínimos indicados en el PCV de la carretera.

### **2.1.2 Investigaciones Internacionales**

Para Núñez Hernández J., Salguero Velásquez L. y Vera Chila. Faver (2019) se realiza un estudio de asfalto natural como alternativa de rehabilitación de la infraestructura vial en la ciudad de Alto Magdalena, Colombia.

El artículo presentado por los autores colombianos sobre una mezcla asfáltica natural (MAN) nos comenta que el pavimento flexible comúnmente usado en esta zona de Colombia sufre daños constantes y acelerados ocasionados por la humedad y la temperatura, es por eso que se busca implementar el “asfalto natural”, el cual es una alternativa frente a lo convencional, ya que mejora las propiedades notablemente, lo cual podría disminuir los costos de mantenimiento y rehabilitación ya existentes en demasía.

En este escenario, el asfalto natural está compuesto por bitumen, materiales pétreos y asfaltita, mineral con yacimientos en la zona de Girardot. Su finalidad es poder brindar parámetros similares al de un diseño de pavimento tradicional, e inclusive superiores; a su vez su aplicación logra mitigar el impacto ambiental y los elevados costos de transportar agregados de canteras lejanas, el tiempo de obra y su continuo mantenimiento.

Los ensayos mostraron una mejoría en la rigidez de la mezcla asfáltica, la cual se adecuaba a las altas temperaturas, del mismo modo, el aumento en la

resistencia y durabilidad para esta zona donde hay volúmenes medios de tránsito. Sin embargo, no todos los ensayos cumplieron las especificaciones de la normativa del Instituto Nacional de Vías - Colombia en el uso de “asfalto natural”, por lo que se sugiere el uso de ligantes asfálticos, para poder obtener valores correctos.

En pocas palabras, el uso de esta mezcla se puede implementar en zonas rurales donde existen vías no pavimentadas o asfaltos ya deteriorados por las condiciones climáticas, se recomienda aplicar esta técnica económica y su mantenimiento rotativo.

En la siguiente guía presentada por la Universidad de Costa Rica, se comentan conceptos y pautas para la implementación del asfalto espumado en el ámbito de transporte del país. El proceso de diseño y ensayos realizados para estabilizar el pavimento con asfalto espumado debe cumplir con los estándares de la norma.

Se presenta una síntesis de la guía de laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (2016) que se usa en la Universidad de Costa Rica:

El mantenimiento y rehabilitación de un pavimento con fallas superficiales y/o fallas estructurales tiene muchas alternativas de solución de acuerdo con el estado de éste, sin embargo, con el pasar del tiempo las entidades han optado por soluciones inmediatas y fáciles que solo otorgan un “éxito breve”, ya que después, requieren mayor inversión e intervención ingenieril para cuando las vías ya están deterioradas. Entre las técnicas más utilizadas, se encuentra el Reciclado en Frío, mediante el cual se puede aprovechar hasta el 100% de materiales existentes y agregados nuevos.

Para su diseño y ensayo de estas mezclas, se busca una granulometría óptima, con esto se podrá decidir cuál es la técnica más adecuada; en el caso del asfalto espumado se trabajan 3 tipos de Materiales Estabilizados con Bitumen, los cuales tienden a usar materiales granulares como gravas,

arenas y agregados reciclados; el primero posee una alta resistencia al corte y su uso es para un diseño de 6 millones de ESALs, el segundo tiene una medida resistencia al corte y es su diseño se encuentra entre los 3-6 millones de ESALs, por último, este material suele contener grava y arena.

Las proporciones de agregados que se emplean en un laboratorio deben estar en excelentes condiciones para lograr la humedad requerida durante el proceso de adición de agua al bitumen y se obtenga el asfalto espumado óptimo, asimismo, la dosificación nos posibilita uniformidad en el diseño a realizar en campo para un trabajo eficiente. De la misma manera, se debe realizar su curado a la mezcla para su posterior compactación donde se logrará la resistencia final, y si fuese necesario se procederá a suministrar un sello como impermeabilizante de acuerdo con las condiciones ambientales y económicas que se tengan.

En la investigación de Chavarro S. (2018) se propone usar material 100 % reciclados para el diseño de nuevas mezclas, aplicando aditivos y ligantes asfálticos en el caso de vías de bajo tráfico.

La inclusión de mayores cantidades de pavimento asfáltico recuperado (RAP) en la producción de mezclas asfálticas para carreteras de bajo volumen representa una solución ambiental que logra reducir el desperdicio y la demanda de productos derivados fósiles, y al mismo tiempo brinda una oportunidad para que las agencias locales optimicen presupuestos de construcción y mantenimiento de carreteras, ¿ Qué tanto afectan el uso de RAP en proporciones de 60-100 % en un diseño de mezcla asfáltica , de manera que se aplique en Mezclas asfálticas en caliente y en frío, con o sin aditivos?

Las mezclas asfálticas en frío que usaron RAP fueron ensayadas en los laboratorios para conocer su rendimiento en el laboratorio y en campo, se

evaluó la susceptibilidad a la humedad, resistencia al surco, durabilidad y rigidez por resistencia a la tracción indirecta, el módulo resiliente.

Se concluyó que al adicionar humedad a la mezcla de los agregados permitió una mejor trabajabilidad, aunque se obtuvo una buena susceptibilidad a la humedad, no se logró la resistencia a la tracción indirecta. Todas las mezclas espumadas presentaron poca durabilidad con un nivel de Cantabro considerable donde hubo pérdida de masa que varió del 71-92%, lo que da a entender que no hubo una correcta adhesión entre partículas.

En la Universidad de Waterloo, se presentó la siguiente investigación de Bhavsar J., (2015) donde se realiza la comparación de Reciclado en frío in-situ y Reciclado en frío con mezcla asfáltica expandida.

El reciclaje de pavimentos que utilizan CIR y CIREAM tiene el potencial de disminuir el consumo de energía, reducir los impactos ambientales adversos y los costos asociados con la rehabilitación del pavimento asfáltico.

Evaluar el Reciclaje en frío in-situ frente al Reciclaje en frío in-situ con una mezcla de asfalto expandido, sus rendimientos y diferencias

-Evaluar las diferencias de rendimiento de campo entre Reciclaje en frío in situ y el Reciclaje en frío in situ con mezcla asfáltica expandida.

-Evaluación de la diferencia de rendimiento de laboratorio entre Reciclaje en frío in situ y el Reciclaje en frío in situ con mezcla asfáltica expandida.

-Investigación sobre las diferencias de rendimiento de campo a largo plazo entre Reciclaje en frío in situ y el Reciclaje en frío in situ con mezcla asfáltica expandida

Se concluyó se llevaron a cabo tres tipos diferentes de pruebas de laboratorio en muestras mixtas de CIR y CIREAM, para probar su resistencia general, su rendimiento de agrietamiento por tensión y

agrietamiento por fatiga. Estas pruebas se realizaron en dos tipos diferentes de material RAP. Se usó el módulo dinámico para concluir que el curado a las briquetas durante 14 días, se obtuvo mejores resultados en las pruebas donde se aplicaron bajas frecuencias de carga.

El cemento asfáltico se usó en un 3.2 %, brindó un mejor rendimiento en la CIREAM, para el ensayo de resistencia al agrietamiento por fatiga y fallas por temperatura, el CIR y CIREAM, arrojaron resultados similares. Las propiedades del RAP y el uso de emulsión y asfalto espumado fueron las razones principales para las diferencias en cada una de las muestras ensayadas. Sin embargo, durante el proceso constructivo, se recomienda tener mayor cuidado con el curado del Reciclado en frío.

Para Zammit, M. (2016), su investigación sobre el rendimiento de las bases estabilizadas con asfalto espumado incorporando RAP en la ciudad de Ontario para buscar alternativas más sostenibles.

En la ciudad de Ontario, Canadá, el aumento por trabajar con menos agregados vírgenes y mitigar el impacto ambiental de los trabajos realizados durante un proyecto de pavimentación, se busca reciclar el asfalto, que trae beneficios económicos y ambientales, en la actualidad el RAP se usa como base y subbase y ahora se estabilizan estas capas con asfalto espumado, el cual no necesita altas temperaturas para calentar y su trabajabilidad son inmediatas.

El objetivo de la investigación es conocer el potencial de las bases estabilizadas con asfalto espumado para ser utilizado como base granular de alta calidad que a la vez incorpora agregados de baja calidad y reciclados; se usaron distintas cantidades de RAP, las muestras compactadas con estas mezclas se ensayaron para obtener su módulo de elasticidad y sus características de deformación permanente.

Al finalizar las pruebas de Indirect Tensile Strength y Indirect Tensión Resilient Modulus se hicieron durante la fase de diseño, luego los ensayos triaxiales se realizaron en la etapa final. Los resultados mostraron que la mezcla inestabilizada con RAP era muy susceptible a la deformación permanente, sin embargo, obtuvo mejoras con la adición de material granular. En síntesis, se obtuvo que el aumento del contenido de RAP disminuye la tensión de falla final, produjo un patrón de falla más dúctil similar al de la arena suelta en comparación con la arena densa. Se deduce que las mezclas estabilizadas con bitumen pueden atrapar cantidades de agua en los espacios de los poros durante la carga rápida, disminuyendo su resistencia efectiva.

## **2.2 Bases Teóricas**

### **2.2.1 Pavimento**

#### **2.2.1.1 Generalidades**

El asfalto utilizado como componente del pavimento es una mezcla de agregado mineral y fino, unido cohesivamente con aglutinantes bituminosos, con un contenido de aglutinante que suele oscilar entre el 3% y el 7% en peso, según la mezcla y la aplicación. (EAPA, 2014). Así mismo, la Universidad de Costa Rica (2020) define al pavimento como:

“Una estructura constituida por un conjunto de capas superpuestas, de diferentes materiales, adecuadamente compactados, que se construyen sobre la subrasante de la vía con el objeto de soportar las cargas del tránsito durante un período de varios años, brindando una superficie de rodamiento uniforme, cómoda y segura” (p. 3)

Los pavimentos se diseñan con ciertos criterios para asegurar que estos sean duraderos y cuenten con las condiciones adecuadas para su transitabilidad. “Las condiciones ambientales específicas y la carga de tráfico anticipada son las dos consideraciones de diseño estructural

principales para cualquier pavimento” (Wirtgen, 2012, p. 22). Es por ello por lo que el pavimento “deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua” (Rodríguez Mineros y Rodríguez Molina, 2004, p. 16). (Obando C., , 2017)

### 2.2.1.2 Tipos de Pavimento

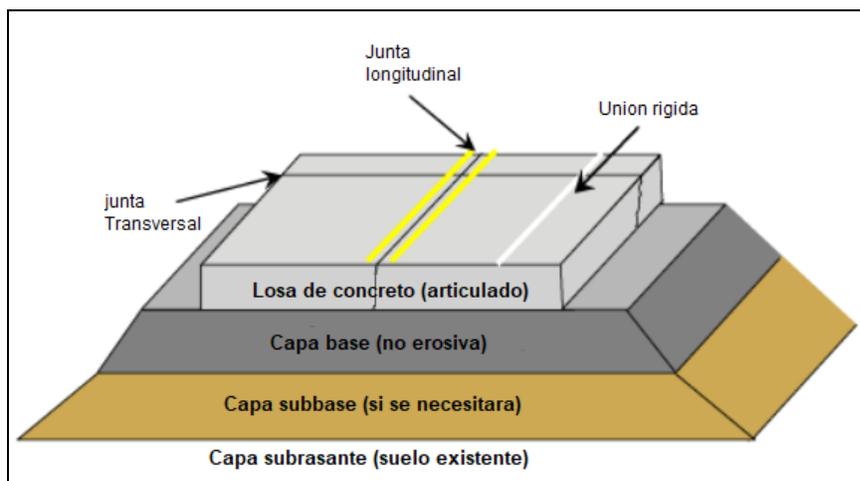
De acuerdo con el material usado para su construcción, el pavimento se puede clasificar de dos maneras fundamentalmente:

#### 2.2.1.2.1 Pavimento rígido

“se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible, su periodo de vida varía entre 20 y 40 años; el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas” (Rodríguez et al., 2004, p. 17). En este tipo de pavimentos, al ser el módulo de elasticidad y la rigidez considerablemente más altos, la distribución de cargas es mayormente absorbida por la losa de hormigón. (Jácome E., 2020).

**Figura 19**

*Estructura típica de un pavimento rígido.*



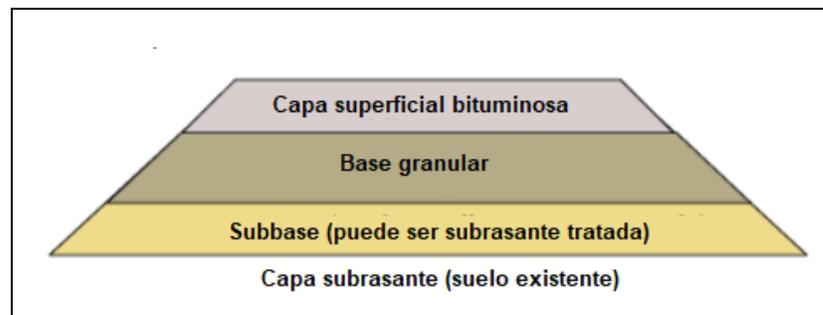
Nota: en la figura se pueden apreciar las distintas capas que conforman la estructura del pavimento rígido. La capa de subbase es opcional, ya que, al concentrar la mayor parte de la carga en la losa de concreto, las capas inferiores estarán sometidas a menos esfuerzos producto de la carga. Recuperado de <http://engineeringfeed.com/pavement-types>

#### 2.2.1.2.2 Pavimento flexible

Es el pavimento cuya “superficie de rueda está constituida principalmente por mezcla asfáltica y capas granulares sin estabilizar o estabilizadas con asfalto. En estos pavimentos la totalidad de la estructura interviene en la distribución de cargas” (Universidad de Costa Rica, 2020, p. 3). Su uso está referido mayormente a zonas de alto tránsito; además, dependiendo de las características de uso y la calidad del terreno en el que se asienta la estructura, se puede prescindir de una u otra capa estructural (Jácome E., 2020). Una característica importante de este tipo de pavimentos es que resulta más rentable su construcción; sin embargo, requiere de mantenimiento constante para mantener su operatividad. “Tiene un periodo de vida de entre 10 y 15 años” (Rodríguez et al., 2004, p. 18).

#### Figura 20

*Estructura típica de un pavimento flexible.*



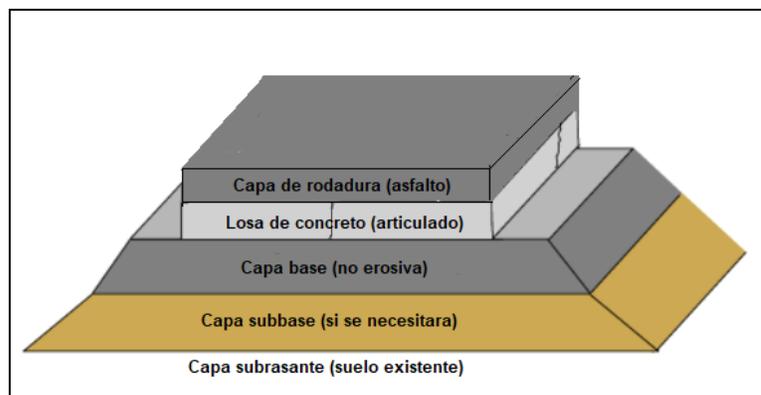
Nota: la estructura de este pavimento esta principalmente compuesta por una subbase, una base y la carpeta de rodadura elaborada con asfalto. Recuperado de <http://engineeringfeed.com/pavement-types>

### 2.2.1.2.3 Pavimento semi-rígido

Estos pavimentos de caracterizan por presentar una estructura compuesta por una losa de hormigón y una superficie compuesta por concreto asfáltico. Su empleo se da básicamente en calles y zonas donde hay presencia de estructuras subterráneas (líneas de tren, alcantarillado, etc.) y se necesita resguardar estas estructuras de las cargas del tráfico (Ccoyllo J. (2019) citando a Tapia (2011)). Entre las ventajas que presentan estos pavimentos esta la ausencia de fatiga en las capas de asfalto, una excelente capacidad estructural y una elevada vida de servicio.

**Figura 21**

*Estructura típica de un pavimento semirrígido.*



Nota: la característica principal de este tipo de pavimento es que aúna en su estructura al pavimento rígido y al flexible, presentando una losa de concreto y sobre la misma una capa de pavimento asfáltico. Adaptación propia.

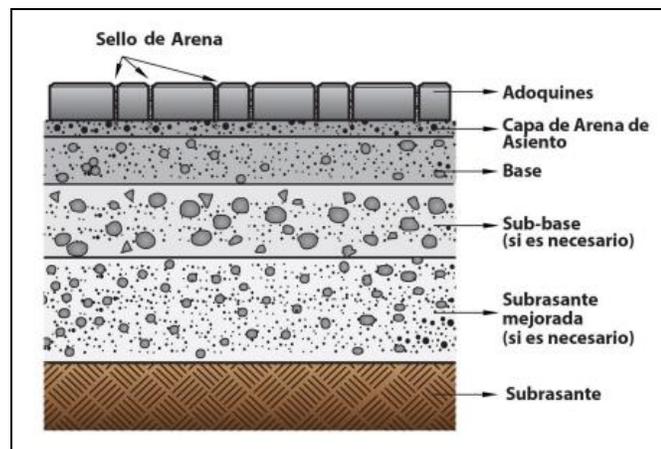
### 2.2.1.2.4 Pavimento articulado

También llamados adoquinados, la estructura básica de este pavimento consta de una capa de base granular, una capa de arena y

una capa de rodamiento constituida por adoquines de concreto, hormigón, ladrillo, etc. Estos elementos de concreto se ensamblan de tal manera que permiten y aseguran una transferencia de carga hacia las capas inferiores, trabajando de una manera sólida y sin posibilidad de desmontaje individual (Instituto del Cemento y del Concreto de Guatemala, 2014). Como en todo pavimento, el número de capas y la composición de estas puede variar en consideración a las cargas del tráfico y a las condiciones a las que estará expuesta la estructura.

**Figura 22**

*Estructura típica de un pavimento articulado o adoquinado.*



Nota: en la figura se aprecia las capas que conforman la estructura de un pavimento articulado. Se puede prescindir de las capas de subrasante mejorada o tratada y de la subbase, esto en función de las características de resistencia del suelo de fundación, así como por las cargas de tráfico a la que estará expuesta la estructura. Recuperado de (Instituto del Cemento y del Concreto de Guatemala, 2014, p. 9).

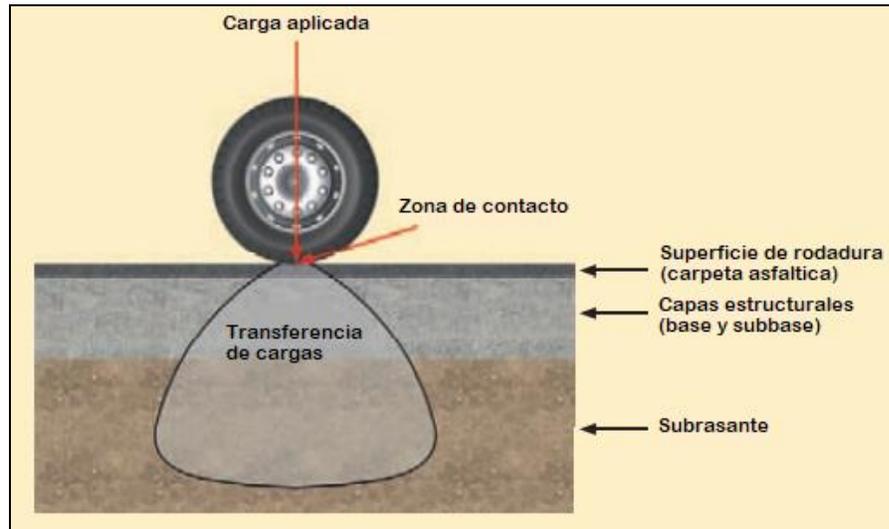
### **2.2.1.3 Componentes del Pavimento**

Los pavimentos flexibles, que son nuestro tema de investigación, se componen principalmente por la carpeta asfáltica, por una capa estructural que a su vez se compone de la base y la subbase y por la

subrasante. Esta composición del pavimento tiene la misión de transferir las cargas que recibe el pavimento hacia el terreno de fundación.

### Figura 23

#### *Transferencia de cargas en la estructura del pavimento flexible*



Nota: se puede apreciar que la transferencia de cargas es gradual y se dispersa a una mayor área en la capa subyacente. Recuperado de Wirtgen (2012)

#### a) **Carpeta Asfáltica**

Es la parte superficial del pavimento, sobre la que circulan los vehículos, estado expuesta a diversos agentes que afectan directamente el pavimento, siendo los dos factores principales el tráfico y los agentes medioambientales. “Es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir” (Rodríguez et al., 2004, p. 25).

Al ser la capa de pavimento más expuesta, esta debe cumplir con criterios de funcionalidad, para asegurar así una conducción segura y evitar el deterioro del pavimento. Espinoza y Vildoso (2014) nos dan mayores alcances de la funcionalidad:

“1) Proporcionar una superficie de rodamiento adecuada que permita el tránsito fácil y cómodo de los vehículos, 2) Impedir la filtración de agua hacia las capas inferiores, ya que el exceso de humedad disminuye la capacidad portante de estas capas ocasionando fallas estructurales y 3) Resistir la acción destructora de los agentes climáticos y desgaste provocados por los vehículos” (p. 61)

**b) Base**

Es la capa ubicada inmediatamente antes de la carpeta asfáltica, y es la que recibe las mayores cantidades de carga. Se puede constituir de material granular (base granular) o de materiales bituminosos, cal y cemento (base estabilizada). “Regularmente esta capa además de la compactación necesita otro tipo de mejoramiento (estabilización) para poder resistir las cargas del tránsito sin deformarse y además de transmitir las cargas en forma adecuada a las capas inferiores” (Rodríguez et al., 2004, p. 24).

Su función principal es recibir las cargas transferidas por la carpeta asfáltica y transferirlas a la subrasante. Esta transferencia es gradual y se distribuye a un área más amplia en la subrasante como se aprecia en la Figura N°29. “La respuesta de una capa a una carga impuesta depende en gran medida de las propiedades del material (elasticidad, plasticidad y viscosidad) y de las características de la carga (magnitud, tasa de carga, etc.)” (Wirtgen, 2012, p. 19)

**c) Subbase**

Esta capa es la que tiene contacto directo con la subrasante. Esta capa recibe las cargas transferidas desde la base con una menor intensidad, lo que genera que esta pueda estar constituida por materiales de menor calidad, reduciendo así los costos en la construcción del pavimento. Además, “también previene la intrusión de los finos del suelo de subrasante en las capas de base, minimiza

los daños por efecto de las heladas y ayuda a prevenir la acumulación de agua libre dentro de la estructura del pavimento” (Espinoza y Vildoso, 2014, p. 62)

#### **d) Subrasante**

Esta capa está compuesta por elementos naturales y se considera como el suelo de cimentación del pavimento. Esta capa no es parte íntegra en la estructura del pavimento; sin embargo, tiene un impacto directo en el mismo. “Los métodos de diseño de pavimentos generalmente utilizan la resistencia y rigidez de la subrasante como parámetros de entrada primarios y tienen como objetivo proporcionar una estructura de suficiente espesor y resistencia para proteger la subrasante” (Wirtgen, 2012, p. 21).

Es en base a los estudios realizados al terreno de fundación, subrasante, que se determina la estructura que deberá tener el pavimento, ya que, con un terreno de fundación más pobre, se necesitará que el pavimento tenga mayor espesor y resistencia a las cargas aplicadas sobre el mismo, para evitar fallos a nivel de la estructura o en la subrasante misma. “En algunos casos, las subrasantes pueden comprender suelos colapsables, arcillas agitadas, arcillas blandas / consolidantes y suelos dispersivos / erosivos. Para tales condiciones, se requieren investigaciones, pruebas y diseño geotécnicos especializados” (Wirtgen, 2012, p. 21).

Cuando se tiene una subrasante considerada como no apta como suelo de fundación para el pavimento (suelos con CBR < 6%) se deben de considerar diversas actividades como la estabilización química o mecánica del suelo, elevación de la rasante, cambio del trazo vial, reemplazo del suelo de cimentación, entre otros. Estas medidas correctivas deben ser elegidas tomando en consideración las características del lugar, así como la que cumpla con elevar los

estándares técnicos y que no conlleven gastos excesivos (Abad H., 2016).

#### **2.2.1.4 Mezclas Asfálticas para el Pavimento**

Los pavimentos flexibles se conciben y diseñan con el objetivo de soportar las cargas del tráfico. Estos pavimentos tienen como componente principal a agregados pétreos, que de acuerdo con su granulometría serán considerados como fino y grueso y un componente bituminoso (cemento asfáltico) que sirve como ligante de los agregados, además de ser un material impermeable, lo que garantiza una adecuada protección de la estructura del pavimento. Las mezclas asfálticas de acuerdo con su temperatura de fabricación se pueden clasificar de la siguiente manera:

##### **2.2.1.4.1 Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA - Hot Mix Asphalt)**

Constituye al tipo más ampliamente usado en cuanto a mezclas asfálticas. Su uso es ampliamente documentado debido a su antigüedad. Su uso se aplica tanto para vías urbanas como rurales, carreteras y autopistas, así como para la construcción de aeropuertos.

“Se necesitan altas temperaturas [275 ° F (135 ° C) a 325 ° F (162 ° C) y más] para asegurar el secado completo del agregado y la posterior unión con el aglomerante, el recubrimiento del agregado por el aglutinante y la trabajabilidad para manejo y compactación adecuados. Todos estos procesos contribuyen a un buen comportamiento del pavimento en términos de durabilidad y resistencia a la deformación permanente y al agrietamiento” (NCHRP, 2015, p. 74)

Un tipo especial de mezclas asfálticas en caliente son las mezclas de alto módulo. Estas se caracterizan por presentar una resistencia a la fatiga y un módulo de elasticidad relativamente altos. Su aplicación se da para carreteras que soportan cargas altas debidas al tráfico y en

rehabilitaciones, en capas de entre 8 a 15 cm. Las proporciones de este tipo de mezclas varían de acuerdo con su uso, pero usualmente estas pueden llegar a presentar un contenido de asfalto del 6% respecto a la masa de material pétreo y con una proporción de polvo mineral de 8 a 10%. (Padilla A., 2004).

#### **2.2.1.4.2 Mezcla Asfáltica en Tibio (WMA- – Warm Mix Asphalt)**

Esta tecnología permite trabajar las mezclas asfálticas en caliente a una temperatura considerablemente menor, generalmente en un rango de 79°C a 146°C, una reducción de casi 23% respecto de la mezcla en caliente; esto debido a la aplicación de aditivos o agua.

Dentro de la clasificación de las mezclas tibias podemos subdividir la misma en dos fases. La primera corresponde a las mezclas asfálticas medio tibias (HWMA – Half Warm Mix Asphalt) en donde el asfalto se calienta, pero esta temperatura no supera el punto de ebullición del agua (100°C) y la segunda corresponde a las mezclas tibias propiamente dichas, en donde la temperatura supera a la del punto de ebullición del agua (100°C) pero esta es inferior en 20 o 30°C de las mezclas en caliente. (Kumar y Chandra, 2016)

“La producción de WMA en los Estados Unidos ha aumentado exponencialmente en los últimos años, de 19,2 millones de toneladas en 2009 a 86,7 millones de toneladas en 2012” (NCHRP, 2015, p. 74)

Entre las ventajas que se pueden presentar con la utilización de mezclas tibias esta la reducción de la temperatura, con ello se reduce la emisión de gases a la atmosfera, la reducción de humo, la disminución en el consumo de energía, una rapidez en su trabajabilidad y uso después de compactado, así como mayores rendimientos en la distancia de tendido.

“Las temperaturas más bajas de mezclado y pavimentación minimizan las emisiones de humo y olores y crean condiciones de trabajo más frescas para los trabajadores del asfalto. Como regla general, la emisión de humos se reduce en aproximadamente un 50% por cada 12 ° C de reducción de temperatura. Por tanto, una reducción de temperatura de 25 ° C puede conducir a una reducción de la emisión de humos de aproximadamente un 75%” (EAPA, 2014b)

#### **2.2.1.4.3 Mezcla Asfáltica en Frío (CMA - Cold Mix Asphalt)**

La ventaja que presenta este tipo de mezclas es que se puede trabajar a temperatura ambiente, en algunos casos puede que sea necesario calentar ligeramente el asfalto, pero ello no quita su característica principal de mezclar los agregados con un ligante bituminoso y mezclarlo, extenderlo y compactarlo a temperatura ambiente.

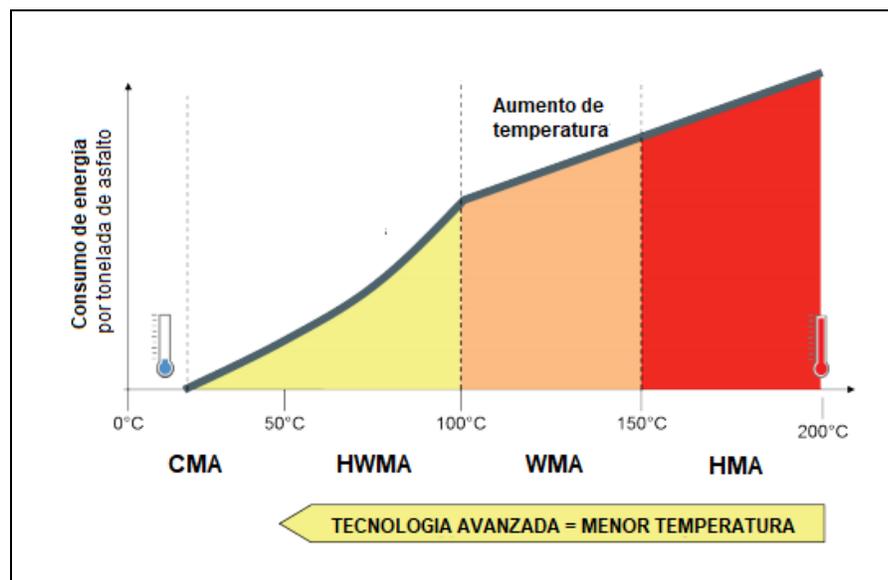
Para lograr la trabajabilidad del material es necesario que el ligante bituminoso presente una menor viscosidad que los usados en las mezclas en caliente. “Este tipo de mezclas se trabaja con diluidos o con emulsiones asfálticas para conseguir el recubrimiento del ligante sobre los agregados a temperaturas bajas” (Ccoyllo, 2019, p. 31).

El empleo de emulsiones con asfalto fluidificado propicia que se mantenga la trabajabilidad por un periodo después de su fabricación. Este tipo de mezclas puede ser almacenadas ya que la pérdida de viscosidad es lenta cuando el material se mantiene acopiado, siendo lo contrario cuando se ha tendido en obra. Las capas delgadas del material propician que el fluidificante se evapore y con ello, su endurecimiento. El uso de betunes fluidificados lleva ya largo tiempo en desuso en Europa, ello debido a la evaporación de hidrocarburos no quemados a la atmosfera al endurecerse, su elevado precio en el mercado y que son sustancias inflamables lo que puede representar un mayor peligro para los trabajadores.

Las emulsiones de rotura lenta son aquellas que aumentan la resistencia de la mezcla después de generarse la rotura de la emulsión. A este proceso se le conoce como maduración y se da debido a la evaporación del agua presente en la emulsión (rotura) aumentando con ello la cohesión de la mezcla (Padilla., 2004).

**Figura 24**

*Clasificación de las mezclas asfálticas de acuerdo con su temperatura.*



*Nota:* en la gráfica se aprecian los distintos rangos de temperatura de las mezclas asfálticas. Las mezclas en frío son la alternativa con las más bajas temperaturas, pudiéndose trabajar a temperatura ambiente. el rango de las mezclas tibias es el más amplio (50°C a 150°C). Recuperado de (EAPA, 2014b).

### 2.2.1.5 Ciclo de Vida del Pavimento

Como toda obra de ingeniería, los pavimentos comienzan su deterioro en el preciso momento en el que se han terminado de construir. Rodríguez et al. (2004) reconoce tres fases a lo largo de la vida del pavimento:

- **Fase de consolidación:** es la fase inicial en la vida del pavimento. Hace referencia a la consolidación que sufre la estructura de pavimento al momento de que ellos vehículos empiezan a transitar

por ella. Esta fase tiende a ser relativamente rápida e inexistente cuando se ha realizado una adecuada compactación a las diversas capas del pavimento.

- **Fase elástica:** esta fase inicia inmediatamente después de que el pavimento se ha consolidado por completo. Se podría decir que es la fase más importante y la de mayor duración, ya que de esta fase depende que tan larga sea la vida útil del pavimento. Cuando un vehículo transita por el pavimento, este recibe una carga que genera hundimiento en su superficie (deflexión) tendiendo a recuperarse en el momento en el que deja de recibir la carga. En esta fase no se presentan fallas en la estructura del pavimento provocada por agentes externos al mismo, pudiendo presentarse fallas locales cuando no se han tenido en cuenta diversos factores al momento de su construcción.
- **Fase de fatiga:** es la última fase en la vida del pavimento. La constante aplicación de cargas sobre el mismo genera que pierda su propiedad elástica y el pavimento no pueda regenerarse. Una vez que esto sucede se presentan grietas longitudinales a causa de la fatiga en el pavimento que, junto con la acción del agua que penetra a las capas internas del pavimento por medio de estas grietas, provocan un deterioro gradual y constante de la vía, requiriéndose que esta tenga que ser reconstruida.

#### **2.2.1.6 Factores de Deterioro del Pavimento**

Para la construcción de una carretera existen dos factores fundamentales que se toman en cuenta: las condiciones medioambientales y la carga producto del tránsito. Es en base a estos factores que se evalúan cuáles van a ser los diversos agentes que afectan negativamente la vida del pavimento y propician su deterioro. “Generalmente, el deterioro del pavimento se mide indirectamente evaluando la calidad de la conducción, pero obviamente también son relevantes las características visibles, como

la profundidad de la deflexión y el agrietamiento de la superficie” (Wirtgen, 2012, p. 23).

#### **2.2.1.6.1 Condiciones Ambientales**

Para determinar los efectos negativos que las condiciones medioambientales tienen sobre el pavimento, es necesario precisar que esta afecta a la vía en dos formas: en su superficie y en su estructura. Los efectos que tienen estos agentes sobre el pavimento pueden deteriorarlo de manera progresiva, ya que al fisurarse la carpeta asfáltica el agua penetra por estas grietas llegando así a las capas estructurales, y los daños en las capas estructurales se pueden apreciar en la superficie con la generación de más grietas.

Capa superficial: La superficie del pavimento es la capa sobre la que se tiene mayor incidencia de daños como producto de los agentes ambientales como son la lluvia, la radiación ultravioleta, la nieve, granizo, entre otros. Los efectos sobre la superficie se manifiestan de la siguiente manera:

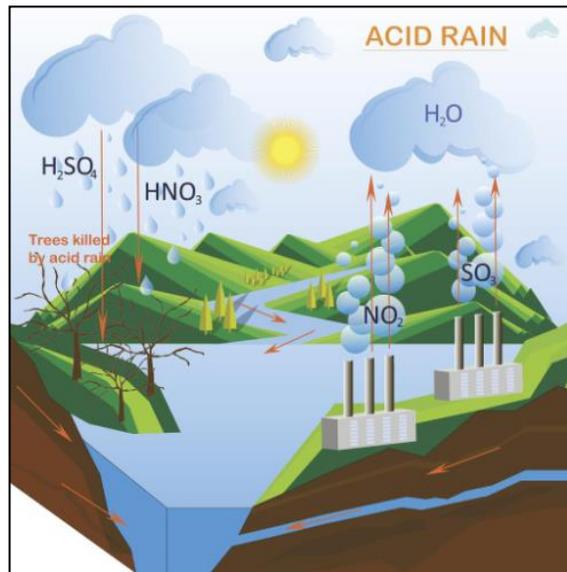
**Efectos del agua:** el agua, generalmente proveniente de la lluvia, penetra por las fisuras de la superficie y se acumula una presión de poros bajo el efecto de las cargas, lo que genera que la unión entre los agregados y el ligante se rompa, generando la desintegración y el desprendimiento del asfalto (Wirtgen, 2012). “De otro lado, es normal que, en ambientes húmedos o saturados, las mezclas reporten disminución en la cohesión de los asfaltos con el granular, lo cual afecta la estabilidad y rigidez Marshall en las mezclas asfálticas” (Obando C., 2017, p. 197).

Cuando el agua que afecta al pavimento se considera ácida, los daños al pavimento son mayores debido a los componentes que el agua ácida deja en el pavimento. Este tipo de aguas son producto de los gases contaminantes presentes en la atmósfera, estos gases al interactuar con la humedad presente en la atmósfera se condensan y

caen forma de precipitaciones. Entre los daños generados producto del agua acida se puede considerar el lavado de los agregados del pavimento producto de la reacción química de los componentes del pavimento con los del agua acida, lo que ocasiona un desgaste y desintegración de los agregados. Además, producto del desgaste y arrastre de los componentes del pavimento se crean vacíos que al recibir las cargas del tránsito ocasionan roturas en el pavimento. (Obando C., 2017).

### Figura 25

*Proceso de formación de la lluvia ácida.*



*Nota:* gases contaminantes como el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) se unen a las partículas de agua (humedad de la atmósfera), generando que en la lluvia hay presencia de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Recuperado de “Ecología verde”. URL: <https://www.ecologiaverde.com/cuales-son-las-posibles-soluciones-de-la-lluvia-acida-1201.html>.

Efectos de la temperatura: “Las carreteras se construyen alrededor del mundo en todo tipo de clima, desde desiertos secos y cálidos hasta regiones de alta precipitación y condiciones de tundra heladas”

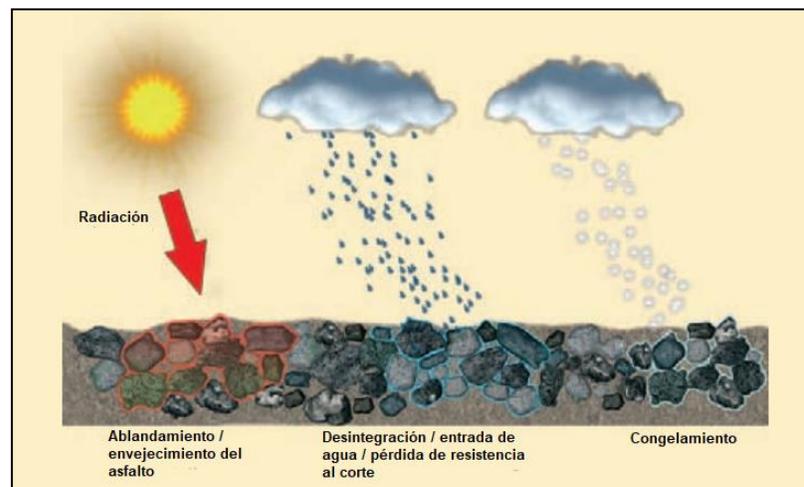
(Wirtgen, 2012, p. 22). Estas variaciones en la temperatura producen que los materiales del pavimento se expandan y contraigan provocando cambios en el volumen del pavimento.

En las zonas propensas a heladas, se produce el mismo efecto a causa del agua atrapada en las grietas del pavimento. Al momento de congelarse el agua aumento su volumen, disminuyendo su volumen cuando se ha producido el descongelamiento, pero generando un vacío que ante el efecto de cargas produce un hundimiento del pavimento.

Efectos de la radiación solar: la incidencia de luz UV sobre el pavimento ocasiona su envejecimiento. Este se da debido a la oxidación que sufre el asfalto a consecuencia de la insolación. Durante este proceso, el asfalto pierde elasticidad, generando su endurecimiento y volviéndolo más frágil, con más susceptibilidad al agrietamiento con los cambios de temperatura (Espinoza y Vildoso, 2014)

## Figura 26

*Efectos medioambientales sobre el pavimento.*



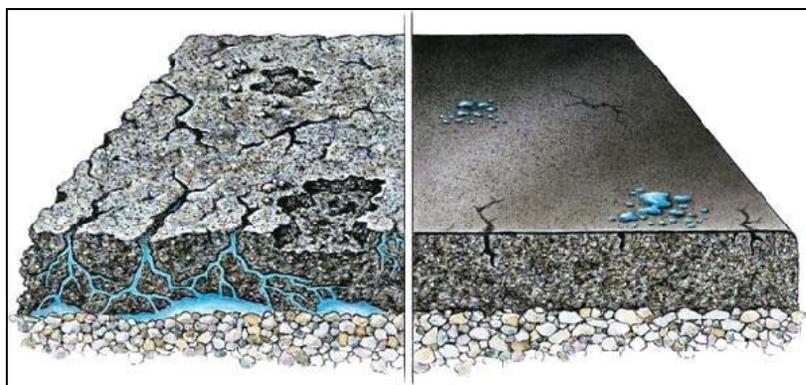
*Nota:* factores como el agua y la radiación UV pueden generar diversos daños en el pavimento como su envejecimiento y la aparición de grietas por donde el agua ingresa. Además, la temperatura juega un papel importante al influir en la expansión y contracción del pavimento y en el congelamiento del agua. Extraído de (Wirtgen, 2012, p. 24)

**Capa estructural:** Para las capas estructurales del pavimento, el agua es el mayor enemigo de estas. Cuando esta ingresa a las capas estructurales del pavimento se produce un efecto de lavado de las partículas, además de que genera presiones intersticiales que, en unión con las cargas del tráfico producirán hundimientos y baches en la vía. Se debe tener presente la calidad del material estructural, ya que cuanto más cohesivo es el material, más vulnerable es a la humedad, independiente del hecho de que la capacidad de carga de un material en estado seco es siempre mayor que en estado húmedo (Wirtgen, 2012).

El agua ácida, proveniente de la lluvia y de los cursos de agua, incluyendo los flujos freáticos, juega un rol importante en el desempeño de las capas estructurales. A medida que el pavimento se desgasta el agua entra con mayor facilidad y origina un efecto “lavadora” en las capas del pavimento; además, cuando el agua es bombeada fuera del asfalto arrastra gran cantidad de material, que al reaccionar químicamente con el agua ácida genera que se reblandezcan, y sea arrastrado con mayor facilidad. Al entrar el agua cada vez con mayor facilidad, acelera la oxidación de la estructura, produciendo una mayor rigidez en el asfalto. Las consecuencias de la intrusión del agua en las capas estructurales del pavimento son visibles en la superficie a medida que los daños avanzan y se hace evidente que el pavimento ha sufrido daños considerables a falta de mantenimiento de precauciones en su conservación (Obando C., 2017).

## Figura 27

*Daño en el pavimento a causa de la intrusión de agua.*



*Nota:* en la figura se aprecia la comparación en el estado de conservación del pavimento. El agua ingresa por las fisuras de este y ocasiona un daño repetitivo y cíclico, ya que, a mayor humedad, mayor será el desgaste y agrietamiento del pavimento, y mientras mayor sea el desgaste del pavimento, mayor cantidad de agua podrá ingresar al mismo. Recuperado de Valley Seal Coat & Paving. URL: <https://valleysealcoat.biz/>

### 2.2.1.6.2 Cargas del Tráfico

La finalidad de todo pavimento es el tránsito cómodo y seguro de los vehículos. Es por esta razón, que para el diseño de la estructura del pavimento se toman en cuenta factores relativos al tránsito como lo son el tipo de vehículo y la frecuencia de tránsito.

Para el diseño y construcción de la vía se consideran los antecedentes de tráfico por la vía, así como el tipo de vehículos que usualmente transitan por la misma y, además, se debe tomar en consideración que al construir una vía se va a tener un tráfico inducido, por lo que las consideraciones para el diseño del pavimento abarcan también la magnitud y la frecuencia de carga que se espera soporte el pavimento durante su vida útil. (Espinoza y Vildoso, 2014) citan a Wirtgen (2004) al definir los factores de la carga que imparte un neumático sobre la superficie de la carretera:

- La fuerza en kN que transfiere el neumático al pavimento.
- La presión de inflado en kPa que determina el área de contacto entre el neumático y el pavimento. Este dato define el área de superficie sujeta a carga.
- La velocidad de tránsito de los vehículos define el tiempo de carga del pavimento.

Estos factores son importantes ya que las cargas que soporta la vía nos son constantes y cambian de acuerdo con el tipo de vehículo. Así, indudablemente, un automóvil imparte menos carga que un camión o un tráiler; además, mientras más pesado sea un vehículo su velocidad de tránsito será más lenta.

“Los automóviles de pasajeros suelen tener presiones de neumáticos en el rango de 180 a 250 kPa y soportan menos de 350 kg por neumático, o 7 kN en un eje. Esta carga es estructuralmente insignificante en comparación con la impartida por un camión grande utilizado para transportar cargas pesadas, que oscilan entre 80 y 130 kN por eje (dependiendo de los límites legales y el control de masa) con presiones de neumáticos que oscilan entre 500 y 1300 kPa” (Wirtgen, 2012, p. 25).

## Figura 28

*Constante y variado tránsito en una avenida de la ciudad Lima.*



Nota: en la imagen se aprecian vehículos menores como automóviles particulares y taxis, junto a vehículos que transfieren mayores cargas al pavimento como lo son los camiones. Recuperado de una publicación virtual de “el Economista América” con fecha 22/02/2019.

URL: <https://www.economistaamerica.pe/mercados-eAmperu/noticias/9719092/02/19/Restriccion-del-transito-de-camiones-de-carga-no-aliviara-el-trafico-en-Lima.html>

El paso de vehículos sobre el pavimento tiene diversos efectos sobre el mismo, y si la carga que recibe la estructura es mayor a la se utilizó en su diseño, el pavimento tendera a agrietarse a causa de la fatiga. Los vehículos livianos tienen generalmente un impacto insignificante sobre la estructura del pavimento; sin embargo, los vehículos con mayor peso generan una deformación considerable en el pavimento. A medida que transcurre la vida del pavimento, estas cargas crean un efecto acumulativo, lo que degrada progresivamente la estructura del pavimento. “Los ejes sobrecargados causan una cantidad desproporcionada de daño a la estructura del pavimento, acelerando dicho deterioro” (Wirtgen, 2012, p. 26). Las deformaciones producidas por la carga vehicular pueden ser causantes de deformaciones transitorias o permanentes y/o agrietamiento por fatiga.

- Transitorias

Como su nombre lo indica, estas deformaciones desaparecen cuando la carga se retira. Si el pavimento recupera su forma de manera instantánea se dice que la deformación es elástica. Si, por el contrario, tarda un cierto tiempo en recuperar su forma desde que la carga se retira, se dice que la deformación es viscoelástica. (Rodríguez et al., 2004).

- Permanente

Son aquellas deformaciones que permanecen aun cuando se han retirado la carga. Esto se debe a un exceso en la magnitud de la carga que ha sido aplicada al pavimento, por lo que esta ha sobrepasado la capacidad de respuesta de este y su límite de resistencia. La aplicación de estas cargas genera un cambio en el volumen del pavimento y por ende una reducción en sus vacíos. Esta reducción en los vacíos no solo causa surcos en la trayectoria de las ruedas; sino que, además, propicia que el asfalto se comporte como un fluido cuando está caliente (Wirtgen, 2012).

Rodríguez et al. (2004) señala tres tipos de deformación permanente:

Por consolidación: este tipo de deformación se caracteriza por presentar un cambio en el volumen del pavimento. Esta reducción en el volumen generalmente se da en aquellas capas que no se han compactado adecuadamente durante la construcción. Si bien esta deformación no produce grietas, si produce incomodidades al tránsito.

Plástica: se da debido a que las cargas del tráfico exceden la capacidad portante de la estructura del pavimento, por lo que se producen fallas por esfuerzo de corte. Se evidencian

alteraciones en la superficie del pavimento, sin que ello implique cambios en el volumen de la estructura.

Por expansión: se da debido a errores durante el proceso constructivo, al emplear materiales inadecuados con una deficiente calidad en el trabajo. Se producen cambios en el volumen del pavimento debido a variaciones en el contenido de agua en el suelo de fundación.

– Agrietamiento por fatiga de materiales ligados

Esta falla se inicia en la parte inferior de la carpeta asfáltica, donde las tensiones producto de la tracción causada por las cargas de los vehículos es máxima. Estas grietas se propagan hacia la superficie haciendo evidente la falla. “El agrietamiento de arriba hacia abajo puede ocurrir en capas gruesas de asfalto. La deformación permanente del material subyacente exagera el agrietamiento al aumentar efectivamente la tensión de tracción impuesta por las cargas de las ruedas” (Wirtgen, 2012, p. 26).

### **Consecuencias del Agrietamiento**

A medida que el pavimento se deteriora y la presencia de grietas se hace cada vez mayor, este es más susceptible a que el agua ingrese a través de ellas y ocasiona que la resistencia del pavimento sea menor y por ende que las cargas del tráfico produzcan mayor daño en el mismo.

Una vez que el agua ingresa al pavimento, esta genera una serie de presiones intersticiales como consecuencia de las cargas del tráfico. Estas presiones en el interior del pavimento producen que las partículas finas del agregado se “laven” y estas son expulsadas a la superficie a través de las grietas. Esta acción de bombear el agua con

finos deja vacíos en el pavimento que, con la acción de las cargas, devienen a generar hundimientos, además, de acentuar las grietas.

Como ya se ha visto, la temperatura y en general, las condiciones del entorno tienen una injerencia directa en el estado de conservación del pavimento. A temperaturas más bajas (menor a 4°C) el agua se expande producto del congelamiento y con ello genera presiones hidráulicas aun sin la presencia de cargas de tránsito.

En zonas desérticas las grietas pueden generar otro tipo de daños en el pavimento. En este tipo de ecosistemas, la temperatura entre el día y la noche suele presentar diferencias considerables; así, durante la noche se presentan temperaturas bajo cero, mientras que durante el día se presentan elevadas temperaturas que a menudo superan los 35°C. En los pavimentos, las bajas temperaturas provocan que este se contraiga, haciendo que las grietas en su estructura se ensanchen. Cuando esto ocurre, la arena arrasada por el viento queda atrapada con mayor facilidad en las grietas. A medida que la temperatura aumenta, el pavimento tiende a dilatarse, generándose grandes fuerzas horizontales a causa de la arena retenida en su estructura. Dependiendo de la magnitud de estas presiones se puede incluso generar levantamientos del pavimento en la zona (bordes) de las grietas.

Una de las causas del agrietamiento en zonas desérticas es la elevada pérdida de humedad que sufre a causa del constante calor. A medida que se pierde humedad, las partículas de agua atrapadas dentro del material compactado ejercen la suficiente fuerza de tracción para acuciar el agrietamiento del pavimento.

A pesar de que el constante tránsito de vehículos tiene un efecto de desgaste gradual del pavimento, la ausencia de este puede generar que la superficie del pavimento se agriete. Esto se debe a que el

pavimento se somete a tensiones con el paso de la carga, lo que hace que las grietas se mantengan selladas (Wirtgen, 2012).

#### **2.2.1.7 Fallas en el pavimento**

La construcción de una vía se ejecuta tomando como consideración que esta estará operativa por un número determinado de años, llamado horizonte de proyecto de la obra. A medida que el tiempo transcurre el pavimento se deteriora básicamente por dos motivos: los factores ambientales como el agua, la temperatura; y por las cargas del tráfico.

El deterioro en el pavimento es gradual y generalmente comienza de una forma lenta, para ir aumentando en intensidad y magnitud a medida que transcurre el tiempo. Es por esta razón que el pavimento requiere de un constante monitoreo para poder medir el estado de deterioro y tomar las medidas de reparación más oportunas.

“Cuando una obra vial se pone en servicio, debe presentar las condiciones óptimas para su operación; al transcurrir el tiempo, se deteriora por el uso, dificultándose así cada vez más el tránsito, por lo que es preciso hacer una conservación normal adecuada y rehabilitaciones oportunas, para que la obra no llegue a tener una falla prematura” (Marchan R., 2005, p. 103)

Encontrar la raíz del problema resulta fundamental para determinar cuál método de rehabilitación será el adecuado para tratar la vía; así como saber si bastara con una reparación superficial o un mantenimiento menor o una rehabilitación más a fondo, incluso si es que el pavimento ha llegado al final de su vida útil.

“Los deterioros/fallas de los pavimentos flexibles pueden clasificarse en dos grandes categorías: los deterioros / fallas estructurales y los deterioros/fallas superficiales. Los deterioros de la primera categoría se asocian generalmente con obras de rehabilitación de costo alto.

Los deterioros de la segunda categoría se relacionan generalmente con obras de mantenimiento periódico (por ejemplo, carpeta delgada de concreto asfáltico o tratamiento superficial)” (MTC, 2016, p. 85)

**Tabla 6**

*Deterioros o fallas de los pavimentos flexibles.*

Clasificación de los deterioros/fallas	Código de deterioro/falla	Deterioro / Falla	Gravedad
Deterioros o fallas Estructurales	1	Piel de cocodrilo	1: Malla grande (> 0.5 m) sin material suelto 2: Malla mediana (entre 0.3 y 0.5 m) sin o con material suelto 3: Malla pequeña (< 0.3 m) sin o con material suelto
	2	Fisuras longitudinales	1: Fisuras finas en las huellas del tránsito (ancho ≤ 1 mm) 2: Fisuras medias corresponden a fisuras abiertas y/o ramificadas (ancho > 1 mm y ≤ 3 mm) 3: Fisuras gruesas corresponden a fisuras abiertas y/o ramificadas (ancho > 3 mm). También se denominan grietas.
	3	Deformación por deficiencia estructural	1: Profundidad sensible al usuario < 2 cm 2: Profundidad entre 2 cm y 4 cm 3: Profundidad > 4 cm
	4	Ahuellamiento	1: Profundidad sensible al usuario pero ≤ 6 mm 2: Profundidad > 6 mm y ≤ 12 mm 3: Profundidad > 12 mm
	5	Reparaciones o parchados	1: Reparación o parchado para deterioros superficiales. 2: Reparación de piel de cocodrilo o de fisuras longitudinales, en buen estado. 3: Reparación de piel de cocodrilo o de fisuras longitudinales, en mal estado.
Deterioros o fallas superficiales	6	Peladura y Desprendimiento	1: Puntual sin aparición de la base granular (peladura superficial). 2: Continuo sin aparición de la base granular o puntual con aparición de la base granular. 3: Continuo con aparición de la base granular.
	7	Baches (Huecos)	1: Diámetro < 0.2 m 2: Diámetro entre 0.2 y 0.5 m 3: Diámetro > 0.5 m
	8	Fisuras transversales	1: Fisuras Finas (ancho ≤ 1 mm) 2: Fisuras medias, corresponden a fisuras abiertas y/o ramificadas (ancho > 1 mm y ≤ 3 mm) 3: Fisuras gruesas, corresponden a fisuras abiertas y/o ramificadas (ancho > 3 mm). También se denominan grietas.

*Nota:* la tabla muestra las fallas o deterioros en el pavimento flexible, clasificadas según el nivel de afectación al pavimento (superficial o estructural). Extraído de (MTC, 2016, p. 86).

### **2.2.1.7.1 Falla Superficial**

Como su nombre lo indica, este tipo de fallas se presentan en la capa de rodadura del pavimento. Se puede dar el caso que estas fallas guarden relación o sean consecuencia de fallas que se han generado desde las capas subyacentes.

Como ya se ha explicado, el proceso de agrietamiento entra en un círculo de deterioros progresivos que se acentúan con la falta de mantenimiento y el constante paso de los vehículos. Así, si la carpeta de rodadura ha perdido su característica de impermeabilidad y el agua se está filtrando, puede que esta llegue hacia las capas estructurales, ocasionando un lavado del agregado fino y haciendo que las grietas presentes en la superficie se acentúen y se agraven.

“Los deterioros superficiales se originan en general por un defecto de construcción, por un defecto en la calidad de un producto o por una condición local particular que el tráfico acentúa. Además, pueden resultar de la evolución de deterioros o fallas estructurales” (MTC, 2016, p. 86).

#### **a) Peladura y desprendimiento**

Este tipo de fallas hace referencia al desgaste gradual que sufre el pavimento como consecuencia de la desintegración de sus materiales pétreos o del ligante bituminoso, dejando la superficie cada vez más expuesta al ataque de los agentes ambientales y a la acción del tránsito. La superficie se desintegra por pequeños trozos en su inicio, dejando progresivamente los materiales expuestos y dando lugar a una textura en el pavimento más rugosa.

“Frecuentemente se presenta como un desprendimiento de agregados en forma de estrías longitudinales, paralelas a la

dirección del riego. El desprendimiento puede ser originado también en un proceso de descubrimiento por pérdida de adherencia entre el agregado y el asfalto, cuando actúan agentes agresivos tales como solventes y otros derivados del petróleo, e inclusive, la acción del agua (pluvial)” (Rodríguez et al., 2004, p. 67)

Esta falla se puede dar por defectos mismos de la construcción o de la calidad de los agregados, así como por un deterioro natural del ligante bituminoso a causa de agentes como la radiación UV o un sobrecalentamiento del asfalto, lo cual ocasiona la oxidación y consecuente envejecimiento de la mezcla asfáltica, haciendo que pierda su capacidad de unión. Cuando las fallas se dan por problemas en la construcción, esto puede ser una insuficiente compactación, lo que hace que la mezcla asfáltica no tenga la suficiente densidad al presentar una gran cantidad de burbujas de aire atrapadas en su interior; además de que puede deberse al hecho de una mala dosificación del ligante asfáltico, lo que hace que este sea insuficiente, o por el empleo de agregados de agregados con mayor afinidad al agua (hidrófilos), contaminados o sucios y/o con un inadecuado nivel de humedad.

Adicionalmente, un pobre riego de liga o una deficiente imprimación generan que el revestimiento no tenga la suficiente adherencia con la capa inferior, un espesor de la capa de rodamiento menor al que se necesita, el derrame de agentes agresivos que pueden provocar el ablandamiento del pavimento tales como derivados del petróleo, el tránsito de vehículos con ruedas metálicas u orugas puede provocar escarificación e indentación y una elevada temperatura como consecuencia de tránsito pesado e intenso pueden generar que

el pavimento se desprenda en pedazos ocasionando las peladuras.

Para medir el grado de deterioro que ha sufrido el pavimento se establecen niveles de severidad o gravedad. El nivel más bajo presenta evidencias de un incipiente desprendimiento del agregado pétreo y el ligante bituminoso; sin embargo, la superficie se mantiene firme y bien ligada. El nivel intermedio, el desprendimiento de material pétreo y ligante bituminoso es significativo, pudiendo existir partículas sueltas y fácilmente disgregables; además, a causa del desprendimiento, la superficie del pavimento presenta una textura rugosa. En el nivel avanzado, el desprendimiento del agregado es excesivo, confiriendo a la superficie una textura muy rugosa e incomodidades al tránsito como consecuencia de la gran cantidad de peladuras o pequeñas cavidades distribuidas a lo largo de la vía.

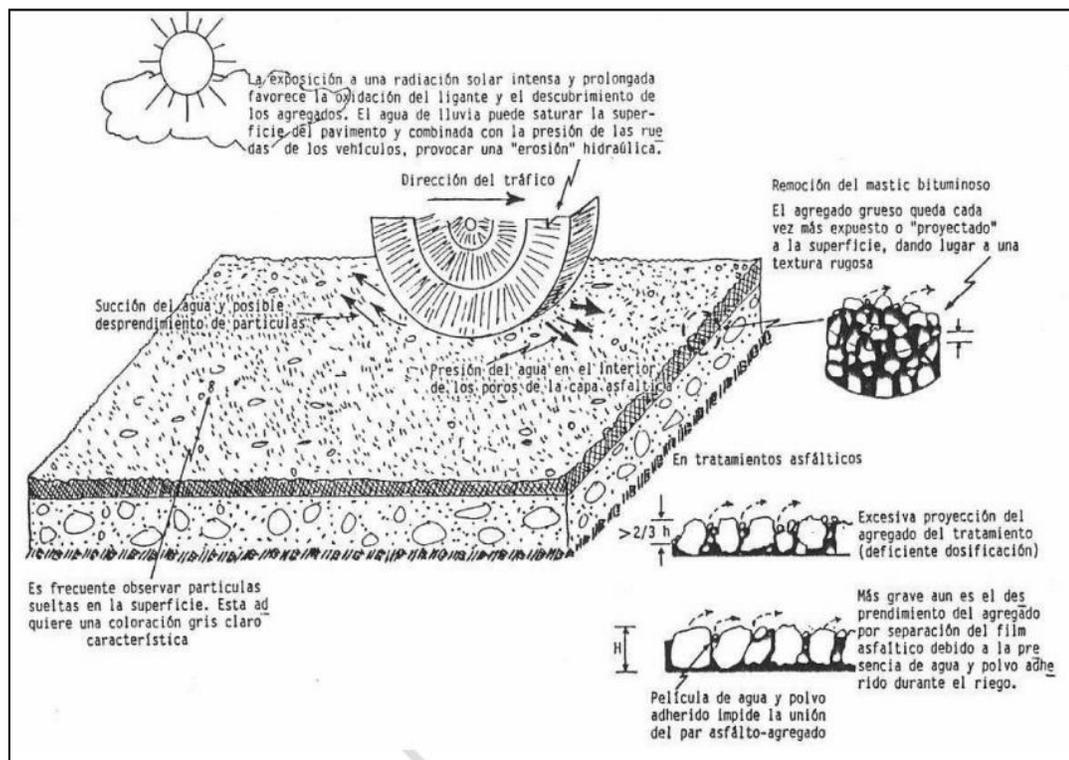
“Se debe reparar de la mejor manera puesto que si no se hace, esto puede llegar a convertirse en exudación, descascamientos y aumentarle la permeabilidad a la estructura. No afecta la movilidad, pero en el vehículo se sienten leves vibraciones” (Barajas y Buitrago, 2017, p. 28).

La medición se realiza en metros cuadrados y se clasifican acorde al nivel de gravedad que presenta. Entre las medidas correctivas que se pueden aplicar están la aplicación de aplicación de riego con emulsión bituminosa o rejuvenecedora a lo largo de la superficie, sellado de la superficie con lechada asfáltica (slurry seal), material bituminoso y recubrimiento de arena, recapado con mezcla asfáltica en caliente, bacheo superficial, entre otros.

“El proceso continúa con el tiempo, acelerándose a medida que aumenta la permeabilidad del revestimiento y oxidación del medio ligante. Esta evolución suele ir acompañada de peladuras y baches superficiales hasta llegar a la completa desintegración del revestimiento” (MOPC, 1990)

**Figura 29**

*Descripción grafica del proceso de deterioro por desprendimiento del pavimento.*



*Nota:* la figura muestra la descripción grafica de los diversos factores que ocasionan el deterioro del pavimento por desprendimiento. Agentes como la radiación solar, el agua y un deficiente proceso constructivo pueden ocasionar que el pavimento se desintegre. Extraído de (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, MOPC, 1990).

b) Baches (huecos)

Los baches son definidos como la desintegración total de la superficie de rodadura. Huecos en el pavimento con un diámetro mínimo de 150mm usualmente menores a 0,9m

formando un hoyo o cavidad redondeada, de bordes netos y lados verticales en su parte superior. A medida que transcurren vehículos por la vía, los baches crecen en longitud y profundidad, muchas veces con una distancia igual a la rueda de un camión, dejando expuestos los materiales que conforman la base granular del pavimento.

“Este tipo de daño puede producirse por la detención de agua en zonas fisuradas que ante la acción del tránsito comprime los esfuerzos efectivos creando deformaciones y la falla del pavimento, esto sucede como la evolución de otros daños mal reparados, principalmente la piel de cocodrilo, la consecuencia de no reparar bien este daño es la destrucción de la estructura del pavimento, ocasiona cambios bruscos en la dirección de los vehículos, por consiguiente la velocidad en estos tramos deberá ser reducida, produciendo un congestionamiento vehicular” (Barajas y Buitrago, 2017, p. 26).

Una de las principales causas de la formación de los baches es la falta de mantenimiento oportuno al pavimento, como lo son las peladuras, hundimientos, piel de cocodrilo, entre otros. Además, la falta de calidad en los agregados de construcción y un deficiente diseño estructural del pavimento.

Normalmente, el nivel de gravedad o severidad se mide en base al diámetro que presenta el bache y se miden como nivel de gravedad bajo, medio y alto. Los valores se ven en la tabla 7.

**Tabla 7**

*Nivel de severidad de los baches en el pavimento.*

Profundidad máxima del bache	Diámetro promedio del bache		
	Menor de 20cm	De 20 a 50cm	Mayor de 50cm
Menor de 25 mm	B	B	M
De 25 a 50 mm	B	M	A
Mayor de 50 mm	M	M	A

*Nota:* la tabla nos da los niveles de severidad de los baches en base a su diámetro y a su profundidad. Cuando la profundidad es menor a 25mm es probable que la falla se de en tratamientos superficiales, mientras que una profundidad mayor de 50mm significa que el bache ha progresado en la capa base del pavimento. Adaptado de MOPC, 19990 con los datos de MTC, 2016.

De acuerdo con el nivel de severidad del bache, este se puede tratar con diversas alternativas, tales como un bacheo superficial con mezcla asfáltica en caliente o en frío, bacheo parcial pudiendo realizar un sellado de superficie. Si el bache presenta grandes dimensiones puede que sea necesario un bacheo profundo más sellado de la superficie afectada con slurry seal, la escarificación del pavimento y reconstrucción parcial del mismo con base granular.

“Constituyen la manifestación última a la que se llega por evolución de otros daños como consecuencia de la falta de un mantenimiento oportuno. A medida que progresa el deterioro del pavimento, los baches aumentan en profundidad, número y extensión; este proceso se acelera debido a la retención de agua en las cavidades abiertas y su infiltración a las capas

inferiores” (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, MOPC, 1990).

Se puede medir por número de baches acorde con su nivel de severidad y/o en metros cuadrados. Para ser considerados dentro del registro, los baches deberán presentar un área mínima de aproximadamente 0.02 m<sup>2</sup>. Si el bache se presentara en una zona de agrietamiento por fatiga, el área del agrietamiento se reduce por el área del bache. (Federal Highway Administration (FHWA), 2014).

### Figura 30

*Baches en el pavimento.*



Nota: de izquierda a derecha, nivel de severidad bajo, medio y alto. Extraído de (Federal Highway Administration (FHWA), 2014).

#### c) Fisuras transversales

Son fracturas del pavimento de longitud variable que se dan de forma perpendicular al eje de la carretera. Pueden afectar todo el ancho de la vía o limitarse a los 60cm del borde y regularmente se distribuyen en tramos homogéneos con longitudes que varían entre los 5 a 20m.

“Son una señal de la presencia de esfuerzos en una de las capas de la estructura del pavimento. Ocasionadas por la rigidización de la mezcla asfáltica, esto ocurre por la pérdida de flexibilidad, que se debe a un exceso de material mineral, no arcilloso, o también por bajas o altas temperaturas en la zona donde se encuentra el pavimento” (Barajas y Buitrago, 2017, p. 17-18).

Las fisuras transversales pueden ser consecuencia de la retracción de las mezclas asfálticas a causa de la oxidación del asfalto y los cambios constantes de temperatura, un espesor de la carpeta asfáltica menor al requerido para resistir las cargas del tráfico, contracción o asentamiento por falta de humedad en el suelo de fundación o en el terreno próximo al pavimento, una deficiente contención lateral o una contaminación de las capas inferiores en la proximidad de los bordes del pavimento.

Otra causa que puede ser causantes de generar las fisuras transversales es el poco o nulo riego de liga. Esto genera que la carpeta asfáltica no esté debidamente unida a la base, ocasionando que esta sea más susceptible a los efectos del paso de vehículos o de los agentes ambientales como el agua y la temperatura. El deficiente mantenimiento o tratamiento inadecuado de las fisuras transversales puede generar una serie de daños como piel de cocodrilo, fisuras en bloque, descascamientos, asentamientos longitudinales o transversales por el ingreso de agua y desintegración. (Barajas y Buitrago, 2017)

El nivel de severidad de una fisura transversal se mide en base a su ancho de abertura; y se clasifica en tres niveles de severidad: Bajo, Medio y Alto.

El primer nivel (bajo) la fisura, no sellada, no presenta desnivel ni descascaramiento alrededor de sus bordes, con un ancho promedio inferior a los 5 mm. Las fisuras selladas presentan un material de sello en óptimas condiciones, con condiciones de impermeabilidad.

El segundo nivel (medio), la fisura son sellar presenta un ancho promedio mayor de 5mm y de presentar signos de descascaramiento, este es muy leve. En el caso de fisuras selladas, estas presentan un material de sello en malas condiciones ya que permite el ingreso del agua. Para todo tipo de fisuras, selladas y no selladas, que presentan signos de degradación como ramificaciones de fisuras finas que interceptan o están próximas a la fisura, moderado desportillamiento alrededor de los bordes y estos presentan un ligero desnivel (MOPC, 2016)

El nivel de severidad alto presenta fisuras con un nivel de descascaramiento considerable y desnivel en sus bordes, lo que causa un fuerte balanceo o golpeteo al vehículo. Además, presenta múltiples ramificaciones de fisuras alrededor con un nivel de severidad de medio a alto. (MOPC, 2016)

El manual de carreteras, mantenimiento o conservación vial nos da valores distintos, pero con características similares para las fisuras conforme a su nivel de severidad o gravedad. Así, un nivel de severidad bajo presenta un ancho de fisura menor a 1 mm, el nivel de severidad medio presenta un ancho de fisura de 1 a 3mm, mientras que el nivel de gravedad alto presenta un ancho de fisura mayor a 3mm.

“Fisuras longitudinales y transversales: El nivel 1 corresponde al concepto del AASHTO de «hairline crack» («fisura como un cabello»), se puede considerar que el ancho es generalmente

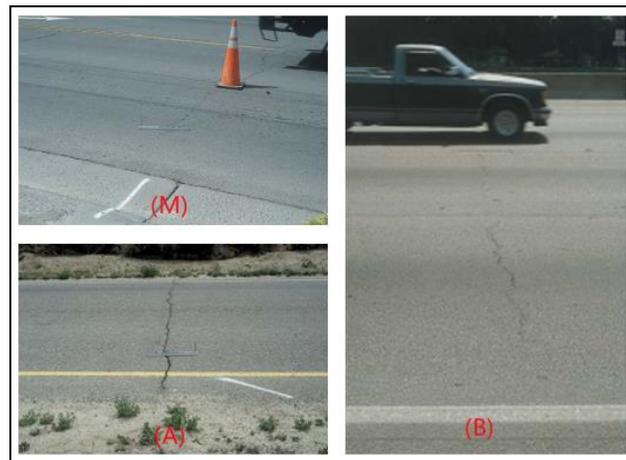
inferior a 1,0mm. En cuanto a las fisuras abiertas de gravedad 2, se considera que su ancho es generalmente superior a un mm con bordes verticales (sin desintegración de bordes) y menor o igual a 3mm. Se vuelven gravedad 3 cuando los bordes se desintegran y tienen un ancho superior a 3 mm” (MTC, 2016, p. 99)

Se pueden tratar las fisuras transversales tomando como base su grado de deterioro y/o el nivel de severidad en el que se encuentra. Se puede aplicar un sellado de la superficie con lechada asfáltica (slurry seal), con emulsión bituminosa o rejuvenecedora, Sellado de fisuras con asfalto líquido o emulsión bituminosa + arena, bacheo parcial o recapado con mezcla asfáltica en caliente de espesor variable según tránsito.

“El número de fisuras puede aumentar notablemente con el tiempo. El desportillamiento de los bordes favorece el desarrollo de agrietamientos cocodrilo alrededor de ellas” (MOPC, 2016).

### Figura 31

*Fisuras transversales en el pavimento.*



Nota: en la figura se ven fisuras transversales conforme a su nivel de severidad: alto, medio y bajo. Extraído de (Federal Highway Administration (FHWA), 2014).

#### **2.2.1.7.2 Falla Estructural**

Este tipo de fallas se presentan en la estructura del pavimento. Este tipo de fallas afectan íntegramente la capacidad del pavimento para soportar las cargas del tránsito y afectan de diversas maneras la serviciabilidad del pavimento, generando el deterioro de esta en un corto tiempo.

Implican una destrucción de la estructura del pavimento, y en parte se debe a que este ha cumplido ya con su vida útil y no es capaz de soportar las cargas que transfieren los vehículos. Si esta llegara a presentarse de forma prematura puede que se deba a deficiencias en la construcción de este o un mal diseño estructural como espesores menores a los requeridos o una mala calidad de los materiales utilizados.

“Si la deformación vertical de las gravas y/o suelos excede el límite admisible, se observan deformaciones permanentes del pavimento (hundimiento o ahuellamiento de gran radio). Si la deformación horizontal de tensión por flexión en la parte inferior de las capas asfálticas excede el límite admisible, dichas capas se fisuran en su parte inferior y las fisuras luego se propagan hasta la superficie: fisuras longitudinales en las huellas del tránsito y fisuras en forma de piel de cocodrilo” (MTC, 2016, p. 85)

Las fallas no aparecen de inmediato, sino que su deterioro es progresivo dado por la repetición de cargas. Determinar la causa de la falla es vital para determinar el tipo de rehabilitación necesaria para el pavimento. “En la corrección de este tipo de fallas es necesario un refuerzo sobre el pavimento existente para que el sistema estructural soporte las exigencias del tránsito presente y futuro estimado” (Jácome, 2020, p. 8).

“En un pavimento asfáltico, la deformación por roderas (deformación permanente) está relacionado con la falta de resistencia al esfuerzo cortante de la carpeta asfáltica, así como a fallas en la parte inferior de la estructura del pavimento (subrasante o suelo de cimentación) debido a un exceso de esfuerzos. A su vez la resistencia al esfuerzo cortante del concreto asfáltico dependerá de diferentes aspectos tales como características volumétricas del material, calidad y distribución granulométrica de los agregados, la selección adecuada del tipo y cantidad de cemento asfáltico, entre otros” (Josephia, Ossa y Hernández, 2016)

### **Piel de cocodrilo**

Este tipo de fallas hace referencia a una serie de fisuras interconectadas entre si formando pequeños polígonos de ángulos agudos en la superficie del pavimento, generalmente con un diámetro menor a 30cm. La misma forma de interconexión de estas fisuras hace que se asemejen a la piel de un cocodrilo.

Esta falla se da inicialmente en las capas inferiores del pavimento, donde las tensiones y deformaciones por tracción como consecuencia de las cargas del tránsito son mayores. En un principio pueden ser poco graves, se propagan a la superficie como una serie de fisuras longitudinales que luego, por la acción repetitiva del tránsito, deteriora el pavimento y deviene a generar en la interconexión de estas y en la formación de una especie de mallas, al principio, de “polígonos incompletos dibujados en la superficie por fisuras cerradas (es decir, de ancho nulo)” (MTC, 2016).

Este tipo de fallas raramente cubren toda el área del pavimento, ya que se presenta en aquellas zonas más expuestas a las sollicitaciones del tránsito, principalmente huellas de canalización. Esta falla puede agravarse debido al constante paso de vehículos y a la contracción como consecuencia de los cambios de temperatura, lo que genera

que el asfalto se ha endurecido de una manera importante. A medida que el tamaño de los polígonos disminuye, las fisuras se abren y se evidencia pérdida de material en los bordes.

La falla es un indicativo de que el pavimento ha perdido resistencia a la fatiga producto de la repetición de cargas de tránsito, por lo que se deduce que el pavimento ha perdido capacidad estructural y este ha llegado al final de su vida útil. Las causas pueden ser producto de unos espesores menores a los requeridos, una mala calidad en la ejecución, elaboración y puesta en obra de la mezcla asfáltica y la susceptibilidad a la acción del agua por un drenaje superficial inadecuado.

Si las capas subyacentes, base y subbase, no son lo suficientemente resistentes, el fisuramiento será acompañado por ahuellamientos. Cuando en el pavimento se presenta un drenaje deficiente, el fisuramiento comenzará en las huellas de canalización exterior. En la etapa final, el agrietamiento se transforma en baches. De esa manera se tiene que la misma sección del pavimento presentará fisuramiento piel de cocodrilo, ahuellamientos y baches. (Rodríguez et al., 2004)

Se identifican tres niveles de severidad en base al ancho de las grietas, así como por el orden de magnitud de la malla. El nivel de severidad más bajo es aquel que presenta fisuras muy finas, con anchos menores a 1.5mm y una malla mayor a 0.5m de diámetro. Las fisuras son mayormente paralelas con escasa interconexión entre ellas y sin presencia de material suelto. El nivel de severidad medio corresponde a aquellas fisuras con un ancho menor a 5mm y una malla con un diámetro de entre 0.3 y 0.5m. las fisuras forman polígonos pequeños y angulosos, pudiendo haber presencia de material suelto. El nivel de severidad más alto corresponde a fisuras con mayor ancho y una malla con un diámetro menor a 0.3 m en este nivel se presenta despostillamiento en los bordes de las fisuras.

Pudiendo, estas piezas atrapadas en las fisuras, ser removidas por la acción del tráfico.

Las medidas correctivas se dan de acuerdo con la gravedad y extensión de las fisuras, así como de otros elementos como las deformaciones, hundimientos o rugosidad, pueden ser el sellado de la superficie con lechada asfáltica (slurry seal) o con material bituminoso con recubrimiento de agregado, bacheo parcial o superficial con mezcla asfáltica en caliente o frío, bacheo profundo con reposición de base granular, rehabilitación o construcción entre otros.

### **Figura 32**

*Falla por fisuramiento tipo piel de cocodrilo en el pavimento.*



Nota: la figura muestra el fisuramiento tipo piel de cocodrilo en diversas etapas. En su inicio, las fisuras se encuentran relativamente distantes unas de otras. A medida que avanza el deterioro las grietas se abren e incluso se puede generar que se desprendan porciones de pavimento por la acción del tráfico. Elaboración propia.

a) Fisuras longitudinales

Son fisuramiento que se extienden por la vía paralelamente a su eje. Al igual que con las fisuras transversales, su presencia suele ser indicativo de esfuerzos en una de las capas del pavimento, como consecuencia de la pérdida de flexibilidad que sufre el pavimento al rigidizarse la mezcla asfáltica.

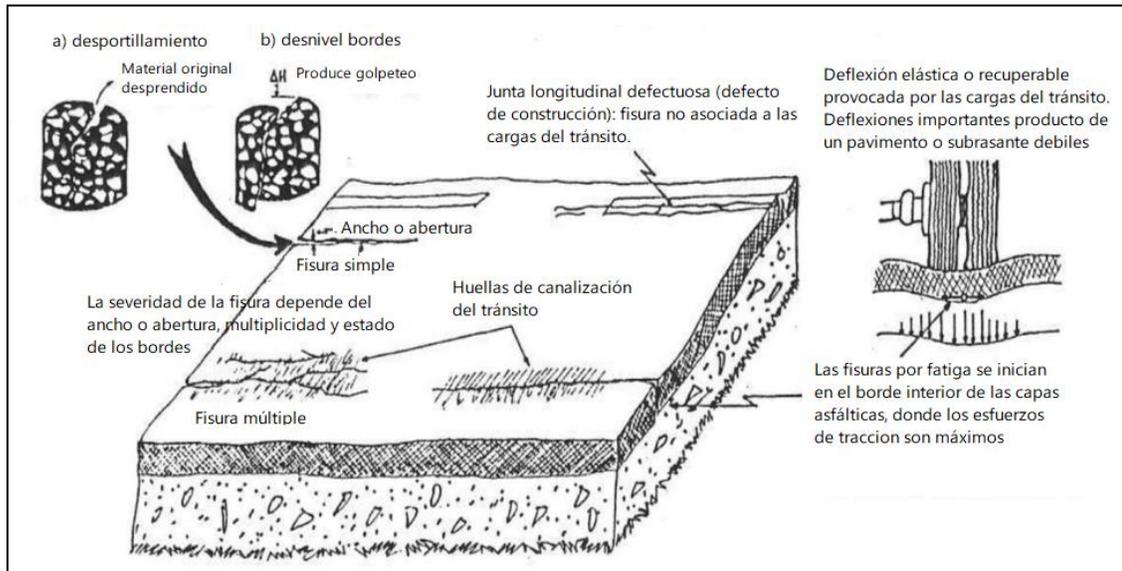
“En este rubro se incluyen las fisuras longitudinales de fatiga. Discontinuas y únicas al inicio, evolucionan rápidamente hacia una fisuración continua y muchas veces ramificada antes de multiplicarse debido al tráfico, hasta convertirse en muy cerradas” (MTC, 2016, p. 88).

Las causas del deterioro del pavimento que deviene a generar en fisuras longitudinales son diversas y variables, por lo que el pavimento se puede ver afectado a futuro de diversas maneras. La causa principal es la fatiga producto de la repetición de cargas sobre el pavimento, huellas de canalización del tránsito, y la incapacidad de este para resistirlas. Generalmente es indicativo de deficiencia estructural. Un deficiente confinamiento estructural o un drenaje inadecuado en los bordes, provocan el debilitamiento de esta zona, haciendo que las fisuras ocurran típicamente entre 30 y 60cm del borde de la calzada. Factores como la temperatura y la falta de humedad pueden provocar la contracción de la mezcla asfáltica y la desecación de los terraplenes o el suelo de fundación.

El grado de severidad de estas fisuras está definido por el ancho o abertura de las fisuras y el nivel de multiplicidad que presentan. Estos niveles de severidad responden a los mismos criterios que los dados para el fisuramiento transversal.

**Figura 33**

*Esquema descriptivo de la fisuración longitudinal en el pavimento.*



*Nota:* se presentan diversas causas y consecuencias de la fisuración longitudinal en el pavimento. Factores como la fatiga producto de las cargas del tráfico, la retracción a causa de los cambios de temperatura y deficiencia en los materiales de construcción pueden generar estas fallas. Extraído de (MOPC, 2016, p. 37).

Acorde con el nivel de severidad en el que se encuentre la falla, es que se elige la opción de mantenimiento o rehabilitación más oportuna para el pavimento. Estas opciones pueden ser el sellado de superficie con emulsión bituminosa o rejuvenecedora, sellado de la superficie con lechada asfáltica, sellado de las fisuras con asfalto líquido, recapado con mezcla asfáltica en caliente, e incluso la rehabilitación o reconstrucción.

A medida que el daño avanza, es posible que se dé un incremento en las fisuras hasta varios metros, hasta convertirse en una falla tipo piel de cocodrilo si esta ramifica

y multiplica. Agentes ambientales como el agua pueden generar que la falla aumente su gravedad de una manera más rápida.

b) Deformaciones por deficiencia estructural (hundimiento)

Son depresiones o descensos de la superficie del pavimento. Se puede dar de manera localizada o pueden afectar a toda un área de la vía. Estos hundimientos pueden estar orientados en sentido transversal o longitudinal o tomar forma de media luna.

La depresión continua aparece en la huella del tránsito, en un ancho superior a 80cm, sobre los laterales del pavimento de 0.5 a 0.8 m del borde; mientras que una depresión localizada es un hundimiento de la superficie del pavimento en un punto concreto del mismo (MTC, 2016).

Las causas de esta falla son producto del paso de vehículos pesados por la vía, lo que ocasiona que las capas del pavimento se asienten bajo estas cargas o pueden ser producto de una deficiente calidad en los materiales de construcción, así como una excesiva cantidad de agua en el pavimento. “Son consecuencias del fenómeno de fatiga de una o varias capas del pavimento y de la subrasante sometidas a una repetición de cargas superior a la permisible. Es indicativo de insuficiencia estructural del pavimento” (MTC, 2016, p. 90). Además, la falta de confinamiento lateral y el incremento de la humedad producen un hundimiento en los bordes del pavimento y una falta de estabilidad en las capas del pavimento respectivamente.

“Hay varias causas que los producen, las cuales están vinculadas con problemas que afligen a toda la estructura del

pavimento, entre las que se encuentran asentamientos de la subrasante, inestabilidad de la banca y circulación de tránsito muy pesado. Este daño puede concebirse en fisuración, desprendimientos y movimientos de masa, ocasiona inseguridad en los vehículos, principalmente cuando estos contienen agua, ya que se puede producir hidropneumático” (Barajas et al., 2017, p. 24)

Los niveles de severidad son medibles en base a la profundidad que presenta la depresión, lo que genera un impacto directo en los vehículos que transitan por la vía. El nivel de severidad bajo presenta una profundidad de depresión menor a 20mm, teniendo una baja incidencia o siendo esta apenas perceptible en la comodidad de manejo a la velocidad promedio permitida. El nivel de severidad medio presenta una profundidad de entre 20 a 40mm, presentando una moderada incomodidad en la conducción y obligando a disminuir la velocidad de circulación. El nivel de severidad alto son aquellas depresiones con una profundidad mayor a 40mm, viéndose seriamente afectada la comodidad en la conducción e incluso pudiendo resultar peligrosa.

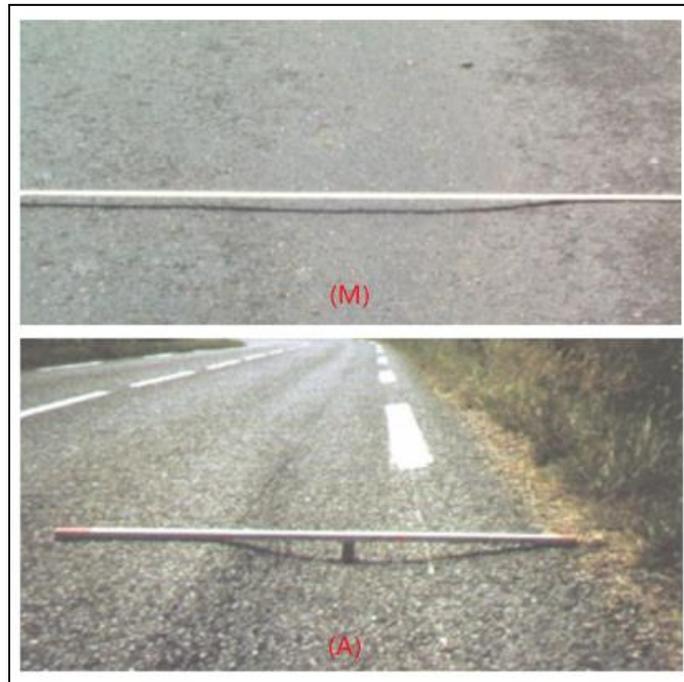
Conforme con su nivel de severidad y su extensión, en conjunto con elementos de diagnóstico como fisuraciones, deflexiones y rugosidad presentes en la vía, se aplican medidas correctivas como bacheos superficial o parcial nivelante con mezcla asfáltica en frío o en caliente; bacheo profundo, con reposición de base granular; escarificación y reconstrucción total o parcial del pavimento existente.

“La evaluación depende sustancialmente de las causas. Defectos constructivos pueden pertenecer a estable mucho tiempo. Cuando son atribuidos a la debilidad de la base

progresan rápidamente en severidad y extensión, dando lugar a baches” (MOPC, 2016, p. 24).

### Figura 34

*Falla por hundimiento en el pavimento.*



*Nota:* la figura muestra los niveles de severidad medio y alto en pavimentos. La profundidad es medida colocando una regla rígida de 1.50m de longitud colocada transversalmente en la calzada. Extraído de (MTC, 2016).

#### c) Ahuellamiento

Es una depresión longitudinal del pavimento situada en la zona de circulación de las llantas de los vehículos, cuya deformación se da por comportamiento viscoelástico de la carpeta de rodadura, como indicativo de una insuficiente capacidad estructural o una deficiente estabilidad entre el pavimento y la subrasante. Tiene una longitud mínima de 6 metros y su formación se debe a las repetidas deformaciones

permanentes producto de un tránsito pesado y canalizado. “La huella aparece en el trazado de las ruedas, en un ancho inferior a 0.8 m, sobre los laterales del pavimento de 0.5 a 0.8 m del borde” (MTC, 2016, p. 93)

Cuando la deformación tiene un radio de influencia pequeño, estas se centran en la carpeta de rodadura y suelen ir acompañadas de deslizamientos laterales y elevaciones; al contrario, cuando el radio de influencia de esta es grande, se pueden ver afectadas las capas estructurales e incluso la subrasante, lo que puede llevar a una falla estructural.

El ahuellamiento se puede dar debido a una mala estabilidad de las mezclas asfálticas como consecuencia de una deficiente compactación o dosificación, diseños de espesores por debajo de los requeridos para soportar las solicitaciones de carga o el tránsito de cargas mayores por la vía a las permitidas o una calidad en el concreto asfáltico inferior a la que se requiere para la vía.

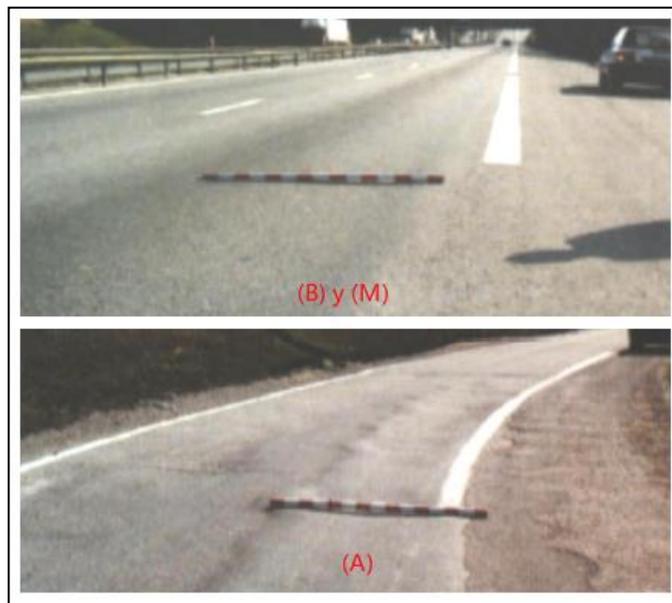
Los niveles de severidad se miden en base a la profundidad mayor del ahuellamiento y se realiza con una regla rígida de 1.50 metros de longitud. El nivel más bajo presenta una profundidad menor o igual a 6mm, el nivel medio presenta una profundidad de entre 6 a 12mm y el nivel de mayor severidad presenta una profundidad mayor a 12mm.

A medida que esta falla progresa en deterioro se pueden producir otras fallas como piel de cocodrilo y desprendimiento. Al igual que ocurre con los hundimientos, puede llegar a almacenar agua en su cavidad, generando que el suelo del pavimento pierda fricción a causa del agua en la superficie.

Dependiendo del nivel de severidad se pueden realizar obras de mantenimiento como un bacheo superficial o parcial con mezcla asfáltica en caliente o frío, fresado o escarificación de la carpeta asfáltica e incluso la rehabilitación y reconstrucción parcial o total, incluyendo obras de mejoramiento de drenaje si fuera necesario.

### Figura 35

*Falla por ahuellamiento en el pavimento.*



*Nota:* la figura muestra los niveles de severidad del ahuellamiento bajo-medio y alto en pavimentos. La profundidad es medida colocando una regla rígida de 1.50m de longitud colocada transversalmente en la calzada. Extraído de (MTC, 2016, p. 94).

#### d) Reparaciones o parchado

Son áreas en las cuales se ha tenido que hacer una reparación de la vía, con materiales similares o eventualmente diferentes a los existentes, con el fin de mitigar los defectos, presentes en el pavimento, de manera temporal o definitiva. “Cuando la intervención realizada implica el cambio del espesor parcial o total del asfalto, es conocido como parcheo y cuando la

intervención realizada implica el cambio parcial o total de granulares, es conocido como bacheo” (Barajas et al., 2017).

A medida que los parches en el pavimento aumentan, el nivel de serviciabilidad de la carretera disminuye, a la vez que se evidencia la cantidad de reparaciones requeridas por el pavimento hasta el nivel de indicar la necesidad de reforzamiento estructural. En términos generales, los parches constituyen un punto de quiebre en la continuidad del pavimento, pudiendo ser en muchos casos el origen de una mayor rugosidad y pudiendo generarse fallas en el mismo o en el área adyacente.

“Una reparación reciente enmascara un problema, reparaciones frecuentes lo subrayan. Las reparaciones deben ser calificadas en el momento del examen visual, pues algunas de ellas son tomadas en cuenta para determinar el estado estructural del pavimento. Si la reparación se aplica a deterioros / fallas superficiales y erradica el defecto, no se usará para calificar el estado estructural del pavimento. Si se aplica a la fisuración estructural, se considera como factor agravante” (MTC, 2016, p. 94)

Los niveles de severidad se miden en base a la falla que cubren. Así, el manual de carreteras, mantenimiento o conservación vial define tres niveles: 1) Reparación o parchado para deterioros/ fallas superficiales, 2) Reparación de piel de cocodrilo o de fisuras longitudinales, en buen estado y 3) Reparación de piel de cocodrilo o de fisuras longitudinales, en mal estado (MTC, 2016). Además, no se detalla ninguna medida correctiva que se requiera.

“Los daños evolucionan dentro del área del bacheo o reparación, incrementando su nivel de severidad, de acuerdo

con el tipo de manifestación de que se trate; en última instancia pueden culminar en la rotura de la reparación dando lugar a un bache. Con frecuencia acelerar también el deterioro del área de pavimento contiguo, principalmente al permitir el ingreso de agua” (MOPC, 2016, p. 98).

### **Figura 36**

*Reparaciones o parchados en el pavimento.*



*Nota:* se aprecian diversos estados del parche en el pavimento. En el nivel más severo, el parche se ha roto y ha generado la formación de un bache. Elaboración propia.

#### **2.2.1.8 Tipos de Mantenimiento Vial**

Al ser concebida la vía para estar a la intemperie, esta se ve afectada a lo largo de toda su vida de servicio por factores como el clima, la geología del lugar, volumen de tránsito, etc. Estos factores pueden generar daños en el pavimento a un ritmo lento o acelerado, pero siempre gradual y constante, por lo que se hace necesario que al pavimento se le dé el adecuado mantenimiento para conservarlo en óptimas condiciones de transitabilidad y asegurar que cumpla así con su vida útil.

“Es oportuno señalar aquí que, a la hora de efectuar los trabajos de mantenimiento, en muchos casos puede ser necesario combinar una técnica de reparación con una o más acciones preventivas, a riesgo de que, si solo se lleva a cabo la primera, el mecanismo causante del daño puede o no desaparecer; de no hacerlo, comenzará nuevamente su efecto destructivo en el pavimento no bien se habilite al tránsito, con graves consecuencias para el desempeño y durabilidad de ambos, pavimento y reparación” (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, MOPC, 1990)

En el Perú, el mantenimiento vial, solo en la ejecución de gastos de la Red Vial Nacional, representa el 22% de la inversión total, con un presupuesto ejecutado de S/ 1,296,629,453 de un total de S/ 1,311,870,627 asignados en el año 2019. (Provías Nacional - Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2020). Los trabajos de conservación vial podemos agruparlos dentro de las siguientes categorías:

#### **2.2.1.8.1 Mantenimiento Rutinario**

Estas actividades son de carácter preventivo y son las más ejecutadas durante la vida útil del pavimento. Comprende todas aquellas actividades cuya finalidad es la de reparar de manera inmediata daños menores en la vía que pudieran ocasionar incomodidades en el tránsito pero que no la afectan de manera significativa. “También, incluye aquellas labores de reparación vial destinadas a recuperar elementos menores dañados, deteriorados o destruidos, tal como los barandales de puentes, obras de drenaje menores, señalización vertical y horizontal, muros de retención y actividades afines” (Rodríguez et. al., 2004, p. 33-34). El manual de carreteras, mantenimiento o conservación vial (MTC, 2016) la define como la actividad de rutina básica de la conservación vial que se da a causa del monitoreo diario del camino en forma visual.

**Tabla 8***Actividades de mantenimiento rutinario.*

ACTIVIDAD DE CONSERVACION RUTINARIA	ELEMENTO DE CONSERVACION
Sellado de fisuras y grietas en calzada Sellado de fisuras y grietas en bermas Parchado superficial en calzada Parchado profundo en calzada Bacheo de bermas en material granular Nivelación de bermas con material granular Parchado superficial de bermas con tratamiento asfáltico Parchado profundo de bermas con tratamiento asfáltico	Pavimentos flexibles en calzada y bermas
Conservación de las señales verticales Conservación de postes de kilometraje Conservación de barreras de seguridad Conservación de guardavías metálicas Conservación de marcas en el pavimento Conservación de pintado de cabezales de alcantarillas, elementos visibles de muros, puentes, túneles y otros elementos viales Conservación de reductores de velocidad Conservación de otros elementos de seguridad vial (tachas retrorreflectivas, postes delineadores, captafaros, etc.) Conservación de aceras de concreto	Señalización y dispositivos de seguridad vial

*Nota:* la tabla muestra las actividades de conservación rutinaria para pavimentos flexibles y para la señalización y dispositivos de seguridad. Esto es importante ya que una mala señalización podría generar problemas como exceso de velocidad y un inadecuado uso de la vía. Adaptado de (MTC, 2016).

### **2.2.1.8.2 Mantenimiento Periódico**

Son obras de conservación que se realizan de manera ocasional y con periodos más prolongados de tiempo, de 2 a 6 años (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, MOPC, 1990) y que tienen como función restablecer las características de transitabilidad de la superficie de rodadura, evitando así la aparición de nuevos defectos y que se agraven los defectos presentes ya en la capa de rodadura; sin que ello implique una rehabilitación de las capas subyacentes del pavimento.

“Está conformada por obras que acumulan aspectos que no pueden ser de reparación inmediata, pero que, si son visibles y en base a la experiencia y demanda del tráfico, son programables para ser realizadas por tramos viales, cuya prioridad se certifica en el campo en función de los registros de estado del camino” (MTC, 2016, p. 22)

Las obras de mantenimiento periódico, presentes en el Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial, se muestran en la Tabla 9

Entre las características del mantenimiento periódico “está la de preservar en buena forma la textura de la superficie de rodadura, de manera que asegure la integridad estructural del camino por un tiempo más prolongado y evite su destrucción” (Abad, 2016, p. 39). Dentro de las obras de conservación, el reciclado de pavimentos para la reutilización en la carretera se presenta como una de las alternativas con mayor acogida por sus beneficios técnicos, económicos y ambientales.

**Tabla 9**

*Actividades de mantenimiento periódico.*

ACTIVIDAD DE CONSERVACION PERIÓDICA	ELEMENTO DE CONSERVACION
Sellos asfálticos	Pavimentos Flexibles en calzada y bermas
Recapeos asfálticos	
Fresado de carpeta asfáltica	
Microfresado de carpeta asfáltica	
Reconformación de base granular en bermas	
Imprimación reforzada en bermas con material granular	
Nivelación de bermas con mezcla asfáltica	

Nota: la tabla muestra las actividades de conservación periódica para pavimentos flexibles. Dentro de estas actividades se puede añadir al reciclado de pavimentos como una alternativa de conservación. Adaptado de (MTC, 2016).

#### **2.2.1.8.3 Mantenimiento Temporal**

Este tipo de mantenimiento vial se realiza con la intención de evitar que el tránsito se desarrolle en condiciones peligrosas o de extrema incomodidad. Este tipo de mantenimientos suelen tener un periodo breve de utilidad ya que se llevan a cabo con la intención de que la vía resista y no sufra mayores deterioros mientras que se planifican y se evalúan el tipo de mantenimiento definitivo que la vía necesita.

#### **2.2.1.8.4 Mantenimiento de Emergencia**

Son mantenimientos de tipo correctivo y tienen como finalidad asegurar la transitabilidad de forma segura para los usuarios. “En este se realizan todo tipo de reparaciones, ya sea el caso de tener un mal diseño vial, construcciones deficientes, desastres naturales, etc.” (Jácome, 2020, p. 9).

Estos mantenimientos se realizan con carácter de urgencia ante un evento no programado o imprevisto como lo son los desastres naturales (huaicos, inundaciones, derrumbes, etc.) con el único fin de asegurar el paso vehicular sin que con ello se trate de remediar las fallas estructurales, es por esta razón que estos mantenimientos tienen un periodo de acción limitado. Entre las actividades de mantenimiento de emergencia se encuentran la estabilización de taludes, limpieza de derrumbes mayores y la reposición de superficie vial.

### **Figura 37**

*Derrumbes y daños en las vías a causa de desastres naturales.*



Nota: la figura muestra una serie de vías que se han visto afectadas a causa de derrumbes como son los huaicos y una mala estabilidad en los taludes de los cerros. Adaptación propia.

#### **2.2.1.8.5 Rehabilitación**

Cuando las condiciones del pavimento han llegado a un nivel de deterioro considerable y estas ya no pueden subsanarse por medio de actividades de mantenimiento, es necesario rehabilitar la vía. La principal función de la rehabilitación es dotar al pavimento de la capacidad estructural necesaria para que este soporte las cargas de

tráfico y clima durante un periodo adicional a su vida útil. Este tipo de actividades requieren de una evaluación previa para determinar el nivel de intervención necesaria, así como, del diseño estructural de acuerdo con las solicitaciones de carga y al tiempo que se pretende prolongar la vida útil del pavimento.

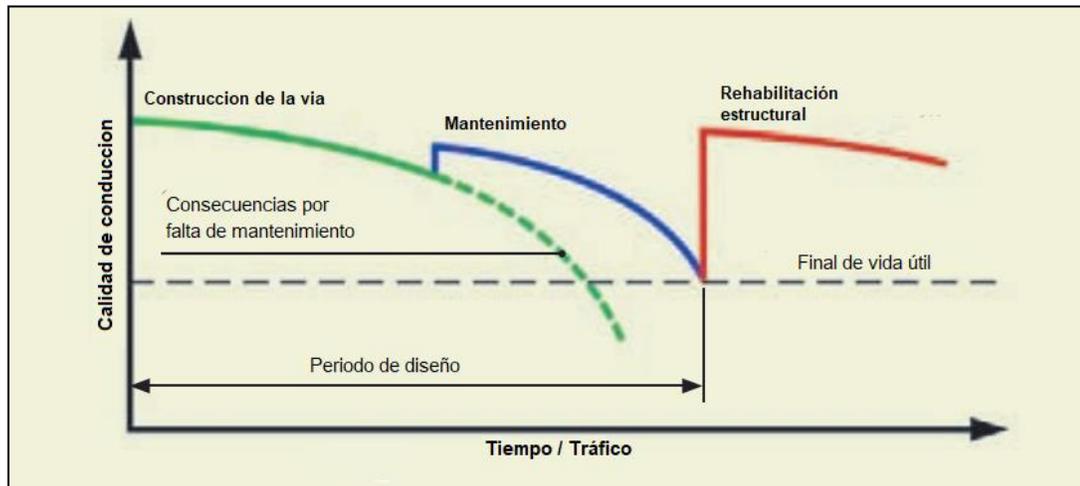
Entre las actividades de rehabilitación tenemos el restablecimiento de la capacidad estructural y la calidad de la superficie de rodadura, así como también el mejoramiento del sistema de drenaje.

“La rehabilitación del pavimento a veces se pospone hasta que se combina con un ejercicio de mejora para mejorar la geometría de la carretera y agregar carriles adicionales. Cada decisión de rehabilitación debe tomarse de forma independiente dentro del contexto de la red vial general”  
(Wirtgen, 2012, p. 29)

La tasa de deterioro del pavimento viene dada por la calidad en la conducción. Un pavimento deteriorado propicia que la conducción sea incomoda y segura, a su vez, que la misma genera más daños en el pavimento debido a la carga dinámica. Tomar las medidas de corrección a tiempo resulta eficaz y conveniente ya que a medida que el deterioro avanza la escala de las medidas correctivas aumenta, al igual que el costo de tales medidas.

**Figura 38**

*Vida útil, mantenimiento y rehabilitación de pavimentos.*



*Nota:* la figura muestra un esquema de la vida del pavimento, mostrando las consecuencias de la falta de mantenimiento y la vida útil que se gana al rehabilitar el mismo. Extraído de (Wirtgen, 2012, p. 28).

### **2.2.1.9 Actividades de Rehabilitación y Mantenimiento**

Las actividades de mantenimiento en su conjunto tienen como finalidad la protección del pavimento de los agentes medioambientales, en especial del agua. El agua ingresa a la estructura del pavimento a través de grietas presentes en su superficie, por lo que sellar estas grietas y mantener al pavimento impermeable es fundamental para evitar su deterioro.

Las actividades de mantenimiento están enfocadas a mantener la durabilidad y flexibilidad de la superficie del pavimento; sin embargo, no tratan los efectos de la fatiga producidos por las cargas del tráfico, por lo que este tipo de fallas requiere de algún tipo de rehabilitación estructural para devolver el pavimento a un estado óptimo.

“Si se abordan a tiempo, los efectos del envejecimiento pueden tratarse eficazmente mediante la aplicación de un rocío ligero de

emulsión bituminosa diluida. Las condiciones más serias requieren una aplicación de sellado de viruta donde los volúmenes de tráfico son bajos, o una capa de asfalto de mezcla en caliente convencional” (Wirtgen, 2012, p. 28)

Para abordar el problema del mantenimiento o rehabilitación del pavimento, generalmente bastara con inspecciones de tipo visual y estudios básicos, como la medida de las deflexiones, para determinar el grado de deterioro del pavimento y cuál es la alternativa de rehabilitación más acorde con lo que se espera.

Se debe de tomar en cuenta dos aspectos importantes. El primero, corresponde a determinar si el daño que presenta el pavimento es de carácter superficial o este ha penetrado las capas subyacentes del pavimento y el daño abarca a las capas estructurales. Lo segundo que se debe tomar en cuenta es el tiempo de vida útil que se espera para el pavimento. “Al separar la naturaleza del problema en dos categorías (superficial y estructural) del marco de tiempo (a corto o largo plazo), se simplifica la selección de la mejor opción” (Wirtgen, 2012, p. 30).

#### **2.2.1.9.1 Rehabilitación Superficial**

Este tipo de mantenimientos o rehabilitación se llevan a cabo en la capa superficial del pavimento. Esta capa es la más expuesta a los fenómenos atmosféricos y a las cargas por tráfico. Su evaluación se da básicamente en las condiciones de serviciabilidad en las que se encuentra el pavimento, claramente visibles y sentidas por los usuarios de la vía. Los problemas que se presentan en la superficie están dados básicamente por los efectos de la radiación ultravioleta, lo que genera el envejecimiento, y el agrietamiento superficial debido a los cambios de temperatura.

### **Recubrimiento superficial de asfalto**

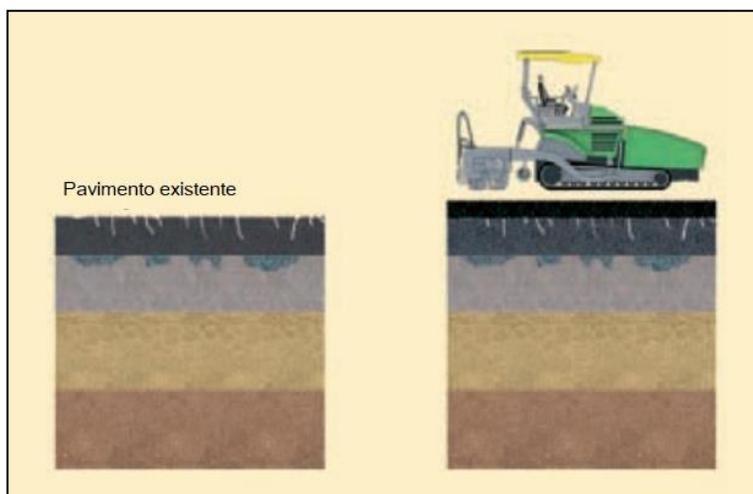
Este trabajo de mantenimiento, generalmente, se realiza como parte de los trabajos correspondientes a la conservación periódica de los pavimentos flexibles. Consiste principalmente en la colocación de una delgada capa de rodadura sobre la superficie ya existente. Esto se hace con la finalidad de devolver al pavimento las condiciones de transitabilidad y recuperar las condiciones superficiales y de resistencia del pavimento.

Se debe tener presente que las grietas y fallas presente en el pavimento se reflejaran en la nueva carpeta de rodadura si es que estas no han sido tratadas y subsanadas previamente.

En términos generales, esta alternativa es sencilla y su impacto en los usuarios de la vía es mínimo y el tiempo de ejecución de los trabajos es relativamente corto; sin embargo, la colocación de carpeta sobre carpeta genera que la elevación del pavimento aumente, pudiendo causar problemas de acceso y drenaje.

**Figura 39**

*Recapeo asfáltico.*



*Nota:* se muestra el detalle de la actividad de Recapeo asfáltico. Sobre la superficie ya existente, se coloca una nueva carpeta de rodadura. Extraído de (Wirtgen, 2012, p. 31).

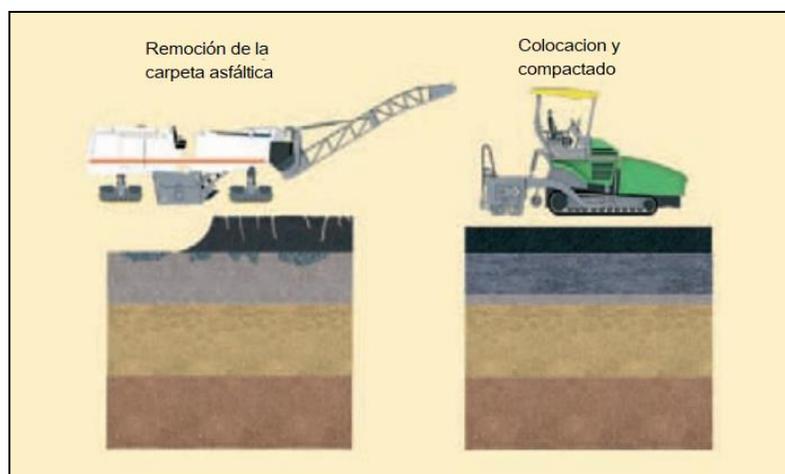
### **Remover y reemplazar**

Esta actividad consiste en moler total o parcialmente la capa de rodadura y reemplazarla con una nueva. Esta nueva carpeta de rodadura se produce en caliente en plantas de asfalto. El objetivo de esta actividad es recuperar las condiciones adecuadas de transitabilidad del pavimento, así como las características de resistencia, flexibilidad e impermeabilidad que debe de tener la capa de rodadura.

Las principales desventajas que se pueden presentar en este tipo de actividad es el hecho generar desperdicios a causa de la remoción de la carpeta asfáltica y mayor contaminación al momento de la producción de la mezcla en caliente; además, es una alternativa que toma tiempo debido al procedimiento que se debe seguir.

### **Figura 40**

*Proceso de remoción y reemplazo de la capa de rodadura.*



*Nota:* se muestra el detalle de la actividad de remoción y reemplazo de la carpeta asfáltica. La carpeta asfáltica deteriorada se remueve con la intención de colocar una nueva como

reemplazo. Esta nueva capa de rodadura tiene como función devolver las características superficiales y estructurales al pavimento. Extraído de (Wirtgen, 2012, p. 32).

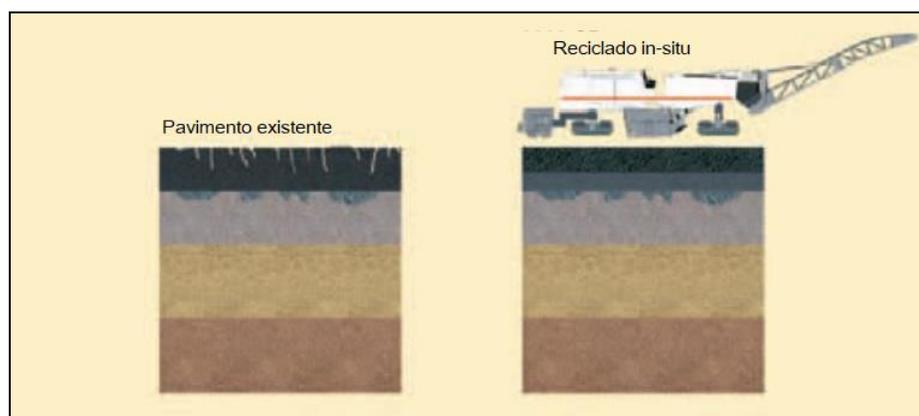
### **Reciclado**

El proceso de reciclado de la carpeta asfáltica se figura como una solución técnica, económica y ambientalmente amigable. Consiste en la remoción de la capa de rodadura en su reutilización para la construcción de la nueva carpeta asfáltica.

El procedimiento se puede llevar a cabo en una planta o en el mismo lugar de la construcción (in-situ), presentando diferencias básicas como los gastos por viaje y la rapidez de ejecución de los trabajos.

### **Figura 41**

*Proceso de remoción y reemplazo de la capa de rodadura.*



Nota: se muestra el detalle de la actividad de remoción de la carpeta asfáltica. Este material se reutiliza en la construcción de la nueva capa de rodadura. Para ser reciclado, el material debe cumplir con ciertos parámetros y su estabilización se puede hacer con cemento o un ligante bituminoso. Extraído de (Wirtgen, 2012, p. 33).

#### **2.2.1.9.2 Rehabilitación Estructural**

Dependiendo del grado de deterioro del pavimento, una rehabilitación superficial puede no ser necesaria para subsanar las

fallas que se presentan. Es en estos casos en donde se procede a rehabilitar el pavimento desde su estructura.

La rehabilitación estructural es una solución a largo plazo, además de presentar elevados costos para que el pavimento recupere su transitabilidad y las condiciones necesarias para operar con seguridad y confort.

Se debe tener en cuenta que al rehabilitar la estructura del pavimento es la estructura la que está dañada, mas no los materiales que la conforman; es por esto por lo que se debe dar prioridad a recuperar lo más que se pueda los materiales que conforman el pavimento.

“Como regla general, la rehabilitación estructural debe tener como objetivo maximizar el valor de rescate del pavimento existente. Esto implica que no se debe alterar el material que se ha densificado. La acción de amasado continua del tráfico tarda muchos años en alcanzar este estado y los beneficios que ofrecen estas densidades altas deben utilizarse siempre que sea posible” (Wirtgen, 2012, p. 34).

Una evaluación meticulosa de las causas del deterioro del pavimento nos dará mayores alcances de la alternativa de rehabilitación más idónea para la estructura, así como de evitar que en el futuro se presenten nuevamente las fallas por las mismas causas.

### **Reconstrucción total**

Consiste básicamente en remover y tirar. Esta operación es preferiblemente usada cuando, junto con la actividad de rehabilitación, se realizan actividades de mejoramiento vial, como el cambio en el trazo de la vía.

Esta reconstrucción se debe dar habiendo realizado el análisis estructural necesario para que el pavimento resista las cargas de tráfico y las condiciones ambientales a las que estará expuesto.

Junto con la reconstrucción del pavimento manteniendo sus espesores originales, se puede dar el caso de adicionar capas nuevas a las ya existentes con la finalidad de aumentar la resistencia estructural; sin embargo, esta operación puede traer problemas con el drenaje y la accesibilidad, ya que eleva la superficie del pavimento.

**Figura 42**

*Proceso de reconstrucción de la estructura del pavimento.*



Nota: el proceso de reconstrucción del pavimento puede ir de la mano con proyectos de mejora que exige cambios en la alineación de la vía. Adicionalmente, se pueden agregar capas extras a las ya existentes con la finalidad de proveer más resistencia. Extraído de (Wirtgen, 2012, p. 35).

### **Estabilización**

El proceso de estabilización consiste en reciclar hasta el 100% de las capas granulares que demandan rehabilitación a causa del deterioro sufrido. La estabilización se puede llevar a cabo in-situ o en una planta.

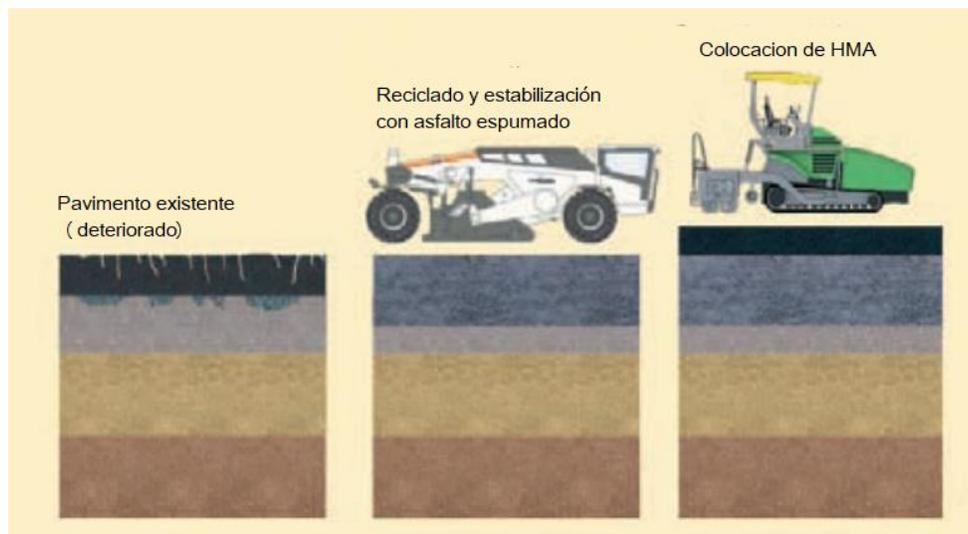
Las ventajas de este procedimiento es que permite la máxima reutilización de los materiales del pavimento sin que las capas subyacentes se vean afectadas. La estabilización se lleva a cabo

cuando el material existente en el pavimento es marginal y requiere de fortalecimiento.

La forma más práctica de estabilización es con cemento o agentes bituminosos. Estos agentes bituminosos pueden ser emulsiones asfálticas o asfalto espumado.

### Figura 43

*Proceso de reciclado y estabilización de capas granulares del pavimento.*



*Nota:* la figura muestra el proceso de remoción y estabilización de las capas estructurales del pavimento. Adicionalmente, se pueden agregar capas extras a las ya existentes con la finalidad de proveer más resistencia. Extraído de (Wirtgen, 2012, p. 36).

## 2.2.2 Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP)

### 2.2.2.1 Generalidades

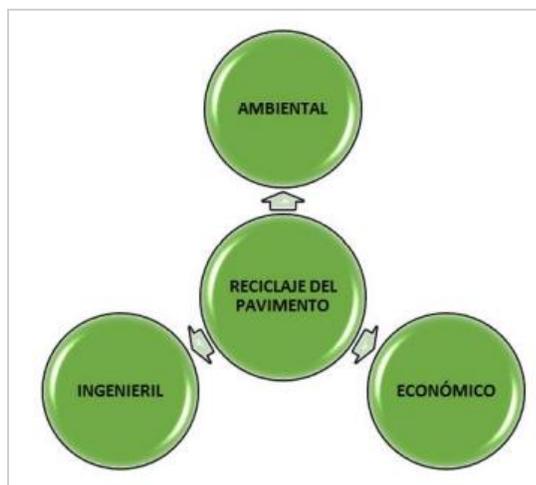
Al igual que toda obra de ingeniería vial, las carreteras se construyen con la finalidad de proveer transitabilidad y mejorar la calidad de vida de la población directa o indirectamente afectada por la misma. La EAPA (2014a) resalta la importancia de las carreteras al denominarla como uno de los activos más valiosos de la comunidad europea, estimando su valor en unos 16 billones de euros. (p. 4)

Solo en el departamento de Lima, por información dada por el MTC, al 2016, se tenían 1052.3 km de vías asfaltadas; muchas de ellas con más de 15 años de antigüedad, una vía bien diseñada y con el mantenimiento adecuado y realizado con prontitud puede asegurar que las vías se mantengan en óptimo estado durante su vida útil; sin embargo, “en la práctica, el mantenimiento requerido no se realiza con frecuencia, haciendo necesaria la rehabilitación tan pronto como sea necesaria” (Wirtgen, 2004).

Uno de los principales componentes de las vías a nivel mundial en general, y en el Perú en particular, es el asfalto. Gran parte de las vías en el Perú están conformadas por pavimentos flexibles y mixtos, siendo muy escasas las vías en donde se ha usado íntegramente pavimento rígido. “El asfalto es el material elegido para la construcción de carreteras, debido a su conducción cómoda y segura, su relación calidad-precio, velocidad de instalación, flexibilidad en la construcción, ejecución y mantenimiento combinados con una excelente durabilidad.” (EAPA, 2014a, p. 4). Además, por sus mismas características, el asfalto “puede reciclarse al 100% sin degradar su funcionalidad, y actualmente es el material de construcción más reciclado del mundo.” (EAPA, 2014a, p. 4).

## Figura 44

*El reciclado de pavimento*



*Nota:* el reciclado tiene mejoras ambientales – ingenieriles y económicas, el AEI del reciclaje de asfalto. Recuperado de (Instituto Mexicano del Transporte, 2018, p. 4)

### 2.2.2.2 Antecedentes

De acuerdo con el artículo de Texas A&M Transportation Institute (2016)

“Se tiene registros que se ha utilizado el reciclado para el mantenimiento y rehabilitación de pavimentos desde los 1930’s en Europa, en mayor parte como Inglaterra y Alemania, sin embargo, se tuvo un mayor impacto en los años 70’s debido al cese temporal de los envíos petroleros del Medio Oriente rumbo a varias zonas del mundo, en especial hacia EEUU, esta crisis ocasionó al aumento del precio de barril de petróleo hasta un cuádruple de su precio inicial, al mismo tiempo, la crisis mundial de energía no traía más soluciones que problemas.”(p. 1)

Toda esta incertidumbre llevó a que varios países buscaran alternativas más económicas, eficientes y amigables con el medio ambiente, por ello, los siguientes años, la industria de pavimentos asfálticos ha estado

en constantes cambios con métodos más innovadores a lo largo de los años.

De acuerdo con (NAPA, 2019) “La gran ventaja del Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) es que permite reusar la superficie de rodadura y las otras capas del paquete estructural, la tendencia de ahorrar recursos se ha globalizado, por ello es por lo que la National Asphalt Pavement Association indica que el producto más reciclado desde el año 1993 es el asfalto, por delante del papel, plástico, vidrios, entre otros.”

Las técnicas más usadas hasta la actualidad son el reciclado en caliente in situ, que requiere de una fuente de calor, la cual ablanda el pavimento asfáltico, lo derrite y permite hacer un remezclado in-situ con aditivos o materiales pétreos. El reciclado superficial consta en manipular la superficie de pavimentos con bajos espesores, su objetivo es para evitar que la superficie esté lisa, corregir perfiles geométricos de la calzada, entre otros.

También existe el reciclado en planta, donde se suele trabajar con agregados vírgenes que luego suelen ser almacenados en centros de acopio, su mayor ventaja es el obtener un producto final de mayor calidad, debido a que en la cámara de mezclado se pueden distribuir mejor la dosificación de agregados.

Entre las áreas donde hay aplicación de reciclaje, fue porque se encontró altos niveles de rigidez del sellante o ligante asfáltico, desprendimiento de agregados por fallas de cohesión, fallas superficiales como agrietamiento o agujeros, asentamientos que ocasionan ondulaciones y corrimientos en la capa de rodadura.

### **2.2.2.3 Métodos de Reciclado**

El reciclado de pavimentos, y en especial, la reutilización de los mismos in-situ, no es un término nuevo en el mundo de la construcción. Ya desde la década de 1930, en Estados Unidos se han “utilizado varias

formas de reciclaje de pavimentos in-situ, para rehabilitar y mantener pavimentos” (Texas A&M Transportation Institute, 2014, p. 1). Además, existen diversas formas en las que se puede reutilizar el pavimento. El Texas A&M Transportation Institute (2014) nos da mayores alcances en la definición de estos:

“Cold in-place recycling (CIR) (reciclado en frío in-situ a profundidad parcial): pulverización de profundidad parcial (2 a 5 pulgadas) de las capas de asfalto en el pavimento, adición de un agente de reciclaje y emulsión de asfalto o asfalto espumado, mezcla del agente de reciclaje y material pulverizado / encolado, depósito y compactación. El reciclaje en frío en planta, donde las existencias de materiales reciclados se mezclan en una unidad de reciclaje estacionaria o un molino de pugmill (mezcla) de la planta central, es similar al CIR. La única diferencia es que los materiales se procesan fuera del sitio en lugar de ser procesados en la carretera. El reciclaje en frío en planta y el CIR se combinan a menudo y se denominan reciclaje en frío.

Full-Depth reclamation (FDR) (reciclaje en frío in situ de profundidad total): pulverización de las capas de asfalto del pavimento (6 a 12 pulgadas) y una parte de los materiales subyacentes (base granular), con o sin la adición de un estabilizador. (Cemento portland, cal, emulsión asfáltica o asfalto espumado), esparcimiento y compactación

Hot in-place recycling (HIR) (reciclado en caliente in-situ): Se da un ablandamiento de la superficie unida al asfalto mediante calentamiento y escarificación (1 a 2 pulgadas) con púas o un cabezal de fresado. El material escarificado se mezcla con un agente rejuvenecedor (agente de reciclaje), se coloca con una pavimentadora de asfalto de mezcla en caliente estándar y se compacta.

HIR — remezclado: similar al reciclaje de superficie, excepto que el material escarificado / molido se mezcla con una pugmill o tambor de

mezcla con asfalto de mezcla en caliente nuevo (típicamente 18 a 25 por ciento) o agregado, si se desea, y se coloca como una capa.

HIR - repavimentación: similar al reciclaje de superficies, excepto que se coloca una capa de mezcla de asfalto en caliente directamente sobre el material reciclado de la superficie suelta y se compacta simultáneamente como una capa.” (p. 2)

De los métodos antes mencionados, el reciclado en frío es el que presenta mayor oportunidad de ahorro tanto de energía como de materiales, ya que no demanda de temperaturas altas para que cumpla con la función de devolver la calidad a la vía. Si bien, para el reciclado en frío es posible usar como agente estabilizador tanto emulsiones como asfalto espumado, el Departamento de Transporte de Colorado, CDOT por sus siglas en inglés, nos dice que “aunque el asfalto espumado es algo diferente de la emulsión, los resultados del proceso de estabilización para ambos sistemas probablemente sean similares” (2015).

El hecho de que el procedimiento se lleve a cabo en el mismo lugar significa que el material extraído no será transportado a una planta fija para su procesamiento, evitando así gastos en el transporte y repavimentación de los mismos; sin embargo, “los procesos in situ generalmente abordan problemas no estructurales o de superficie, como la necesidad de volver a perfilar o remodelar una carretera o las características de la superficie de retorno y donde existe una base sólida y estable existente.” (EAPA, 2014a, p. 13)

#### **2.2.2.4 Clasificación del RAP**

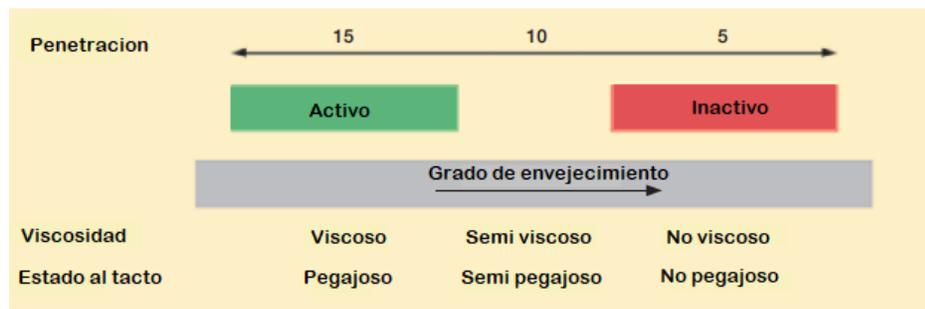
Es importante resaltar que, si bien el uso del reciclado de pavimento en frío es altamente beneficioso y práctico, ya que “esto tiene la ventaja de reducir los movimientos de transporte de los materiales a reciclar y los que deben desecharse y las emisiones de transporte asociadas.” (EAPA, 2014a), se deben de tomar en cuenta ciertos conceptos relacionados con

el material reciclado, y para esto es necesario saber en qué condiciones se encuentra el aglutinante antiguo ya que este “tendrá una influencia significativa en cómo se comportará el material reciclado cuando se reutilice.” (Wirtgen, 2012).

Se puede clasificar al material recuperado en frío (RAP) como activo e inactivo. Realizar pruebas para determinar la cantidad de aglutinante presente en el RAP o los parámetros reológicos del mismo (penetración, punto de reblandecimiento y viscosidad), nos proporcionara unos indicadores para clasificar el RAP. “El valor de la penetración indicará la viscosidad del betún recuperado, lo que permitirá clasificar el RAP como activo o inactivo” (Wirtgen, 2012):

**Figura 45**

*Clasificación del RAP en activo o inactivo según sus parámetros.*



*Nota:* Extraído de (Wirtgen, 2012)

Sin embargo, es posible determinar esta clasificación con unas sencillas pruebas. Wirtgen (2012) nos proporciona observaciones para catalogar al RAP como inactivo:

- Aspecto visual: el RAP es de un color gris apagado sin superficies negras brillantes.
- Fragilidad: un trozo de RAP se rompe limpiamente en pedazos.
- Adhesión: los trozos de RAP (a temperatura ambiente) no se pegan a la mano cuando se aprieta firmemente una muestra.

Cuando el material recuperado se clasifica como activo, “será necesario, para inactivar el asfalto en el RAP, incorporar o sustituir una proporción del material con agregado triturado (tamaño máximo menor a 6,7 mm o a 20 mm según sea necesario)” (Universidad de Costa Rica, 2020).

### **2.2.3 Asfalto Espumado**

#### **2.2.3.1 Antecedentes**

El asfalto espumado fue descubierto en la Universidad Estatal de Iowa en 1956 por el profesor Ladis Csanyi. “se utilizó un proceso de inyección de vapor al asfalto para formar la espuma, para construir caminos por la Armada norteamericana en las islas del Pacífico utilizando como agregado cenizas volcánicas” (PITRA, 2011)

No fue sino hasta 1991, año en el que expiraron los derechos sobre la patente adquirida por la organización Mobil Oil en 1968, en que el uso de la tecnología se masificó.

La organización Mobil Oil, hoy Exxon Mobil, compró la patente de invención de la tecnología del espumado del asfalto en 1968 y desarrolló la primera cámara de expansión que mezcla agua fría con asfalto caliente para generar espuma, transformándose así en un proceso más práctico, económico y menos peligroso. En los años transcurridos desde el descubrimiento del asfalto espumado, la tecnología de reciclaje de pavimentos avanzó hasta el punto en que podría utilizarse comúnmente para la rehabilitación de carreteras. No pasó mucho tiempo antes de que el concepto de asfalto espumado se combinara con la estabilización del pavimento reciclado como una técnica de uso común. Los aumentos posteriores de los precios del crudo en la década de 1970 hicieron que el asfalto espumado ganara popularidad para su uso en la estabilización de pavimentos de base y recuperada a medida que la tecnología de reciclaje y espumado continuaba mejorando. Desde la década de 1970, el uso de asfalto espumado para estabilizar la base y

los materiales recuperados ha vuelto a aumentar en popularidad con los aumentos en los precios del petróleo crudo y el aumento de las preocupaciones ambientales y energéticas. Dado que las materias primas son cada vez más caras, se hace importante aplicar técnicas en las que se empleen hasta el 100% de material reciclado. El uso de materiales en el lugar ahorra energía porque los materiales se procesan in situ, lo que reduce en gran medida el transporte requerido para transportar los materiales antiguos del pavimento como desechos. La posterior adición de asfalto espumado al pavimento recuperado aumenta su resistencia a la tracción y resistencia a la humedad. (Minnesota Department of Transportation, p.2, 2009).

La investigación y desarrollo del asfalto espumado adquiere mayor relevancia a mediados de los 90's e inicios de los 2000, de acuerdo con Wirtgen (2004):

“En Sudáfrica se hizo ensayos con un Simulador de Vehículos Pesados, en el cual se evaluó una mezcla de pavimento reciclado, cemento y asfalto espumado, esto sirvió para la guía técnica provisorio de Diseño y Uso de Materiales tratados con Asfalto Espumado de la Asphalt Academy”,

### **2.2.3.2 Generalidades**

En términos generales, se podría definir a la estabilización de pavimento con asfalto como “material granular o combinación con material recuperado donde se incorpora emulsión asfáltica o asfalto espumado para aumentar la resistencia al corte y disminuir la susceptibilidad al daño por humedad” (Universidad de Costa Rica, 2020). En una aproximación específica del concepto de estabilización con asfalto espumado, en el Manual de Reciclado en Frio se señala como “una manera efectiva de mejorar la resistencia del material y reducir al mismo tiempo los efectos perjudiciales del agua” (Wirtgen, 2004).

El método para la rehabilitación de pavimentos usada ampliamente en el Perú consiste en fresar la carpeta asfáltica y producir asfalto en caliente para colocar una nueva carpeta asfáltica en reemplazo de la que se ha fresado. Esta técnica de rehabilitación genera, no solo la eliminación del material fresado y la explotación de recursos, sino que además se debe de trabajar a elevadas temperaturas, ya que “las altas temperaturas son necesarias para asegurar el secado completo del agregado y la posterior unión con el aglomerante, el recubrimiento del agregado por el aglomerante y la trabajabilidad para un manejo y compactación adecuados” (National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), 2015). A esta forma de producción de asfalto se le denomina mezcla asfáltica en caliente (HMA, por sus siglas en ingles).

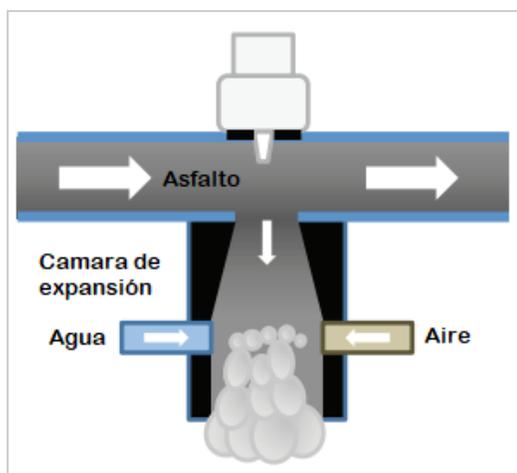
### **2.2.3.3 Proceso de Espumado**

El tratamiento del material reciclado con asfalto espumado consiste en recuperar hasta el 100% de la carpeta asfáltica existente, y hasta un porcentaje de la base granular. Este material recuperado se mezcla con asfalto espumado, el cual “consiste en calentar asfalto a una temperatura entre 155 °C y 175 °C, donde se mezcla con una pequeña cantidad de agua atomizada en una cámara de expansión y aire a una presión aproximada de 5 bares (100 kPa)” (Universidad de Costa Rica, 2020).

La cantidad de asfalto y agua dependen de factores como la cantidad de material que se va a estabilizar. Generalmente la cantidad de asfalto optima fluctúa entre 1.6 y 2.2% de asfalto por masa de material reciclado. Mientras que la cantidad de agua optima puede estar en los rangos de 1 a 3% del peso de asfalto. Una cantidad mayor de asfalto, mayor al 3%, fomentan la inestabilidad ya que el exceso de lubricación proporcionado por el asfalto genera que el ángulo de fricción interna disminuya.

## Figura 46

*Producción de asfalto espumado en cámara de expansión.*



*Nota:* el proceso del espumado se realiza en una cámara de expansión, en donde se inyecta aire, agua y asfalto a una presión y temperaturas constantes y previamente ensayadas para obtener una correcta espumación. Extraído de (NCHRP, 2015).

La forma en que se proporciona humedad a la mezcla define el tipo de espumación que se lleva a cabo. Cuando se da una espumación directa, el agua es agregada de manera manual al asfalto caliente, produciendo de esa manera la espumación; mientras que, si se trata de una espumación indirecta, el agua se encuentra atrapada en la estructura molecular de materiales como la zeolita sintética, generando una micro espuma cuando esta entra en contacto con el asfalto caliente (Ccoyllo, 2019).

### **2.2.3.4 Ventajas de la Aplicación de Asfalto Espumado**

El uso del asfalto espumado se ha masificado a través de los años gracias a su practicidad y relativa rapidez en la ejecución de proyectos en los que se aplica. Además, el hecho de aplicarlo con pavimento reciclado permite un significativo ahorro en la obtención de materiales pétreos y, ya que, el método emplea una cantidad mínima de filler (de

ser necesario), asfalto y agua, los costos tienen una disminución considerable, a la par que se preserva el medio ambiente.

“El reciclado en frío con betún espumado como ligante es una tecnología que se ha implantado en el mundo entero y que cobra cada vez más importancia tanto para las autoridades de construcción viales como para las empresas constructoras dedicadas al saneamiento y la construcción de carreteras” (Wirtgen, 2019)

El manual de Reciclado en Frío (2012), se nos da importantes alcances en cuanto a la diferencia de estabilizar el pavimento con asfalto espumado (BSM-foam) frente a la producción de la mezcla asfáltica en caliente (HMA):

**Tabla 10**

*Comparación estabilización con Asfalto espumado frente a HMA*

Comparación entre tipos de tratamiento asfáltico		
Factor	BSM-foam	HMA
Agregados que se pueden utilizar	-roca triturada -grava natural -material reciclado -arenas marginales	-roca triturada -0% a 50% de material reciclado
Temperatura del asfalto	160°C a 180°C (antes del espumado)	140°C a 180°C
Temperatura del agregado durante la mezcla	Ambiente (> 15°C)	Caliente (140°C a 200°C)
Contenido de humedad durante la mezcla	70% a 90% del óptimo contenido de humedad	Seco
Tipo de	Cobertura de las	Recubrimiento de

recubrimiento al agregado	partículas finas. Mayor cohesión asfalto/finos	todas las partículas de agregado con espesor de capa controlado
Temperatura de construcción/ compactación	Ambiente (> 10°C)	140°C a 160°C
Vacíos	10% a 15%	3% a 7%
Tasa de ganancia de fuerza inicial	Medio (pérdida de humedad)	Rápido (enfriamiento)
Modificación del asfalto	No (los modificadores son antiespumantes)	Si
Parámetros del asfalto	Propiedades espumantes <ul style="list-style-type: none"> <li>● Razón de expansión</li> <li>● Vida media</li> </ul>	Penetración Punto de rotura Viscosidad

*Nota:* la tabla muestra las diferencias más resaltantes entre la producción de mezcla asfáltica en caliente (HMA) y la utilización de asfalto espumado para la estabilización de pavimentos. Extraído de (Wirtgen, 2012, p. 124)

Una de las principales ventajas de la aplicación de asfalto espumado es la temperatura de trabajo. Mientras que las mezclas convencionales necesitan de una elevada temperatura de los agregados y del asfalto para que se pueda producir, el método de estabilización con asfalto espumado permite que el procedimiento sea llevado a cabo con una temperatura de los agregados mínimamente superior a la temperatura ambiente (>15°C) y permite que la obra sea ejecutada con una temperatura igual de baja (10°C más a la temperatura ambiente). Ello

permite que el tiempo de ejecución sea relativamente más rápido, así como una operatividad del pavimento en un tiempo mucho menor.

“El reciclado en frío con asfalto espumado permite producir capas de base flexibles y duraderas. Estas constituyen el fundamento ideal para el extendido del firme de asfalto de poco espesor” (Wirtgen, 2019). Además, al utilizar asfalto espumado, aumenta la resistencia de la mezcla y reduce la susceptibilidad al daño por humedad de los materiales granulares estabilizados, da mayor rigidez a la capa de base volviéndola flexible y resistente a la fatiga.

La estabilización de pavimentos con asfalto espumado se presenta como una alternativa sostenible, económica y ambientalmente menos agresiva; esto partiendo de la base de que el material recuperado ha sido determinado como apropiado para su reutilización, habiendo sufrido pequeños cambios en su desempeño mecánico (EAPA, 2014a).

#### **2.2.3.5 Propiedades de la Espumación**

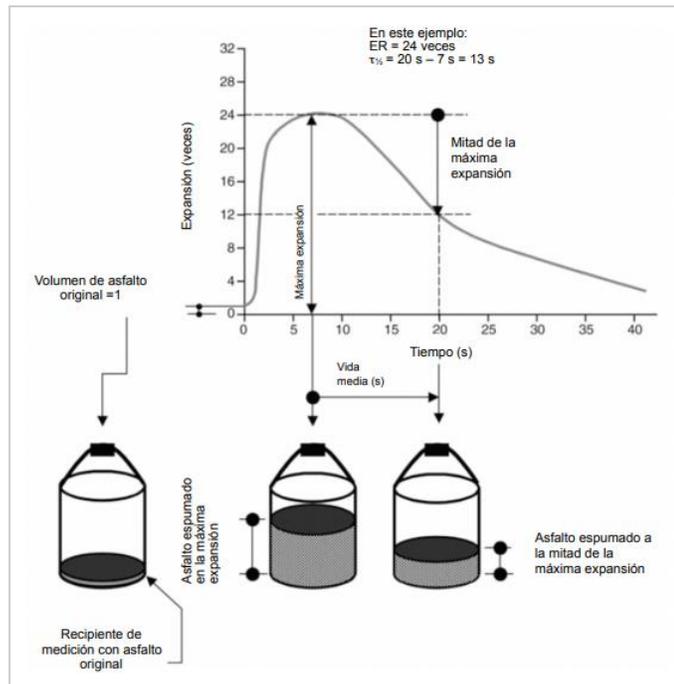
El asfalto que se utiliza para el espumado debe de cumplir con ciertas características, una de ellas es el valor de penetración (Pen), el cual puede estar en un rango de entre 60 y 200 (Wirtgen, 2012); sin embargo, este parámetro por sí solo no basta para determinar si el asfalto es el indicado para ser usado. Para ello, es necesario determinar dos parámetros que serán la base sobre la cual se sustentara la elegibilidad del asfalto. Estas propiedades son:

- **Razón de Expansión:** Es una medida de la viscosidad de la espuma y determina qué tan bien se dispersará el asfalto en la mezcla. Se calcula como la relación entre el volumen máximo de espuma y el volumen original del asfalto sin espumar. (Wirtgen, 2012). El valor mínimo para considerar aceptable este factor es de 8.

- Vida Media: es una medida de estabilidad de la espuma y provee una indicación de la tasa de colapso de la espuma. Se calcula como el tiempo, en segundos, que transcurre para que la espuma colapse a la mitad de su volumen máximo. (Universidad de Costa Rica, 2020). El valor mínimo de este factor es de 6.

**Figura 47**

*Vida media y razón de expansión del espumado de asfalto.*



*Nota:* el proceso del espumado se caracteriza por su vida media, medida en segundos, y la razón de expansión, medida como la cantidad de veces que se expande el asfalto respecto a su volumen original. Extraído de (Wirtgen, 2004).

### 2.2.3.6 Factores que influyen en la Espumación

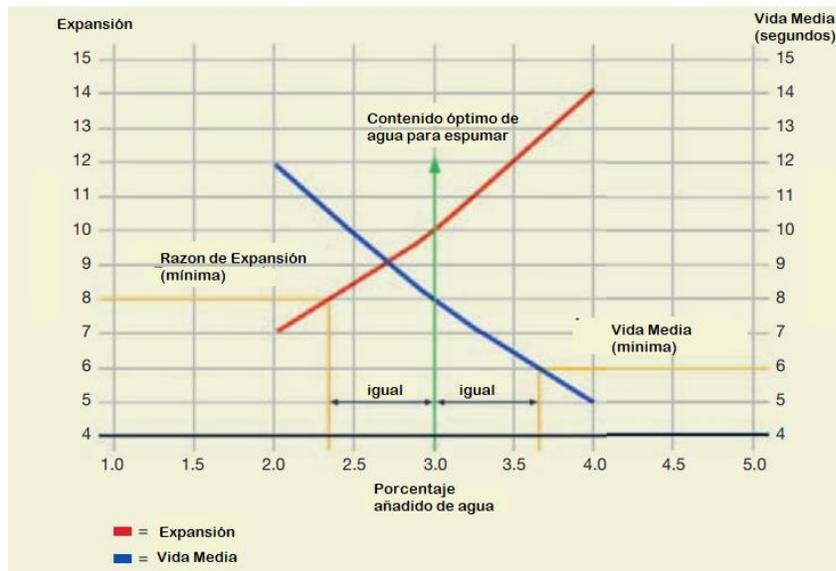
Los parámetros de espumación, vida media y razón de expansión, se ven básicamente afectados por dos factores: el agua y la temperatura. “La tasa de aplicación de agua y la temperatura del betún son los factores más importantes que influyen en la calidad de la espuma.” (Wirtgen, 2012).

### 2.2.3.6.1 Adición de Agua

Uno de los factores importantes que van a tener incidencia directa en la calidad del espumado que se busca es la cantidad de agua que se debe agregar para obtener una razón de expansión y una vida media óptimos y de acuerdo con las especificaciones requeridos tanto para el asfalto empleado como para el espumado en sí. Esta relación del porcentaje de agua con los dos parámetros (vida media y razón de expansión) se pueden apreciar en la figura 48:

**Figura 48**

*Contenido óptimo de agua para espumado en relación con la vida media y razón de expansión*



*Nota:* Extraído de (Wirtgen, 2012, p. 142)

Se tiene que a mayor porcentaje de agua se va a tener una mayor razón de expansión, pero produce que se tenga una vida media más corta; mientras que un menor porcentaje de agua genera una vida

media más prolongada, pero disminuye su razón de expansión. “Se debe evitar el uso de agua con impurezas, aunque se obtenga una buena espuma de asfalto, para evitar obstrucciones del sistema de inyección del asfalto.” (Universidad de Costa Rica, 2020)

### 2.2.3.6.2 La Temperatura

Otro aspecto importante para tener en cuenta es la temperatura tanto de los agregados como del asfalto que se usara para espumar. La temperatura del agregado debe de ser la idónea para lograr una vida media y una razón de expansión óptimas ya que “las temperaturas más altas del material aumentan el tamaño de la partícula que se puede recubrir, mientras que las temperaturas bajas pueden resultar en poca o ninguna dispersión del betún” (Wirtgen, 2012). La temperatura para el agregado, así como su influencia en los parámetros del asfalto espumado se pueden ver en la tabla N° 10:

**Tabla 11**

*Limites mínimos aceptables para parámetros del asfalto espumado.*

Temperatura del agregado	10% a 15%	Superior a 15°C
Razón de expansión (veces)	10	8
Vida media (segundos)	8	6

*Nota:* Extraído de (Wirtgen, 2012)

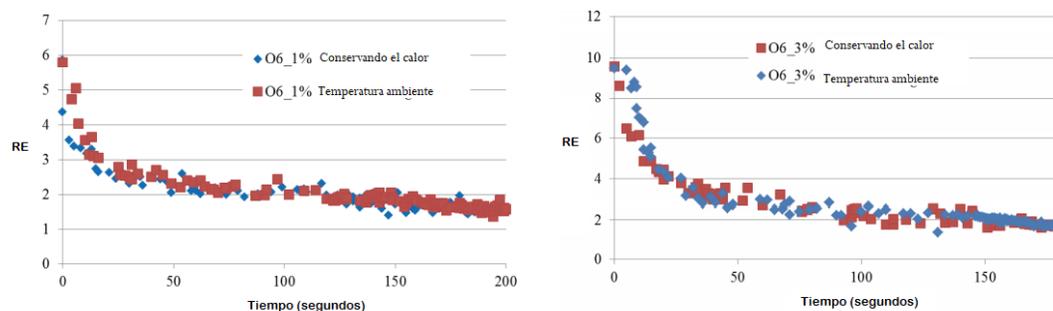
La temperatura del asfalto juega un rol importante para la producción de la espuma, ya que “una elevada temperatura del asfalto generalmente crea mejores espumas” (Wirtgen 2012). Sin embargo, esta temperatura debe fluctuar entre un rango entre 155 °C y 175 °C. (Universidad de Costa Rica, 2020).

A efectos de investigar si la temperatura de la cámara en donde se realiza el procedimiento de espumado tiene influencia directa o indirecta en los valores de la vida media y la razón de expansión, la NCHRP (2015) llevo a cabo unos proyectos en laboratorio. Este proyecto consiste en espumar el asfalto, con diferentes porcentajes de agua, a una temperatura de 160°C, en un Accufoamer. El experimento se llevó a cabo dejando a temperatura ambiente la cámara de expansión en el primer caso, y cubriendo con unas “mantas” calefactoras la cámara en segundo lugar, a fin de mantener la temperatura elevada. La temperatura de las mantas es la misma que tiene el asfalto al espumar, 160°C. “La temperatura del aglutinante en la unidad de espumado no se redujo por debajo de 160°C porque esto daría como resultado la obstrucción de los tubos en la unidad de espumado” (NCHRP, 2015).

El estudio dio mayores luces respecto a la influencia de la temperatura en el proceso de espumado. Es indudable que el asfalto debe de estar caliente para así poder reaccionar con el agua y crear la espuma. Sin embargo, se pudo comprobar que el estado de la temperatura a la que se encuentra la cámara en donde se realiza el proceso no tiene una influencia directa en el mismo. “Con base en estos resultados, la temperatura de la unidad colectora no se considera un factor para caracterizar las espumas aglutinantes” (NCHRP, 2015).

**Figura 49**

*Comparación de los resultados del espumado conservando la temperatura y a temperatura*



*ambiente*

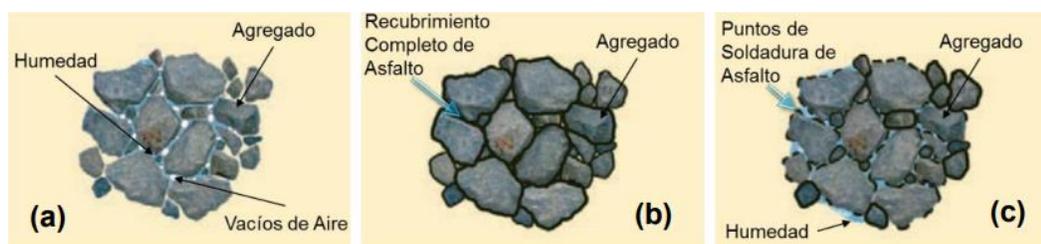
*Nota:* Extraído de (NCHRP, 2015)

### 2.2.3.7 Estructura del Material

Otro aspecto importante que se debe de tener en cuenta es la clasificación del material reciclado. Para que el procedimiento se lleve a cabo con éxito, el material reciclado tiene que ser inactivo, esto debido a que una concentración mayor de asfalto envejecido en la mezcla ocasiona que las gotas de asfalto espumado no se adhieran a la superficie del RAP. Un RAP inactivo generara una unión entre las partículas del agregado de forma no continua. Esta unión se comporta como materiales granulares con fricción entre partículas retenidas, pero con mayor cohesión y rigidez. (Wirtgen, 2012).

## Figura 50

*Tipos de unión en la mezcla del material RAP con asfalto espumado.*



*Nota:* RAP a) no unido, b) unión continua y c) unión discontinua. Extraído de (Instituto Mexicano del Transporte , 2018)

En términos generales, la utilización de material reciclado para la estabilización requiere de consideraciones especiales debido a que en su composición presenta un asfalto que se ha envejecido a lo largo del tiempo.

“Mientras que el material que no es RAP exige la presencia de una cantidad mínima de polvo ( $> 4\%$  en masa  $< 0.075$  mm) para que el asfalto se disperse de manera efectiva, el material RAP con tan solo un  $1\%$  de pasar el tamiz de  $0.075$  mm se puede tratar con éxito con asfalto espumado” (Wirtgen, 2012, p. 211).

El filler ayuda a mejorar la adherencia del betún a los demás agregados, ya que mejora la dispersión del asfalto, aumenta la rigidez de la mezcla haciendo que la ganancia de resistencia se de en un menor tiempo. Además, modifica la plasticidad de los agregados naturales, reduciendo el índice de plasticidad (IP) y acelera el curado de la mezcla compactada.

Se debe tomar en consideración que al agregar filler activo, este no debe de exceder el  $1\%$  del material, cuando se trata de cemento, y de  $1,5\%$  cuando se trata de cal hidratada, y esta sea requerida para modificar la plasticidad. Sin embargo, una tasa de aplicación mayor produce fragilidad en el pavimento, lo que fomenta la contracción y el

agrietamiento asociados con el tráfico. “El filler, aplicado en cantidades cercanas al 1% en peso, puede producir un aumento significativo de la resistencia retenida sin afectar las propiedades de fatiga de la capa” (Espinoza P. y Vildoso J., 2014).

## **2.3 Definición de términos**

Para la definición de términos se tendrá como punto de partida las variables escogidas.

### **2.3.1 Reciclado de Pavimentos**

Se entiende por reciclado la reutilización de materiales que conforman (capas) un pavimento existente, mediante procesos especiales, con la finalidad de mejorar sus propiedades y reincorporarse en la estructura. El reciclado puede ejecutarse en frío o en caliente. En ambos casos puede hacerse en obra, o transportando el material a una planta donde es procesado, bien en caliente o en frío.

Según el MOPC de República Dominicana (2016), los objetivos principales son:

- Garantizar seguridad al tránsito
- Dar comodidad a la circulación sobre el pavimento
- Preservar la integridad de la estructura del pavimento
- Preservar la integridad de la carpeta asfáltica

### **2.3.2 Reciclado en Frío**

Consiste en la recuperación del material de un pavimento asfáltico existente, el cual es mezclado con asfalto espumado, adiciones (cemento o cal) y agregados nuevos (si es necesario) para formar una base asfáltica que será colocada en el mismo lugar o en otro distinto. La recuperación puede ejecutarse mediante un equipo fresador capaz de disgregar el material o mediante métodos convencionales donde el proceso de disgregación ocurre con posterioridad a la recuperación. En general el material recuperado está

formado no sólo por concreto asfáltico disgregado, sino también por agregados aportados por la base y subbase granular existente.

El reciclado en frío es especialmente conveniente en pavimentos que presenten deformaciones, disgregación, oxidación, grietas de bloque, longitudinales y transversales, y problemas estructurales que no afecten las capas inferiores de la estructura. Ofrecen, por lo general, una buena relación beneficio-costos ya que eliminan transportes y botes de materiales contaminantes.

### **2.3.3 Asfalto Espumado**

“El asfalto espumado consiste en calentar asfalto a una temperatura entre 155 °C y 175 °C, donde se mezcla con una pequeña cantidad de agua atomizada en una cámara de expansión y aire a una presión aproximada de 5 bares (100 kPa). Cuando las partículas de agua entran en contacto con el asfalto caliente, la energía calórica del asfalto se transfiere al agua. Tan pronto como el agua alcanza su punto de ebullición, esta cambia de estado y al hacerlo, crea una burbuja con una delgada película de asfalto llena con vapor de agua” (Universidad de Costa Rica, 2020, p. 30)

### **2.3.4 Fresado**

“Este trabajo consiste en cortar total o parcialmente la capa de rodadura del pavimento de la vía, incluyendo los correspondientes a los túneles, puentes y demás elementos, de acuerdo con las especificaciones técnicas y de conformidad con el proyecto. El objetivo del fresado es la recuperación de las condiciones estructurales y superficiales del pavimento para alcanzar una adecuada circulación vehicular con seguridad y comodidad.” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016, p. 331)

### **2.3.5 Escarificación**

“El eskarificado consiste en golpear el suelo con un grupo de láminas colocadas en un tambor. Las láminas giran libremente en su eje y puede

regularse su profundidad de penetración, al controlar desde la escarificadora la posición del tambor.

Esta técnica de preparación se emplea para restaurar superficies de hormigón, asfalto, metal y otro tipo de suelos. Al mismo tiempo que retiran la capa más superficial del suelo, las escarificadoras dejan un acabado rugoso y muy adherente, lo que facilita el tratamiento posterior y posibilita un mejor acabado.” (<https://www.tecmapro.com/Novidades/maquina-fresado-carretera/>) (2017)

### **2.3.6 Estabilización de Suelos**

“Consiste en la estabilización de suelos de relativa baja plasticidad ( $IP < 16$ ) con espumado, en donde los suelos pueden provenir de la recuperación de áridos de un camino sin pavimentar o de nuevas canteras. Principalmente se emplean agregados recuperados cuya granulometría es mejorada por agregados nuevos (si es necesario), ya que uno de los objetivos de esta aplicación es obtener mezclas de bajo costo. El proceso de recuperación de los agregados es similar al descrito para el reciclado en frío de pavimentos asfálticos” (Espinoza et al., 2014, p. 102).

### **2.3.7 Economía Circular**

“la economía circular pretende que nuestros productos estén siempre en circulación, no solo ampliando su vida útil sino consiguiendo que, tanto durante esta como una vez que se acabe, sirvan para generar nuevos productos (de igual manera que la planta contribuye a crear nuevas plantas y nuevos organismos), para que así no se haga necesario extraer grandes cantidades de recursos naturales, sino emplear de nuevo aquellos que ya fueron una vez utilizados o extraídos, evitando así tanta dependencia por unos recursos que se agotan.” (Belda, I., 2018, p.31).

### **2.3.8 Medio Ambiente**

“Se entiende por medio ambiente un complejo entramado de relaciones entre factores físicos, biofísicos, sociales y culturales en el que ocurren las relaciones que conlleva la actividad humana y social. Los factores físicos se refieren a todo lo inerte presente en el planeta, los biofísicos abarcan todos los seres vivos, lo social se refiere a las estructuras organizativas de las especies, y lo cultural engloba finalmente todo lo hecho por el hombre.” (Muñoz, Contreras y Molero, 2018, p.15)

### **2.3.9 Desarrollo Sostenible**

“El concepto de desarrollo va ligado con la idea de crecimiento ilimitado de la producción, y su resultado se mide en agregados monetarios homogéneos de esa producción. El pensamiento ecológico, la noción de desarrollo hace referencia a procesos físicos de producción singulares y heterogéneos, que son sostenibles en la medida en que se realizan siguiendo los principios de funcionamiento de los ecosistemas naturales.

La sostenibilidad implica conciencia, sensibilidad, responsabilidad, cambios políticos y actitudes ciudadanas, aspectos éticos y culturales, así como patrones de consumo y estilos de vida.” (Innovación y Cualificación, S. L, 2019, p. 131 y 133)

## CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

### 3.1 Hipótesis

Las hipótesis son suposiciones hechas en base a nuestro problema de investigación. Es así como las hipótesis vienen a dar una posible respuesta a esta problemática planteada. En el Diccionario de la lengua española (DLE), la hipótesis es definida como: suposición que se establece provisionalmente como base de una investigación que puede confirmar o negar la validez de aquella.

Hernández Sampieri (2014) nos dice que:

“Las hipótesis son las guías de una investigación o estudio. Las hipótesis indican lo que tratamos de probar y se definen como explicaciones tentativas del fenómeno investigado. Se derivan de la teoría existente y deben formularse a manera de proposiciones. De hecho, son respuestas provisionales a las preguntas de investigación” (p. 104)

Las hipótesis deben situarse en un contexto y tiempo determinados para poder ser válidas; además, estas deben poder ser medibles y está estrechamente ligado al hecho de que las variables de estudio deben ser comprensibles, precisas y lo más concreto que sea posible.

#### 3.1.1 Hipótesis Principal

La hipótesis principal es:

La aplicación del reciclado con asfalto espumado para la rehabilitación y mantenimiento de pavimentos nos brindara beneficios de sustentabilidad en el proyecto.

Para nuestro tema de investigación, las hipótesis planteadas son del tipo descriptiva y de diferencia de grupos. La hipótesis descriptiva tiene como intención predecir un dato o valor en la variable o variables que se van a medir u observar; esto se justifica en el hecho de describir el proceso y los

beneficios, derivados del mismo, con la aplicación del reciclado de pavimentos con asfalto espumado. Mientras que la hipótesis de diferencia de grupos se formula en investigaciones que tiene por objetivo el comparar grupos; ello se justifica en la comparación hecha entre la técnica de reciclado con asfalto espumado frente al método usado en el proyecto de estudio.

### **3.1.2 Hipótesis Secundaria**

- Se dan mejoras técnicas en la aplicación del reciclado con asfalto espumado para la rehabilitación de pavimentos.
- Existen ventajas en el tiempo de proyecto en la aplicación del reciclado con asfalto espumado frente a la técnica del fresado en el proyecto.
- Existen beneficios ambientales en la aplicación del reciclado con asfalto espumado para la rehabilitación de pavimentos en el proyecto.

## **3.2 Variables**

Una variable es un atributo o cualidad que puede o no estar presente en el objeto de estudio, el cual puede ser individuos, fenómenos, procesos, etc. Hernández Sampieri (2014) define a la variable como “una propiedad que puede fluctuar y cuya variación es susceptible de medirse u observarse” (p. 105).

### **3.2.1 Definición Conceptual de las Variables**

- Reciclado en frío con asfalto espumado  
El término de “asfalto espumado” se deriva de la acción de “espumar” ejercida por el betún. Esto incluye la inyección de una pequeña cantidad de agua y aire a una alta presión con el asfalto calentado, con lo que el asfalto produce espuma y su tamaño original aumenta a un tamaño 20 veces mayor. A continuación, la espuma se añade directamente a la mezcladora a través de unas toberas de inyección y se procesa perfectamente con materiales de construcción fríos y húmedos. A este

material nuevo de construcción, frecuentemente producido reutilizando asfalto fresado, se le denomina material estabilizado con asfalto (Wirtgen, 2019).

- Mantenimiento periódico en la ejecución del proyecto con el método convencional

El mantenimiento periódico está conformado por obras que acumulan aspectos que no pueden ser de reparación inmediata, pero que, si son visibles y en base a la experiencia y demanda del tráfico, son programables para ser realizadas por tramos viales, cuya prioridad se certifica en el campo en función de los registros de estado del camino (MTC, 2016). Estas obras incluyen cortar total o parcialmente la capa de rodadura del pavimento de la vía, de acuerdo con las especificaciones técnicas y de conformidad con el proyecto.

### 3.2.2 Operacionalización de las Variables

**Tabla 12**

VARIABLES DE ESTUDIO	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Reciclado en frío con Asfalto Espumado	Aspectos Técnicos	Procedimiento constructivo	Documentos bibliográficos
		Maquinaria empleada	Documentos bibliográficos
	Aspectos Ambientales	Consumo de combustible por maquinaria	Especificaciones técnicas
		Emisiones de GEI	Documentos especializados
Aspectos temporales	Material recuperado y añadido	Documentos bibliográficos	
Ejecución de mantenimiento periódico en el proyecto con el método convencional	Aspectos Técnicos	Periodo de ejecución	Documentos bibliográficos
		Apertura al tránsito	Documentos bibliográficos
		Tipo de procedimiento	Expediente técnico de obra
	Aspectos Ambientales	Proceso constructivo	Expediente técnico de obra
		Maquinaria empleada	Expediente técnico de obra
		Material eliminado	Expediente técnico de obra (ETO)
Aspectos temporales	Consumo de combustible	Especificaciones técnicas	
	Producción de nueva mezcla asfáltica en caliente	ETO y documentación especializada	
Aspectos temporales	Periodo de ejecución	Expediente técnico de obra	
	Tiempos de producción	Expediente técnico de obra	

## CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 4.1 Tipo y Nivel

Cuando hablamos de un proyecto de investigación, en términos generales, hacemos referencia al conjunto de actividades necesarias para obtener una información. Hernández (2014) define la investigación como “un conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno o problema” (p. 4); con esto decimos que la investigación se compone de una serie ordenada de procedimientos y normas, además de tener la capacidad de analizar y juzgar de forma neutral, imparcial y desinteresada para llegar a una idea clara de lo que sucede en la realidad.

Para hablar del tipo y método de investigación es necesario analizar diversos conceptos, los cuales se agrupan y subdividen en base a criterios de selección. Dichos criterios de selección están sintetizados en el libro Metodología de la Investigación Científica para ingenieros de Borja.

De acuerdo con el fin que se persigue, la presente investigación es aplicada. Este tipo de investigación busca conocer, actuar, construir y modificar una realidad problemática (Borja, 2016, p. 10); ello, ya que en la investigación se estudiará la técnica del reciclado con asfalto espumado, a fin de exponer sus ventajas respecto de las actividades que mayormente empleadas para el mantenimiento periódico de las vías.

De acuerdo con los tipos de datos analizados, esta investigación es cuantitativa, ya que se analizarán diversos documentos que abordan el tema del reciclado con asfalto espumado, además, se estudiarán las diversas formas de reciclado que contempla la normativa vigente, a fin de establecer una relación de similitud y divergencias entre la técnica del asfalto espumado y las técnicas usadas en el Perú para la conservación vial.

Ya que la investigación tendrá un arraigo bibliográfico, se considera de tipo no experimental. Este tipo de investigación podría definirse como aquella que se realiza sin manipular deliberadamente variables. Es decir, se trata de estudios en los que no hacemos variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto

sobre otras variables. (Hernández, 2014, p. 152). En esta investigación solo se estudiarán las consecuencias e impactos de reutilizar la carpeta asfáltica con el añadido de asfalto espumado, priorizando la perspectiva medioambiental.

Al ser no experimental, esta investigación es de tipo descriptiva y transversal. En la investigación descriptiva se investigan y determinan las propiedades y características más representativas de los objetos (Borja, 2016, p. 13). Para la descripción de la técnica del asfalto espumado, se recurrirá a fuentes como artículos y tesis, en las cuales se aborda el tema, ya sea por un estudio que se hace del mismo o documentos en donde se expone la técnica después de haberse llevado a cabo. La técnica del fresado es ampliamente conocida en el Perú, ya que su uso en el mantenimiento de vías ha sido utilizado desde hace mucho. Para este caso, las fuentes están dadas por artículos, tesis, así como por la normativa vigente en el Perú y por el expediente técnico de la obra que se analizará. En la investigación transversal, se describe el fenómeno de estudio en un momento determinado del tiempo, sin que importe la evolución del fenómeno (Borja, 2016, p. 14). Esta característica cumple con la línea de investigación elegida, ya que se plantea estudiar cual es el impacto de la utilización de RAP con asfalto espumado en el proyecto "Ampliación de la Av. Ferrero (La Molina – Santiago de Surco)".

#### **4.2 Diseño de Investigación**

La presente investigación tiene como muestra a un cierto número de proyectos, así como información documental de la rehabilitación de carreteras empleando asfalto espumado con material reciclado de asfalto. Así mismo, se toma como punto de estudio el proyecto "Ampliación de la Av. Ferrero (La Molina – Santiago de Surco)" en el cual se medirán los posibles impactos que se hubieran presentado al emplear la técnica del asfalto espumado reciclando la carpeta asfáltica en contraposición con el fresado de la carpeta asfáltica usado como medida de conservación vial.

#### **4.3 Población y Muestra**

La población por estudiar abarca a los pavimentos rehabilitados con la técnica del asfalto espumado, ya que es del estudio realizado a los mismos de donde se extrae la

información necesaria para establecer las relaciones de las técnicas de rehabilitación de pavimentos. Cabe señalar que estos proyectos se tomaron indiscriminadamente de diversos países incluyendo dos que se han llevado a cabo en el Perú.

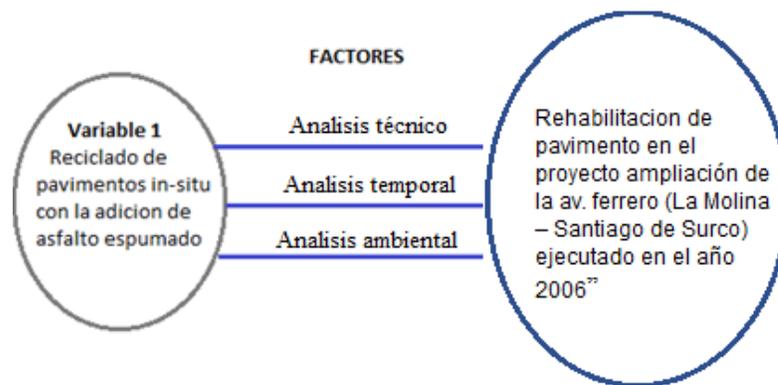
Para detallar la técnica de rehabilitación, se ha tomado como base de estudio el proyecto "Ampliación de la Av. Ferrero (La Molina – Santiago de Surco)", el cual se ejecutó en el año 2006; además de lo expuesto en la normativa peruana para el mantenimiento de vías.

#### 4.3.1 Relación entre Variables

En la investigación se evaluarán las ventajas y desventajas en la aplicación del método del reciclado in-situ con la adición de asfalto espumado frente al método utilizado para rehabilitar el pavimento en la obra “Ampliación de la Av. Raúl Ferrero (La Molina – Santiago de Surco) ejecutado en el año 2006”. De esta variable se debe de identificar sus factores técnicos, y ambientales; de tal forma que se puedan verificar y medir desde el punto de vista de sus factores, para así determinar relaciones de desigualdad o de similitud. Lo dicho se expone gráficamente en la figura 51

**Figura 51**

*Relación entre las variables*



*Nota:* Elaboración propia

Es importante señalar que en la presente investigación no se presenta un enfoque de variables independientes y dependientes. La relación que existe entre las variables puede considerarse en cierto grado correlacional, ya que se busca “conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos” (Hernández, 2014, p. 93); para efectos de nuestra investigación, las mejoras en el tiempo de ejecución del proyecto, mejoras técnicas y ambientales que se presentan al estabilizar el pavimento con asfalto espumado, reutilizando la carpeta asfáltica.

#### **4.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

##### **4.4.1 Tipos de Técnicas e Instrumentos**

Para la recolección de datos se hará uso de los diversos instrumentos como lo son: las fichas bibliográficas, registro de casos, estudios previos que guarden relación con alguna de las variables de estudio, expedientes técnicos de obras en la que se ejecutaron alguno de los métodos de investigación y por último se hará uso de un análisis deductivo con el cual podamos relacionar de manera lógica las variables en estudio.

##### **4.4.2 Criterios de Validez y Confiabilidad de los instrumentos**

Los documentos de donde es extraída la información son, en su mayoría, artículos científicos, normativas y manuales dados por entidades de estado peruano e internacionales como la National Academy of Sciences Engineering and Medicine y European Asphalt Pavement Association; así como de empresas con una amplia experiencia en nuestro tema de estudio como lo es Wirtgen.

Se cuenta, además, con una serie de documentos académicos como los son las tesis, reconocidas y respaldadas por importantes universidades que se encuentran en constante investigación e innovación.

#### **4.4.3 Procedimiento para la Recolección de datos**

Para la obtención de las fuentes, se realizó una búsqueda concienzuda de los diversos informes, tesis, artículos, etc., presentes en la web. Así mismo la universidad cuenta con suscripciones en diversos sitios académicos, los cuales cuentan con información detallada y una amplia fuente de documentos científicos que contienen datos analizados minuciosamente por instituciones públicas y privadas de todo el mundo.

Para el tema de estudio, es necesario recolectar información de entidades como las municipalidades y los organismos reguladores del transporte, ya que es allí en donde se tienen datos como expedientes técnicos y actualizaciones de las diversas normativas que rigen los proyectos de ingeniería.

#### **4.5 Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos**

Para el procesamiento de los datos se analizó la información obtenida de la búsqueda, comparando un documento de otro en base a su registro histórico. De igual forma, se realizó una actualización bibliográfica e histórica de los diversos estudios realizados a través de los años, para así llegar a un consenso de continuidad y homogeneidad de la información.

## CAPÍTULO V: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

### 5.1 Reciclado en Frío con Asfalto Espumado

#### 5.1.1 Generalidades

El reciclado en frío es el término que hace referencia al proceso de recuperar y reutilizar el pavimento existente con el fin de prolongar su vida útil y evitar el desperdicio de material que se encuentra en condiciones adecuadas para ser puesto en obra. Este proceso se realiza sin la adición de calor, como se da en el caso de las mezclas asfálticas en caliente, y comprende desde la reutilización de capas delgadas del pavimento denominado reciclado in-situ (CIR por sus siglas en inglés) hasta capas gruesas de pavimento que pueden incluir más de dos tipos distintos de material (FDR por sus siglas en inglés).

El avance y las mejoras en las tecnologías para el reciclado han permitido su masificación en diversos países del mundo al aplicarlo con éxito en la rehabilitación de sus pavimentos.

“Las recicladoras han presentado a los ingenieros de pavimentos una gama completamente nueva de posibilidades, la más importante es la capacidad de construir capas monolíticas gruesas de material estabilizado. Desde una perspectiva estructural, una sola capa de material estabilizado de 300 mm de espesor tiene una capacidad de carga mucho mayor que dos capas separadas de 150 mm de espesor construidas una encima de la otra. Este concepto es bien conocido en la industria de la construcción, donde se utilizan vigas de madera laminada como elementos estructurales” (Wirtgen, 2012, p. 76)

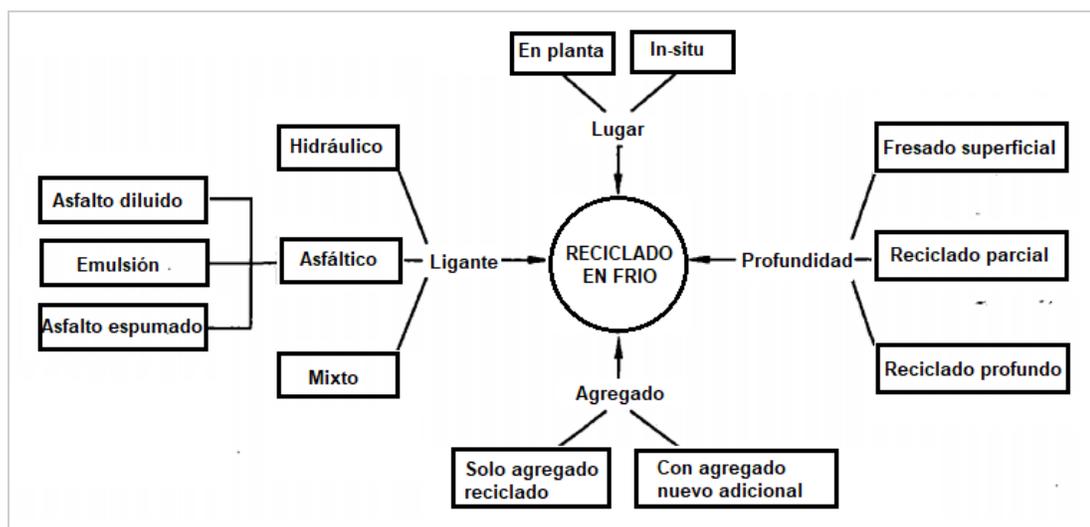
Actualmente, el proceso in-situ con asfalto espumado se ha situado como una de las alternativas más rentables en el mercado para la rehabilitación de pavimentos, existiendo máquinas recicladoras capaces de rehabilitar el pavimento a una fracción del costo de los métodos convencionales. “En numerosos países de los cinco continentes se han reciclado ya más de cien millones de metros cuadrados con asfalto espumado” (Wirtgen, 2019)

### 5.1.2 Tipo de Reciclado en frío

El proceso y el tratamiento que se le da al material recuperado consisten básicamente en la adición de asfalto como aglutinante y material granular en el caso que sea necesario. Responde a diversos criterios como la profundidad de fresado del material y la composición de este.

**Figura 52**

*Esquema del reciclado en frío.*



*Nota:* en el esquema es posible ver las diversas combinaciones que se pueden dar en el reciclado en frío. El proceso se puede desarrollar en una planta o en el lugar mismo de la construcción, con adición o no de agregados vírgenes, a profundidades diferentes y con diversos agentes como ligantes. Recuperado por Abad (2016) de Thenoux Z. & García (1999).

El proceso puede ser llevado en planta o en el lugar y la elección de este depende de si el proyecto requiere capas de asfalto adicionales, por lo que el pavimento fresado deberá almacenarse para su uso posterior; si el pavimento recuperado presenta heterogeneidad en su composición o si se requiere de precisión en las proporciones de mezclado y si el material de pavimento recuperado es demasiado duro que resulta complicado pulverizarlo adecuadamente in-situ.

El proceso de tratamiento del material reciclado en planta comprende el traslado del material fresado a una unidad de almacenamiento, donde el material se trabaja con una unidad de procesamiento, como un mezclador continuo (Espinoza et al., 2014). El reciclado in-situ presenta mejoras mayormente económicas al disminuir los gastos de transporte de materiales y al aumentar la rapidez de ejecución.

#### **5.1.2.1 Reciclado en Planta**

El reciclado en planta comprende el proceso de fresado y tratamiento del material en una planta, donde, con la adición de un agente bituminoso estabilizante (emulsión asfáltica o asfalto espumado) se logra la homogeneización de la mezcla. Esta mezcla es llevada luego al lugar de la pavimentación y puesta en obra en una pavimentadora o una motoniveladora. Cabe señalar que la mezcla puede ser almacenada por largos periodos de tiempo sin que con ello se afecten las condiciones de calidad de la mezcla.

El hecho de transportar los materiales hasta una planta permite que estos sean previamente tratados y seleccionados para dar mayor confianza al producto final. Además, los tipos de plantas utilizadas permiten que estas sean instaladas en lugares próximos al lugar de ejecución de la obra, reduciendo así significativamente las distancias recorridas.

“Tanto en el reciclado en frío de pavimentos asfálticos, como en la estabilización de suelos se coloca sobre la base asfáltica una carpeta de rodado del tipo sello de agregados, lechada o una carpeta asfáltica. En caminos de menor importancia, la colocación de la carpeta de rodado puede incluso no ser necesaria” (Abad, 2016, p. 74).

El reciclado en frío en planta es una opción que se debe de tomar en cuenta cuando se requiera una exacta dosificación y la mezcla con asfalto espumado sea acopiada y almacenada para un posterior uso.

Wirtgen (2012) muestra los principales beneficios obtenidos del tratamiento en planta frente al tratamiento in-situ:

- Control de insumos: una de las principales ventajas que se tienen frente al reciclado in-situ es la capacidad de seleccionar y pretratar los materiales recuperados del pavimento existente. La calidad y el control de las mezclas se hace más riguroso y exhaustivo debido a que los materiales se pueden triturar y tamizar hasta llegar a la granulometría requerida, además del hecho de que pueden ser probados y ensayados antes de mezclarse.
- Calidad de mezcla: la calidad de la mezcla puede mejorar si se realizan los ajustes necesarios para retener por más tiempo los materiales en la cámara de mezclado.
- Capacidad de almacenamiento: esto se logra principalmente en aquellas mezclas estabilizadas con asfalto; sin embargo, se deben de tener en cuenta las restricciones de tiempo en aquellas mezclas con presencia de cemento. La mezcla se almacena y apila para ser posteriormente utilizada en obra. El proceso de colocación se puede dar con una pavimentadora, niveladora o mano de obra según sea necesario.

## Figura 53

### *Planta de reciclaje en frío de pavimento*



*Nota:* en el reciclado en frío en planta el material es llevado hasta una planta móvil, como la que se puede ver en la imagen, y se estabiliza con asfalto espumado y, en caso fuera necesario, cemento y agua para lograr una mezcla homogénea y en óptimas condiciones para su puesta en obra. Extraído de (Wirtgen, 2019).

#### **5.1.2.2 Reciclado In-Situ**

El reciclado in-situ nos permite fresar, procesar y colocar el material en el mismo lugar y en un brevísimo periodo de tiempo. Consiste en reutilizar los materiales de las capas de pavimento mediante su estabilización y homogenización con agentes bituminosos y/o cementantes, con el fin de adecuar el material a las condiciones de uso y prolongar la vida útil del pavimento.

“Esta técnica permite reutilizar la totalidad de los materiales extraídos del pavimento envejecido en condiciones técnicas, económicas, sociales y ambientales muy favorables” (Abad, 2016, p. 75).

Las grandes protagonistas del reciclado en frío in-situ son las máquinas recicladoras. Estas máquinas están diseñadas para fresar y estabilizar el pavimento de una sola pasada, en un tambor que cumple ambas

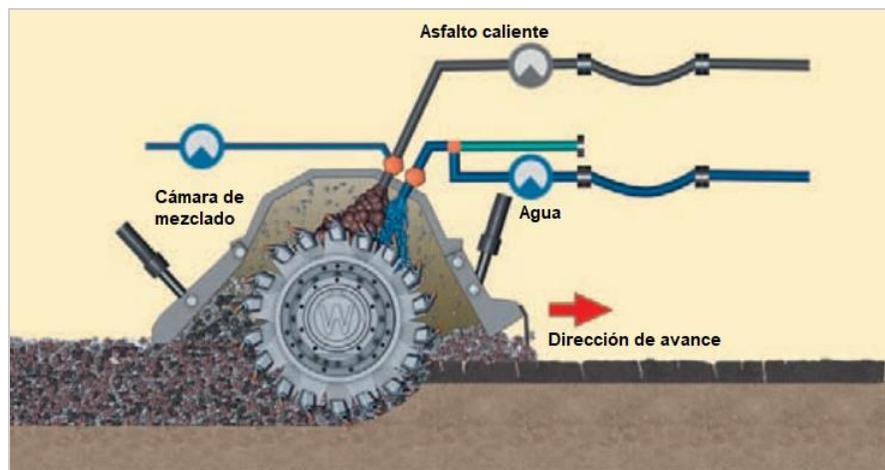
funciones. Estas máquinas han evolucionado a lo largo del tiempo desde simples fresadoras del pavimento y estabilizadores básicos del suelo hasta los recicladores especializados de hoy.

El elemento principal de las máquinas recicladoras son el tambor de corte. Este tiene la función de remover el pavimento a medida que la máquina avanza. Usualmente gira hacia arriba y a medida que avanza, pulverizan el material y lo elevan a la cámara de mezclado en la que se encuentra el tambor. Los agentes estabilizadores se agregan a la cámara de mezclado a través de un sistema de bombeo que consta de una serie de boquillas equidistantes.

Los agentes estabilizadores se vierten a la cámara de mezclado desde camiones cisterna, las cuales administran y transportan los aditivos necesarios para estabilizar la mezcla. La estabilización se puede hacer, de la manera más simple, con agua hasta agentes estabilizadores de asfalto (emulsión asfáltica o asfalto espumado).

**Figura 54**

*Tambor de corte y Cámara de mezclado.*



*Nota:* el tambor de corte remueve y pulveriza el material de pavimento mientras la maquinaria avanza. En la figura se aprecia el proceso de estabilización con asfalto

espumado, obtenido al inyectar agua y asfalto a la cámara de mezclado mediante un sistema de bombeo. Extraído de (Wirtgen, 2012, p. 81).

### **5.1.3 Proceso del Reciclado en Frío**

El proceso del reciclado in-situ “es un proceso muy rápido donde el equipo reciclador, casi de manera simultánea, corta el pavimento antiguo, incorpora los agentes elegidos según diseño de mezcla y vuelve a dejarlo tendido para su conformación y compactación” (Espinoza et al., 2014, p. 221).

“El reciclado de pavimentos es un método constructivo relativamente simple, sin embargo, y como en todas las operaciones de alto rendimiento, el trabajo debe ser correctamente administrado y planificado para que se pueda alcanzar y sacar provecho a los altos rendimientos que pueden lograr las maquinarias empleadas” (Abad, 2016, p. 167)

El proceso se simplifica en gran medida debido a la rapidez con la que trabajan las maquinas recicladoras. A través de los años han evolucionado desde simples fresadoras y estabilizadoras básicas hasta convertirse en las maquinas recicladoras especializadas de hoy, dotadas con un tambor y una cámara de mezclado que facilita y garantiza calidad en los procesos.

“Dado que están diseñados específicamente para reciclar capas gruesas de pavimento en una sola pasada, los recicladores modernos tienden a ser máquinas grandes y potentes, montadas sobre orugas o neumáticos de alta flotación” (Wirtgen, 2012).

Como todo proceso de ingeniería, gran parte de su éxito está dado por los trabajos logística implementados en la obra. Estos trabajos consisten en la capacitación del personal de campo y oficina, así como la programación de equipos, recursos y los despachos de materiales como asfalto y cemento. Además, se debe de realizar un levantamiento topográfico de las zonas de trabajo, con el fin de determinar cualquier zona de relleno y su nivelación,

ya que, al existir estas deformaciones, la maquina recicladora “calca” las mismas, dejando a su paso las mismas deformaciones.

Con la nivelación hecha, se procede a la demarcación de los anchos de la carretera con el fin de efectuar la esquematización de los anchos del tambor de la recicladora. Ya con esta demarcación se puede efectuar la distribución del cemento portland que se usará como filler en la mezcla de pavimento y proporciona resistencia a los ciclos de humedecimiento y secado. Es importante la demarcación de los anchos a fin de hacer coincidir los anchos de la vía con los anchos de la recicladora y las secciones de traslape con la finalidad de en esas zonas no exista duplicidad en la colocación de material y no vayan a quedar sectores con excesos o defectos de alguno de los materiales que pueden llegar a causar acolchonamientos, rigideces indeseadas o excesivos consumos de materiales.

“El ancho de franja varía acorde al ancho de vía, pero debe ser lo suficiente para la operatividad de los equipos sin mayores restricciones. En cada franja se deberán efectuar traslapos de 0.15 m. a 0.20 m. en zonas tangentes; y de 0.35 m. a 0.50 m. en las zonas de curva” (Deza et al., 2017, p. 98)

Para la distribución por la vía de la cantidad de cemento portland necesario se deben de tener en cuenta el peso específico del material reciclado, el volumen del material recuperado y la cantidad necesaria de cemento portland que se debe agregar. Esta cantidad de cemento portland que se agrega a la mezcla debe de ser máximo del 1% del peso de la masa; ya que, la aplicación de mayores cantidades de cemento introduce fragilidad que fomenta la contracción y el agrietamiento asociado con el tráfico.

Si bien el cemento portland no es el único agente que puede ser agregado como filler, ya que se puede usar cal hidratada, se han tomado como base proyectos cuyas ejecuciones han sido analizadas en diversas tesis, y en ellos se ha empleado cemento portland.

Una vez que el cemento se ha extendido en la superficie se procede con el reciclado del pavimento. Para ello se conforma un tren de reciclado, “estos consisten en configuraciones de trenes de máquinas que fueron diseñadas para lograr la capacidad de reciclar capas de pavimento en una sola pasada” (Espinoza et al., 2014). Este tren de reciclado consta de una recicladora y un par de camiones cisterna con agua y asfalto respectivamente, las cuales se unen a la recicladora por medio de una serie de ductos que llevan el asfalto caliente y el agua hasta la cámara de mezcla de la recicladora. De esta forma aprovechamos el 100% del pavimento existente.

“La recicladora Wirtgen posee un tambor con puntas semejantes a los de una fresadora y estas van pulverizando las capas de asfalto y base granular, luego los va mezclando con el cemento colocado sobre la superficie y se va inyectando el asfalto y el agua para el espumado, y el agua de compactación mediante una serie de boquillas distribuidas sobre y a lo ancho del tambor de la recicladora” (Abad, 2016 tomado de Espinoza et al., 2014).

## Figura 55

*Recicladora Wirtgen y componentes.*

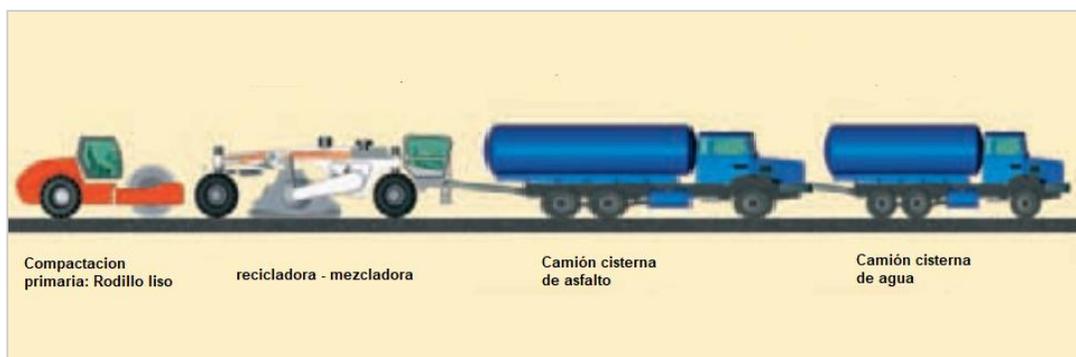


*Nota:* en la figura se aprecia la recicladora Wirtgen y sus componentes como son los ductos por los que el asfalto espumado llega hasta la cámara de mezclado y se mezcla con el material recuperado del pavimento existente. Adaptado de Wirtgen, 2019.

Inmediatamente después del tren de reciclado, se lleva a cabo la compactación primaria. Esta consiste en el paso de un rodillo liso y un rodillo neumático (Espinoza et al., 2014); sin embargo, Abad, 2016 toma solo para la compactación primaria un rodillo liso, mientras que Deza et al., 2017 toma, para la compactación primaria, un rodillo pata de cabra. Para este proyecto, tomando en cuenta que los vehículos que transitan por la vía son en su mayoría vehículos livianos, se utilizara, para la compactación primaria, un rodillo liso y así llegar a la mínima densidad exigida del 98%.

## Figura 56

*Tren de reciclado y compactación primaria.*



*Nota:* el tren de reciclado consta de un camión cisterna de agua y otro que transporta el asfalto caliente y la recicladora. Inmediatamente después de estos se realiza la compactación primaria con el rodillo liso. Adaptado de Wirtgen, 2012.

Seguidamente de la compactación primaria, se da paso al tren de perfilado y compactado. Este tiene como finalidad perfilar y compactar la mezcla de RAP a fin de llegar a la densidad adecuada y al óptimo contenido de humedad para que el desempeño estructural sea el adecuado.

El tren de perfilado y compactado consta de una cisterna de agua, una motoniveladora, dos rodillos lisos y un rodillo neumático (Espinoza et al., 2014; Abad, 2016).

“Para darle terminación a la capa reciclada se debe realizar un riego de agua en aproximadamente (0.5 % - 1 %), esto va a depender del contenido de humedad natural y de las condiciones climáticas de la zona. Se procede a sellar con el rodillo neumático, cuyo objetivo es densificar un poco más el material y que obtengan un valor del 100%” (Abad, 2016, p. 174)

## Figura 57

*Tren de perfilado y compactado.*



*Nota:* el tren de perfilado y compactado se compone de una motoniveladora y los rodillos lisos, para seguidamente dar paso a la cisterna de agua y al rodillo neumático. El agua se agrega con el fin de densificar un poco más el material y que las densidades suban al 100%. Adaptación propia.

Una vez que se han compactado adecuadamente las capas de pavimento, se repite el proceso en las franjas contiguas hasta completar el tramo de acuerdo con lo previsto. Espinoza et al., 2014 nos dice que el avance de los trabajos en el mantenimiento de las carreteras La Oroya – Chicrín – Huánuco – Tingo María – Dv. Tocache y Conococha – Yanacancha, se dio en un rango de 800 a 1200 ml en una jornada normal de trabajo, lo que da como promedio de avance 1000 ml por jornada de trabajo. Esto, siempre y cuando se tengan espesores de capas asfálticas entre 5 y 10 cm, ya que al aumentar el espesor del asfalto disminuye la velocidad del reciclado.

Abad, 2016 nos dice que en el mantenimiento periódico de la carretera Conococha- Huaraz, se tuvo un avance en una jornada normal de trabajo, se encuentra entre 300ml (mínimo) y 1100 ml (máximo) por día normal de trabajo, es decir, un avance promedio de 760 ml, siempre y cuando se tengan espesores de capas asfálticas existentes entre 5 y 10 cm (carretera Conococha- Huaraz fue de 5 y 7.5 cm).

En cuanto al curado, Abad, 2016 dice que las capas recicladas requieren un período de curado para su maduración, antes de que se autorice su cobertura con la micro superficie. Este periodo depende de las condiciones

climáticas del proyecto (gradiente térmico y la lluvia). Durante dicho lapso, se aplicaron los riegos de protección, para prevenir el deterioro de la capa reciclada por la acción de las aguas superficiales y del tránsito automotor. Dichos riegos se realizaron utilizando el asfalto diluido MC-30, después al final se recubrió la capa con el mortero asfáltico (micro pavimento); mientras que Espinoza et al., 2014 detalla las labores de curado, el cual se hizo mediante la colocación de un riego de protección que fue una emulsión sin polímero diluida en una proporción de 1 a 3 de agua, esta se aplicaba al día siguiente, después del reciclado, así no había pérdida de humedad sobre la base reciclada.

Deza et al. (2017), nos dice que la carretera puede ser abierta al tráfico, una vez que los controles de calidad con muestras representativas tomadas de la base compactada y en la frecuencia indicada en las especificaciones correspondientes sean satisfactorias. De los datos de obras ejecutadas se tiene, Espinoza et al. (2014) nos dice que la vía se abría al tránsito todas las tardes después de la jornada de trabajo sin inconvenientes para el reciclado recién trabajado. Al respecto, Abad (2016), detalla que la vía se mantuvo abierta al tránsito durante todo el periodo de ejecución de la obra debido al ancho de la vía, 7.20m, ya que mientras el reciclado se daba en un franja, las otras quedaban abiertas al tránsito con la debida señalización a fin de evitar accidentes; sin embargo, una vez terminada la compactación y habiendo sido autorizado por parte de la supervisión, la vía fue abierta al tránsito respetando una velocidad máxima de 30km/h.

## **5.2 Aplicación de Mezcla Asfáltica en Caliente**

Caso de Estudio: Expediente Técnico Ampliación de la Av. Raúl Ferrero (La Molina – Santiago de Surco)

Una de las avenidas más importantes de Lima Este, que conecta los distritos de Santiago de Surco y La Molina, es la Av. Raúl Ferrero. Este proyecto se realizó en el año 2006, dentro del proceso de licitación, concurso y posterior ejecución; se llevó acabo la rehabilitación y mantenimiento de algunos tramos debido a que, a

inicios de los años 2000, la vía se encontraba deteriorada y dañada por factores temporales, climáticos, estructurales y el crecimiento constante de población y automóviles que la recorren cada día con el pasar de los años, más aún en las horas de mayor congestión.

Debido a esto, la Empresa Administradora de Peajes EMAPE S.A., por encargo de la Municipalidad Metropolitana de Lima junto con las Municipalidades de La Molina y Santiago de Surco, en años pasados, ya se había elaborado estudios para la ampliación de la avenida, sabiendo del problema que se venía en un futuro. Este proyecto que se describe en el Contrato N° 06-41280, fue suscrito a la Oficina de Servicios para Proyectos de las Nacionales Unidas (UNOPS), por cuenta de EMAPE y correspondió al Servicio de Consultoría para su actualización.

El diseño consideró las características topográficas del terreno y de la vía ya existente con sus respectivas limitaciones físicas. En la siguiente lista del marco situacional se muestra las fechas de licitación, la situación en la que se encontraba la vía y el trabajo realizado.

### **5.2.1 Marco Situacional del Proyecto:**

Licitación: Licitación por Invitación OSP/PER/162/362

- Fecha: 23 de marzo 2006
- Firma del contrato: 07 de abril 2006
- Plazo: 60 días calendario
- Fecha de inicio de contrato: 10 de abril de 2006
- Fecha de término de contrato: 09 de junio de 2006

Antes de la ejecución del proyecto

- Calzadas de la Av. Ferrero con 1 carril por sentido de circulación
- En la intersección de la Av. Raúl Ferrero-Av. Golf Los Incas, se tiene cerca de la intersección:

En la Av. Golf Los Incas

- Solo 2 carriles por sentido de circulación.
- Av. Raúl. Ferrero
- Ampliación cerca de la intersección a 2 carriles sentido este.

Después del proyecto:

- Ampliar la calzada de la Av. Ferrero a 2 carriles por sentido de circulación

Modificar la intersección de la Av. Raúl Ferrero-Av. Golf Los Incas, proporcionando cerca de la intersección:

En el tramo que conecta con la Av. Golf Los Incas – Santiago de Surco

- Se ampliaron a 2 carriles con sentido directo de Sur-Norte y 1 carril de giro libre a la derecha.
- Se ampliaron a 3 carriles con sentido de Norte – Sur, de los cuales 2 carriles tienen solución de continuidad sin interferencia semafórica en la intersección + 2 carriles de giro izquierda.

En el tramo de la Av. Raúl Ferrero de La Molina

- Se ampliaron a 2 carriles con sentido directo de Este-Oeste, distribuidos en 1 carril de giro libre a la derecha y ampliación a 3 carriles en la intersección para el giro izquierda.

### **5.2.2 Descripción Geográfica**

La zona de ubicación física del proyecto se halla en los distritos de La Molina y Santiago de Surco. Se describe el área de estudio, la cual está rodeada de las siguientes avenidas:

- Por el Oeste, hasta la Avenida Golf Los Incas,
- Este, hasta la Avenida Alameda del Corregidor
- Por el Sur, con la calle Papa Pío XII,
- Por el Norte, con Ovalo Monitor Huáscar

El área de estudio está ubicada en la Av. Raúl Ferrero se inicia a 100 m de la Av. El Polo (Golf Los Incas) en el distrito Santiago de Surco y culmina a 180 m de la Alameda El Corregidor, en el Distrito de La Molina, Provincia y Departamento de Lima.

Las coordenadas del área del proyecto se indican en la tabla

**Tabla 13**

*Vértices del Área del Proyecto*

<b>Coordenadas</b>	
<b>Norte</b>	<b>Este</b>
8'660,000.000	284,000.000
8'664,000.000	288,000.000

*Nota:* Datos extraídos del Expediente Técnico

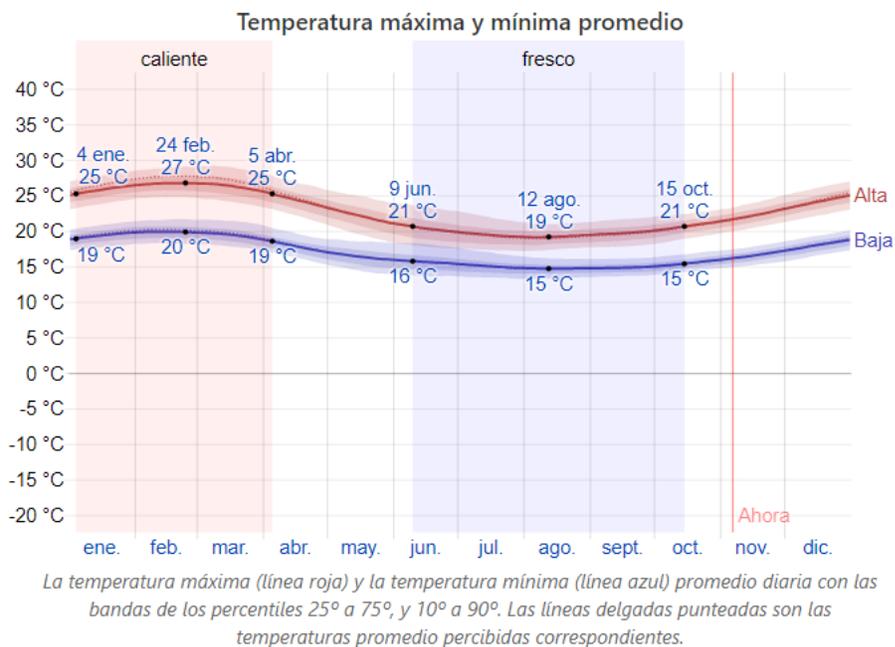
#### **Condiciones climáticas**

En términos generales, según el mapa climático del Perú, Lima se ubica en la región de clima semicálido (desértico-árido-subtropical) con presencia de cielo nuboso, con escasa o nula precipitación. En los meses de otoño e invierno, el cielo amanece cubierto o nuboso, disipándose las nubes hacia el mediodía permitiendo brillo solar.

En Lima, al tener una condición de alta humedad El clima es templado, sol intenso en los meses de enero a marzo, temperaturas promedio de 22° C entre marzo y julio, temperaturas promedio de 18° C entre julio y diciembre.

**Figura 58**

Temperatura máxima y mínima durante el año en Lima Este (Santiago de Surco – La Molina)



*Nota:* Gráfico extraído de (Weather Spark, 2016)

### 5.2.3 Proceso de Rehabilitación del Pavimento Flexible

#### Diseño del Pavimento

El diseño otorgado al proyecto, que se ejecutó con Términos de referencia, es para el tramo de la Av. Ferrero, se cuenta desde 200 m al Este de la intersección con la Av. El Golf Los Incas, hasta 200 m antes de la intersección con la Av. Alameda del Corregidor.

Acorde con el estudio, se encontró que la solución más factible al problema de tránsito que se origina en la Av. Ferrero, para garantizar fluidez en el tránsito, a su vez se implementó soluciones a las intersecciones de la Av. La Alameda del Corregidor y la Av. El Golf Los

Incas con la Av. Ferrero, con la finalidad que se dé un resultado integral del problema.

En el diseño de la ampliación de la Av. Raúl Ferrero en el año 2006, se tuvieron en consideración los parámetros establecidos por la normativa de la época, junto con recomendaciones de la norma norteamericana, para su concepción se aplicaron las siguientes:

- Manual de Diseño de Carreteras (DG-2001) del MTC.
- A Policy on Geometric Design of Highway and Streets (AASHTO-2001)

Dentro de los márgenes del proyecto no se hicieron modificaciones muy notables en la geometría de la vía, tanto en planta como en elevación, priorizando en lo posible realizar modificaciones recomendable para que se aplique de la mejor manera la Norma. En el diseño de la vía, se consideró principalmente los valores de la velocidad, a partir de este se determinaron las característica técnicas del diseño. La sección transversal en la vía fue definida en base a la demanda prevista del momento y futura.

Las características consideradas para el diseño son:

- Velocidad Directriz : 30 Km/h
- Ancho de Calzada Derecha : 6.60 m
- Separador Central : Variable (min. 0.20m)
- Ancho de Calzada Izquierda : 6.60 m
- Ancho de Bermas : Variable (min. 0.60m)
- Radio Mínimo: 20 m
- Pendiente Máxima : 12 %
- Distancia de Visibilidad de Parada :35 m
- Peraltes : Existentes
- Bombeo : Existente
- Talud de Corte : Variable
- Talud de Relleno : 1.5: 1 (H: V)

Dentro de la actualización del expediente, se designó la solución final que fue entregada en el documento final, donde en un principio se evaluaron

alternativas preliminares, las cuales contemplaban soluciones integrales para el acceso total de mayor alcance, sin embargo, generaban un costo muy elevado, que, a su vez, requerían más áreas aledañas que en el año 2006 ya estaban ocupadas.

La actualización que se le dio al diseño vial, dentro de los parámetros de la normativa de la época fueron los siguientes:

- El mejoramiento de la sección existente, con la finalidad de incrementar la capacidad de la vía, adicionando 2 carriles a la calzada que se encontró funcionando en el 2006.
- La construcción de las calzadas de circulación (2 carriles por sentido) de 6.60 m de ancho respectivamente.
- Por la poca disposición de espacio se eligió un separador central variable de 0.20 m como mínimo en zonas de tangente, mientras que, en las zonas de curvas cerradas fue hasta 2.00 m
- Se proyectó bermas laterales variables de 0.60 m mínimo en zonas de corte pronunciado y hasta 3.00 m en zonas de estacionamiento para parada de emergencia.
- En las zonas de cortes pronunciados se proyectó la colocación de un muro de protección de 0.80 m de altura, y el talud adyacente tuvo adosado una malla de alta resistencia para la protección contra caídas de piedras sueltas.
- En las zonas de relleno se colocaron muros de barrera 0.80 m de altura, con la finalidad de mejorar la seguridad de la vía y así evitar posibles despistes de los vehículos.

El método AASHTO 93 considera los siguientes parámetros para el cálculo:

- Tráfico,
- Período de diseño,
- C.B.R. de la subrasante,
- Coeficientes de resistencia relativa y de drenaje.

Para seleccionar el refuerzo asfáltico sobre el pavimento existente, se aplicó el procedimiento que indica el Manual AASHTO-93, referido a la selección de la capacidad estructural del pavimento existente sobre la base de su vida remanente.

**Figura 59**

*Refuerzo asfáltico*

RECAPADO ASFALTICO SOBRE PAVIMENTO FLEXIBLE EXISTENTE METODO AASHTO'93		
Av. RAUL FERRERO	TRAMO II: 0+680-0+920, 1+390-1+730	
AASHTO'93 PERIODO DE DISEÑO	SN Mr de Subrasante	SN Mr de Subrasante
	10 años	10 - 20 años
<b>CARPETA ASFALTICA EXISTENTE</b>	<b>0.850</b>	<b>0.850</b>
a1 / cm	0.170	0.170
D1 ( cm )	<b>5.0</b>	<b>5.0</b>
<b>BASE GRANULAR EXISTENTE</b>	1.455	1.455
a2 / cm	0.055	0.055
m2	1.150	1.150
D2 ( cm )	<b>23.0</b>	<b>23.0</b>
<b>SUBBASE GRANULAR EXISTENTE</b>	0.000	0.000
a3 / cm	0.043	0.043
m3	1.150	1.150
D3 ( cm )	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
<b>SN (existente inicial)</b>	2.305	2.305
% Vida remanente de la capa existente	65.0%	65.0%
Factor de condición de la capa existente	0.93	0.93
<b>SN (existente efectivo)</b>	2.147	2.147
<b>SN (total requerido)</b>	3.087	3.204
<b>SN (refuerzo requerido)</b>	0.940	1.058
a1 / cm	0.170	0.170
REFUERZO ASFALTICO	5.5	6.2
<b>REFUERZO ASFALTICO ADOPTAD</b>	<b>5.5</b>	<b>6.0</b>

*Nota:* Diseño extraído de las Especificaciones Técnicas del Expediente de la Ampliación de la Av. Raúl Ferrero.

Después de los diseños planteados, se determinó que para estos tramos el espesor de la carpeta asfáltica sea de 0.05 m, se colocó después que se echó el riego de liga RC-250. Habiendo ya ejecutado los trabajos de mantenimiento a las fisuras, grietas, parchados superficiales y profundos.

## Figura 60

*Nuevo espesor de 5 centímetros*

<b>SN (refuerzo adoptado)</b>	0.850
Coefficiente estructural (al / cm)	0.170
REFUERZO ASFALTICO (cm)	5.0
<b>REFUERZO ASFALTICO ADOPTAD</b>	<b>5.0 cm</b>

*Nota:* Extraído de Expediente Técnico sección Diseño de pavimentos

### 5.2.3.1 Rehabilitación del pavimento

El objetivo principal de la rehabilitación que se propuso fue corregir defectos de la superficie de rodadura del pavimento existente, que fueran perjudiciales para la seguridad, comodidad y rapidez con la que debía circular el tráfico de la época y el proyectado. Además, poder obtener un grado de serviciabilidad correcto durante el periodo de tiempo para el que se diseña la vida útil del pavimento.

Las fallas que se encontraron en el pavimento, en el año 2006, tenían distinto origen y naturaleza, a continuación, los mencionamos:

- Excesivo aumento de las cargas circulantes.
- Deficiencias en el proceso constructivo.
- Tendido de tuberías y soluciones muy improvisadas en el pavimento.
- Mantenimiento periódico casi inexistente y desfasado.

Se encontraron 2 tipos de fallas:

- Fallas superficiales: comprendían defectos en la superficie de rodadura ocasionadas por deficiencias de la capa asfáltica, la cuales no guardan relación con la estructura del pavimento.
- Fallas estructurales: comprendían defectos en la superficie de rodadura cuyo origen es una falla estructural del pavimento, ya que alteró a una o más capas del pavimento.

Las fallas de tipo superficial se corrigieron uniformizando la superficie y aplicándole la necesaria textura y rugosidad. Mientras que, en las fallas estructurales, se reforzó la estructura existente y en otros casos se hizo una reconstrucción total, de manera que obtuviese las exigencias del tráfico presente y proyectado.

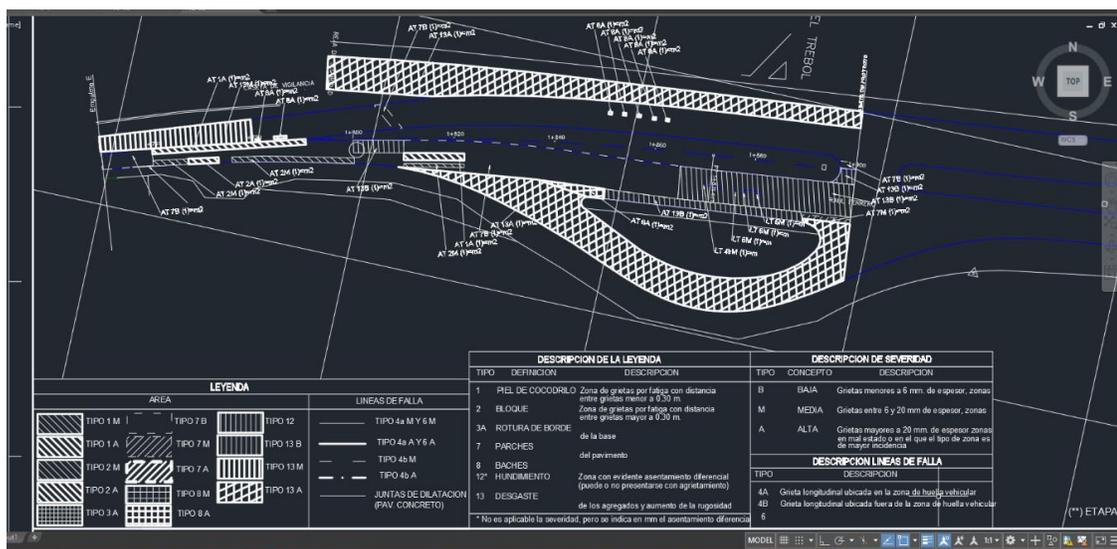
Se ejecutó una Evaluación Superficial – Visual de Pavimentos, este procedimiento incluyó las siguientes etapas:

- Reconocimiento de campo
- Identificación de fallas existentes en el pavimento
- Planteamiento de soluciones de Construcción, Reconstrucción y Refuerzo asfáltico

En los planos de rehabilitación se presenta la identificación de las fallas existentes en el pavimento y sus respectivas alternativas de solución.

**Figura 61**

*Fallas en la Etapa I - Sector La Molina: Km. 1+280 Al Km. 1+900*



*Nota:* Plano extraído del Expediente Técnico de la Ampliación de la Av. Raúl Ferrero

## **Proceso de Mezcla Asfáltica en Caliente**

### **Remoción de Carpeta Asfáltica existente**

Consistió en la remoción de la carpeta asfáltica en las áreas de reconstrucción, teniendo las precauciones en no dañar la capa de la base granular existente, de manera que se empalme correctamente con la estructura del nuevo pavimento, este material removido de la carpeta asfáltica fue apilado en los laterales para su posterior eliminación. Se realizó usando las uñas del escarificador de la motoniveladora, el área removida de carpeta asfáltica se midió en metros cuadrados de superficie, acorde con las especificaciones señaladas en el expediente técnico.

### **Perfilado y Compactación de la Base Granular**

Este proceso consistió en el perfilado y compactación del nivel de la base granular existente en el tramo final del proyecto, incluyó la adición de materiales necesarios, para completar niveles, la escarificación, la mezcla, así como el humedecimiento, compactación y perfilado final conforme con las dimensiones, alineamientos y pendientes señalados en los planos del proyecto; el control topográfico es esencial para uniformizar la base en zonas con excesos y reponer material granular donde se necesite.

Cuando el material alcanzó la humedad apropiada, se compactó con el equipo aprobado hasta que logró la densidad especificada. En las superficies más reducidas, ya sea, por su extensión, pendiente o proximidad a obras de arte no permitan la utilización del equipo con el que se trabaja usualmente, se compactaron a través de otros medios, de manera que se alcanzó la densidad mayor a la capas inferiores.

Se efectuó longitudinalmente, empezando por los bordes exteriores en dirección al centro, traslapando en cada recorrido un ancho no mejor de un tercio del ancho del rodillo compactador. No se extendió ninguna capa de material de base mientras que no haya realizado la nivelación y comprobación del grado de compactación de la capa anterior. Se tuvieron los cuidados para evitar derrames de material que pudiesen contaminar las fuentes de agua, suelo y flora cercana al área de compactación

## **Riegos de Imprimación Asfáltica y Mezclas en Caliente**

### **Agregados pétreos y filler**

Los agregados pétreos aplicados para la ejecución de en casos de tratamiento de mezcla bituminosa deberán poseer una naturaleza de alta trabajabilidad, para que cuando se aplique sobre la capa de material asfáltica no se desprenda por factores externos como el agua y el tránsito que la circula.

Se aceptaron el uso de agregados con las características hidrófilas correctas, por ello, en caso fuese necesario un aditivo, permita la adhesión. El polvo mineral provenía de la trituración de agregados pétreos y del aporte de productos comerciales, en este caso fue de cal hidratada y cemento portland.

Se usó una fracción del material proveniente de la clasificación, se verificó que no tuviese actividad y no tenga una condición plástica. A través del ensayo de sedimento en tolueno, se obtuvo su peso unitario aparente, el cual tuvo un valor de entre 5-8 décimas de gramo por centímetro cúbico ( $0.5 - 0.8 \text{ g/cm}^3$ ) de acuerdo con la norma (BS 812, NLT 176) y el coeficiente de emulsibilidad fue inferior a las 6 décimas (0.6)

## Cemento asfáltico

El cemento asfáltico adquirido fue clasificado por viscosidad absoluta y por penetración para su posterior uso en las mezclas asfálticas elaboradas en caliente. Su clasificación de penetración fue de 60-70, por otro lado, el asfalto debe presentar una textura homogénea, libre de agua y sin la formación de espumas al momento de ser calentado a una temperatura de 175 ° C, mientras que los requisitos de calidad fueron establecidos por las siguientes tablas 14 y 15.

**Tabla 14**

*Especificaciones del Cemento Asfáltico Clasificado por Penetración*

Características	Ensayo	Grado de Penetración	
		60 – 70	
		Mín.	Máx.
Penetración 25°C, 100 g, 5s, 0.1 mm	MTC E 304	60	70
Punto de Inflamación COC, °C	MTC E 312	232	-
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	MTC E 306	100	-
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	MTC E 302	99	-
Susceptibilidad Térmica			
Ensayo de Película Delgada en Horno, 3.2 mm, 163°C, 5 h	MTC E 316		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de masa, %</li> <li>• Penetración del residuo, % de la penetración original.</li> <li>• Ductilidad del residuo, 25°C, 5cm/min, cm.</li> </ul>		-	0.8
	MTC E 304	52	-
	MTC E 306	50	-
Índice de Susceptibilidad térmica		-1.0	+1.0
Ensayo de la Mancha con solvente Heptano – Xileno 20% (opcional)	MTC E 314	<b>Negativo</b>	

*Nota:* Especificaciones extraídas del expediente técnico.

## Asfaltos diluidos (Tipo Cutback)

Los asfaltos diluidos se aplican para ciertos escenarios, en este proyecto se usó el curado medio (MC) y el curado rápido (RC), cada

uno corresponde a los requisitos de calidad que demandan las siguientes tablas.

**Tabla 15**

*Requisitos de Material Bituminoso Diluido de Curado Medio*

Características	Ensayo	MC-30	
		Mín.	Máx.
Viscosidad Cinemática a 60°C, mm <sup>2</sup> /s	MTC E 301	30	60
Punto de Inflamación (TAG, Copa abierta) °C	MTC E 312	38	
Destilación, volumen total destilado hasta 360°C, % Vol.	MTC E 313	40	25
<ul style="list-style-type: none"> <li>• A 190°C</li> <li>• A 225°C</li> <li>• A 260°C</li> <li>• A 315°C</li> </ul>		75	70 93
Residuo de la destilación a 315°C		50	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pruebas sobre el residuo de la destilación</li> <li>• Ductilidad a 25°C, 5 cm/min., cm. Penetración a 25°C, 100 gr., 5 seg. (*)</li> <li>• Viscosidad absoluta a 60°C, Pa.s</li> <li>• Solubilidad en tricloroetileno, %</li> </ul>	MTC E 306	100	250
	MTC E 304	120	120
		30	
	MTC E 302	99	
Contenido de agua, % del volumen		-	0,2

(\*) Opcionalmente se puede reportar Penetración en vez de viscosidad.

*Nota:* Tabla extraída del expediente

**Tabla 16***Requisitos de Material Bituminoso Diluido para Curado Rápido (AASHTO M-81)*

Características	Ensayo	RC-250	
		Mín.	Máx.
Viscosidad Cinemática a 60°C, mm <sup>2</sup> /s	MTC E 301	250	500
Punto de Inflamación (TAG, Capa abierta) °C	MTC E 312	27	-
Destilación, volumen	MTC E 313	-	-
Total, destilado hasta 360°C, %Vol.		35	-
• A 190°C		60	-
• A 225°C		80	-
• A 260°C			
• A 316°C			
Residuo de la destilación a 360°C		65	-
Pruebas sobre el residuo de la destilación	MTC E 306	100	-
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min., cm.			
Penetración a 25°C, 100 gr., 5 seg. (*)	MTC E 304	80	120
Viscosidad absoluta a 60°C, Pa.s			
Solubilidad en tricloroetileno, %	MTC E 302	60	240
		99	-
Contenido de agua, % del volumen		-	0.2

*Nota:* Tabla extraída del expediente técnico

La cantidad de m<sup>2</sup> de material bituminoso, estuvo comprendido entre 0.7 – 1.5 L/m<sup>2</sup> para una penetración dentro de la capa granular de apoyo de 7 mm como mínimo, se verificó cada 25 m.

### **Imprimación**

La superficie de la base que fue imprimada obtuvo la concordancia con los alineamientos, gradientes y secciones típicas diseñadas en los planos, junto con el cumplimiento de las especificaciones relativas a la base granular.

Previamente a la implementación de la capa de imprimación, una barredora y un soplador mecánicos eliminó todo material suelto o ajeno a la vía. La acumulación de material fino fue removida por medio de la cuchilla niveladora y con una ligera escarificación, además la superficie se preparó y humedeció para luego continuar con la imprimación.

Se dispuso de cartones para acomodar la base antes de imprimir, para eludir la superposición de riegos en áreas imprimadas, se accionó la llave de riego donde se hizo un empalme exacto. El material se implementó uniformemente a la temperatura y velocidad especificada, el régimen se mantuvo en un rango de 0.7 – 1.5 L/m<sup>2</sup> acorde a la textura superficial de la base.

Cuando se colocó el asfalto diluido, se comprobó mediante muestras representativas cada 9000 galones, el grado de viscosidad cinemática del producto, mientras que, en el uso de emulsión asfáltica, se comprobó su tipo, contenido de agua y penetración del residuo. Al final de cada caso, se guardó una muestra para ensayos ulteriores de contraste.

**Tabla 17***Rangos de Temperatura de Aplicación (°C)*

Tipo y Grado del Asfalto	Rangos de Temperatura	
	En Esparcido o Riego	En Mezclas Asfálticas (1)
<b>Asfaltos Diluidos:</b> MC-30 RC-250 o MC-250	30-(2) 75-(2)	- 60-80(3)
<b>Cemento Asfáltico</b> Todos los grados	140 máx. (4)	140 máx. (4)

*Nota:* Ligantes asfálticos y cemento asfáltico aplicados durante el proceso de imprimación asfáltica en la Ampliación de la Av. Raúl Ferrero.

### **Materiales y producción de agregados**

Las fuentes de los materiales y agregados, así como sus respectivos procedimientos y equipos utilizados para su explotación, tuvieron la aprobación y verificación de un supervisor, sin embargo, eso no significa que el contratista los acepte, ya que el suministro debe cumplir con todos los requisitos de cada especificación. Todos los trabajos de clasificación de agregados y los de separación de partículas de mayor tamaño, se ejecutaron en el sitio de explotación y elaboración, no se realizaron en la vía.

## **Fórmulas de Trabajo para Mezcla Asfáltica en Caliente**

Antes de comenzar el acopio de los materiales, el contratista suministró al supervisor la verificación de estas muestras, tanto el producto bituminoso y de los aditivos. Estas muestras fueron ensayadas en el laboratorio, obteniendo validez y garantía para poder ser aplicadas en la mezcla, por lo tanto, el supervisor solicitó al contratista una “Fórmula de trabajo”, la cual cumplió con las exigencias demandas en la especificación correspondiente; en este documento se consignó la granulometría de cada uno de los agregados pétreos y sus respectivas dosificaciones, junto con el filler y su gradación. En el caso de la M.A.C., se señaló el porcentaje de aditivo respecto al peso del ligante asfáltico, en el momento de su incorporación.

Para la mezcla de agregados en seco y para la mezcla de los agregados con el ligante bituminoso, se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones:

- La temperatura máxima y mínima de calentamiento previo de los agregados y el ligante, en ningún caso fueron introducidas en el mezclador a una temperatura que fuera superior a la del ligante en más de 15 °C.
- El porcentaje de filler con respecto al peso de la mezcla, en caso fuera requerido.
- Las temperaturas máximas y mínimas al salir del mezclador.
- La temperatura mínima de la mezcla en la descarga de los elementos de transporte.
- La temperatura mínima de la mezcla al inicio y terminación de la compactación.

La fórmula contempla las tolerancias que se admitieron para los trabajos específicos, ya que ésta rige para la toda la obra. Solo pudo ser modificada durante la ejecución de los trabajos, en el escenario que hubiera cambio de materiales, canteras o las circunstancias lo necesitaran, con previa aprobación del supervisor.

### **Tramo de prueba en mezclas nuevas.**

Por adelantado, el contratista emprendió un tramo de prueba para verificar el estado de los equipos y se determinaron en las secciones de ensayos de ancho y longitud definida acordada con el supervisor, se concretó que los métodos de preparación, transporte, colocación y compactación de la mezcla cumplan los requisitos de su especificación.

Se tomaron muestras de la mezcla, para establecer la aprobación con las condiciones exigidas que corresponden a granulometría, dosificación, densidad y demás parámetros. Sin embargo, en los casos donde los trabajos no cumplieron los requisitos, el contratista efectuó las correcciones en los equipos y sistemas para concluir la actividad encargada, y que la fórmula de trabajo se ejecute correctamente.

La aplicación de pavimento asfáltico en la construcción de carreteras precisa de un conveniente manejo ambiental, debido a las futuras consecuencias y el desarrollo sostenible que se busca hasta la actualidad. En el proyecto, se realizaron acciones complementarias para mitigar los efectos de contaminación al mínimo.

Durante la utilización del material bituminoso, las especificaciones exigen extintores de emergencia con fácil accesibilidad para el personal de trabajo, ya que, debido a las altas temperaturas con las que se trabajan puedan generar algún inconveniente. Así mismo, los botiquines de primeros auxilios son esenciales y los Equipos de

Protección Personal (EPP) para la protección de todo el personal que esté en contacto con los gases que sean emanados.

### **Aceptación de los Trabajos**

Todo trabajo realizado tuvo que cumplir los siguientes controles:

- Verificación de la implementación de los trabajos y sus especificaciones
- Verificación del estado y funcionamiento de toda maquinaria e instrumento empleado durante la obra.
- Verificación de las plantas de asfalto y de trituración, con sus respectivos filtros, captadores de polvo, sedimentadores de lodo y otros accesorios que fueran necesarios para la ejecución del trabajo e impedir la emisión de gases que afecten al medio ambiente.
- Comprobación de requisitos de calidad en los materiales empleados.
- Ejecución de ensayos de control de mezcla, densidad de las probetas de referencia, densidad de la mezcla asfáltica compactada in-situ, extracción de asfalto, granulometría, y el control de temperatura de mezclado, descarga, extendido y compactación de la mezcla.
- Comprobación de las dosificaciones para los ensayos de ligante en imprimaciones
- Medición de espesores, perfiles, textura superficial y verificación de uniformidad en la superficie de rodadura.

### 5.2.3.2 Maquinaria usada en el proyecto de Av. Ferrero

#### Remoción de carpeta asfáltica

Se empleó las uñas del escarificador de la motoniveladora, protegiendo el espesor de la carpeta asfáltica en todas las medidas posibles. El material residual se apiló en los laterales de la calzada dónde se formaron montículos, una vez estuvo listo para su eliminación, se transportó hacia vertederos de residuos de construcción.

**Figura 62**

*Maquinaria empleada para la remoción de la carpeta asfáltica*



*Nota:* Motoniveladora y Cargador frontal empleadas en la Ampliación de la Av. Raúl Ferrero

#### Demolición

Dentro del expediente, la maquinaria encargada de transportar los residuos sólidos de demolición y remoción que generó la obra, se utilizaron vehículos con contenedores y tolvas con la finalidad que se lleven a un vertedero. Todos los vehículos contaban con contenedores, para que el material transportado llegue correctamente al vertedero de residuos sólidos, así mismo, se verificó que las tolvas debían estar óptimas condiciones, no posea roturas, perforaciones, ranuras o espacios que puedan ocasionar la mínima pérdida de material; por último, cada vehículo tuvo un letrero visible para indicar su máxima capacidad.

Con respecto a la maquinaria y el equipo de construcción se tuvo prudencia para que ocasione el mínimo deterioro a los suelos, para los vehículos pesados de carga y descarga, tenían alarmas acústicas y visuales dentro de las cabinas de operación, donde se no entró personal ajeno al operador.

### **Ejecución de Riegos de Imprimación y Mezcla en Caliente**

Se utilizaron agregados pétreos y polvo mineral (filler), siempre que se use un tratamiento de mezcla bituminosa se tiene que usar estos materiales. Se trabajó con agregado grueso, el cual fue retenido en el tamiz N° 4, agregado fino, material que queda retenido entre las mallas N° 4 y N° 200, y polvo mineral que pasó el tamiz N° 200.

### **Maquinaria para el transporte**

Así como los agregados y las mezclas fueron transportados en volquetes precisamente acondicionados para su finalidad, la forma y alturas de las tolvas fueron tales que, al momento de echar la mezcla en la terminadora, el volquete solo tocó a la tolva por medio de los rodillos. Dentro de los volquetes se tuvo en consideración la temperatura de la mezcla, por ello, se integraron termómetros y protección para evitar las emisiones contaminantes.

### **Imprimación**

En este proceso se empleó elementos mecánicos de limpieza y camiones cisterna irrigadores de agua y asfalto, el equipo de limpieza estuvo compuesto por una barredora mecánica, del tipo rotario, fueron operados a través de arrastre con tractor.

Sus dispositivos de irrigación deberán proporcionar una distribución transversal adecuada del ligante. El vehículo deberá estar provisto de un velocímetro calibrado en metros por segundo (m/s), o pies por segundo (pie/s), visible al conductor, para mantener la velocidad constante y necesaria que permita la aplicación uniforme del asfalto

en sentido longitudinal. El camión cisterna deberá aplicar el producto asfáltico a presión y para ello deberá disponer de una bomba de impulsión, accionada por motor y provista de un indicador de presión. También, deberá estar provisto de un termómetro para el ligante, cuyo elemento sensible no podrá encontrarse cerca de un elemento calentador. Para áreas inaccesibles al equipo irrigador y para retoques y aplicaciones mínimas, se usará una caldera regadora portátil, con sus elementos de irrigación a presión, o una extensión del carrotanque con una boquilla de expansión que permita un riego uniforme.

### **Extensión de la mezcla**

La extensión y terminación de la mezcla asfáltica en caliente se hizo con una pavimentadora autopropulsada, apropiada para extender y uniformizar la mezcla con un mínimo de precompactación acorde con los anchos y espesores del expediente. La pavimentadora estuvo equipada con un vibrador y un distribuidor de tornillo sinfín reversible, capacitado para aplicar la mezcla por delante de los enrasadores. El equipo de dirección integrado tenía velocidades para retroceder y avanzar sin ninguna complicación.

**Figura 63**

*Tren de Asfalto*



*Nota:* Maquinaria empleada en la Ampliación de la Av. Raúl Ferrero

El volumen de transporte del material de eliminación corresponder a los materiales provenientes de la remoción de la carpeta asfáltica anterior, demoliciones de sardineles, veredas de concreto, losas de concreto, muros de concreto y material de excavaciones de estructuras, que fueron depositados provisionalmente en zonas de acopio, ubicadas a 1 km del área de trabajo, antes de ser transportados a un vertedero de residuos sólidos.

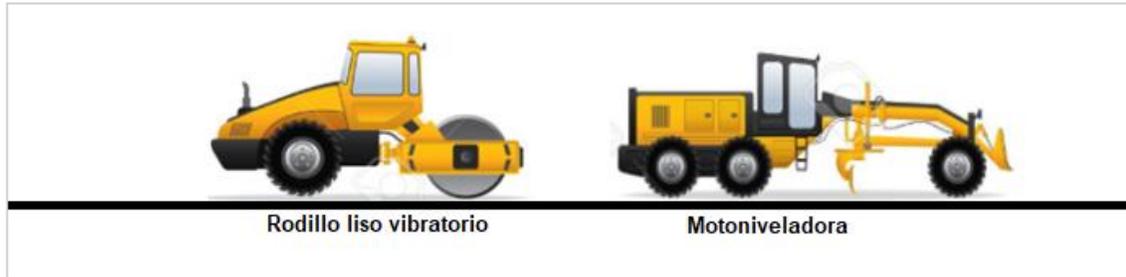
### **Equipo de compactación**

Se usaron rodillos autopropulsados de cilindros metálicos, estáticos o vibratorios, triciclos o tándem y de neumáticos, todos estos vehículos fueron aprobados por el supervisor, puesto que se obtuvieron resultados correctos en la fase de experimentación.

Los compactadores de rodillos no presentaron surcaron surcos ni irregularidades, los compactadores vibratorios dispusieron dispositivos para eliminar la vibración al invertir la marcha, se usaron controladores de vibración y de frecuencia independientes. Los de neumáticos tuvieron ruedas lisas, en número, tamaño y disposición, de manera que alcanzaron el traslape de las huellas delanteras y traseras, en algunos casos, se usó faldones de lona protectora para evitar el enfriamiento del neumático. Las presiones estática, dinámicas y las presiones de contacto de los compactadores fueron necesarias para alcanzar la densidad y homogeneidad de la mezcla en toda la superficie requerida.

## Figura 64

### *Motoniveladora y Compactadora*



*Nota:* La maquinaria utilizada durante el perfilado y compactación final

## CAPÍTULO VI: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

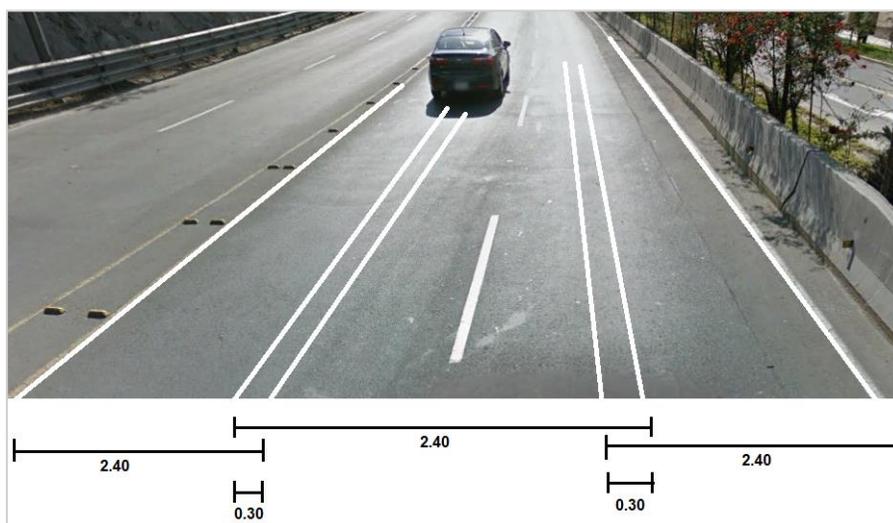
### 6.1 Resultados de la Investigación

#### 6.1.1 Ventajas Técnicas de la Aplicación de Asfalto Espumado

Para la ejecución del reciclado con asfalto espumado es necesario que se ejecuten trazos en la vía a fin de definir los anchos de las franjas que serán recicladas. Estos anchos se definen a razón del ancho del tambor fresador de la maquina recicladora. La recicladora Wirtgen 2500S tiene un ancho del tambor de fresado de 2.40 m, por lo que este será el ancho que se recicle por franja. Como la vía tiene un ancho total de 6.60 m, esta se divide en tres franjas de 2.40 m con un traslape cada una de 30 cm. Esta definición de las franjas de trabajo es necesaria a fin de graduar los materiales a utilizar como el cemento portland y de esa manera evitar excesos o una escases de los materiales.

**Figura 65**

*Franjas divisorias en la avenida Raúl Ferrero para reciclado con asfalto espumado.*



*Nota:* la vía tiene un ancho de 6.60 m y la recicladora tiene un ancho del tambor de fresado de 2.40 m, por lo que es posible realizar tres divisiones en el pavimento con un traslape de 30cm. Elaboración propia.

En total, para todo el proceso de remoción y colocación de una nueva carpeta asfáltica en caliente se utilizaron 7 maquinarias. El empleo de estas, se utilizaron en diferentes tiempos y con distinta intensidad, utilizando la motoniveladora en las partidas de remoción de carpeta asfáltica existente y perfilado y compactación de base granular existente.

**Tabla 18**

*Maquinaria total empleada en el método del reciclado y el método convencional con mezcla asfáltica en caliente.*

Proceso	Actividad y/o partida	Maquinaria empleada	
		Cantidad	Nombre
Reciclado en frio con asfalto espumado	Reciclado en frio y compactación primaria	1	Cisterna de Agua
		1	Cisterna de asfalto
		1	Recicladora Wirtgen
		1	Rodillo liso
	Compactación secundaria	1	Motoniveladora
		2	Rodillo liso
		1	Cisterna de agua
		1	Rodillo neumático
Maquinaria total empleada		8 maquinarias	
Rehabilitación de pavimento existente en la Av. Raúl Ferrero (La Molina - Santiago de Surco)	Remoción de carpeta asfáltica existente	1	Motoniveladora
	Perfilado y compactación de base granular	1	Cargador frontal
		1	Motoniveladora
	1	Rodillo liso	
	1	Volquete	
	1	Pavimentadora	
1	Rodillo liso		

70 e = 0.05 m	1	Rodillo tándem
Maquinaria total empleada		6 maquinarias

*Nota:* en la tabla se aprecia que el proceso de reciclado en frío con asfalto espumado utiliza un total de 8 máquinas, mientras que el proceso de rehabilitación del pavimento por el método convencional utiliza un total de 6 máquinas. Elaboración propia.

### 6.1.2 Ventajas en el Tiempo la Aplicación de Asfalto Espumado

Las actividades destinadas a la rehabilitación (Tabla 19) comprenden tres procesos, cada uno desarrollado en tiempos distintos, ya que una actividad precede a la otra. Por lo que el tiempo de ejecución de todo el proceso desde la remoción de la carpeta asfáltica hasta la colocación de una nueva mezcla en caliente es acumulativo y secuencial, estando estas actividades presentes en gran parte del proyecto.

**Tabla 19**

*Actividades para la rehabilitación del pavimento en la Av. Raúl Ferrero.*

Actividad	Duración	Fecha inicial	Fecha final
Remoción de carpeta asfáltica existente	12 días	08/06/2006	20/06/2006
Perfilado y compactación de base granular existente	25 días	31/07/2006	25/08/2006
Pavimento de concreto asfáltico en caliente (MAC) 60-70 e = 0.05 m	56 días	27/08/2006	22/10/2006

*Nota:* la actividad que demanda mayor tiempo es la colocación de carpeta asfáltica en caliente, con 56 días. Además, las actividades son secuenciales y una es la predecesora de la otra, lo que indica que tiene que terminar una para que empiece la otra. Elaboración propia.

Dentro del diagrama Gantt del proyecto (Anexo 3) se esquematizan las actividades de la obra, así como sus actividades precedentes. Las actividades de remoción de la carpeta asfáltica y perfilado y compactado de la base granular existente no forman parte de la ruta crítica del proyecto, ello debido a que tienen duraciones menores a actividades que las precede; sin embargo, la actividad de Pavimento de concreto asfáltico en caliente (MAC) 60-70 e = 0.05 m es una actividad crítica, debido a su duración y a que las actividades que la preceden son críticas.

El reciclado en frío con asfalto espumado es un proceso rápido y práctico, ya que la máquina recicladora ejecuta dos actividades importantes como lo son la remoción y colocación de la carpeta asfáltica en un solo paso, uniéndose en una las actividades de rehabilitación ejecutadas en el proyecto de la avenida Raúl Ferrero.

**Tabla 20**

*Cuadro comparativo en las actividades de rehabilitación con el método convencional y el asfalto espumado.*

ACTIVIDADES	
Rehabilitación Av. Raúl Ferrero	Reciclado en Frío con Asfalto Espumado
Remoción de carpeta asfáltica existente	Reciclado de la carpeta asfáltica con asfalto
Perfilado y compactación de base	PEN 60-70 e = 0.07 m

granular existente	
Pavimento de concreto asfáltico en caliente (MAC) 60-70 e = 0.05 m	Curado y sellado con micropavimento

*Nota:* al ejecutarse la remoción y la colocación del pavimento en un solo paso, las actividades de Remoción de carpeta asfáltica existente y Pavimento de concreto asfáltico en caliente (MAC) 60-70 e = 0.05 m quedan suprimidas, así como la de Perfilado y compactación de base granular existente al tener la capacidad de fresar parte de la base granular. Elaboración propia.

### **6.1.3 Ventajas Ambientales de la Aplicación de Asfalto Espumado**

Para los motores de las maquinarias de los sectores de construcción, industrial, minería se establecieron valores límites por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE. U., los cuales son medidos fuera de ruta al momento de ser comercializados, en otras palabras, cuando el vehículo aún no ha sido utilizado. En la normativa se estableció el término “Tier”, para distribuir la potencia nominal del motor y el año de fabricación, ha sido dividida en varias fases de desarrollo: Tier 1, Tier 2, Tier 3, Tier 4, Tier 4N.

**Tabla 21**

*Variación normativa EPA según el tamaño del motor*

Potencia Neta	Hp < 11	11 ≤ Hp < 25	25 ≤ Hp < 50	50 ≤ Hp < 75	75 ≤ Hp < 100	100 ≤ Hp < 175	175 ≤ Hp < 300	300 ≤ Hp < 600	600 ≤ Hp < 750	750 ≤ Hp < 1207	1207 ≤ Hp
Año	Kw < 8	8 ≤ Kw < 19	19 ≤ Kw < 37	37 ≤ Kw < 56	56 ≤ Kw < 75	75 ≤ Kw < 130	130 ≤ Kw < 225	225 ≤ Kw < 450	450 ≤ Kw < 560	560 ≤ Kw < 900	900 ≤ Kw
2000	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1
2001	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 2	Tier 1	Tier 1	Tier 1
2002	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 2	Tier 2	Tier 1	Tier 1
2003	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 1	Tier 1
2004	Tier 1	Tier 1	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 1	Tier 1
2005	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 1	Tier 1
2006	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 3	Tier 3	Tier 3	Tier 2	Tier 2
2007	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 3	Tier 3	Tier 3	Tier 3	Tier 2	Tier 2
2008	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 3	Tier 3	Tier 3	Tier 3	Tier 3	Tier 2	Tier 2
2009	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 3	Tier 3	Tier 3	Tier 3	Tier 3	Tier 2	Tier 2
2010	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 3	Tier 3	Tier 3	Tier 3	Tier 3	Tier 2	Tier 2
2011	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 3	Tier 3	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4
2012	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4
2013	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4
2014	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4	Tier 4

Nota: Extraído de GEASUR 2014

En la tabla se clasifican los vehículos por la potencia del motor, su consumo energético y el año de fabricación, estos valores nos permiten conocer la cantidad de emisiones que se emanan a lo largo de los años. Durante los últimos años se ha buscado que la sostenibilidad sea uno de los principales objetivos en un proyecto, para esto se ha incentivado la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en todo lo posible, desde los procesos constructivos, las maquinarias a usar y los residuos que se puedan generar al culminar un proyecto. Por ello, en nuestra investigación se buscó medir las emisiones generadas por las maquinarias usadas, de acuerdo con la siguiente tabla 22 podemos ver la emisión por gramo de cada gas.

**Tabla 22**

*Estándar de emisiones según EPA. (Agencia de Protección Ambiental)*

EPA : Estándar de emisiones de los motores de encendido por compresión (CO/NMHC+NOx/PM en g/kW-hr)																
Potencia Neta	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015+
Kw < 8	8,0 / 10,5 / 1,0					8,0 / 7,5 / 0,8			8,0 / 7,5 / 0,4							
8 ≤ Kw < 19	6,6 / 9,5 / 0,8					6,6 / 7,5 / 0,8			6,6 / 7,5 / 0,4							
19 ≤ Kw < 37	5,5 / 9,5 / 0,8				5,5 / 7,5 / 0,6			5,5 / 7,5 / 0,3					5,5 / 4,7 / 0,03			
37 ≤ Kw < 56	- / - / 9,2 / - <sup>a</sup>				5,0 / 7,5 / 0,4			5,0 / 4,7 / 0,3 <sup>b</sup>					5,0 / 4,7 / 0,03			
56 ≤ Kw < 75								5,0 / 4,7 / 0,4					5,0 / 4,7 / 0,02		5,0 / 0,19 / 0,4 / 0,02 <sup>a</sup>	
75 ≤ Kw < 130	5,0 / 6,6 / 0,3			5,0 / 4,0 / 0,3				5,0 / 4,0 / 0,02								
130 ≤ Kw < 225	3,5 / 6,6 / 0,2			3,5 / 4,0 / 0,2					3,5 / 4,0 / 0,02			3,5 / 0,19 / 0,4 / 0,02 <sup>a</sup>				
225 ≤ Kw < 450									3,5 / 6,4 / 0,2							
450 ≤ Kw < 560	11,4 / 1,3 / 9,2 / 0,54 <sup>a</sup>			3,5 / 6,4 / 0,2					3,5 / 0,4 / 3,5 / 0,1 <sup>a</sup>			A				
560 ≤ Kw < 900																
Kw > 900	11,4 / 1,3 / 9,2 / 0,54 <sup>a</sup>			3,5 / 6,4 / 0,2					3,5 / 0,4 / 3,5 / 0,1 <sup>a</sup>			A				
Kw > 900																

A : 3,5 / 0,19 / 3,5 / 0,04 (NMHC/NOx/PM/CO en g/kW-hr)  
a : Los estándares están dados: CO/HC/NOx/PM en g/kW-hr  
b : Entre los años 2008-2011 a los fabricantes se les da la opción de cumplir con la norma Tier3 [4,7 / 5,0 / 0,4 (NMHC+NOx/CO/PM en g/kW-hr)]

Tier 1	Tier 2	Tier 3	Tier 4 Interim / Final
--------	--------	--------	------------------------

Nota: Estos valores se estimaron de acuerdo con el promedio de maquinarias en el sector de construcción, minería, industrial que se vienen utilizando en los últimos 20 años.

De acuerdo con las tablas 21 y 22, se realizó una estimación de Gases de Efecto Invernadero por cada máquina utilizada dentro del proceso que se aplicó en la Av. Raúl Ferrero con el proceso convencional de Mezcla Asfáltica en Caliente y con el proceso de Reciclado en frío con asfalto espumado.

Para el proceso de Rehabilitación con la mezclas asfáltica en caliente, se emplearon camiones cisterna, rodillos lisos, neumáticos y tándem, cargador sobre llantas, pavimentadora, motoniveladora y camión imprimador.

**Tabla 23**

*Emisiones de cada maquinaria durante el proceso de Ampliación de Av. Raúl Ferrero*

Maquinaria en Av. Ferrero (M.A.C.)	Potencia (Hp)	Año de Fabricación	Tier	Emisión (g/ kW-hr)		
				CO	NMHC + NOX	PM
Camión volquete 6 x 4 10m3	330	2004	Tier 2	3.5	6.4	0.2
Camión cisterna 4 x 2 (agua) 1500gl	122	2004	Tier 2	5	6.6	0.4
Camión cisterna 4 x 2 (agua) 2000gl	160	2004	Tier 2	5	6.6	0.4
Rodillo liso vibratorio autopropulsado 12 tn	135	2004	Tier 2	5	6.6	0.4
Rodillo liso vibratorio autopropulsado 9 tn	100	2004	Tier 2	5	6.6	0.4
Rodillo liso vibratorio Manual 1 tn	10.8	2004	Tier 1	6.6	9.5	0.8
Rodillo neumático autopropulsado 23 tn	127	2004	Tier 2	5	6.6	0.4
Rodillo neumático autopropulsado 5 tn	80	2004	Tier 2	5	6.6	0.4
Rodillo Tandem Estático Autopropulsado 8-10 tn	70	2004	Tier 2	5	7.5	0.4
Rodillo Tandem Estático Autopropulsado 2.5 - 4 tn	35	2004	Tier 2	5.5	7.5	0.6
Cargador sobre llantas 3 yd3	155	2004	Tier 2	5	6.6	0.4
Pavimentadora sobre orugas 10-16'	69	2004	Tier 2	5	7.5	0.4
Camión imprimador 6 x 2 1800 gal	210	2004	Tier 2	3.5	6.6	0.2
Motoniveladora	125	2004	Tier 2	5	6.6	0.4
<b>TOTAL (g/ kW-hr)</b>				<b>69.1</b>	<b>97.8</b>	<b>5.8</b>

*Nota:* Se tomaron los valores de acuerdo con la tabla 22 del Geasur, de acuerdo con cada maquinaria, su año de fabricación y la potencia del motor.

**Tabla 24**

*Emisiones de cada maquinaria con el proceso de asfalto espumado de Ampliación de Av. Raúl Ferrero*

Maquinaria en Av. Ferrero (Asfalto espumado)	Potencia (Hp)	Año de Fabricación	Tier	Emisión (g/ kW-hr)		
				CO	NMHC + NOX	PM
Camión cisterna 4 x 2 (asfalto) 2000 gl	210	2018	Tier 4	3.5	0.19	0.4
Camión cisterna 4 x 2 (agua) 2000 gl	165	2018	Tier 4	5	0.19	0.4
Rodillo liso vibratorio autopropulsado 12 tn	135	2018	Tier 4	5	0.19	0.4
Motoniveladora	125	2018	Tier 4	5	0.19	0.4
Rodillo neumático autopropulsado 23 tn	127	2018	Tier 4	5	0.19	0.4
Recicladora Wirtgen WR 2500 S	670	2018	Tier 4	3.5	0.19	0.4
<b>TOTAL (g/ kW-hr)</b>				27	1.14	2.4

*Nota:* Maquinaria empleada para el proceso de reciclado de pavimento in-situ con asfalto espumado. Se estimaron los valores de acuerdo con la tabla 22 extraída del Geasur (2014).

## **6.2 Análisis e Interpretación de los resultados**

### **6.2.1 Ventajas Técnicas de la Aplicación de Asfalto Espumado**

El procedimiento constructivo del reciclado en frío con asfalto espumado tiene la cualidad de simplificar la cantidad de pasos a ejecutar hasta reducirlo a uno solo, en el que se comprenden la remoción y reutilización in situ de la carpeta asfáltica seguido del proceso de compactación necesario para alcanzar los niveles óptimos de calidad requeridos del asfalto. El proceso de reciclado en frío con asfalto espumado se detalla en el numeral 5.1.3 de la presente investigación.

Además, la máquina recicladora tiene la capacidad de reciclar parte de la base granular existente, haciendo del proceso ideal si es que la falla ha penetrado más allá de la capa superficial y parte de la base granular demanda también de rehabilitación.

El proceso de reciclado en frío con asfalto espumado utiliza 8 maquinarias para su ejecución. Estas se componen de las cisternas de agua y asfalto, además de las máquinas compactadoras, la motoniveladora y la máquina recicladora de asfalto. Todas ellas trabajan en conjunto para lograr el proceso de una manera rápida y económica.

## Figura 66

*Proceso de compactado de material reciclado con asfalto espumado.*



*Nota:* en la imagen se aprecian las maquinarias empleadas en el proceso de compactación de la carpeta asfáltica reciclada con asfalto espumado. Estas maquinarias se componen de una motoniveladora, dos rodillos lisos, una cisterna de agua y un rodillo neumático. Extraído de Espinoza et al. (2014).

El proceso de rehabilitación de la avenida Raúl Ferrero, comprendió la recuperación de tramos de vía en donde la carpeta asfáltica se había visto deteriorada. Este procedimiento se llevó a cabo escarificando la carpeta asfáltica para posteriormente colocar una nueva carpeta asfáltica en caliente. El proceso está detallado en el expediente técnico de la obra de la siguiente manera:

“Esta partida consistirá en la remoción de la carpeta asfáltica en las áreas de reconstrucción (para el tramo final del proyecto), tratando de no alterar la capa de base granular existente, de modo de permitir la conformación de la estructura del nuevo pavimento de acuerdo con lo indicado en los planos. Este material removido de la carpeta asfáltica será apilado a los costados para su eliminación” (Expediente técnico

de la Ampliación de la Av. Ferreros (La Molina – Santiago de Surco).

La remoción de la carpeta asfáltica se llevó a cabo utilizando la motoniveladora, empleando las uñas de esta para escarificar la carpeta asfáltica, tratando en lo posible de no comprometer a la base granular. El material removido se apila a un costado de la vía listo para su eliminación. Para el perfilado y compactación de la base granular existente fueron necesarios la utilización de una motoniveladora para el perfilado y un rodillo liso vibratorio para la compactación.

Una vez que la base se encuentra en óptimas condiciones de densidad y humedad, es que se procedió con la colocación de la carpeta asfáltica en caliente. Este paso se lleva a cabo con una pavimentadora y un volquete en el cual se traslada la mezcla asfáltica hasta el área del proyecto. La compactación se llevó a cabo con la utilización de un rodillo tándem vibratorio y el rodillo neumático.

### **6.2.2 Ventajas en el Tiempo la Aplicación de Asfalto Espumado**

La variable tiempo es una de las principales diferencias que se tienen cuando se aplica el método del reciclado con asfalto espumado frente a los métodos convencionales en donde se trabaja con una mezcla asfáltica en caliente. Justamente, la rapidez en el proceso radica en la temperatura con la que se ejecutan los trabajos. Mientras más caliente se halle la mezcla, más tiempo tarda que esta se enfríe y esté operativa.

Otro aspecto importante es que con el reciclado en frío el proceso se realiza in-situ, sin necesidad de transportar el material de un lugar a otro, ya que este se reutiliza en su totalidad, reduciendo y hasta eliminando las actividades de transporte y eliminación de material excedente proveniente de la remoción del pavimento.

El proyecto de rehabilitación de la avenida Raúl Ferrero se ejecutó con la finalidad de rehabilitar el pavimento con actividades como el tratamiento de fisuras y el parchado superficial y profundo, e incluso la remoción de la

carpeta asfáltica. Además, se ejecutó la ampliación en tramos de la vía a dos carriles por sentido. La totalidad del proyecto tuvo una duración de 150 días y se inició el uno de junio del año 2006 (01/06/06).

La rehabilitación del pavimento en tramos de la avenida Raúl Ferrero tuvo como finalidad remover la carpeta asfáltica en aquellas zonas en donde el daño de esta no puede ser subsanado con reparaciones menores, tratando de no afectar en el proceso de remoción a la base granular; nivelar y compactar la base granular existente y la colocación de una nueva carpeta asfáltica en caliente.

El proceso para la ejecución de la rehabilitación del pavimento mediante el método del reciclado de la carpeta asfáltica se ha dividido en dos actividades. La primera, Reciclado de la carpeta asfáltica con asfalto PEN 60-70 e = 0.07 m, consiste en el proceso de fresado y reutilización de la carpeta asfáltica; mientras que la segunda actividad, Curado y sellado con micro pavimento, tiene como finalidad dar el acabado final al pavimento estabilizado con asfalto espumado con una mezcla de MC30 + arena fina (micro pavimento), a la vez que se ofrece una protección al mismo frente a las condiciones climáticas y la acción del tránsito.

### **6.2.3 Ventajas Ambientales de la Aplicación de Asfalto Espumado**

#### **Gases de Efecto Invernadero (GEI)**

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Es un gas compuesto por dos moléculas de oxígenos y una de carbono, también se le conoce como anhídrido carbónico. Generado en su mayoría por actividad industrial, el cual trabaja de manera similar a un techo de vidrio de un invernadero, conteniendo el calor y aumentando la temperatura del planeta.

- Monóxido de carbono (CO)

Es el gas más dañino y el más excesivo en la capa inferior de la atmósfera, con mayor concentración a los alrededores de las grande metrópolis. Posee un matiz incoloro, inodoro e insípido, es insoluble

en agua. Está caracterizado por su rápida dispersión y su alta combustión. Es generado por una incompleta combustión del carbono en el interior del motor, es el gas de mayor emisión después del CO<sub>2</sub> por causas no naturales, ya que la actividad del hombre produce miles de toneladas. Al ser altamente tóxico trae consecuencias al medio ambiente, por ende, a la salud de todos los seres vivos, de manera que te conduce a la muerte.

- Lluvia acida

Los gases de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> al entrar en contacto con el vapor de agua presente en la atmósfera, forman ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), que durante la precipitación generan la acidificación del suelo y el agua. Por lo tanto, el pH regular del agua es de 5.5 – 5.7, pero durante la lluvia ácida, el pH disminuye a 5, generando obstrucciones en los poros de las plantas que aprehenden el CO<sub>2</sub> y destruyendo la biodiversidad de los ecosistemas.

- Material particulado (MP):

Es una mezcla de partículas líquidas y sólidas de sustancias orgánicas e inorgánicas, las cuales se quedan suspendidas en el aire debido a su densidad. De acuerdo con el (GEASUR Tecnología y Medioambiente, 2014), el Material particulado se divide en 4 categorías acorde al tamaño de las partículas.

1. MP<sub>10</sub>, partículas tienen un diámetro aerodinámico menor que 10 [mm].
2. MP<sub>2,5</sub> partículas finas que tienen un diámetro menor que 2,5 [mm], representan alrededor de 97% del MP<sub>10</sub>.
3. Partículas ultrafinas que tengan un diámetro menor que 0,1 [mm] o 100 [nm].
4. Nano partículas, las cuales son caracterizadas por diámetros menores que 50 [nm].

El mayor contribuyente a las emisiones de material particulado, expresado como MP10, es el parte automotor de gasóleo o diésel, son ocasionadas por bajas temperaturas y la reducción de oxígenos en una llama durante la combustión. Esta combustión varía de acuerdo con la inyección del combustible, sus características de mezclado aire-combustible y el aceite que es lubricado en las paredes de la cámara de combustión con los asientos de las válvulas de aire.

- Óxidos de Nitrógenos (NOx)

Son un conjunto de óxido nítrico y dióxido de nitrógenos (NO<sub>2</sub>), que tienen gran implicancia en los gases de efecto invernadero, siendo este último, el que predomina en la atmosfera, y su proceso de oxidación es acelerado, lo cual provoca el NO<sub>3</sub> y el ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>).

### **Material utilizado para el reciclado**

En la obra de rehabilitación de la avenida Raúl Ferrero se escarificaron y eliminaron 4072.58 m<sup>2</sup> de pavimento, material que se reutiliza en su totalidad al emplear el método del reciclado con asfalto espumado. Sin embargo, el método del reciclado demanda de materiales nuevos para poder ser ejecutado. Estos materiales por utilizar son asfalto, cemento y agua en distintas proporciones.

En el caso del cemento, este se aplica como un porcentaje del peso del material reciclado, el cual es máximo 1%. Una vez que se tiene el peso total de cemento que es necesario para que se ejecute correctamente el reciclado, este se distribuye en base a bolsas de cemento por metro lineal o metro cuadrado de franja. Esto con la finalidad de evitar excesos o escases de cemento.

El peso de asfalto a emplear en la obra es un porcentaje del peso del material reciclado. Este peso, según Wirtgen, varía entre el 1,6 y 2,2% del peso del material reciclado como recomendación; sin embargo, Espinoza et al. (2014) nos dice que en el mantenimiento de

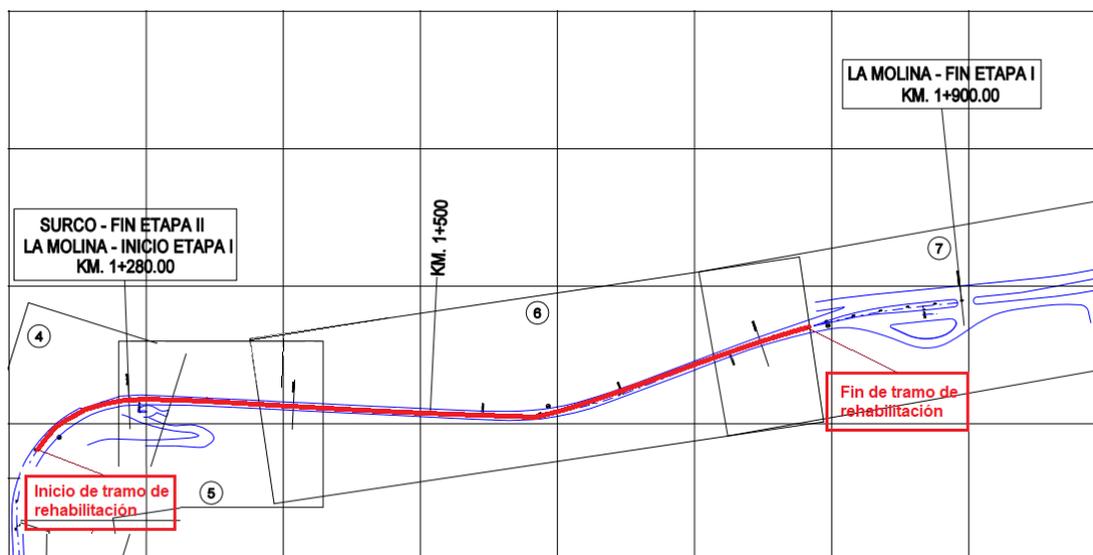
las carreteras La Oroya – Chicrín – Huánuco – Tingo María – Dv. Tocache y Conococha – Yanacancha, se utilizó un porcentaje de asfalto de 2,5% del peso del material reciclado.

El porcentaje de agua para la espumación está en base al peso del asfalto que se emplea. Este porcentaje varía entre el 1% a 3% del peso del asfalto (Gonzales, 2017). Además, durante el proceso de compactación, se agrega una pequeña cantidad de agua sobre el pavimento con el fin de densificar más el material y que las densidades alcancen valores del 100%. Este riego de agua está entre 0.5% al 1% del peso del material.

Debido a que en el proyecto no se realizaron ensayos al pavimento removido, debido a que este fue eliminado, no se tienen datos del peso específico del mismo, por ende, no se podría realizar la comparación con dicho material. Abad (2016) proporciona los datos de la densidad del material removido y que fue reutilizado en la conservación periódica de la carretera Conococha – Huaraz. La densidad del material fue de 2243 kg/m<sup>3</sup>. Para efecto de realizar las comparaciones en la presente investigación, dicho valor de la densidad en nuestra obra.

**Figura 67**

*Tramo de remoción y colocación MAC en la av. Raúl Ferrero.*



*Nota:* el tramo a rehabilitar tuvo una longitud de 656.87 ml, correspondientes a un área total de 4072.58 m<sup>2</sup> y un ancho de vía de 6.6 m. Adaptación propia.

Tomando como base los datos de la tabla 25 se obtuvieron los valores para los distintos materiales. De acuerdo con el peso específico asumido, se tiene un peso de 157 kg/m<sup>2</sup> de material recuperado, y teniendo en cuenta que el área total es de 4072.58 m<sup>2</sup>, se tiene un peso total de 639435.8 kg.

Para que la proporción de cemento sea la adecuada, se hicieron los cálculos adecuados en los cuales primero el peso unitario de acuerdo con el espesor del material a reciclar. Tomando en consideración la longitud de la vía, se tiene el peso volumétrico por metro cuadrado de vía, siendo de 1.57 kg/m<sup>2</sup>; lo que nos da un área aproximada de 27 metros cuadrados por bolsa de cemento y 11 metros lineales por franja a reciclar.

$$\text{Asfalto/franja} = \frac{2243\text{kg}}{\text{m}^3} * 2.4\text{m} * 0.07\text{m} * 2.2\% = \frac{8.29\text{kg}}{\text{m}} \approx \frac{8.29\text{lit}}{\text{m}} \approx \frac{2.19\text{gal}}{\text{m}}$$

$$\text{Agua espumación/franja} = \frac{2.19\text{gal}}{\text{m}} * 3\% = 0.07\text{gal/m}$$

$$\text{Agua compactación} = \frac{2243\text{kg}}{\text{m}^3} * 6.6\text{m} * 0.07\text{m} * 1\% = 10.36\text{kg/m} \approx 2.74\text{gal/m}$$

### 6.3 Discusión de resultados

Espinoza et al. (2014) nos dice que el avance promedio diario en el mantenimiento de las carreteras La Oroya – Chicrín – Huánuco – Tingo María – Dv. Tocache y Conococha – Yanacancha, fue de 20 km por mes, lo que daría un estimado de 800 m por día. La vía de estudio tiene un ancho de 6.60 m y una longitud equivalente de 656.87 m, asumiendo que el tramo a rehabilitar es recto en su totalidad. De ello se deriva el hecho de que se pueda rehabilitar la vía en un día de trabajo, debido a los rendimientos dados por la recicladora.

Las actividades que comprenden el reciclado con asfalto espumado (Anexo 4), Reciclado de la carpeta asfáltica con asfalto PEN 60-70 e = 0.07 m y el Curado y sellado con micro pavimento, tienen una duración total de tres días, tomando en cuenta que la actividad de reciclado de la carpeta asfáltica precede a la del curado y sellado.

La actividad de curado y sellado de la carpeta asfáltica tiene una duración de dos días, ya que el curado se lleva a cabo con riegos de protección, para prevenir el deterioro de la capa reciclada por la acción de las aguas superficiales y del tránsito automotor. Dichos riegos se realizan utilizando el asfalto diluido MC-30, después al final se recubrió la capa con el mortero asfáltico (Abad, 2016).

El proceso de reciclado de la carpeta asfáltica con asfalto espumado ha demostrado a través del tiempo, ser un proceso práctico, económico y ambientalmente más amigable, debido a la rapidez con la que se realiza el proceso de fresado y

reutilizado de la carpeta asfáltica existente con la utilización de potentes maquinas recicladoras.

Al producir una nueva mezcla asfáltica en caliente se demanda de agregados vírgenes y asfalto a elevadas temperaturas de producción y puesta en obra; mientras que con el reciclado in-situ con asfalto espumado el asfalto debe de estar caliente pero el agregado se trabaja a temperatura ambiente, por lo que, con el agregado de agua, la temperatura de la mezcla disminuye considerablemente, haciendo que su puesta en obra y transitabilidad se de en menor tiempo.

En obras en las que solo se debe ejecutar la remoción de la carpeta asfáltica, la aplicación del reciclado de la carpeta asfáltica con asfalto espumado es una alternativa idónea para ejecutar los trabajos con la calidad requerida y con una reducción considerable de tiempo de ejecución; sin embargo, cuando en la obra se deben ejecutar otras actividades, como en la avenida Raúl Ferrero, no se evidenció una reducción en el tiempo total del proyecto.

A partir de este trabajo se determinó que las emisiones de CO, NOx y MP dependen de la potencia del motor, la antigüedad del equipo y las horas de uso de esta. Se puede decir que el factor que más afecta la cantidad de emisiones es el año de fabricación de los equipos, sus respectivos controles y mantenimientos, sin embargo, cuando se realizó la obra, no hubo el control de maquinarias en ese año, por ello, ahora es vital saber la huella de carbono que se generará en un proyecto.

Para el proceso de ventajas ambientales, se utilizó la metodología EPA para el cálculo de emisiones de CO, NOx y MP, ya que, en el Perú se han adaptado muchas normas norteamericanas a la realidad de nuestro país. Sin embargo, no se cuenta con un sistema que controle las maquinarias y vehículos antiguos que generan altas emisiones de gases de efecto invernadero.

## CONCLUSIONES

Las mejoras técnicas estudiadas y analizadas demostraron que la técnica del reciclado in-situ con asfalto espumado es una alternativa válida ante el proceso convencional empleado en la rehabilitación de pavimento de la avenida Raúl Ferrero, las cuales fueron las siguientes:

1. Para la ejecución de los trabajos de reciclado de la carpeta asfáltica, se emplearon en total 9 maquinarias; sin embargo, el rodillo liso es utilizado para la compactación primaria y puede ser empleado también para la compactación secundaria, lo que hace que se empleen en total 8 maquinarias, ya que un rodillo liso podemos emplearlo para la compactación primaria y luego en la compactación secundaria. La máquina protagonista del proceso considerado en esta tesis, es la recicladora Wirtgen 2500 S. Además, se necesita de cisternas, compactadores y motoniveladora para llegar a la calidad requerida del proceso.
2. Para la rehabilitación del pavimento en el proyecto de mejoramiento de la avenida Raúl Ferrero, fueron necesarias tres actividades: (1) Remoción de carpeta asfáltica existente, (2) Perfilado y compactación de base granular existente y (3) Pavimento de concreto asfáltico en caliente (MAC) 60-70 e = 0.05 m. En el análisis para la ejecución del trabajo con asfalto espumado, estas actividades fueron reemplazadas por dos: (1) Reciclado en frío con asfalto espumado y (2) Curado y sellado con micro pavimento; siendo estas dos únicas actividades las necesarias para que el proceso de rehabilitación se ejecute.

Las ventajas en el tiempo estudiadas y analizadas demostraron que la técnica del reciclado in-situ con asfalto espumado es una alternativa válida ante el proceso convencional empleado en la rehabilitación de pavimento de la avenida Raúl Ferrero, las cuales fueron las siguientes:

1. Con la aplicación del método de reciclado de pavimento con asfalto espumado, se tuvo una duración total de 3 días contados en dos actividades. Mientras que las actividades destinadas a la rehabilitación del pavimento en la avenida Raúl Ferrero

tienen una duración total de 93 días, ya que es necesario finalizar una actividad para comenzar con la siguiente, por lo tanto los días son secuenciales y acumulativos.

2. En total, se tuvo una reducción en el tiempo de trabajo para las actividades de rehabilitación del pavimento de un 97% aplicando el reciclado de pavimento in-situ con asfalto espumado.
3. El proyecto de la rehabilitación de la avenida Raúl Ferrero tiene una duración total de 150 días. Se demostró, a través de la diagramación Gantt en el programa MS Project que el proyecto no disminuye su tiempo total de ejecución, debido a que las actividades destinadas a la ampliación de pavimento no pueden ser reducidas mediante esta técnica.

Los beneficios ambientales estudiados y analizados demostraron que la técnica del reciclado in-situ con asfalto espumado es una alternativa válida ante el proceso convencional empleado en la rehabilitación de pavimento de la avenida Raúl Ferrero, las cuales fueron las siguientes:

1. En el proyecto de la avenida Raúl Ferrero se eliminaron 4072.58 m<sup>2</sup> de pavimento, producto de la remoción de la carpeta asfáltica. Al realizar el análisis para la ejecución del proyecto con asfalto espumado se reutilizó el pavimento en su totalidad, evitando así la generación de residuos sólidos, de manera que se trabaja más sostenible y amigable con el medio ambiente.

**Tabla 25**

Actividades	Material eliminado
Rehabilitación de pavimento existente en la Av. Raúl Ferrero (La Molina - Santiago de Surco)	4072.58 m <sup>2</sup>

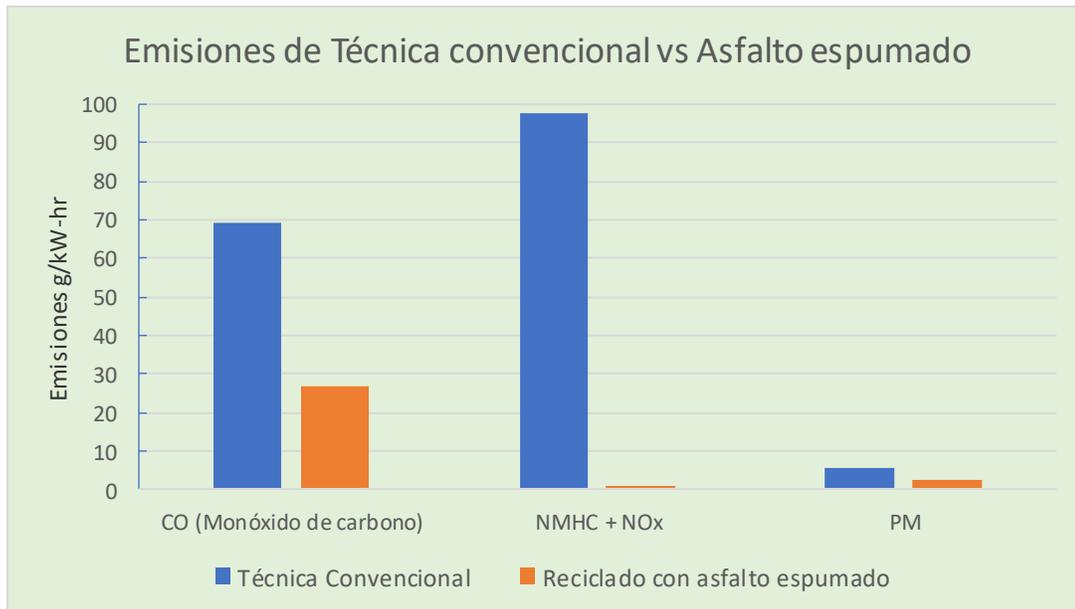
Reciclado en frío con  
asfalto espumado

0.00 m<sup>2</sup>

2. Las cisternas de agua y asfalto empleadas para el proceso de reciclado con asfalto espumado poseen una mayor capacidad de almacenaje con un total de 2000 galones por vehículo. Para el proceso de colocación de la carpeta asfáltica se requirió de 3717 galones de asfalto, mientras que para el agua de espumación y compactación se emplearon 112 galones y 1690 galones respectivamente; por lo tanto, solo fue necesario 2 veces el uso de cisternas de asfalto y 1 sola vez la cisterna de agua.
3. En la Tabla 26, se puede ver una comparación de emisiones de los Gases de Efecto Invernadero producidos en gramos por kilowatt – hora, en el monóxido de carbono se obtuvo un valor de 69.1 g/KW-hr en la técnica convencional, mientras que en el asfalto espumado se produjo 27.1 g/KW-hr. En los hidrocarburos no quemados y los óxidos de nitrógeno se obtuvo un valor de 97.8 g/KW-hr en la técnica convencional y en el asfalto espumado solo el 1.14 g/KW-hr; en el material particulado se obtuvo un valor de 5.8 g/KW-hr para la técnica convencional y solo 2.4 g/KW-hr en el asfalto espumado.

**Tabla 26**

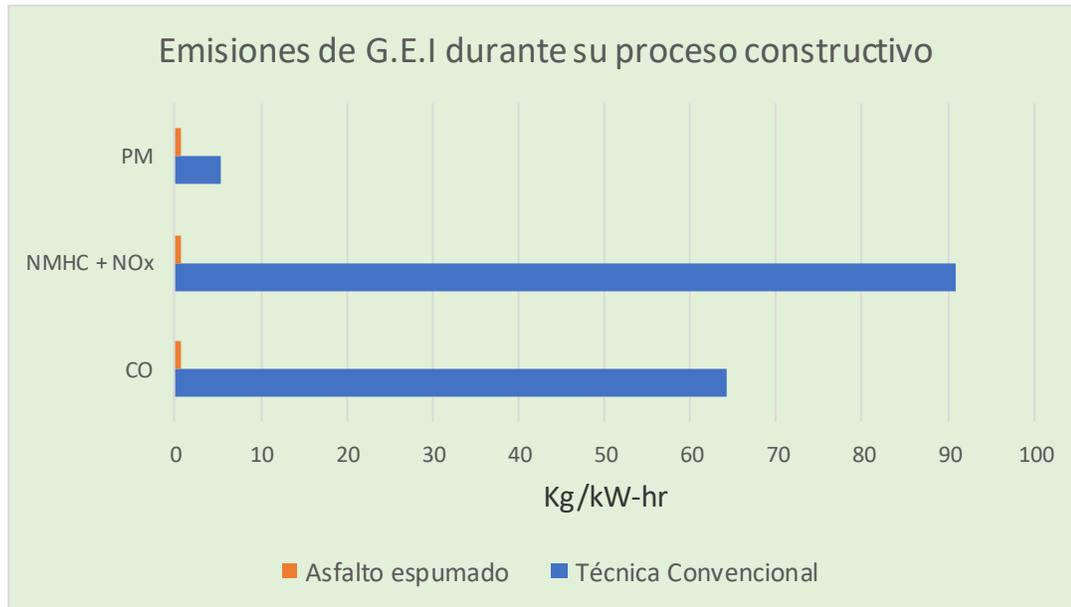
*Comparación de emisiones entre la técnica convencional y asfalto espumado*



4. En la tabla 27, se resume las emisiones generadas durante todo el proceso constructivo realizado en la Av. Raúl Ferrero con la técnica convencional (93 días de acuerdo con el cronograma) y el reciclado de pavimento con asfalto espumado (3 días de acuerdo a nuestra investigación). Los valores obtenidos de PM fueron de 0.08 kg/kW-hr en el asfalto espumado, mientras que en la técnica convencional fueron 5.4 kg/kW-hr; en los hidrocarburos no quemados y los óxidos de nitrógeno se obtuvo un valor de 0.04 kg/kW-hr en el asfalto espumado, mientras que en la técnica convencional se generaron 90.9 kg/kW-hr, por último, en el monóxido de carbono se emitieron 0.81 kg/kW-hr con el asfalto espumado y en la técnica convencional fueron 64.3 kg/kW-hr.

**Tabla 27**

*Comparación de emisiones de la durante su proceso constructivo de la técnica convencional y asfalto espumado*



## RECOMENDACIONES

1. De acuerdo con lo visto y estudiado en la presente investigación, se debe hacer un mantenimiento oportuno y adecuado a la vía con el fin de evitar su mayor deterioro y con ello prolongar la vida útil del pavimento.
2. El tipo de mantenimiento que se debe aplicar al pavimento depende del grado de deterioro que presenta la vía y saber reconocer fallas que pueden tener un origen más allá de la capa superficial. Por ello, se recomienda realizar estudios a profundidad al pavimento a fin de dar la correcta solución a la falla.
3. Es necesario realizar una mejora en la información base al número de máquinas presentes en la construcción debido a la poca información que se tiene al respecto, para lo cual debiese crearse un sistema de registro nacional para la maquinaria fuera de ruta que sea de libre acceso a la comunidad.
4. Las actividades deben analizarse tomando en cuenta las predecesoras y de si es una actividad critica; ya que ello tendrá un impacto directo en el tiempo de ejecución del proyecto; sin embargo, deben ser consideradas aquellas actividades ajenas a la rehabilitación del pavimento y que se deben llevar a cabo siguiendo los tiempos establecidos.
5. Una vez que la vía rehabilitada con asfalto espumado es abierta al tránsito vehicular, la conducción debe ser lineal y se deben evitar que los vehículos circulen con una velocidad mayor de 30 km/h sobretodo e zonas de curva, ya que podrían darse deformaciones en el pavimento.
6. Durante la pandemia Covid-19, se trabajó de manera remota para poder conseguir la información del expediente técnico de la Ampliación de la Av. Raúl Ferrero, sin embargo, cuando las entidades como EMAPE o Municipalidades de Santiago de Surco y La Molina trabajen de manera completa, se recomienda buscar mayor información para un futuro estudio o intervención en la vía estudiada, para poder hacer un mantenimiento periódico de acuerdo a las condiciones en que se encuentre la avenida; ya que al haber transcurrido cerca de 15 años, le corresponde una intervención como tal.
7. Se recomienda la aplicación de asfalto espumado en proyectos de vías urbanas, puesto que, solo ha sido aplicado en ciertos proyectos de carreteras en el interior del

país, su uso nos brindaría las ventajas técnicas, temporales y ambientales ya mencionadas, para mejorar la calidad de los ecosistemas de una ciudad y no afectar tanto al flujo que esta posea

8. Para trabajos futuros se podría estudiar el impacto que generan las emisiones estimadas por este estudio en los ecosistemas. Además de estudiar de qué manera esta contaminación se traslada por medio del aire a zonas urbanas y cómo afecta a las personas.
9. Dentro del Manual de Carreteras Mantenimiento o Conservación Vial del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, no se menciona la técnica de reciclado de pavimento con asfalto espumado para los servicios de mantenimiento periódico o rutinario, es por ello, que se recomienda difundir la técnica y sus beneficios, ya que, para su aplicación en el país se han usado normas y guías extranjeras , tales como Manual de Reciclado en frío de la empresa alemana Wirtgen , la Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto de la Universidad de Costa Rica, Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado de México, entre otras.
10. La investigación nacional para el uso de asfalto espumado ha trabajado de manera empírica el proceso de espumación y su puesta en marcha, debido a que no se cuenta con los implementos y equipos necesarios para su modelado y realización, sin embargo, eso no ha sido un impedimento para que la ingeniería civil continúe, por ello, se busca la inversión tanto del estado peruano como de las empresas; Ya que, los países con mayores inversiones en educación y formación, son los que más producción y desarrollo generan.
11. Como en todo proyecto de ingeniería, es fundamental tener los materiales y productos en el momento exacto para su trabajabilidad. El reciclado con asfalto espumado requiere de agregados vírgenes como cemento y asfalto; sin estos elementos, la obra no avanza y la actividad se retrasa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, H. (2016). *Análisis comparativo del reciclado con asfalto espumado y la técnica convencional en la conservación periódica de la carretera Conococha Huaraz 2010-2011*. Tesis de Grado, Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo, Huaraz. Obtenido de <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1449>
- Asphalt Recycling & Reclaiming Association, ARRA. (2016). *Recommended Construction Guidelines for Cold In-place Recycling (CIR) Using Bituminous Recycling Agents*. Annapolis, Maryland . Obtenido de <https://cdn.ymaws.com/www.arra.org/resource/resmgr/files/ARRA-CR101.pdf>
- 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*. Monografía para Optar por el Título de Ingeniero Civil, Universidad católica de Colombia, Bogotá. Obtenido 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%202.pdf>
- Berthelot, C., Podborochynski, D., Fair, J., Anthony, A., & Marjerison, B. (2007). *Mechanistic-Climatic Characterization of Foamed Asphalt Stabilized Granular Pavements in Saskatchewan*. Saskatchewan, Canadá.
- Bhavsar, J. (2015). *Comparing Cold In-Place Recycling (CIR) and Cold In-Place Recycling with Expanded Asphalt Mixture (CIREAM)*. Tesis de maestría, Universidad de Waterloo, Waterloo, Ontario, Canadá. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/144148577.pdf>
- Borja S., M. (2016). *Metodología de la investigación científica para ingenieros*. Chiclayo, Perú.
- Ccoyllo, J. (2019). *Método de asfalto espumado para mejorar los factores de diseño de mezclas asfálticas para Pavimentos Flexibles - Lima*. Tesis de Grado, Universidad

Peruana los Andes , Lima, Perú. Obtenido de <http://repositorio.upla.edu.pe/handle/UPLA/1378>

Chandra, R. K. (junio de 2016). Warm Mix asphalt investigation on Public Roads - A Review. *Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal (CiVEJ)*, 03(02), 75-86. doi:10.5121/civej.2016.3206

Chavarro Muñoz, S. J. (2018). *High Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Asphalt Mixtures for Low Volume Roads*. Tesis de maestría, Texas A&M University, Texas, Estados Unidos. Obtenido de <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/173997>

Comisión Multisectorial de Seguridad Vial - Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2019). *Plan Estratégico Nacional de Seguridad Vial PENsv 2017 - 2021*. Lima, Perú.

Consejo Nacional de seguridad vial. (viernes 8 de septiembre de 2017). Plan Estratégico Nacional de Seguridad Vial 2017 -2021. *El Peruano*. Obtenido de [https://www.mtc.gob.pe/cnsv/documentos/PENsv\\_2017-2021.pdf](https://www.mtc.gob.pe/cnsv/documentos/PENsv_2017-2021.pdf).

CONSULTORES, B. D. (2006). *Ampliación de la Av. Ferrero (La Molina - Santiago de Surco)*. Expediente Técnico, Lima.

Deza S., Díaz, C., Miranda, L. y Velázquez, M. (2017). *Aplicación de nuevas tecnologías a la conservación de la red vial de Arequipa Caso corredor vial: Cañón del Colca - Valle de los Volcanes*. Tesis de Maestria, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima, Perú. Obtenido de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/622095>

EAPA, EUPAVE y FEHRL. (2018). *Road Pavement Industries Highlight Huge CO2 Saving Offered by Maintaining and Upgrading Roads*. Bruselas, Belgica .

Eller, A., & Olson, R. (2009). *Recycled Pavements Using Foamed Asphalt in Minnesota*. Minnesota: Minnesota Department of Transportation.

Espinoza P. y Vildoso J. (2014). *Estudio de la Técnica de Reciclado con Asfalto espumado en las carreteras La Oroya - Chicrin - Huanuco - Tingo Maria - Dv. Tocache y Conococha Yanacancha*. Tesis de grado, Universidad Ricardo Palma, Lima, Peru.

Obtenido de [http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/2173/espinoza\\_pk-vildoso\\_je.pdf?sequence=1](http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/2173/espinoza_pk-vildoso_je.pdf?sequence=1)

European Asphalt Pavement Association . (2017). *Asphalt in Figures 2017*. Bruselas, Belgica .

European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2014). *Asphalt the 100% recyclable construction product*. Bruselas, Belgica.

European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2014a). *Asphalt the 100% recyclable construction product*. Bruselas, Belgica. Obtenido de [https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/EAPApaper\\_Aspphalt\\_the-100-\\_recyclable\\_construction-product.pdf](https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/EAPApaper_Aspphalt_the-100-_recyclable_construction-product.pdf)

European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2014b). *The use of Warm Mix Asphalt. Position Paper*, Bruselas . Obtenido de <https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/EAPA-paper-Warm-Mix-Asphalt-version-2014.pdf>

European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2019). *The asphalt industry's contributions to climate neutrality and preservation of Europe's natural environment*. Bruselas, Belgica.

Federal Highway Administration. (2014). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program* . Report No FHWA-HRT-13-092, Office of Infrastructure Research and Development, Virginia. Obtenido de <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/13092/13092.pdf>

Fernandez, J., Salguero Velásquez, L., & Vera Chila, F. (2019). *Asfalto natural alternativa de rehabilitación y mejoramiento de la infraestructura vial del Alto Magdalena Colombia – Revisión Sistemática*. Girardot, Colombia: Grupo Compás .

GEASUR Tecnología y Medioambiente. (2014). *Análisis técnico-económico de la aplicación de una nueva norma de emisión para motores de maquinaria fuera de ruta a nivel país*. Santiago de Chile: Geasur.

- GmbH, W. (2019). *El ligante acreditado en todo el mundo para el reciclaje en frío. Betún espumado*. Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH.
- Gonzales Remond, M. H. (2017). *Propuesta para la mejora de los Pavimentos Asfálticos utilizando el método del asfalto espumado*. Tesis de grado, Arequipa, Perú. Obtenido de [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCSM\\_6ab95a2831f6c4a18bba0f8f1712e88d](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCSM_6ab95a2831f6c4a18bba0f8f1712e88d)
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN*. México D.F. , México: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Hunter, R., Self, A., & Read, J. (2015). *The Shell Bitumen Handbook Sixth edition*. Londres: ICE Publishing.
- Innovación y Cualificación, S. (2017). *Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible*. Málaga: IC Editorial. Obtenido de <https://elibro.net/es/lc/bibliourp/titulos/124252>
- Instituto del Cemento y del Concreto de Guatemala. (2014). *Guía de Instalación de adoquines de Concreto*. Guatemala.
- Instituto Mexicano del Transporte . (2018). *Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado*. Sanfandila, Queretaro.
- Jácome, E. (2020). *Implementación del proceso de conservación de la estructura de la capa de rodadura de la vía Ambato – Tisaleo sector Huachi la Magdalena en el tramo de la abscisa 0+000 hasta 3+200 de la provincia de Tungurahua*. Tesis de Grado, universidad técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/31277>
- Jenkins, K., van de Ven, M., & de Groot, J. (1999). *CHARACTERISATION OF FOAMED BITUMEN*. Zimbabwe.
- Jesús, O. d. (18 de Febrero de 2015). *REDSOCIAL56*. Obtenido de <https://redsocal56.wordpress.com/2015/02/18/historia-del-asfalto/>

- Josephia R., O. A. (23 y 26 de Noviembre de 2016). Caracterización mecánica de una mezcla asfáltica tibia. *XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*. Mérida, Yucatán. Obtenido de <https://civilgeeks.com/2017/06/14/caracterizacion-mecanica-una-mezcla-asfaltica-tibia/>
- Marchan, R. (2005). *Métodos de Rehabilitación en Pavimentos*. Tesis de Grado, Instituto Politécnico Nacional, Mexico DF. Obtenido de [https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/1483/1/168\\_2005\\_ESIA-ZAC\\_SUPERIOR\\_marchan\\_moreno.pdf](https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/1483/1/168_2005_ESIA-ZAC_SUPERIOR_marchan_moreno.pdf)
- Margaritis, A., & Van den bergh, W. (2018). *EVALUATION OF FLEMISH BITUMINOUS MIXTURES PERFORMANCE CONTAINING RAP. Statistical analysis and modelling*. Antwerp, Belgium.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC). (2016). *Identificación de Fallas en Pavimentos y Técnicas de Reparación (Catalogo de Fallas)*. Dirección General de Reglamentos y Sistemas , Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, Republica Dominicana. Obtenido de <http://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identifici%C3%B3n-fallas.pdf>
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, MOPC. (1990). *Identificación de Fallas en Pavimentos y Técnicas de Reparación (Catalogo de Fallas)*. Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, Republica Dominicana. Obtenido de <http://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identifici%C3%B3n-fallas.pdf>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2016). *MANUAL DE CARRETERAS MANTENIMIENTO O CONSERVACION VIAL* . Lima, Perú.
- NCHRP IDEA Program. (Abril 2020). *Products with an Impact or Potential Impact on Current Highway Practice*. National Academy of Sciences Engineering and Medicine, Washington, D. C. Obtenido de <https://docplayer.net/183760634-Nchrp-idea-program-products-with-an-impact-or-potential-impact-on-current-highway-practice-notable-examples-april-2020.html>
- NCHRP REPORT 807. (2015). *Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt Applications*. Washington, D.C, EEUU.

- NCHRP Synthesis 421. (2011). *Recycling and Reclamation of Asphalt Pavements Using In-Place Methods*. National Academy of Sciences engineering and medicine, Washington, D. C. Obtenido de <https://www.nap.edu/catalog/14568/recycling-and-reclamation-of-asphalt-pavements-using-in-place-methods>
- Obando C., . (2017). Influencia del agua en el desempeño de los pavimentos: lluvia ácida. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 190-206. doi:10.17081/invinno.5.2.2761
- Padilla., A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. Tesina, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2099.1/3334>
- Provías Nacional - Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2020). *MEMORIA ANUAL 2019*. Lima.
- Quinde B. (Agosto - 2020 Número 65). Arranca Perú invertirá más de S/ 6,400 millones para la ejecución de obras. *PERU CONSTRUYE*, 14-15.
- Rodríguez Minero y Rodríguez Molina. (2004). *Evaluacion y rehabilitacion de Pavimentos por el Método del Reciclaje*. Tesis de Grado, Universidad de El Salvador, Escuela de Ingeniería Civil , San Salvador, El Salvador. Obtenido de [http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2234/1/Evaluaci%C3%B3n\\_y\\_rehabilitaci%C3%B3n\\_de\\_pavimentos\\_flexibles\\_por\\_el\\_m%C3%A9todo\\_del\\_reciclaje.pdf](http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2234/1/Evaluaci%C3%B3n_y_rehabilitaci%C3%B3n_de_pavimentos_flexibles_por_el_m%C3%A9todo_del_reciclaje.pdf)
- SENAHMI, S. N. (2014). *Estimación de emisiones vehiculares en Lima Metropolitana - Informe final*. Lima.
- SENAMHI. (2014). *El fenómeno EL NIÑO en el Peru*. Lima, Peru: Impresiones y Servicios Generales TAWA.
- Shuler, S., & Transportation, C. D. (2015). *Best Practices for Full-Depth Reclamation Using Asphalt Emulsions*. Colorado: Colorado Department of Transportation - Research.
- Texas A&M Transportaton Institute. (2016). *IN-PLACE PAVEMENT RECYCLING: GAPS, BARRIERS, AND PATH FORWARD*. Texas, Estados Unidos .

- Ulloa-Calderón, A., Múnera-Miranda, J. C., & RICA, L. N. (2020). *Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto*. San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.
- Universidad de Costa Rica. (2016). *RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS EN MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO*. San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.
- Universidad de Costa Rica. (2016). *RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS EN MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO*. Unidad de Materiales y Pavimento, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Obtenido de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/278>
- Weather Spark. (Diciembre de 2016). *Cedar Lake Ventures, Inc.* Obtenido de Weather Spark : <https://es.weatherspark.com/y/21290/Clima-promedio-en-La-Molina-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Williams, Brett; Willis, J. Richard; Ross, T. Carter; NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. (2019). *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2018*. Washington DC: Federal Highway Administration Office of Preconstruction, Construction, and Pavements.
- Wirtgen GmbH. (2004). *Wirtgen Manual de Reciclado en frío*. Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH.
- Wirtgen GmbH. (2004). *Wirtgen Manual de Reciclado en frío*. Windhagen, Alemania. Obtenido de <https://www.yumpu.com/en/document/read/33315918/wirtgen-cold-recycling-manual-resansil>
- Wirtgen GmbH. (2012). *Wirtgen Cold Recycling Technology manual*. Windhagen, Alemania. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Kim\\_Jenkins4/publication/327738860\\_Recommendation\\_of\\_RILEM\\_TC237-SIB\\_on\\_cohesion\\_test\\_of\\_recycled\\_asphalt/links/5bab48b445851574f7e65b40/Recommendation-of-RILEM-TC237-SIB-on-cohesion-test-of-recycled-asphalt.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Kim_Jenkins4/publication/327738860_Recommendation_of_RILEM_TC237-SIB_on_cohesion_test_of_recycled_asphalt/links/5bab48b445851574f7e65b40/Recommendation-of-RILEM-TC237-SIB-on-cohesion-test-of-recycled-asphalt.pdf)

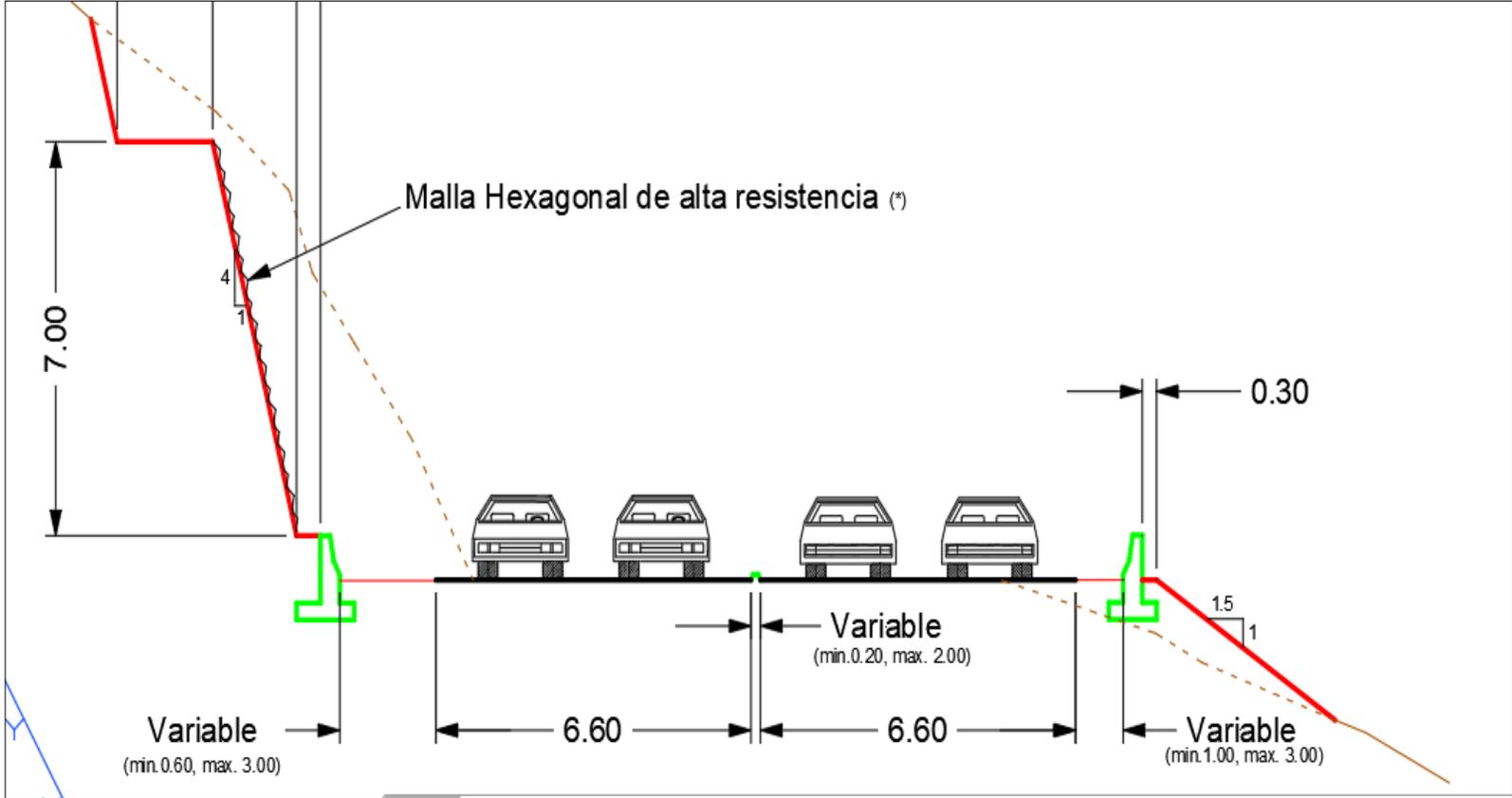
- Wirtgen GmbH. (2012). *Wirtgen Cold Recycling Technology manual*. Windhagen, Alemania. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Kim\\_Jenkins4/publication/327738860\\_Recommendation\\_of\\_RILEM\\_TC237-SIB\\_on\\_cohesion\\_test\\_of\\_recycled\\_asphalt/links/5bab48b445851574f7e65b40/Recommendation-of-RILEM-TC237-SIB-on-cohesion-test-of-recycled-asphalt.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Kim_Jenkins4/publication/327738860_Recommendation_of_RILEM_TC237-SIB_on_cohesion_test_of_recycled_asphalt/links/5bab48b445851574f7e65b40/Recommendation-of-RILEM-TC237-SIB-on-cohesion-test-of-recycled-asphalt.pdf)
- Wirtgen GmbH. (2019). *El ligante acreditado en todo el mundo para el reciclaje en frío. Betún espumado*. Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH.
- Wyk, V. A., Wood, L. E., & Purdue, U. o. (1983). *Construction of a Recycled bituminous pavement using Foamed Asphalt*. Indiana, Estados Unidos.
- Zammit, M. (2016). *Performance of Foamed Asphalt Stabilized Base Materials Incorporating Reclaimed Asphalt Pavement*. Tesis de maestría, McMaster University, Hamilton, Ontario. Obtenido de [https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/20296/2/Zammit\\_Matthew\\_S\\_2016\\_August\\_MASc.pdf](https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/20296/2/Zammit_Matthew_S_2016_August_MASc.pdf)

## **ANEXOS**

## Anexo 1 Matriz de Consistencia

TEMA: ANÁLISIS DEL USO DEL RECICLADO CON ASFALTO ESPUMADO PARA LA REHABILITACION DE PAVIMENTOS EN ZONAS URBANAS					
Problemas	Objetivos	Hipotesis	Variables	Metodología	Tipo y Diseño
Problema general	Objetivo general	Hipotesis general			
¿En qué medida el uso del reciclado con asfalto espumado genera mejoras en la rehabilitación de pavimentos en el proyecto "ampliación de la av. ferrero (La Molina – Santiago de Surco) ejecutado en el 2006"?	Analizar las mejoras que se dan con la aplicación del reciclado de pavimentos con asfalto espumado en el proyecto "ampliación de la av. ferrero (La Molina – Santiago de Surco) ejecutado en el 2006"	La aplicación del reciclado con asfalto espumado para la rehabilitación de pavimentos, nos brindara beneficios de sustentabilidad en el proyecto	Variable 1 Reciclado en frío con Asfalto Espumado  Variable 2 Ejecución de mantenimiento periódico en el proyecto con el método convencional		
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipotesis específicas	Indicadores	Para el procesamiento de los datos se analizó la información obtenida de la búsqueda, comparando un documento de otro en base a su registro histórico. De igual forma, se realizó una actualización bibliográfica e histórica de los diversos estudios realizados a través de los años, para así llegar a un consenso de continuidad y homogeneidad de la información.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de investigación: Aplicada</li> <li>• Enfoque de la investigación: Cuantitativa</li> <li>• Alcance/Nivel: Investigación descriptiva</li> <li>• Metodo: deductivo</li> <li>• Diseño: Investigación transversal, No experimental</li> </ul>
¿Qué diferencias técnicas existen en la aplicación del reciclado con asfalto espumado para la rehabilitación de pavimentos en el proyecto "ampliación de la av. ferrero (La Molina – Santiago de Surco) ejecutado en el año 2006"?	Diferenciar los aspectos técnicos que existen en la aplicación del reciclado con asfalto espumado para la rehabilitación de pavimentos en el proyecto "ampliación de la av. ferrero (La Molina – Santiago de Surco) ejecutado en el año 2006"	Se dan mejoras técnicas en la aplicación del reciclado con asfalto espumado para la rehabilitación de pavimentos	V1: Procedimiento constructivo, Maquinaria empleada  V2: Tipo de procedimiento, Proceso constructivo, Maquinaria empleada		
¿Qué diferencias se pueden dar en los plazos de ejecución de obra con el reciclado con asfalto espumado en la rehabilitación de pavimentos en el proyecto "ampliación de la av. ferrero (La Molina – Santiago de Surco) ejecutado en el año 2006"?	Medir las diferencias en los plazos de ejecución que se tienen con el uso asfalto espumado, en la intervención Ampliación de la Av. Ferrero (La Molina – Santiago de Surco), obra realizada en el 2006 con la finalidad de verificar si existen ventajas	Existen ventajas en el tiempo de proyecto en la aplicación del reciclado con asfalto espumado frente a la técnica del fresado en el proyecto	V1: Periodo de ejecución, Apertura al tránsito  V2: Periodo de ejecución, Tiempos de producción		
¿Qué beneficios ambientales aporta la aplicación del reciclado con asfalto espumado en la rehabilitación de pavimentos en el proyecto "ampliación de la av. ferrero (La Molina – Santiago de Surco) ejecutado en el año 2006"?	Describir los beneficios ambientales que se tienen al rehabilitar el pavimento reciclado con asfalto espumado	Existen beneficios ambientales en la aplicación del reciclado con asfalto espumado para la rehabilitación de pavimentos en el proyecto	V1: Consumo de combustible por maquinaria, Emisiones de CO2, Material recuperado y añadido  V2: Material eliminado, Consumo de combustible, Producción de nueva mezcla asfáltica en caliente		

**Anexo 2: Plano de diseño de Ampliación Av. Raúl Ferrero**



Anexo 3 : RECICLADORA WIRTGEN WR 2500S



Características técnicas

## Recicladora WR 2500 S



## Características técnicas

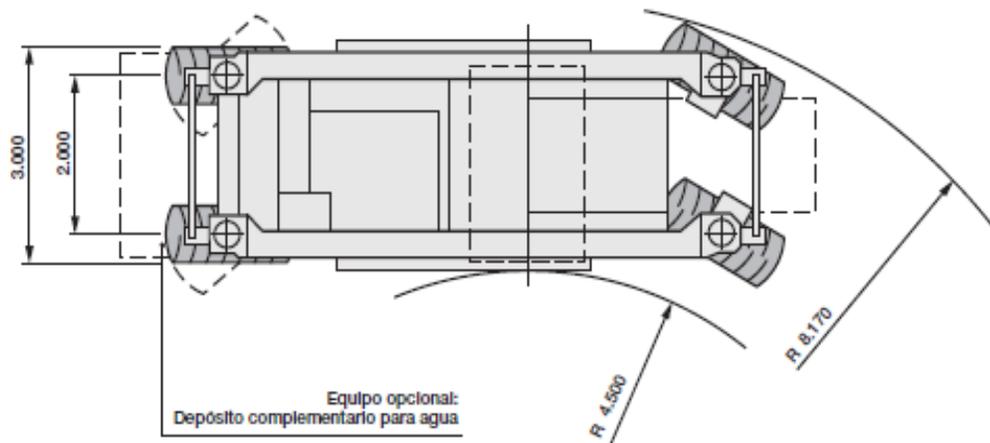
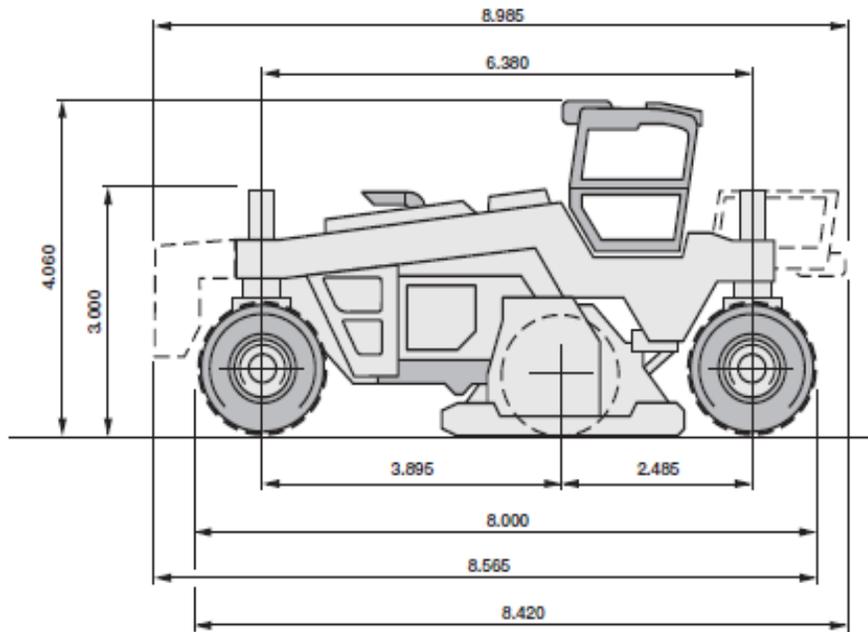
	Recicladora WR 2500 S Anchura de fresado 2.438 mm	Recicladora WR 2500 S Anchura de fresado 3.048 mm
<b>Anchura de fresado máxima</b>	2.438 mm	3.048 mm
<b>Profundidad de fresado **</b>	0 – 500 mm	0 – 500 mm
<b>Tambor de fresado</b>		
Espaciado entre picas	30 mm	37 mm
Número de picas	216	216
Diámetro del tambor de corte con picas	1.480 mm	1.480 mm
<b>Motor</b>		
Fabricante	Deutz AG	Deutz AG
Tipo	TCD 2015 V08	TCD 2015 V08
Refrigeración	Agua	Agua
Número de cilindros	8	8
Potencia	500 kW/670 HP/680 CV	500 kW/670 HP/680 CV
Revoluciones	2.100 min <sup>-1</sup>	2.100 min <sup>-1</sup>
Cilindrada	15.874 cm <sup>3</sup>	15.874 cm <sup>3</sup>
Consumo de combustible a plena carga	142 l/h	142 l/h
Consumo de combustible a 2/3 de la carga	95 l/h	95 l/h
<b>Características de traslación</b>		
1ª Velocidad de avance	0 – 15 m/min	0 – 15 m/min
2ª Velocidad de avance	0 – 40 m/min	0 – 40 m/min
3ª Velocidad de avance	0 – 80 m/min	0 – 80 m/min
4ª Velocidad de avance	0 – 200 m/min	0 – 200 m/min
Pendiente superable teórica máx.	57 %	57 %
Inclinación transversal máxima	8°	8°
Altura libre sobre el suelo	370 mm	370 mm
<b>Pesos **</b>		
Peso sobre eje delantero, depósitos llenos	17.500 daN (kg)	18.300 daN (kg)
Peso sobre eje trasero, depósitos llenos	15.500 daN (kg)	16.000 daN (kg)
Tara	31.500 daN (kg)	32.800 daN (kg)
Peso de servicio, CE **	32.000 daN (kg)	33.300 daN (kg)
Peso de servicio máx.	33.000 daN (kg)	34.300 daN (kg)
<b>Ruedas</b>		
Tipo	Diagonal	Diagonal
Medidas ruedas delanteras/traseras	28 L 26	28 L 26
<b>Capacidad de los depósitos</b>		
Combustible	1.500 l	1.500 l
Aceite hidráulico	270 l	270 l
Agua	500 l	500 l
<b>Instalación eléctrica</b>	24 V	24 V
<b>Dimensiones de transporte</b>		
Dim. de la máquina (long. x anch. x altura)	8.500 x 3.200 x 3.200 mm	8.500 x 3.800 x 3.200 mm

\*\* – La profundidad máxima de fresado puede variar del valor indicado debido a tolerancias y desgaste.

\*\* – Todos los pesos indicados se refieren a la máquina de base con cabina del conductor sin más equipamiento especial.

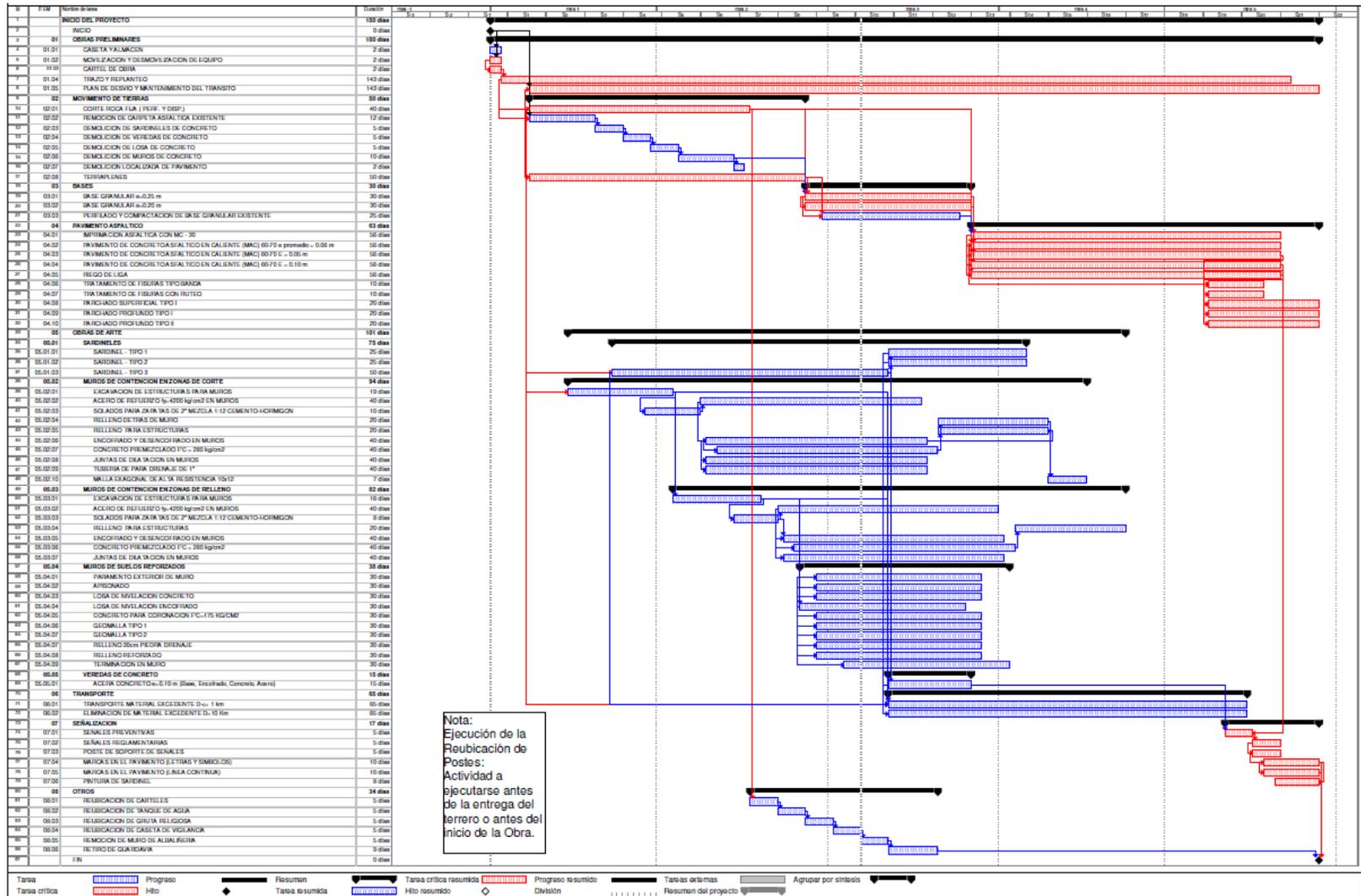
\*\* – Peso de la máquina, depósito de combustible y de agua semillero, conductor (75 kg), herramientas.

Dimensiones en mm

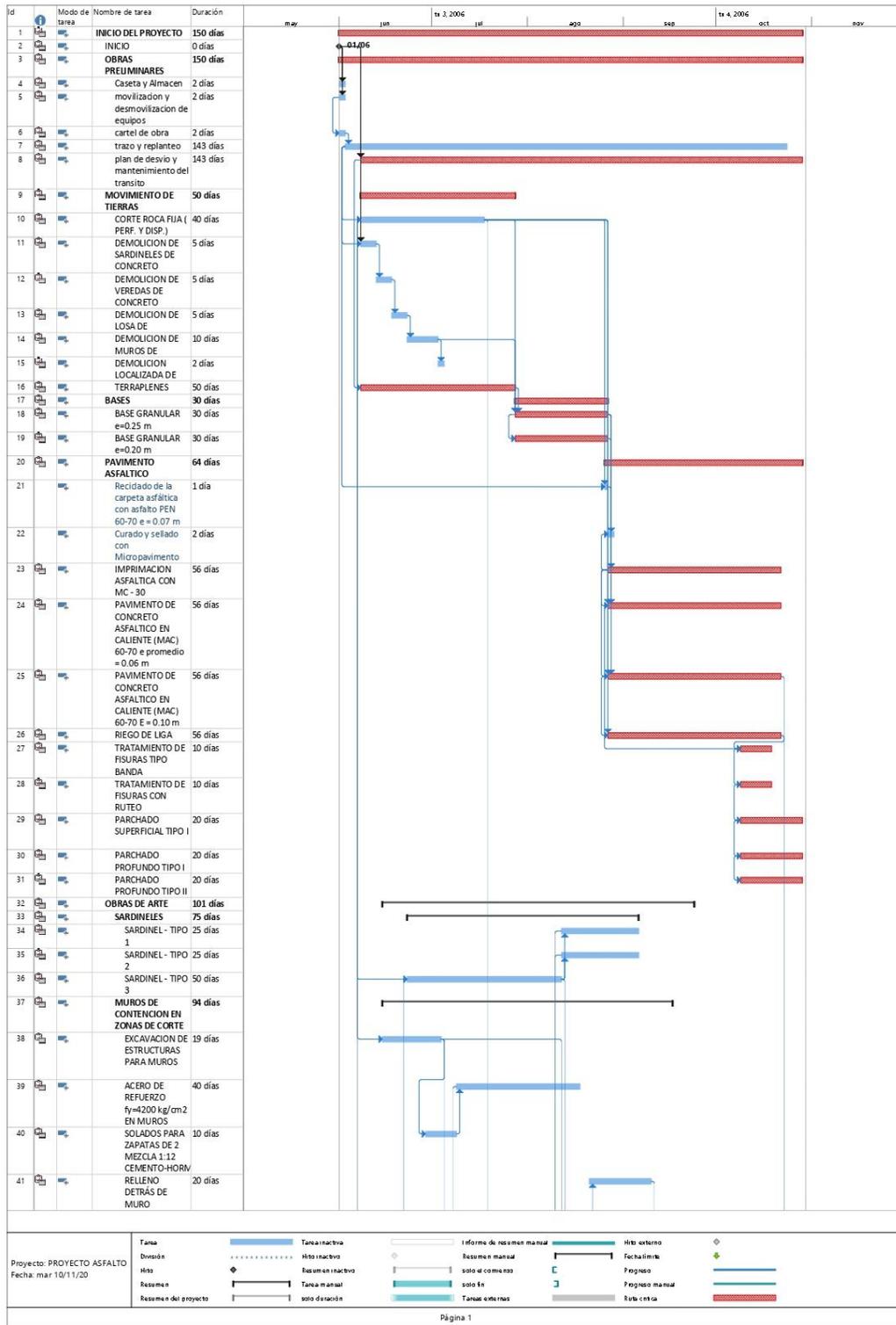


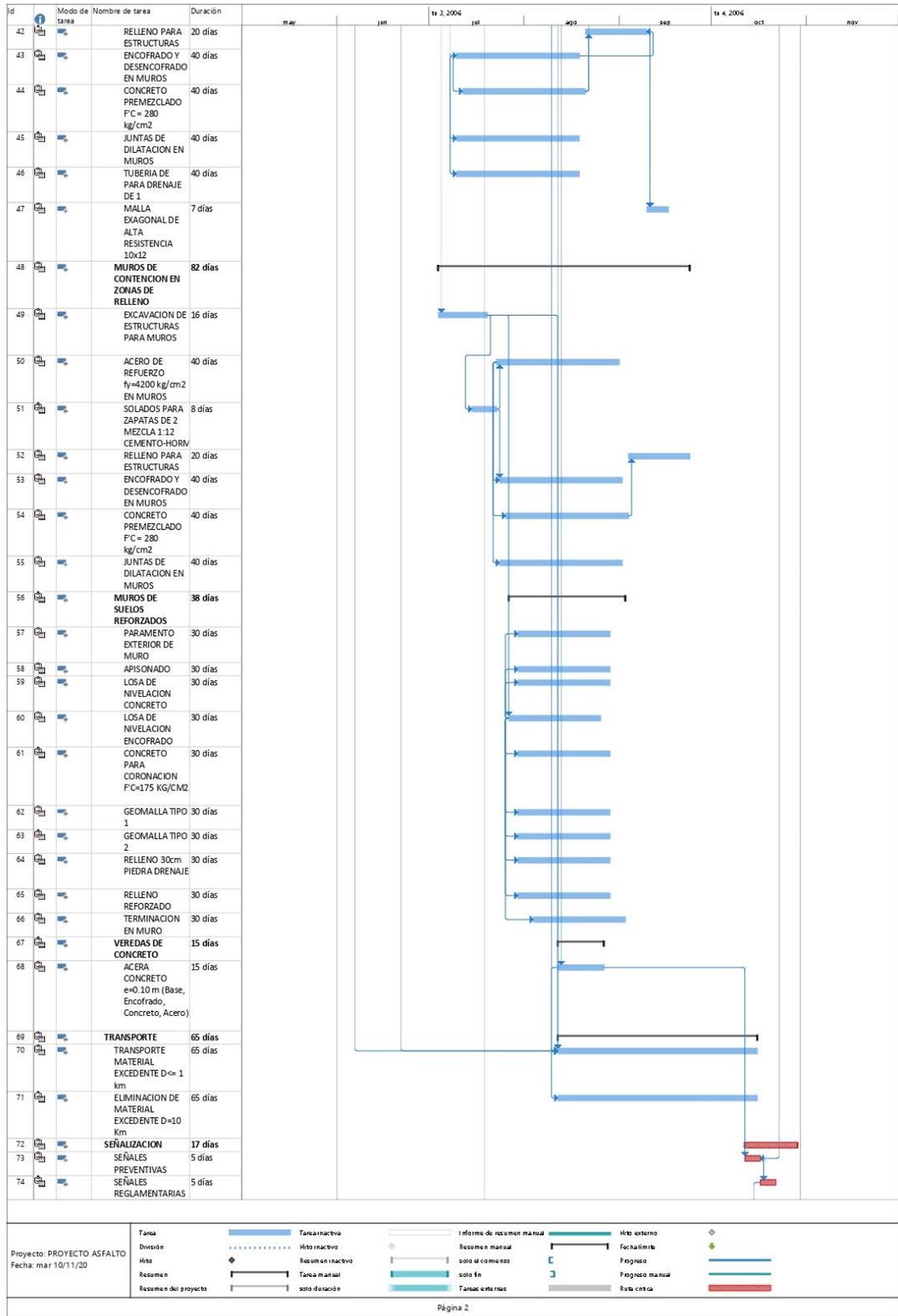
Anchura de la máquina con equipo opcional «Anchura de fresado 3.048 mm»: 3.700 mm

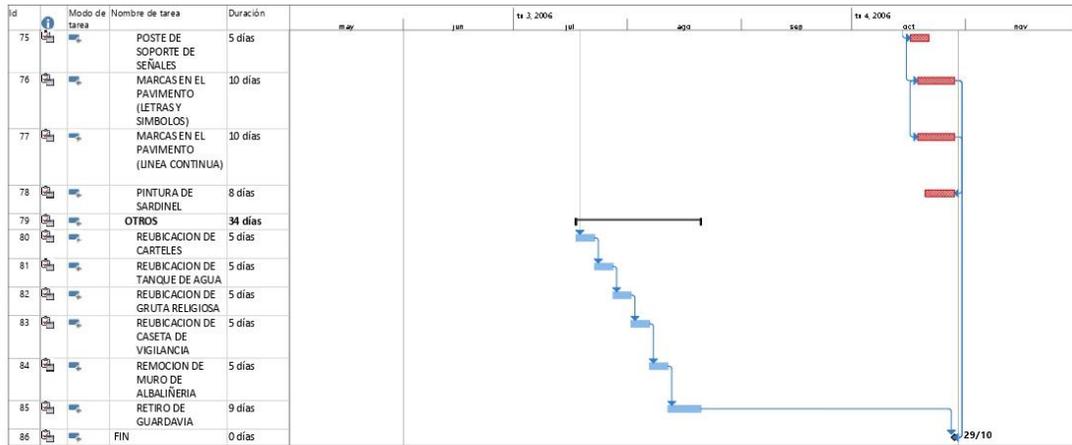
# Anexo 4 CRONOGRAMA DE AMPLICACIÓN AV. RAÚL FERRERO (TÉCNICA CONVENCIONAL)



## Anexo 5 CRONOGRAMA DE AMPLICACIÓN AV. RAÚL FERRERO (RECICLADO DE PAVIMENTO CON ASFALTO ESPUMADO)







Proyecto: PROYECTO ASFALTO  
 Fecha: mar 10/11/20

Tarea		Tarea inactiva		Informe de resumen manual		Hito externo	
División		Hito inactivo		Resumen manual		Fecha límite	
Hito		Resumen inactivo		solo al comienzo		Progreso	
Resumen		Tarea manual		solo fin		Progreso manual	
Resumen del proyecto		solo desación		Tareas críticas		Ruta crítica	

Página 3