

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Civil

“APLICACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES RECICLADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE NUEVOS PAVIMENTOS ECONÓMICOS EN EL PERÚ-2020” Revisión sistemática

Trabajo de investigación para optar el grado de:

Bachiller en Ingeniería Civil

Autor:

Wilson Valerio Bejarano Benites

Asesor:

Ing. Mg. Gonzalo Hugo Díaz García

Trujillo - Perú

2020



DEDICATORIA

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi familia

Por su cariño y paciencia que me dieron fortaleza para seguir mis estudios.

Por su comprensión y todo el apoyo brindado durante mi vida

AGRADECIMIENTO

Agradezco a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Privada del Norte, por los conocimientos adquiridos durante los ciclos académicos que curse durante 5 años.

A mis amigos y compañeros, quienes compartieron momentos, experiencias y conocimientos que me permitieron idear esta investigación.

Al Ingeniero Gonzalo Díaz García, por el apoyo y asesoramiento impartido para la elaboración de esta investigación. Por su empatía y compromiso para con quienes hemos sido, sus estudiantes.

ÍNDICE

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE ECUACIONES	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. Realidad Problemática.....	9
1.2. Formulación del Problema	12
1.3 Objetivos	12
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	13
2.1. Tipo de Investigación.....	13
2.2. Técnicas e Instrumentos de recolección y análisis de datos	13
2.3. Análisis de Datos e Información	16
CAPÍTULO III. RESULTADOS.....	36
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	49
4.1. Discusión	49
4.2. Conclusiones	53
4.3. Recomendaciones	54
REFERENCIAS	55
ANEXOS.....	59
ANEXO 01. Ejemplo de Diseño de Pavimento Flexible. Método AASHTO 93	59
ANEXO 02. Diseño de Pavimento. En Excel.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01. Comparación de reciclado en frío y en caliente	29
Tabla 02. Comparación de estabilizaciones de reciclado en frío con cemento y emulsión asfáltica.	30
Tabla 03. Ventajas y desventajas del asfalto espumado.	32
Tabla 04. Resumen de Metodología y Resultados de investigaciones anteriores.....	36-48
Tabla 05. Numero de Repeticiones Acumuladas de Ejes Equivalentes de 8.2ton. en el Carril de Diseño para Pavimentos Flexibles, Semirrígidos y Rígidos	59
Tabla 06. Valores recomendados de nivel de confiabilidad para una sola etapa de diseño (10 a 20 años) según rango de tráfico	60
Tabla 07. Valores de Desviación Estándar Normal correspondiente a los Niveles de Confiabilidad	61
Tabla08 Valores m, para modificar los Coeficientes Estructurales o de Capa de Base y Subbase sin tratamiento, en pavimentos flexibles	63
Tabla 09 Coeficientes estructurales de materiales en el pavimento	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01. Etapa de selección de la Información	14
Figura 02. Etapas de la búsqueda de información	15
Figura 03. Máquinas Fresadoras o perfiladoras	17
Figura 04. Extractores Centrífugos.	19
Figura 05. Ensayo de Compresión variando % de Asfalto	21
Figura 06. Proceso de falla a tracción indirecta	23
Figura 07. Representación de la microestructura de material reciclado	24
Figura 08. Ejemplo de planta de asfalto en caliente	29
Figura 09. Esquematización de reciclado in situ con asfalto espumado	32
Figura 10. Muestra de material espumado in situ.	33
Figura 11. Proceso de Reciclado	36

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 01. Cálculo del Contenido de Asfalto.....	19
Ecuación 02. Cálculo del Porcentaje Retenido del Suelo en cada Tamiz.....	20
Ecuación 03. Cálculo del Porcentaje Que Pasa cada Tamiz.....	20
Ecuación 04. Porcentaje de asfalto por peso de la mezcla total	25
Ecuación 05. Porcentaje de asfalto nuevo en la mezcla reciclada.....	26
Ecuación 06. Porcentaje de asfalto en la mezcla recuperada de pavimento.....	26
Ecuación 07. Modulo Resiliente.....	60
Ecuación 08. Ecuación General de Diseño	62

RESUMEN

Este trabajo de investigación recopila información científica sobre la reutilización de pavimentos flexibles para la construcción de pavimentos económicos nuevo. El reciclaje de pavimentos flexible es una alternativa de solución económica aplicando ingeniería y reduciendo impacto ambiental, permitiendo reutilizar materiales (en especial de la carpeta de rodadura, para su reutilización en campo.

En la actualidad, existen muchos métodos de reciclaje de pavimentos flexibles, estos se describen en caliente y frío. El procedimiento consiste en remover la carpeta de rodadura, la cual puede ser extraída con una fresadora para rescatar el cemento asfáltico y agregados y así, remezclarlos con o sin adición de emulsiones u otros materiales ligantes, con la finalidad de construir nueva pavimentación. En el caso del reciclado en frío se tritura el material y se mezcla con aditivos estabilizadores como cemento o emulsión asfáltica. Para los reciclados en caliente, se adiciona cemento asfáltico.

En estos últimos años se ha implementado la técnica del asfalto espumado el cual consiste en remover pavimento envejecido, y mezclarlo con cemento y agua, con la finalidad de producir variaciones volumétricas, dando como resultado un material viscoso y comprensible, que luego de extendido y compactado obtiene gran resistencia a las solicitaciones de carga.

En general, la aplicación de pavimentos reciclados resulta sostenible, Pues en todos los casos investigados, ha cumplido con buen desempeño estructural, además de reducir el impacto ambiental (al consumir poco material granular virgen y reducir emisiones de CO) y resultan bastan económicas

Palabras clave: Pavimentos flexible reciclado, niveles de servicio, cemento asfáltico, pavimentos, carpeta de rodadura (,)

ABSTRACT

This research work gathers scientific information on the reuse of flexible pavements for the construction of new economic pavements. Flexible pavement recycling is an economical solution alternative by applying engineering and reducing environmental impact, allowing materials (especially from the rolling folder, to be reused in the field.

Currently, there are many methods of recycling flexible pavements, these are described in hot and cold. The procedure involves removing the rolling folder, which can be extracted with a milling machine to rescue asphalt cement and aggregates and thus remix them with or without the addition of emulsions or other binding materials, in order to build new paving. In the case of cold recycling, the material is crushed and mixed with stabilizing additives such as cement or asphalt emulsion. For hot recycling, asphalt cement is added.

In recent years the technique of foamed asphalt has been implemented which consists of removing aged pavement, and mixing it with cement and water, in order to produce volumetric variations, resulting in a viscous and understandable material, which after spreading and compacting obtains great resistance to load requests.

In general, the application of recycled pavements is sustainable, as in all cases investigated, it has performed well structural performance, in addition to reducing the environmental impact (by consuming little virgin granular material and reducing CO emissions) and are economical enough

Keywords: Recycled flexible flooring, service levels, asphalt cement, pavements, rolling folder (,)

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El pavimento es una estructura compuesta de capas granulares de distintos materiales. En específico, un pavimento flexible consta de capas de material granular compactado y una carpeta de rodadura elaborada con cemento asfáltico. Esta estructura está sujeta a la acción continua de tráfico y factores meteorológicos; estos factores y la depreciación de los materiales que componen esta estructura, dan paso a un deterioro progresivo, lo cual resulta en la disminución de los niveles de seguridad y confort de la vía. Es común que una vez deteriorada la estructura del pavimento o cumplido su vida útil, se estila realizar la rehabilitación de la vía con la finalidad de recuperar los niveles de servicio del pavimento; en los casos donde se encuentre comprometida las carpetas de material granular compactado, por lo general se reconstruye, dando lugar a la demolición y eliminación de los materiales envejecidos del pavimento. Estos materiales envejecidos se convierten en material a desechar, lo cual incrementa el impacto ambiental producto de prácticas constructivas. Por ello, con la sensibilización social con respecto a la necesidad de preservar el medio ambiente, resulta factible el reciclaje de estos materiales, que al ser reutilizados e incorporándose algunos aditivos o emulsiones resultan de gran trabajabilidad y resistencia para construir pavimentos.

En países europeos como España, se cuenta con normativa vigente sobre el reciclaje de pavimentación, la cual sirve de gran aporte, en las diversas clasificaciones de reciclaje de pavimentos flexibles. Según se expresa en la Orden Circular 08/01 de la normativa de Carreteras de España, desde el año 2002, se detallan las tres técnicas de reciclado in situ las cuales consisten en reciclado con emulsión de capas bituminosas, con cemento de capas de firme, en central en caliente de capas bituminosas.

Existe evidencia amparada en normativa y prácticas constructivas internacionales que el reciclaje de pavimentos permite rescatar la totalidad del material envejecido, y se puede utilizar en la creación de nuevos pavimentos. Para tal fin, resulta necesaria la realización de algunos ensayos y controles de calidad estrictos durante el rescate y la implementación de la nueva vía.

En países, como Colombia y México se han implementado buenas prácticas de construcción, destacando entre ellas, el reciclaje de Pavimentos Flexible. Bibliografía colombiana, señalan técnicas de reciclaje in situ y en planta, incluso formas de realizar el nuevo cálculo de los espesores de pavimentos flexibles con carpetas asfálticas recicladas.

En el Perú existen investigaciones sobre el reciclaje de pavimentos, sin embargo, son muy pocas la ejecución de obras pavimentarias con pavimentos flexible reciclado; sigue siendo una práctica en nuestro país, el bacheo parcial como una solución a deterioro superficial de carpeta de rodadura. En las prácticas constructivas y en la elaboración de expedientes técnicos se considera siempre la demolición y eliminación de los materiales envejecidos de pavimento, lo cual constituye una gran inversión no solo para eliminar el material, sino para la adquisición de nuevos materiales.

En noviembre del 2016, llega a Perú la primera planta móvil de asfalto reciclado, la cual fue adquirida por Cosapi Y Mota-Engil Perú para realizar el reciclado de pavimentos y brindar un gran aporte a la sostenibilidad de obras pavimentarias. Esta planta viene trabajando en tramos carreteros de Tacna y en la ciudad de Arequipa.

En la ciudad de Trujillo, no se han realizado obras que contemplen el reciclado de pavimentos flexibles, lo cual se ha hace más evidente en el mal estado de su red vial local, la cual se encuentra envejecida, en su mayoría. Para las autoridades y entidades gubernamentales encargadas de obras de pavimentación, solo existen soluciones poco útiles

y sin justificación técnica. Es común que nuestras autoridades consideren el bacheo periódico una solución a los bajos niveles de servicio de nuestra red vial, sin embargo, estas soluciones resultan ser muy costosas en el tiempo; al igual que reconstruir pavimento resulta de gran inversión del estado por lo cual, la poca factibilidad de los proyectos manejados por el Estado y la mala gestión resultan, en la constante degradación de nuestra red vial.

1.2. Formulación del problema

¿Es posible aplicar pavimentos flexibles reciclados en la construcción de nuevos pavimentos económicos en el Perú?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la factibilidad de la aplicación de reciclaje de pavimentos flexibles para la construcción de nuevos pavimentos en el Perú

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar los tipos de reciclaje de pavimentos flexibles
- Comprender el proceso de obtención y construcción de pavimentos reciclados.
- Expresar los resultados de investigaciones de pavimentos flexibles reciclados.
- Conocer normativas y buenas prácticas de construcción de pavimentos flexibles reciclados.
- Evaluar la aplicación y sostenibilidad del uso de pavimentos flexibles reciclados como solución económica para la construcción de nuevos pavimentos.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación correspondiente a este documento se refiere una revisión sistemática. Este es un estudio cuantitativo no experimental que reúnen datos y sustento teórico-científico de fuentes bibliográficas. Corresponde un estudio retrospectivo y descriptivo de datos e información recopilada de estudios, investigaciones y bibliografías diversas.

Una revisión sistemática corresponde a una investigación metodológica que permite recolectar información detallada sobre un tema específico, además nos permite profundizar y entender conocimientos con respecto al tema investigado; resulta de gran importancia consultar fuentes bibliográficas de nivel académico confiable, para nuestro caso hemos recopilado información de tesis de pregrado y posgrado, además de bibliografía netamente teórica en tecnología de pavimentos.

2.2. Técnicas e Instrumentos de recolección y análisis de datos

Para el desarrollo de esta investigación, se consideró como primer punto la búsqueda del problema, el cual se detalla en el acápite 1.1 Realidad Problemática. Para tal fin, se tuvieron que realizar técnicas de recolección de datos las cuales consisten en la Selección de Información, el Procedimiento de búsqueda de Información y la Recopilación de datos de interés.

2.2.1. Selección de Información

Para determinar la cantidad de información sobre tesis de pregrado, posgrado, además de libros, revistas y artículos científicos se realizó un

proceso de selección que consiste en tres etapas, las cuales se detallan en la

Figura 01.

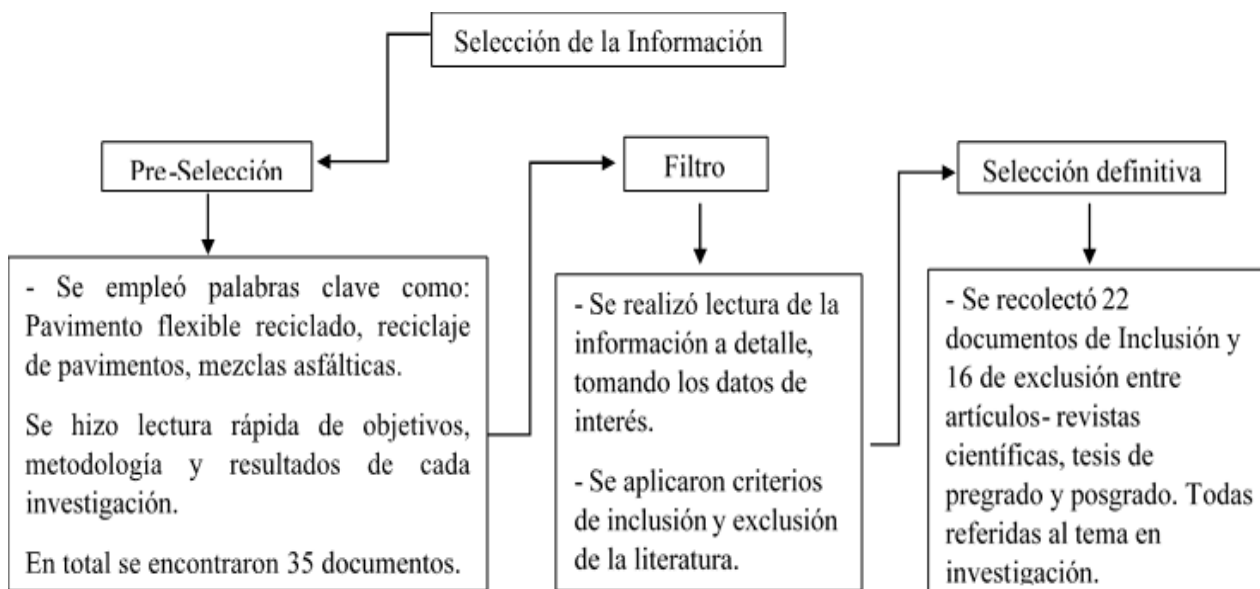


Figura 01. Etapa de selección de la Información. Se muestran las etapas de

Pre-selección, Filtro y selección definitiva de información. **Fuente: Propia**

2.2.2. Procedimiento de búsqueda de Información

La búsqueda de la información se realizó de forma digital, para lo cual se emplearon portales WEB, en su totalidad de libre acceso a público. Se utilizaron palabras clave referentes a reciclaje de pavimentos flexibles. De las investigaciones e información consultada, en su mayoría, datan de entre los años 2009-2019, todas publicadas en español. Se consideró una tesis doctoral del año 2003, esto debido a su calidad investigativa y su gran aporte teórico en a la investigación. Además de una investigación del año 2007, que destaca sobre su calidad aplicativa de pavimentos reciclado in situ en la ciudad de Lima.

Se tomaron algunos criterios de discriminación de data, no se tomaron en consideración la información que no se encontraba con fecha de publicación o

cuya fuente no se considere confiable. Se esquematiza los procedimientos o criterios empleados en la Búsqueda de Información. Ver Figura 02.

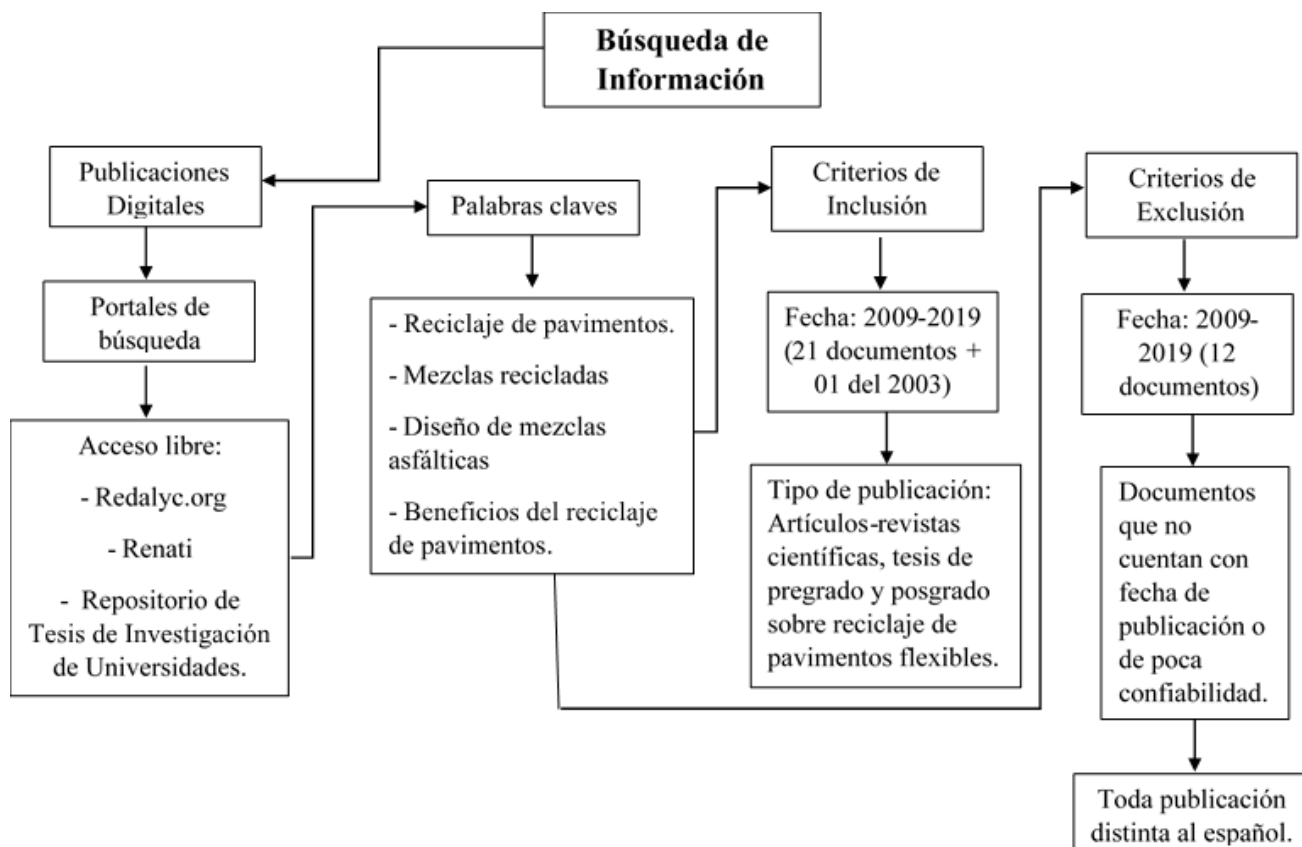


Figura 02. Etapas de la búsqueda de información. En su mayoría publicaciones digitales sobre reciclaje de pavimentos, se incluyeron 22 documento de investigación y se excluyeron 13. Fuente Propia.

2.2.3. Recopilación de datos de Interés

Una vez seleccionada la información, se consideró leer los documentos en su totalidad. Se tuvo especial consideración en los ítems de interés correspondiente a problemática, objetivos, metodología, resultados y discusión, conclusiones y recomendaciones, así como de las referencias bibliográficas de las investigaciones recopiladas.

De estas se tomaron los objetivos y los resultados obtenidos, así como parte de las conclusiones que se exponen en los diversos documentos recopilados.

Algunos datos que resultaron de importancia para esta investigación fueron los temas relacionados a:

- Reciclaje de Pavimentos
- Ensayos de laboratorio para determinar propiedades de las mezclas recicladas
- Diseño de mezclas asfálticas recicladas
- Beneficios del reciclaje de Pavimentos flexibles.

2.3. Análisis de Datos e Información

2.3.1. Análisis de información

2.3.1.1. Pavimentos flexibles reciclados

Un pavimento flexible reciclado consiste en reutilizar un pavimento en mal estado mediante un tratamiento o adición de algún estabilizador como: cemento asfáltico, emulsión asfáltica cemento, u otro material que permite al pavimento avejentado ser un refuerzo o parte de una nueva calzada. El hecho de que un pavimento se encuentre en mal estado, no significa que no sirva, siempre y cuando se realice un tratamiento, este pavimento envejecido puede adquirir características semejantes a un pavimento nuevo.

2.3.1.2. Tipos de Reciclaje de Pavimentos

a. Reciclaje superficial

El reciclaje superficial se refiere al retratamiento de la superficie del pavimento en bajos espesores, generalmente entre 2.5 y 5 centímetros. Este

tipo de reciclaje consiste en recuperar parte de la carpeta asfáltica deteriorada, en caso que las fallas del pavimento no sean de tipo estructural. En este tipo de reciclaje el procedimiento a seguir consiste en el fresado, cepillado escarificado, triturado y adición de algún estabilizador, con la finalidad de reacondicionar y compactar la nueva superficie con material reciclado. Este proceso puede realizarse en frío (con alguna emulsión) o en caliente (por lo general con pequeños porcentajes de cemento asfáltico).



Figura 03. Máquinas Fresadoras o perfiladoras. En proceso de reciclado de material de pavimentos envejecidos, en la carretera Nacional PE 3SC Jauja – Huancayo, año 2014. Fuente: Chumán, J. 2017, p. 105

b. Reciclaje en frío

El reciclaje en frío consiste en rehabilitar el pavimento asfáltico a una profundidad mayor de 2.5 cm, involucrando o no el material de la capa base. En este tipo de reciclaje se debe escarificar el material y posteriormente, triturarlo hasta un tamaño adecuado para después ser mezclado con un agente o aditivo en pequeños porcentajes. Como su propio nombre lo dice, este proceso se realiza en frío, por lo que se suele utilizar adiciones de emulsiones asfálticas, cementos Portland, cal, mezclas calizas o cenizas volantes.

c. Reciclaje en caliente

El reciclado en caliente consiste en escarificar el espesor deseado del pavimento existente y transportar el material trozado a una planta para ser triturado y clasificado granulométricamente, para luego ser remezclado en caliente; a esta mezcla se agregan materiales nuevos que incluyen agentes reciclados y adiciones o agregados, como cemento asfáltico nuevo. Esta mezcla remezclada se coloca y compacta en caliente con métodos convencionales de construcción. Esta mezcla en caliente puede utilizarse como capa superficial de pavimento, o como material de base, dependiendo del tipo de vía que se construye.

2.3.1.3. Parámetros de Diseño de Mezclas Asfálticas Recicladas

a. Lavado Asfáltico

En las mezclas recicladas rehabilitadas las propiedades del ligante son difíciles de medir pues existe un mezclado parcial entre el ligante del reciclado, el de la mezcla de aporte y el rehabilitador. Uno de los primeros parámetros a considerar en el desarrollo de pavimentos flexibles reciclados consiste en conocer el restante de cemento o ligante asfáltico en el pavimento envejecido, el cual será mezclado con materiales vírgenes (cemento, emulsión, cemento asfáltico, etc.) por lo que se debe determinar con estos valores que cantidad de adición se debe aplicar para las solicitudes de carga o el nivel de servicio proyectado de la vía.

Resulta de gran importancia conocer la composición de los materiales pétreos y ligante asfáltico presentes en el pavimento reciclado. Este procedimiento se realiza mediante el Ensayo de Lavado Asfáltico, normado en la MTC E502.



Figura 04. Extractores Centrífugos. Separa los agregados del asfalto con solvente tricloroetileno. Marca: Soiltest, Inc. (izquierda) y Freesia Macross (derecha). Fuente: Rodríguez, C & Rodríguez J., 2004, p. 140

El ligante del pavimento es extraído con tricloroetileno, tricloroetano, cloruro de metileno o benceno, empleando el equipo de extracción aplicable al método particular (por lo general un extractor de núcleo). El contenido de asfalto se calcula por diferencia de pesos del agregado extraído, del contenido de humedad y del material mineral en el extracto. El contenido de asfalto se expresa como porcentaje en peso de la mezcla libre de humedad.

Ecuación 01. Cálculo del Contenido de Asfalto

$$\text{Contenido de Asfalto \%} = \frac{(W1-W2)-(W3+W4)}{W1-W2}$$

Donde:

W1= Peso de la porción de ensayo

W2= Peso del agua en la porción de ensayo

W3= Peso del agregado mineral extraído

W4= Peso de la materia mineral en el extracto

b. Granulometría

Otro parámetro que se debe evaluar en los pavimentos reciclados es la granulometría del material triturado y las carpetas granulares que se

reutilizaran. Con el objetivo de clasificar y determinar la distribución de partículas, además se verifica si la gradación de los materiales se ha visto interrumpida por exposición (dependiendo del estado envejecido del pavimento) y se requiere de complementar el material granular; o si resulta adecuada su colocación en la construcción del nuevo pavimento.

Se debe observar la tendencia actual al utilizar mezclas densas de granulometrías más gruesas, con la finalidad de incrementar la resistencia estructural y disminuir la susceptibilidad a la deformación permanente (roderas). Es conveniente realizar evaluaciones metódicas del desempeño de las mezclas densas con las Especificaciones actuales (Superpave y SCT 2008) para cuantificar sus beneficios.

Ecuación 02. Cálculo del Porcentaje Retenido del Suelo en cada Tamiz

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso retenido en el tamiz}}{\sum \text{Pesos retenidos en cada tamiz}} \times 100$$

Una vez obtenido el porcentaje retenido en cada tamiz, se puede calcular el porcentaje retenido acumulado para luego calcular el porcentaje pasante con una simple diferencia entre el valor de 100 con el porcentaje retenido acumulado.

Ecuación 03. Cálculo del Porcentaje Que Pasa cada Tamiz

$$\% \text{ Que Pasa} = 100\% - \% \text{ Retenido Acumulado}$$

Con los valores obtenidos se grafican curvas granulométricas que representan la distribución de las partículas del material evaluado. Estos valores se contrastan con las gradaciones o husos granulométricos del Manual

de Carreteras del MTC, necesarios para comprobar la calidad del material y si es justificable su uso o aplicación en la pavimentación.

c. Compresión simple de mezclas asfálticas

La finalidad de este procedimiento es hallar el porcentaje óptimo de asfalto para para obtener la máxima resistencia a la compresión en seco, en húmedo y conservada.

Una vez conocido los porcentajes de cementos asfáltico y ligantes presentes en la mezcla envejecida, se debe determinar la cantidad ideal de material virgen que se debe adicionar para conseguir la máxima resistencia o la sollicitación de carga para el diseño de la vía. Para tal fin, se debe adicionar en pequeños porcentajes la adición; investigaciones señalan que los porcentajes ideales de cemento asfáltico en mezclas asfálticas corresponde a valores entre 4.5% y 7%, por lo que al conocer el porcentaje de cemento asfáltico de la mezcla envejecida se deberá adicionar pequeños porcentajes de material ligante, para mejorar la resistencia de la mezcla asfáltica.



Figura 05. Ensayo de Compresión variando % de Asfalto. Fuente:

Pérez, S & Lemus, W., 2018 p. 57

d. Estabilidad y Flujo Marshall

El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de cuatro pulgadas de diámetro con una altura de dos pulgadas y media, preparadas según lo indica la norma MTC E504 sobre Resistencia de Mezclas Bituminosas empleando el Aparato Marshall, rompiéndolas posteriormente en la prensa Marshal (a una velocidad de 2 plg/min), determinando su estabilidad y deformación. Si se desean conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas así fabricadas, se determinarán previamente los pesos específicos de los materiales empleados y de las probetas compactadas, antes del ensayo de rotura, de acuerdo con las normas correspondientes.

El procedimiento se inicia con la preparación de probetas de ensayo, para lo cual los materiales propuestos deben cumplir con las especificaciones de granulometría y demás, fijadas para el proyecto. Además, deberá determinarse previamente el peso específico aparente de los agregados, así como el peso específico del asfalto, y el análisis de densidad-vacíos.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto para una gradación de agregados específica o preparada, se deberá elaborar a una serie de probetas con distintos porcentajes de asfalto, de tal manera que, al graficar los valores obtenidos después de ser ensayadas, permitan determinar ese valor “óptimo”.

Cuando se utilizan asfaltos líquidos, se preparan y compactan muestras de prueba con distintos porcentajes de asfalto líquido como en el caso del cemento asfáltico, excepto que la temperatura de compactación se toma con base en la viscosidad del asfalto después del curado o sea cuando ha liberado la cantidad especificada de solventes.



Figura 06. Proceso de falla a tracción indirecta. Fuente: Pérez, S & Lemus, W., 2018, p. 61

e. Simulación de Rueda Cargada de Hamburgo

El procedimiento de este ensayo se encuentra en la norma AASHTO T324. Para el cual se realiza un vaciado de mezcla asfáltica, produciendo unas losas rectangulares que simulan carpeta asfáltica o de rodadura. Se realizan 20000 movimientos de roderas aplicadas sobre la superficie, deformación máxima de 20mm, a una temperatura de 50°C.

El ensayo consiste en determinar la deformación de la losa o placa de concreto asfáltico conforme aumente el número de pasadas de rodera. El ensayo concluye al cumplir las 20000 pasadas o cuando se obtenga una deformación de 20 mm (lo que ocurra primero). Mediante la prueba de la Rueda Cargada de Hamburgo se pudo evaluar el desempeño ante la formación de roderas de placas de concreto asfálticos fabricados con diferentes cementos asfálticos.

Cabe mencionar que la prueba de simulación de Rueda Cargada de Hamburgo, considera fallas de humedad en la mezcla bituminosa, además logra predecir la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a sufrir deformaciones permanentes, en los pavimentos de nuestro país se ha hecho habitual, que con los incrementos de los volúmenes de tráfico y las solicitaciones de carga sobre la carpeta de rodadura (debido a los vehículos pesados que circulan en nuestra red vial, que anteriormente utilizaban presiones de inflado de 80 psi, en la actualidad pueden llegar a 120 psi, en suma a la circulación lenta de estos vehículos, originan mayores presiones sobre el pavimentos), generando incidencia a producir fallas o deformaciones permanentes.

2.3.1.4. Procedimiento de diseño para Pavimentos Reciclados.

El proceso de diseño de las mezclas asfálticas en caliente, al igual que las mezclas de pavimentos reciclados comprenden dos etapas de diseño la de diseño de mezcla y la de diseño estructural del pavimento. Para el primer caso se busca determinar la combinación ideal de material reciclado y material virgen para mejorar las características de la carpeta. Y en el diseño estructural, se busca determinar los espesores de las capas estructurales del pavimento.

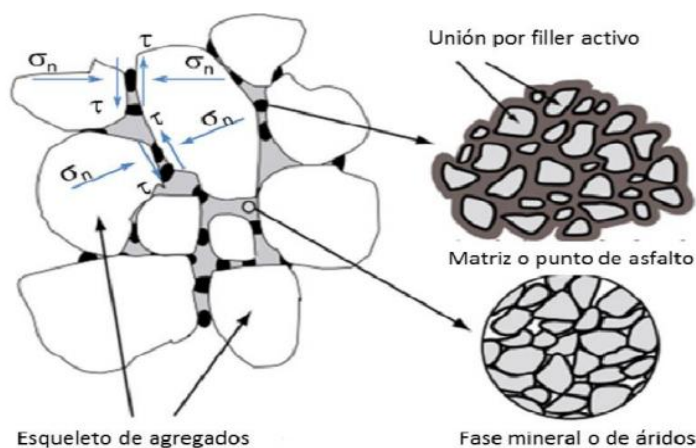


Figura 07. Representación de la microestructura de material reciclado.
Fuente. (Martucci, 2018, pp51)

En la actualidad no existe un método estandarizado para el diseño de pavimentos reciclados en frío. Sin embargo, la mayoría de métodos utilizados en el diseño de mezclas recicladas se complementan con el Ensayos de Estabilidad y Flujo Marshall, debido a la sencillez de su ejecución. Y para el diseño estructural de espesores se sigue utilizando la metodología AASHTO 93 a través de la determinación del Módulo resiliente del suelo y el CBR de la subrasante.

a. *Diseño de Mezclas Asfálticas Recicladas en Caliente.*

Una vez extraídas las muestras recicladas de mezclas asfálticas, es necesario realizar un diseño, para nuestro caso se realizará un diseño en caliente de mezcla asfáltica. Montejo 2010, nos indica las secuencias a seguir para el procedimiento de diseño, los cuales se describen a continuación:

1. *Agregados combinados en la mezcla reciclada.* Usando la granulometría del agregado obtenido del pavimento asfáltico, del material granular recuperado, si lo hay y el agregado nuevo, se calcula una granulometría combinada que reúna los requerimientos deseados, que son los mismos exigidos para mezclas convencionales de concreto asfáltico. (Montejo, 2010, Pág. 291)
2. *Demanda de asfalto para la combinación de agregados.* Puede determinarse por el ensayo CKE (equivalentes centrífugos de kerosene) o estimarse con la fórmula empírica. (Montejo, 2010, Pág. 291)

Ecuación 04. Porcentaje de asfalto por peso de la mezcla total.

$$P_c = 0.035 a + 0.045 b + Kc + F.$$

Dónde: P_c = Porcentaje de asfalto por peso de la mezcla total,

a = Porcentaje de agregado, mayor a 2.36mm.

b = Porcentaje de material entre 2.36mm. y 75 um.

c = Porcentaje de partículas menores a 75 μm .

$K = 0.15$, si el porcentaje inferior a 75 μm está entre 11 y 15;
0.18 si su porcentaje está entre 6 y 10; 0.20 si es menor o igual a
5.

F = Varía entre 0 y 2.0% de acuerdo a la absorción del
agregado. La fórmula se basa en un peso específico o promedio
de 2.60 a 2.70. Si no se dispone de información. Se puede
tomar un valor de 0.7 a 1.0, rango dentro del cual se encuentran
la mayoría de los casos. (Montejo, 2010, Pág. 293)

3. *Porcentaje de asfalto nuevo en la mezcla.* La cantidad de asfalto nuevo por
adicionar en las mezclas recicladas es igual a la demanda total, menos el
porcentaje de asfalto del pavimento asfáltico recuperado. (Montejo, 2010,
Pág. 293)

Ecuación 05. Porcentaje de asfalto nuevo en la mezcla reciclada.

$$Pr = Pc - Pa \times \frac{Pp}{100}$$

Dónde: Pr = Porcentaje de asfalto nuevo en la mezcla reciclada.

Pc = Porcentaje de asfalto por peso de la mezcla total.

Pa = Porcentaje de asfalto en la mezcla recuperada del
pavimento.

Pp = Porcentaje en que interviene el pavimento asfáltico
recuperado dentro de la mezcla reciclada.

Si se requiere expresar el porcentaje de asfalto como porcentaje con respecto
al peso de los agregados:

Ecuación 06. Porcentaje de asfalto en la mezcla recuperada de pavimento

$$Pa = \frac{100 \times Pr}{100 - Pr}$$

4. *Selección del grado del asfalto nuevo.* La cantidad de cemento asfáltico nuevo se expresa como porcentajes del contenido total del ligante, dividiendo el porcentaje de asfalto nuevo por la demanda calculada en la mezcla y multiplicando por 100. (Montejo, 2011, pág. 295)
5. *Tanteo de diseño de la mezcla y selección de la fórmula de trabajo.* Se hacen tanteos usando el método Marshall o el Hveem. El contenido de asfalto se puede ajustar cambiando la cantidad de asfalto nuevo, hasta llegar a una mezcla que cumpla con el criterio del procedimiento de diseño utilizado. (Montejo, 2011, pág. 295).

b. Diseño estructural de pavimentos reciclados en caliente, según Guía para diseño de estructuras de pavimento ASHTO 93

Es un método empírico-experimental que nos permite determinar el espesor de las capas de materiales granulares y carpeta de rodadura. Resulta necesario para el método conocer valores como:

- **Estudio de Tráfico**, que se refiere al volumen de vehículos livianos y pesados que transitan sobre la vía y se expresa en Número de Ejes Equivalentes (EE)
- **CBR de la subrasante**, con el valor de soporte CBR se puede determinar el módulo resiliente del suelo.
- **Tipo de mezcla**, según el tipo de agregado (chancado, triturado, natural, etc.) y la forma de mezcla (en planta, mezclador rotatorio, niveladora, etc.)

La actual “Guía para el diseño de estructuras de pavimento” (AASHTO, 1993), no considera alguna correlación específica para la determinación de un coeficiente estructural a_2 en mezclas recicladas en frío. No obstante, este coeficiente a_2 puede ser estimado en forma aproximada usando las recomendaciones que la guía.

AASHTO proporciona para bases tratadas con materiales bituminosos (AASHTO, 1998), las cuales se basan en correlaciones entre el módulo resiliente o la estabilidad Marshall y el coeficiente a_2 . Los valores a_2 que normalmente se están utilizando en la actualidad para capas recicladas en frío con emulsiones, varían entre 0,25 y 0,35. Cuando sea posible, se deberían extraer testigos del pavimento reciclado, para determinar su módulo resiliente real y verificar que los especímenes fabricados en laboratorio están proporcionando resultados razonablemente representativos de aquellos obtenidos en terreno. También, deberían evaluarse las condiciones del pavimento, en forma periódica y sistemática, para determinar el comportamiento del pavimento reciclado y validar el proceso de diseño estructural que está siendo usado.

2.3.1.5. Comparación de Métodos de Reciclado

a. Comparación de reciclado en frío y caliente

En términos generales, ambos reciclados resultan útiles, dependiendo de las solicitudes de carga y la finalidad del proyecto a construir. En la tabla 01. Se expresan algunas diferencias entre reciclado en frío y caliente.



Figura 08. Ejemplo de planta de asfalto en caliente. Fuente: Chuman, 2018, p. 28, tomado de Planta de Asfalto ASTEC – Propietario Consorcio “VARGAS”, Ubicación: Paraje La Huaycha – Concepción,

Es conocido por investigaciones que un resultado de mejor calidad se obtiene al utilizar reciclado en caliente, pues permite homogenizar y recompactar el material reciclado junto a materiales vírgenes que aportan mayor resistencia.

Tabla 01.

Comparación de reciclado en frío y en caliente.

RECICLADO EN CALIENTE	RECICLADO EN FRÍO
El material debe ser transportado	Rapidez de ejecución.
Mejor producto final por la homogenización de mezclado	Máquinas modernas permiten grandes avances de más de 1km/día
Almacenamiento del material de entrada en acopios	Proceso limpio y ecológico.
Material puede ser cometido a más ensayos	Material sobran se puede almacenar y reutilizar, ahorra en transporte.
Se puede cambiar la proporción de materiales y se puede reciclar el 100% de material	Se trabajan espesores de hasta 40 cm.
El material puede almacenarse y usarse cuando sea necesario	Se abre el tráfico en forma inmediata.

Fuente propia.

b. Estabilización con cemento y emulsión asfáltica en frío

En la práctica de muchas obras e investigaciones se han planteado y realizado con éxito recuperación de material de carpeta de rodadura y base para aplicarse en construcción de pavimentos reciclados adicionando, entre los más comunes, cemento y emulsión asfáltica. Pero existen ventajas y desventajas sobre la utilización de estos aditivos, Ver tabla 02.

Tabla 02.

Comparación de estabilizaciones de reciclado en frío con cemento y emulsión asfáltica.

ESTABILIZACIÓN DE RECICLADO EN FRÍO CON	
CEMENTO	EMULSIÓN ASFÁLTICA
Ventajas	Ventajas
Disponibilidad	Flexibilidad del material obtenido
Costo accesible	Facilidad de aplicación
Facilidad de aplicación	Normatividad vigente y existente
Aceptación	Se puede mezclas efectivamente con material húmedo y frío.
Se puede efectuar con mezcladora de concreto para volúmenes pequeños.	
Desventajas	Desventajas
Agrietamiento por contracción	Costo por infraestructura elevado
Aumenta la rigidez	Estricto control de producción
El mezclado debe ser de calidad, debe pulverizarse el material	Debe controlarse el régimen de la rotura y del curado posterior.

c. Asfalto espumado

El asfalto espumado es una técnica de estabilización de asfaltos reciclados en el cual se tritura el espesor total del asfalto y parte de la base

granular, produciéndose una nueva base estabilizada. Este proceso se ejecuta dentro de una cámara o cavidad en donde se tritura material y se adiciona asfalto, cemento y agua, en condiciones controladas y precisas, para ello se realizan ensayos de laboratorio para determinar los porcentajes de cada uno de los materiales. Como resultado al juntar agua fría y asfalto caliente se produce una expansión de gas en forma de espuma.

El asfalto en caliente estalla en millones de gotas cuando entra en contacto con pequeñas cantidades de agua fría. Este fenómeno causa que el asfalto se expanda más allá de su volumen original y la espuma resultante es conocida como asfalto espumado. Algunos parámetros a considerar en la producción de asfalto espumados son:

- **Relación de expansión.** Referida a la relación entre el máximo volumen de asfalto en su estado espumoso y el volumen de asfalto cuando la espuma se ha asentado completamente. Una mayor relación de expansión indica que el asfalto será menos visco-elástico y por lo tanto se puede esperar una mayor dispersión del asfalto en la mezcla.
- **Vida media.** Se refiere al tiempo empleado por la espuma para sentarse la mitad del máximo volumen alcanzado. Una mayor vida media indica que se tiene más tiempo para que el asfalto sea mezclado con el material agregado pues esta aun en su forma espumada.

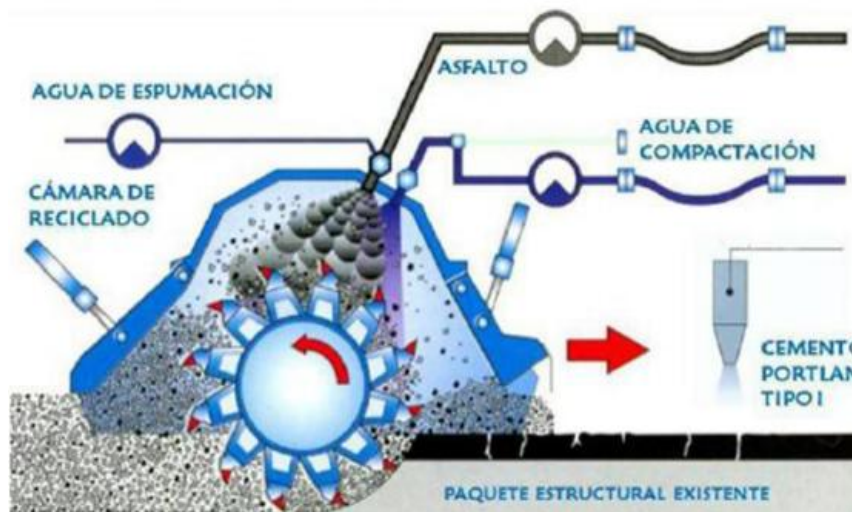


Figura 09. Esquematización de reciclado in situ con asfalto espumado.
Fuente: (Martucci, 2018, pp. 123)

Estos parámetros están influenciados por el grado de penetración y el tipo de cemento asfáltico a utilizar, así como por la cantidad de agua inyectada al asfalto caliente durante el proceso de formación de la espuma.

Tabla 03.

Ventajas y desventajas del asfalto espumado.

ESTABILIZACIÓN DE ASFALTO ESPUMADO	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
- Produce un material con propiedades viscoelásticas	- Calentamiento del asfalto sobre los 160°C, requiere de infraestructura.
- Facilidad de Aplicación con maquinaria moderna	- Material con menos del 5% de finos no se puede tratar con asfalto espumado, debe adicionarse o tratarse con otro agente estabilizador
- Se considera solo el costo del asfalto	- Debe tenerse precauciones con la compactación y con el porcentaje de agua
- Velocidad para adquirir resistencia	
- Tránsito, prácticamente, inmediato.	

- Asfalto espumado aumenta la resistencia mecánica de la mezcla de agregados y minimiza la influencia del agua (humedad) en el desempeño de esta.
- Falta difusión en universidades y entidades públicas sobre la técnica.

Fuente Propia.



Figura 10. Muestra de material espumado in situ. Fuente: (Martucci, 2018, p. 124)

2.3.1.6. Beneficios de las Mezclas Recicladas

a. Beneficios de reciclado superficial.

- El reciclado superficial mejora la resistencia al deslizamiento de los materiales granulares componentes de la mezcla asfáltica.
- Corrige las deficiencias de origen superficial, que no hayan afectado capas granulares, como por ejemplo la piel de cocodrilo o fisuras longitudinales y transversales en el pavimento.
- Mejora el perfil geométrico de la calzada, al corregir los errores superficiales aumenta el confort y los niveles de servicio de la vía.

- Permite eliminar la capa de restitución en refuerzos de pavimento, es decir no se necesita material pétreo virgen para recompartar las capas inferiores de pavimento.

b. Beneficios de reciclado en frío.

- Mejora la resistencia al deslizamiento de los materiales granulares al aumentar la rugosidad de la superficie.
- Corrige las deficiencias de origen superficial y las de origen estructural, es decir, en fallas donde se haya comprometido materiales granulares de base o subbase se recomienda realizar este tipo de intervención.
- Permite incrementar en forma limitada la resistencia estructural del pavimento, pues se considera usar capas de material granular consolidado de gran resistencia que al ser mezclado con materiales vírgenes ofrece mejores resultados resistentes.
- Elimina temporalmente fisuras reflejas y otras fallas en pavimento, debido a que se mezcla en frío es probable que con el tiempo o el aumento de tráfico se presenten pequeñas fallas con el tiempo.
- Permite corregir las características de las mezclas asfálticas superficiales, además de controlar las deformaciones plásticas del pavimento al ser sometido a cargas de tráfico.
- Mejora el perfil geométrico de la calzada, los niveles de confort. Además, se pueden mejorar los niveles de servicio o categoría de la vía.

c. Beneficios del reciclado en caliente

- Refuerza estructuralmente el pavimento en función de las necesidades del proyecto. Esto incluye el aumento de la capacidad resistente del pavimento,

en casos donde se necesita recategorizar el nivel de servicio de la vía, resulta económico implementar este tipo de reciclado.

- Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural.
- Produce mezclas asfálticas de mejor calidad. Debido a que se calientan todos los materiales, se logra homogenizar sus componentes, lo que resulta en una mezcla asfáltica más resistente al agua e intemperismo.
- Elimina fisuras y fallas más comprometedoras en el pavimento flexible, lo cual mejora la rugosidad y la resistencia al deslizamiento, es oportuno indicar que se debe realizar correctamente la dosificación de los materiales, pues sino la resistencia (sobre todo en climas cálidos) se vería afectada en horas pico con cargas lentas sobre el pavimento.
- Corrige el perfil geométrico de la calzada y el confort de la vía.

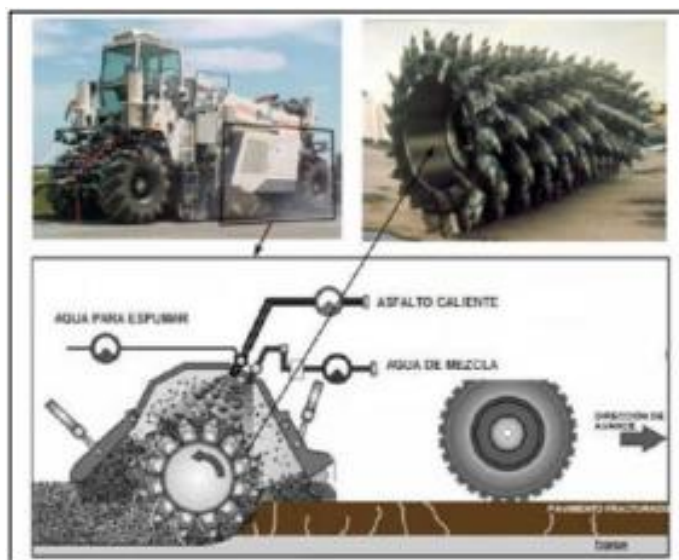


Figura 11. Proceso de Reciclado. Fuente. Espinoza & Vildoso, 2014, pp. 112

CAPÍTULO III. RESULTADOS

En las diversas investigaciones evaluadas se tuvo como objetivo identificar los tipos de reciclaje y su aplicación en la construcción de pavimentos. Así mismo, conocer el funcionamiento y diseño de estos pavimentos reciclados para la aplicación de estas técnicas en nuestra realidad objetiva.

La aplicación de técnicas de reciclaje se viene realizando en muchos países latinoamericanos como Colombia y México, brindando excelentes resultados y, sobre todo, han reducido los costos de mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos flexibles. En localidades peruanas, resulta muy favorable el planteamiento de reutilizar pavimentos flexibles envejecidos en combinación con materiales vírgenes, y así reducir costos presupuestarios, generando mejores niveles de servicio y confort en nuestra red vial nacional.

Los resultados de las investigaciones revisadas se esquematizan en la Tabla 04. En la cual se evidencian los resultados positivos de la aplicación de las diversas técnicas de reciclado en pavimentos.

De las investigaciones hemos tomado los aspectos esenciales a considerar para esta investigación, básicamente, se ha recopilado los puntos de metodología y resultados o conclusiones, para revisar de manera objetiva la información y consolidar conocimiento que será aplicado en nuestra realidad.

Tabla 04.

Resumen de Metodología y Resultados de investigaciones anteriores.

CÓD. INT	FUENTES	TÍTULO	METODOLOGÍA	RESULTADOS/ CONCLUSIONES
TPP-01	Méndez Revollo, Angélica Andrea (2015)	Evaluación Técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas	Se utilizaron muestras de RAP que cumplió su vida útil. Se caracterizaron los materiales recuperados, En el diseño se combinó material virgen con agregados RAP (cumpliendo especificación granulométrica). Se establecieron proporciones para los diseños Marshall para conseguir la relación entre asfalto envejecido y rejuvenecedor	Según ensayo Marshall, el asfalto óptimo para la mezcla fue de 3%. Se realizó el ensayo a resistencia a tracción indirecta en estado seco y húmedo. Los resultados mostraron que la diferencia entre estados seco y húmedo, el seco presenta mayor resistencia. Según los resultados obtenidos a lo largo de este estudio las mezclas con 100% de RAP presentan un comportamiento que cumple con las especificaciones siendo viable para ser utilizada en vías colombianas.
TPP-02	Castro Padilla, Andrea Carolina & Crespo Tovar David Andrés (2018)	Análisis de los métodos de reciclaje en caliente y frío aplicados a concreto asfáltico, para la utilización en carpeta de rodadura en vías terciarias entre los años 2011-2017 en Colombia.	Se recopiló información de artículos, tesis, informes y conoedores de diseño de vías. Se realizó un análisis y comparación, para seleccionar la información enriquecedora. Y así se determinaron las ventajas y desventajas de los concretos asfálticos reciclados en frío y caliente para la producción mezclas eco amigables y económicas en Colombia.	La incorporación de RAP en la fabricación de concreto asfáltico reduce las emisiones de Co. Con los estudios que se han realizado a través de los años, existe la posibilidad de realizar una normativa que guíe el diseño de mezclas asfálticas en tecnología de reciclaje, en frío o caliente

<p>TPP. 03</p>	<p>Cancinos Sazo, Gustavo Adolfo (2013)</p>	<p>Reciclado en Frío in situ en la Rehabilitación de Pavimentos Flexibles con Asfalto Espumado y Recomendación de Especificaciones Técnicas de Construcción para Guatemala.</p>	<p>Se busca optimizar cada uno de los elementos recuperados del pavimento envejecido, de tal manera que se puede determinar su resistencia, corroborar su calidad y durabilidad respecto al diseño. En esta investigación se realiza estudios sobre el asfalto espumado (Técnica que busca recuperar el pavimento envejecido en suma con adiciones de cemento, emulsión asfáltica y agua).</p>	<p>En el proceso de espumación se debe considerar 15 segundos de vida media a una razón de expansión entre 8-15 veces su volumen original. Se determinó con el ensayo de tracción indirecta la resistencia estructural del asfalto espumado, el cual cumple con las solicitaciones de carga. Esta técnica es de beneficio para Guatemala por el reaprovechamiento de materiales reciclados y la reducción de impacto ambiental.</p>
<p>TPP- 04</p>	<p>Hidalgo Montoya, Cesar Augusto (2015)</p>	<p>Estudio de las ventajas económicas del reciclaje en frío in situ de Pavimentos Asfálticos</p>	<p>Con el uso de árbol de decisión se busca la mejor alternativa para el mantenimiento y rehabilitación de vías secundarias con reciclaje de pavimentos con adición de cemento, dadas las ventajas económicas que ofrece debido a la reutilización de materiales pétreos existentes en la vía intervenida El reciclaje con aditivos (cemento) tiene una amplia aplicabilidad y duración.</p>	<p>El uso de reciclaje y productos estabilizadores para estructuras, son alternativas viables y económicas, ya que permiten la reutilización del material existente en la vía logrando unos nuevos materiales de buena calidad para garantizar una estructura perdurable en el tiempo y que cumpla las especificaciones de diseño, además de obtener una importante reducción de costos.</p>

<p>TPP- 05</p>	<p>Balbín Archi, Robinson & Chochon Gómez Víctor Hugo (2019)</p>	<p>Diseño de Mezcla Asfáltica con material reciclado para la Mejora del Comportamiento Mecánico del Pavimento en el Tramo KM 90+000 AL KM 95+000 de la carretera Canta a Huayllay ubicado en el distrito y provincia de Canta en el departamento de Lima 2019</p>	<p>Se realizó una comparación entre pavimento convencional y pavimento reciclado para verificar si este cumple con las especificaciones establecida en la guía MTC (2013). Además, se determinaron las relaciones de Estabilidad-flujo de manas mezclas para determinar su índice de rigidez. Para tal fin se realizaron 15 briquetas con distintos porcentajes de cemento asfáltico.</p>	<p>La mezcla asfáltica reciclada en caliente es 12.75% más barato que la mezcla asfáltica convencional. Un ahorro se produce en el uso del cemento asfáltico de 16.36% con respecto a la variación de los costos de cada pavimento. Debido al ahorro del 40% de reciclado se pudo obtener un ahorro en cada proporción del material utilizado en el nuevo diseño del material reciclado.</p>
<p>TPP- 06</p>	<p>Chero Canales, Jorge Luis (2019)</p>	<p>Análisis y Evaluación del Proyecto de Reciclado y Recapeo de la Carretera Sullana- Dv. Talara del Km. 0+000 al Km- 65+100- Sullana- Piura.</p>	<p>Se realiza proceso de reciclado con aplicación de emulsión asfáltica (rotura lenta del tipo catiónica CSS -1H). Cabe resaltar que dicha emulsión se procesa en planta, propia de la empresa CASA, ubicada en Cañete. La emulsión catiónica que se utilizó en el proyecto proviene de la composición de tres elementos: asfalto agua y un agente emulsificante</p>	<p>Implica la intervención de una capa de 12.5 cm. del material subyacente a la rasante y 5 cm de carpeta asfáltica existente, esta profundidad intervenida fue reconformada. Esta técnica de reciclado, con el fin de alcanzar el número estructural requerido y según características del proyecto, necesita además un Recapeo, que en el presente estudio fue de una capa de 5 cm de mezcla asfáltica modificada con polímeros.</p>

<p>TPP-07</p>	<p>Villa Chaman, Víctor Manuel (2007)</p>	<p>Reciclado in situ en frío de pavimentos empleando emulsiones asfálticas- Aplicación: Colegio FAP Manuel Polo Jiménez. Urb, San Gabino-Santiago de Surco.</p>	<p>Se extrajeron costos precisos de la elaboración y aplicación de un reciclado in situ en frío con emulsión asfáltica catiónica y se llegó a obtener un ahorro entre el 10 y 20% (13.97%) con respecto a un método convencional. La aplicación fue un método constructivo</p>	<p>Esta técnica puede ser aplicada, tanto en pavimentos a rehabilitar como en la construcción de nuevos pavimentos de bajo tránsito y debido a su menor costo favorecer la pavimentación en zonas marginales. Como conclusión final se puede afirmar, que el uso del método de rehabilitación de reciclado in situ en frío con emulsiones asfálticas catiónicas es viable tanto ambiental, técnica y económicamente en el país</p>
<p>TPP- 08</p>	<p>Paiva Ipanaque, Germán & Ramos Vilcarromero, Greyssi (2014)</p>	<p>Reciclado de pavimentos asfálticos y su reutilización para el diseño de mezclas de asfalto en caliente</p>	<p>Esta tesis consiste en la elaboración de una prueba piloto, con el acopio y utilización de materiales disgregados de capas asfálticas de pavimentos en servicio; la preparación de una nueva mezcla asfáltica en caliente mezclando dichos materiales con agregados pétreos con asfalto nuevos. Utilizando el método Marshall.</p>	<p>Se obtuvo mezcla asfáltica reciclada teniendo un contenido de asfalto de 5.5% en promedio y pertenece a una gradación MAC-2. Evaluándose la estabilidad y flujo dando resultados dentro de los especificados en el R.N.E C. E 010 Pavimentos Urbanos. Determinado el óptimo porcentaje de asfalto para los tres porcentajes de MBR y de acuerdo al tipo de tránsito.</p>

<p>TPP- 09</p>	<p>Rodríguez Mineros, Carmen & Rodríguez Molina, José (2004)</p> <p>Evaluación y Rehabilitación de Pavimentos Flexibles por el Método de Reciclaje</p>	<p>Técnicas de rehabilitación de reciclaje de pavimentos, que son las mismas que se le hacen a cualquier vía que quiere rehabilitarse, además que la técnica se realiza en un tiempo relativamente corto y sin molestias mayores al tráfico.</p>	<p>La técnica del reciclaje en frío es aplicable a proyectos a largo plazo, ya que puede mejorar el número estructural del pavimento y es una alternativa que como se estableció en el desarrollo del documento se pueden reciclar profundidades mayores a los 15cm y siempre colocando una carpeta nueva sobre la base reciclada formando así una nueva estructura del pavimento.</p>
<p>TPP-10</p>	<p>Chumán Aguirre, Jorge Manuel (2017)</p> <p>Reutilización de Pavimentos Flexible Envejecido mediante el empleo de una Planta Procesadora de Mezcla Asfáltica en Caliente para Pavimentos en Huancayo 2016.</p>	<p>La metodología empleada nos permitirá lograr resultados positivos en la investigación, que demostrarán; que los residuos de pavimentos flexibles envejecidos sean utilizados en reemplazo de material nuevo o virgen y obtener una mezcla asfáltica adecuada que cumplan con los aspectos técnicos y parámetros de calidad y su utilización en las diferentes vías en beneficio de los usuarios.</p>	<p>Mediante el método Marshall, se ha comprobado la factibilidad del reciclaje parcial de pavimento flexible, como aporte de la mezcla asfáltica procesada en planta (en caliente). A fin de soportar deformaciones, se demuestra que el índice de rigidez es adecuado o sea 2,823.40 Kg/cm contra 1,050 Kg/cm del material nuevo, brindando mayor soporte por unidad de medida lineal en la capa asfáltica compactada.</p>

<p>TPP-10</p>	<p>Arias Fuya, Rodolfo & Rivera Camacho, Beyer. (2019)</p> <p>Evaluación del comportamiento físico mecánico de mezclas en frío para vías de bajo volumen de tránsito de Colombia utilizando 100 % de pavimento asfáltico reciclado.</p>	<p>La metodología se realiza mediante la caracterización física del material de Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP), utilizando como guía las Normas de Ensayos y Especificaciones del INVIAS, realizando también los ensayos mecánicos para la obtención de resultados, y la consecución de una mezcla que satisfaga las necesidades de los objetivos planteados.</p>	<p>El Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP), el material cumple con los parámetros establecidos en las especificaciones de la Norma del INVIAS del 2013, mostrando que el material después de ser sometido a la repetición de cargas generadas por un tráfico vehicular y ya teniendo un desgaste considerable este mantiene propiedades físicas adecuadas para poder ser reutilizado en las diferentes propuestas para el mejoramiento de las vías en Colombia.</p>
<p>TPP-11</p>	<p>Abad Quito, Hilario (2016)</p> <p>Análisis Comparativo del Reciclado con Asfalto Espumado y la Técnica Convencional en la Conservación Periódica de la Carretera Conococha-Huaraz 2010-2011</p>	<p>MTC s a través del programa de infraestructura vial denominado "Proyecto Perú 11" está proponiendo dentro de sus Términos de Referencia el uso reciclados con asfaltos espumados y emulsiones asfálticas, debido principalmente a su buen comportamiento, facilidad de construcción, compatibilidad con un amplio rango de tipos de agregados y ventajas ambientales y energéticas</p>	<p>El beneficio de aplicar la tecnología de reciclado con asfalto espumado es obtener mayor aporte estructural, reduciendo espesores con base estabilizada, respecto al sistema convencional, es así que para la presente investigación se ha obtenido una reducción aproximado al 30% del espesor de la estructura del pavimento</p>

<p>TPP-12</p>	<p>Yangali Limaco, Geofry Oscar (2015)</p> <p>Influencia del uso de la Carpeta Asfáltica Reciclada en las propiedades físico-mecánicas de diseño para rehabilitación de pavimento flexible,</p>	<p>Se analizó la carpeta asfáltica extraída en campo, según guía de reciclado en frío del Instituto del Asfalto. La carpeta asfáltica reciclada será usada como agente ligante en la conformación de una nueva capa de Base Granular Modificada. Se desarrollaron calicatas y pozos de exploración, y se recolectaron muestras de las distintas capas para el análisis en el laboratorio.</p>	<p>Se obtuvo un incremento del CBR o resistencia potencial, el cual comparado con él de la base granular existente inicial es un 14.2%. La duración de la carpeta asfáltica reciclada es mayor por solo 2 meses concluyendo que ambos tienen un tiempo de serviciabilidad similar, así como también, el método del uso de la carpeta asfáltica evita el "Agrietamiento longitudinal por fatiga de arriba hacia abajo" y segundo la "Deformación permanente total - Mezcla asfáltica únicamente" respectivamente.</p>
<p>TPP-13</p>	<p>Ortiz Hernández , Edel (2012)</p> <p>Evaluación del empleo de la tecnología de reciclado de pavimentos en frío disponible en Cuba, en las carreteras de Villa Clara</p>	<p>Se realizó un estudio de las tecnologías de reciclado de pavimentos flexibles existentes en el Mundo y en particular en Cuba, definiéndose el estado del arte de dichas tecnologías, apreciándose un notable incremento en todos los países del mundo, dado las ventajas técnicas, económicas y ambientales que presenta.</p>	<p>En la comparación técnica, económica y ambiental realizada entre la tecnología de reciclado de pavimentos en frío "in situ" usando cemento Portland y asfalto espumado, se obtuvieron resultados muy favorables a favor de la tecnología de reciclado, demostrando la conveniencia técnica, económica y ambiental de emplear la tecnología en el tramo de carretera analizado y en otras de similares características de la provincia de Villa Clara y del país.</p>

<p>TPP-14</p>	<p>Romero Martínez, Paola (2011)</p>	<p>Análisis de la experiencia colombiana en reciclaje en frío de pavimentos asfálticos y formulación de una guía de intervención</p>	<p>La metodología de esta investigación se basó en la recolección de datos mediante bibliografía y prácticas de intervención de pavimentos asfálticos en frío in situ. Los conceptos, fundamentos bibliográficos y experiencias son sintetizadas en una guía de intervención general permita conocer cómo llevar a cabo un proceso de reciclaje de pavimentos asfálticos en frío in situ.</p>	<p>El reciclaje de pavimentos asfálticos en frío tiene como ventaja, frente al que es hecho en caliente, que es realizado en la misma obra, no requiere tratamientos de calor a la mezcla, y, su construcción y puesta en servicio resulta menos completa, proporcionando mayores rendimientos de obra con el consecuente ahorro en costos.</p>
<p>RC- 15</p>	<p>Limón Rafael A. & Cincire Víctor (2009)</p>	<p>El reciclado en caliente de Pavimentos en México</p>	<p>El desarrollo de agentes rehabilitadores formulados con componentes libres de solventes, como polímeros elastómeros, aditivos de estructura malténica y compuestos adicionales, proporcionan mayores beneficios a la mezcla rehabilitada: Rejuvenecen el asfalto envejecido y oxidado, mejoran el cubrimiento de la mezcla, incrementan la afinidad ligante-agregado, benefician la flexibilidad y durabilidad.</p>	<p>El uso de agentes rehabilitadores disminuye la rigidez y fragilidad sin afectar el comportamiento a roderas. El uso de materiales reciclados contribuye a la sostenibilidad en carreteras. El reciclado ofrece significativos ahorros de energía, de materiales no renovables y de los fondos económicos destinados a la conservación de carreteras</p>

RC-16	<p>Pajuelo Cubilla, Carlos (2014)</p>	<p>Reciclado de Pavimentos, experiencia a 4100 msnm,</p>	<p>El Proceso Constructivo de Asfalto espumado se efectúa mediante máquinas autopropulsadas que pueden ejecutar simultáneamente las tareas de disgregación de la capa de pavimento deteriorado, adicionar el producto estabilizante el agua para efectos de lograr la humedad óptima de compactación y efectuar el proceso de mezclado.</p>	<p>El Proceso Constructivo se complementa mediante la aireación de la mezcla el perfilado de la superficie reciclada para su posterior compactación a la humedad óptima y lograr así una capa de base estabilizada, la cual se imprima y se cubre posteriormente con una superficie asfáltica</p>
TPP-17	<p>Martucci, José Luis (2018)</p>	<p>Reciclado de pavimentos in situ utilizando la técnica de asfalto espumado</p>	<p>Realizado la revisión bibliográfica de artículos y publicaciones relacionados con el uso de la tecnología de asfalto espumado en reciclado en sitio con el fin de identificar cuál es el estado del arte en cuanto ha dicho procedimiento se concluye que es una técnica de rehabilitación que pudiera tener una ventana de aplicación en la red vial de Uruguay.</p>	<p>Dentro de las ventajas al utilizar un reciclado con asfalto espumado se encuentra: reutilización del material existente, impidiendo la explotación de nuevos áridos, lograr una alta calidad de las capas estructurales recicladas, menores tiempos de construcción (disminuyen los costos y generan un beneficio a los usuarios), seguridad, entre otras.</p>

<p>TPP-18</p>	<p>Alarcón Ibarra, Jorge (2003)</p>	<p>Estudio del Comportamiento de Mezclas Bituminosas Recicladas en Caliente en Planta</p>	<p>Mediante el ensayo Marshall. Al estudiar el comportamiento de las mezclas recicladas, en cuanto la estabilidad, deformación y porcentaje de huecos en mezcla, se ha observado que presentan un comportamiento muy rígido cuando se utilizan porcentajes elevador de MBR o se disminuye la penetración o el porcentaje del ligante de aportación, lo cual podría favorecer la aparición de fisuras en las capas de pavimento</p>	<p>En resumen, hemos podido comprobar que las mezclas recicladas pueden alcanzar un comportamiento prácticamente equivalente al de las mezclas convencionales, siempre y cuando se tenga el suficiente cuidado en su diseño, y proceso de fabricación. Por lo tanto, el reciclado de pavimentos es una alternativa más que debería tomarse en cuenta en los proyectos de rehabilitación de firmes.</p>
<p>TPP-19</p>	<p>Pérez Acosta, Sebastián & Lemus Franco Yussif (2018)</p>	<p>Comportamiento de una Mezcla Asfáltica densa en frío adicionada con partículas de Policloruro de Vinilo (PVC)</p>	<p>Investigación experimental ya que el material empleado es sometido a ensayos de acuerdo a normativa. Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall, para compresión y aparato de tracción indirecta, para la mezcla MDF adicionada con PVC. En el proceso, se elaboran briquetas a diferentes porcentajes de emulsión.</p>	<p>El reemplazo de partículas de PVC por agregado en el tamiz No. 8 resulta efectivo en los tres porcentajes usados (5%, 15%, 30) para la evaluación de la tracción indirecta en estado seco, ya que en los tres casos aumento la carga máxima y se extendió la deformación final acumulada, logrando una demora en el desprendimiento total entre las dos mitades de la muestra.</p>

<p>TPP-20</p>	<p>Santiago Santiago, Paciano (2017)</p>	<p>Evaluación de la Susceptibilidad a la deformación permanente en Concretos Asfálticos elaborados con Asfaltos Modificados.</p>	<p>Mediante la prueba de la Rueda Cargada de Hamburgo se pudo evaluar el desempeño ante la formación de roderas de placas de concreto asfálticos fabricados con diferentes cementos asfálticos.</p>	<p>El ensayo de la rueda cargada de Hamburgo brinda buenos elementos para la evaluación de los concretos asfálticos ante deformación permanente. Los resultados de esta investigación permitieron identificar que los concretos asfálticos elaborados a partir de cementos asfálticos modificados (con polímero) presentan mejor comportamiento ante la deformación permanente que aquellos elaborados con un ligante convencional.</p>
<p>TPP-21</p>	<p>Marcilo Piña, Valeria (2018)</p>	<p>Evaluación del desempeño del Hormigón Asfáltico con Plástico Polietileno Reciclado para vías de segundo orden.</p>	<p>La investigación experimental, esencial para realizar los ensayos a compresión con briquetas elaboradas, con el objetivo de comparar e identificar cuál es el porcentaje de plástico como agregado recomendable para conseguir mayor resistencia en relación al asfalto común. Contribuyendo a la mejora de las obras civiles y al mismo tiempo al cuidado medioambiental.</p>	<p>La estabilidad de las mezclas modificadas, están por encima casi duplicando la estabilidad de la muestra patrón, sin embargo, todas cumplen con la estabilidad Marshall para un asfalto de tráfico pesado, que, de acuerdo a las Especificaciones Generales para la construcción de caminos y puentes, éste deberá ser como mínimo 1800 libras.</p>

		la tecnología de uso de pavimento reciclados	Se establece la necesidad de incorporar de manera definitiva esta tecnología en la
	Prácticas actuales	demuestra grandes	infraestructura vial colombiana
	y prospectiva de	beneficios en cuanto a	por sus grandes beneficios a nivel
	la Incorporación	calidad, rendimiento,	ambiental, para complementarse
	de Pavimento	economía y disminución de	con las estructuras sostenibles
TPP-22	Salcedo	la contaminación del medio	que se están empleando en
	Delgado,	ambiente. Se desarrolla	nuestro país a causa de la
	Oscar	aproximaciones para el	preocupación mundial pro
	(2011)	diseño, incorporación,	preservar el medio ambiente. Se
	Asfáltico Fresado	producción y construcción	determina un marco teórico para
	en la Producción	de mezclas asfálticas con	Colombia de la tecnología de
	de Mezclas	RAP, favorable en	reciclado de pavimentos
	Asfálticas en	Colombia.	asfálticos.
	frío.		

Fuente propia. La tabla 04, Muestra en la columna denominada COD. INT. Los códigos internos con las abreviaturas TPP (Tesis de pregrado o posgrado) y RC (Revista científica o artículo científico). Adicionalmente se detallan los autores y el nombre de la investigación citada como fuente primaria de información para este trabajo de investigación. Asimismo, se explica la metodología de cada documento, y se expresan los resultados o conclusiones de las investigaciones citadas, las cuales justifican la problemática evaluada en esta investigación.

De manera sintetizada, en la Tabla 04., se exponen las diferentes técnicas de reciclaje de pavimentos que se ha venido utilizando en la última década, presentando todos resultados favorables a nivel estructural, ambiental y económico. Es decir, todos los tipos de reciclaje representan mejoras en las técnicas de construcción de los pavimentos flexibles.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

En la actualidad, como se contrasta con la información y teoría recopilada, existen diversos métodos de reciclaje de pavimentos flexibles, los cuales se pueden dividir en superficial, frío y caliente. Dentro de cada uno de estas existen diversos métodos de estabilización de las diversas capas de granulares del pavimento. En nuestra investigación, hemos ampliado sobre la metodología a utilizar para el diseño de mezclas asfálticas recicladas. El procedimiento consiste en remover la carpeta de rodadura, la cual puede ser extraída con una fresadora para rescatar el cemento asfáltico y agregados y así, remezclarlos con o sin adición de emulsiones u otros materiales ligantes, con la finalidad de construir nueva pavimentación. También se puede rescatar parte o totalidad de las bases granulares compactadas de los pavimentos envejecidos, haciendo al pavimento, 100% reutilizable.

En la mayoría de investigaciones recopiladas el procedimiento técnico recomendado indica recuperar muestras de pavimentos reciclado que haya cumplido su periodo de vida útil. Méndez (2015), nos indica que se debe caracterizar los materiales recuperados. En el diseño se combinó material virgen con agregados RAP, cumpliendo las especificaciones de granulometría. Y se establecieron proporciones para los diseños según la metodología del Ensayo Marshall para conseguir la relación entre asfalto envejecido y rejuvenecedor.

Méndez (2015) “Cabe destacar que en la mayoría de los casos el reciclado ha sido la opción más económica, aun así, la falta de información y de confiabilidad en el método hace que sea una práctica poco utilizada. Además de esto vale la pena destacar el ahorro de materiales, transporte, la reducción de almacenamiento de materiales en botaderos y la utilización racional de recursos naturales; haciendo del RAP una tecnología amigable con el medio ambiente.” (p. 18)

El reciclado de pavimentos representa una opción económica y durable en el tiempo, sin embargo su difusión en el Perú, no ha llegado a calar en las prácticas de ingeniería, pues comúnmente se tiene en las obras partidas de demolición y eliminación de carpetas envejecidas (en el caso rehabilitaciones) y partidas de Recapeo (en el caso de mantenimientos), es conocido que el Recapeo no sirve como solución a largo plazo, pues la intervención de estas técnicas empíricas no se realiza de manera oportuna, más bien se realizan cuando el material granular ha sido comprometido y el pavimento vulnerado en sus espesores más inferiores. Una de las soluciones para rehabilitaciones y mantenimiento es la reutilización del pavimento, resultando de bajo costo y eco-amigable con el entorno.

El reciclado en frío de pavimentos flexibles, una vez consultada la información de muchas investigaciones, es una técnica que consiste en la extracción de material envejecido hasta una profundidad (en la práctica) de 15 a 20 cm. o tomando parte del material granular de la base. Su denominación se refiere a que, una vez extraído el material, este se tritura (cuidando que no se pulvericen los materiales pétreos) y se mezcla con una adición rejuvenecedora, estas adiciones puede ser cualquier material que aporte significativamente, a las características resistentes de la nueva mezcla asfáltica con materiales reciclados. Entre las adiciones más comunes encontramos cementos, emulsiones asfálticas, últimamente han entrado en el mercado los polímeros, es por eso que existen muchas investigaciones donde aportan materiales como PVC o caucho.

La gran ventaja del reciclado en frío es que esta demanda menores gastos que el reciclado en caliente, sin embargo, tiene mayor incidencia a generarse fallas frágiles producto de su gran rigidez. Otra de las condiciones favorables de esta técnica es que es menos contaminante que el reciclado en caliente, esto debido a que no se emite CO en su

proceso constructivo, además de reducir gastos de traslado, pues el reciclaje se realiza in situ.

El reciclaje en caliente, a diferencia del reciclado en frío, este tiene mejores resultados en durabilidad, pues su proceso consiste en extraer hasta la totalidad de los materiales de base y carpeta de rodadura envejecidas; posteriormente, se tritura y se homogeniza la mezcla calentándose (por lo general a 160°C) con adición de cemento asfáltico. Es decir, previo a la homogenización se debe determinar la cantidad de asfalto residual del concreto asfáltico reciclado, para adicionar pequeños porcentajes de asfalto virgen que maximice la respuesta resistente de la mezcla asfáltica reciclado. Es decir, el reciclaje en caliente demanda mayor estudio de los materiales envejecidos a utilizar (se utiliza metodología Marshall, Rueda de Hamburgo, Rotura a tracción indirecta o Resistencia simple a compresión de briquetas de mezcla asfáltica), pero esta tiene mejor desempeño y durabilidad en el tiempo, con este tipo de reciclaje se puede controlar las fallas frágiles por rigidez que existen en el reciclaje en frío, sin embargo, su producción deriva en la emisión de gases de CO y genera costos de transporte, pues el remezclado suele hacer en planta o en equipos neumáticos especializados.

Alarcón (2003), nos indica: “Hemos podido comprobar que las mezclas recicladas pueden alcanzar un comportamiento prácticamente equivalente al de las mezclas convencionales, siempre y cuando se tenga el suficiente cuidado en su diseño” (pp. 224). Entonces el trabajo de reciclado en caliente demanda un trabajo en laboratorio exhaustivo y un mayor criterio para el diseño de mezclas asfálticas.

Otra de las técnicas que hemos mencionado, es el reciclaje de pavimentos utilizando la técnica de asfalto espumado el cual según Cancinos (2013), nos indica algunas ventajas de este proceso constructivo.

- Mejora la tasa de producción diaria, con lo cual se logra un alto rendimiento
- Permite el flujo vehicular de circulación durante el proceso constructivo.
- Al reutilizar los materiales colocados en la carpeta de asfalto, reduce los costos de obtención de productos vírgenes
- Alta capacidad soporte de la nueva estructura de pavimento. (pp. 112)

En el Perú, algunas investigaciones han intentado difundir las diversas técnicas de reciclaje. Pajuelo (2014) nos narra sus experiencias sobre su experiencia de la construcción de reciclado de pavimentos con asfalto espumado a 4100 msnm. En la carretera Conococha-Huaraz, en Ancash. Nos comenta que en el proceso constructivo se utilizaron maquinas autopropulsadas que realizaban la función de disgregar y adicionar estabilizantes, para luego mezclarlos. Esto es evidencia de que es posible realizar estas técnicas de reciclado en el Perú, ejecutándose con los criterios que nos indica la bibliografía, brindando soluciones económicas y de bajo impacto ambiental. Resulta necesario en el Perú, generar guías prácticas (sustentadas en experimentación científica) para el diseño y construcción de pavimentos reciclados, estas tecnologías pavimentarias mejorarías nuestro inventario vial, asimismo nos ayudaría a reducir la brecha de infraestructura vial en el Perú, incluso podría impulsar el desarrollo de zonas marginales que no necesitaría de un presupuesto elevado para la construcción de pavimentos locales. Debido a que ya existen partidas y obras aprobadas o en ejecución resultaría viable intentar rescatar los materiales que serán eliminados, para reutilizar ese material en vías de bajo tránsito en zonas no asfaltadas, mejorando los niveles de servicio y la calidad de tránsito en zonas olvidadas.

4.2 Conclusiones

- En los pavimentos reciclados encontramos diversas técnicas de construcción como los pavimentos en frío o caliente, que se pueden realizar in situ o en planta, los cuales representan soluciones útiles para la construcción de pavimentos nuevos o la rehabilitación de los mismos
- Los procesos de obtención de material reciclado, por lo general, se realizan mediante fresado del pavimento. Y se logran recuperar las capas de carpeta asfáltica y base granular envejecidas, pudiendo recuperar hasta el 100% del material envejecido el cual es homogenizado con algún aditivo estabilizador.
- Las investigaciones estudiadas nos han brindado información muy valiosa, indicando que el reciclaje de pavimento es una opción útil en todas sus técnicas de reciclaje, pues en la experimentación a igualado y en la mayoría de casos superado la resistencia de las mezclas asfálticas, mediante la metodología de Marshall.
- No existe, normativa peruana que parametrize el diseño o construcción de pavimentos reciclados, sin embargo, existen guías de Instituto del asfalto, que nos da recomendaciones empíricas y prácticas sobre la recuperación, el diseño y los procesos constructivos de pavimentos reciclados en frío o caliente.
- En general, la aplicación de pavimentos reciclados resulta sostenible, Pues en todos los casos investigados, ha cumplido con buen desempeño estructural, además de reducir el impacto ambiental (al consumir poco material granular virgen y reducir emisiones de CO) y resultan bastan económicas.
- Es necesario fomentar las técnicas de reciclaje en el Perú, pues su utilidad y aplicación nos permitirá reducir la brecha de infraestructura vial.

4.2 Recomendaciones

- Se debe tener consideración en los criterios de inclusión y exclusión de la información, no debemos utilizar información de fuentes no confiables.
- En este tipo de trabajos (revisión sistemática) se debe entender que los resultados de otras investigaciones no son propios, al revisar mucha bibliografía he notado que muchos cometen el error de reportar esos datos como suyos, cuando se debe considerar los derechos del autor y su publicación.
- Se debe investigar con experimentación los tipos de reciclaje. Con la metodología Marshal se puede realizar múltiples ensayos con materiales reciclados que le puedan sumar beneficios o propiedades a las mezclas asfálticas.
- Resulta primordial la investigación para generar en las que se considere al pavimento reciclado como una técnica viable, de bajo impacto ambiental y económica.

REFERENCIAS

Abad Quito, Hilario. (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 pregrado) Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Perú.

Alarcón Ibarra, Jorge (2003). Estudio del Comportamiento de Mezclas Bituminosas Recicladas en Caliente en Planta. (Tesis doctoral) Universidad Politécnica de Cataluña. España.

Arias Puya, Rodolfo & Rivera Camacho, Beyer. (2019). Evaluación del comportamiento físico mecánico de mezclas en frío para vías de bajo volumen de tránsito de Colombia utilizando 100 % de pavimento asfáltico reciclado. (Tesis de especialización) Universidad Católica de Colombia. Colombia

Balbín Archi, Robinson & Chochon Gómez Víctor (2019). Diseño de Mezcla Asfáltica con material reciclado para la Mejora del Comportamiento Mecánico del Pavimento en el Tramo KM 90+000 AL KM 95+000 de la carretera Canta a Huayllay ubicado en el distrito y provincia de Canta en el departamento de Lima 2019. Repositorio académico de la Universidad San Martín de Porres. Perú

Cancinos Sazo, Gustavo (2013). Reciclado en Frío in situ en la Rehabilitación de Pavimentos Flexibles con Asfalto Espumado y Recomendación de Especificaciones Técnicas de Construcción para Guatemala. (Tesis de posgrado) Universidad de San Carlos de Guatemala. Escuela de Estudios de Postgrado Maestría en Ingeniería Vial. Guatemala.

Castro Padilla, Andrea & Crespo Tovar, David (2018). Análisis de los métodos

de reciclaje en caliente y frío aplicados a concreto asfáltico, para la utilización en carpeta de rodadura en vías terciarias entre los años 2011-2017 en Colombia. (Tesis de pregrado) Universidad Cooperativa de Colombia. Santa Marta. Colombia

Chero Canales, Jorge Luis (2019). Análisis y Evaluación del Proyecto de Reciclado

y Recapeo de la Carretera Sullana- Dv. Talara del Km. 0+000 al Km- 65+100- Sullana-Piura. (Tesis de pregrado) Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Piura. Perú.

Chumán Aguirre, Jorge. (2017). Reutilización de Pavimentos Flexible Envejecido

mediante el empleo de una Planta Procesadora de Mezcla Asfáltica en Caliente para Pavimentos en Huancayo 2016. Universidad Peruana de los Andes. Perú.

Espinoza, P. & Vildoso, J. (2014). Estudio de la técnica del reciclado con asfalto

espumado en las carreteras la Oroya – Chirín – Huánuco –Tingo María – Dv. Tocache y Conococha – Yanacancha. (Tesis de grado, Universidad Ricardo Palma)

Hidalgo Montoya, Cesar (2015). Estudio de las ventajas económicas del reciclaje

en frío in situ de Pavimentos Asfálticos. (Tesis de especialización) universidad de Medellín. Especialización en Vías y Transporte. Medellín, Colombia.

Limón Rafael A. & Cincire, Víctor. (2009). El reciclado en caliente de Pavimentos

en México. Sexto Congreso Mexicano del Asfalto.

Marcillo Piña, Valeria (2018). Evaluación del desempeño del Hormigón Asfáltico

con Plástico Polietileno Reciclado para vías de segundo orden. (Tesis de pregrado) Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil. Ecuador.

Martucci, José (2018). Reciclado de Pavimentos in situ utilizando la Técnica de Asfalto Espumado. (Tesis de posgrado). Universidad Nacional de Rosario. Argentina.

Méndez Revollo, Angélica (2015). Evaluación Técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas. (Tesis de Especialización) Universidad Militar Nueva Granada. Especialización en Ingeniería de Pavimentos. Bogotá, Colombia.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016). “Extracción Cuantitativa de Asfalto en Mezclas para pavimentos” MTC E502-2000. Perú

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016). “Resistencia de Mezclas Bituminosas empleando el Aparato de Marshall” MTC E504-2000. Perú

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014) Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”. Perú

Montejo Fonseca, Alfonso (2002). Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. 2da Edición. Editorial: Stella Valbuena. Universidad Católica de Colombia Bogotá D.C. Colombia

Ortiz Hernández, Edel. (2012). Evaluación del empleo de la tecnología de reciclado de pavimentos en frío disponible en Cuba, en las carreteras de Villa Clara. (Tesis de pregrado) Universidad central “Marta Abreu” de las Villas. Cuba.

Paiva Ipanaque, German & Ramos Vilcarrromero, Greysi (2014). Reciclado de pavimentos asfálticos y su reutilización para el diseño de mezclas de asfalto en caliente. (Tesis de pregrado) Universidad Señor de Sipán. Perú.

Pajuelo Cubilla, Carlos (2014). Reciclado de Pavimentos, experiencia a 4100 msnm. Universidad Nacional Federico Villarreal. Grupo de Transportes. Perú.

Pérez Acosta, Sebastián & Lemus Franco, Yussif. (2018). Comportamiento de una Mezcla Asfáltica densa en Frio adicionada con Partículas de Policloruro de Vinilo (PVC). (Tesis de pregrado) Universidad Católica de Colombia. Bogotá D.C. Colombia.

Rodríguez Mineros, Carmen & Rodríguez Molina, José. (2004). Evaluación y Rehabilitación de Pavimentos Flexibles por el Método de Reciclaje. (Tesis de pregrado) Universidad de El Salvador. El Salvador

Romero Martínez, Paola. (2011) Análisis de la experiencia colombiana en reciclaje en frío de pavimentos asfálticos y formulación de una guía de intervención. (Tesis de posgrado) Universidad de los Andes. Maestría en ingeniería. Bogotá, Colombia.

Ruiz Herrera, Robert & Salcedo Delgado, Oscar. (2011). Prácticas actuales y prospectiva de la Incorporación de Pavimento Asfáltico Fresado en la Producción de Mezclas Asfálticas en frío. (Tesis de pregrado) Universidad Piloto de Colombia. Bogotá DC, Colombia.

Santiago Santiago, Paciano. (2017). Evaluación de la Susceptibilidad a la deformación permanente en Concretos Asfálticos elaborados con Asfaltos Modificados. (Tesis de posgrado) Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Villa Chaman, Víctor Manuel (2007). Reciclado in situ en frío de pavimentos empleando emulsiones asfálticas- Aplicación: Colegio FAP Manuel Polo Jiménez. Urb, San Gabino- Santiago de Surco. (Tesis de pregrado) Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Perú. **Yangali Limaco, Geofry.** Influencia del uso de la Carpeta Asfáltica Reciclada en las propiedades físico-mecánicas de diseño para rehabilitación de pavimento flexible. Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú.

ANEXOS

ANEXO 01. EJEMPLO DE DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE- MÉTODO AASHTO 93

1. DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE

Para el diseño de pavimento flexible podemos ampararnos en la guía empírica del AASHTO, en suma, debemos ampararnos en la normativa peruana del MTC en su Manual de Carreteras.

DATOS:

- Trafico de diseño (W18): 4'696,928 (Estudio de Tráfico)
- CBR de Diseño Subrasante: 27% (Estudio de Suelos)
- CBR subbase: 85%
- CBR Subrasante: $0.70 \cdot 85\% = 60\%$
- Serviciabilidad Inicial=4.5
- Serviciabilidad Final= 2.0
- Condiciones de Exposición: Mayor a 15% de Precipitaciones al año (Clima)
- Calidad de Drenaje: Malo
- Lugar de Construcción: Ceja de Selva, Región La Libertad.

1.1. Clasificación de Tráfico:

Tabla 05.

Numero de Repeticiones Acumuladas de Ejes Equivalentes de 8.2ton. en el Carril de Diseño para Pavimentos Flexibles, Semirrígidos y Rígidos

TIPOS DE TRAFICO	RANGO DE TRAFICO PESADO EXPRESADO EN EE
Tp0	>75,000EE <150,000 EE
Tp1	>150,000EE <300,000 EE
Tp2	>300,000EE <500,000 EE
Tp3	>500,000EE <750,000 EE
Tp4	>750,000EE <1'000,000 EE
Tp5	>1'000,000EE <1'500,000 EE
Tp6	>1'500,000EE <3'000,000 EE
Tp7	>3'000,000EE <5'000,000 EE
Tp8	>5'000,000EE <7'500,000 EE
Tp9	>7'500,000EE <10'000,000 EE
Tp10	>10'000,000EE <12'500,000 EE

Tp11	>12'500,000EE <15'000,000 EE
Tp12	>15'000,000EE <20'000,000 EE
Tp13	>20'000,000EE <25'000,000 EE
Tp14	>25'000,000EE <30'000,000 EE
Tp15	>30'000,000EE

Fuente: MTC (2014). Manual de Carreteras.

Según el MTC, el Tipo de Trafico se clasifica en función al rango de tráfico pesado expresado en Ejes Equivalentes (ESAL). Para este caso tomaremos nuestro W18= 4696928, rango encontrado entre 3'000,000 y 5'000,000.

1.2. Cálculo de Modulo Resiliente:

Ecuación 07. Modulo Resiliente

$$Mr (Psi) = 2555 * CBR^{0.64}$$

Siendo el CBR= 27%

$$Mr_{SUBRASANTE}: 2555 * (27)^{0.64} = 21060 \text{ psi.}$$

$$Mr_{SUBBASE}: 2555 * (60)^{0.64} = 34921 \text{ psi. psi.}$$

$$Mr_{BASE}: 2555 * (85)^{0.64} = 43875 \text{ psi.}$$

1.3. Desviación Estándar Combinada:

Para pavimentos flexibles se utiliza: So= 0.45. Se elige de entre un rango de
0.40 < So < 0.50

1.4. Confiabilidad:

Tabla 06.

Valores recomendados de nivel de confiabilidad para una sola etapa de diseño (10 a 20 años) según rango de trafico

TIPO DE CAMINO	TRAFICO	EJE EQUIVALENTES ACUMULADOS	NIVEL DE CONFIABILIDAD
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	Tp0	>75,000EE <150,000 EE	65
	Tp1	>150,000EE <300,000 EE	70
	Tp2	>300,000EE <500,000 EE	75
	Tp3	>500,000EE <750,000 EE	80
	Tp4	>750,000EE <1'000,000 EE	80
	Tp5	>1'000,000EE <1'500,000 EE	85

Resto de Caminos	Tp6	>1'500,000EE <3'000,000 EE	85
	Tp7	>3'000,000EE <5'000,000 EE	85
	Tp8	>5'000,000EE <7'500,000 EE	90
	Tp9	>7'500,000EE <10'000,000 EE	90
	Tp10	>10'000,000EE <12'500,000 EE	90
	Tp11	>12'500,000EE <15'000,000 EE	90
	Tp12	>15'000,000EE <20'000,000 EE	95
	Tp13	>20'000,000EE <25'000,000 EE	95
	Tp14	>25'000,000EE <30'000,000 EE	95
	Tp15	>30'000,000EE	95

R= 85%

1.5.Serviciabilidad:

Po= 4.5

Pt= 2.0

Δ PSI= Po- Pt= 4.5-2.0

Δ PSI = 2.5.

1.6.Desviación Estándar (Zr):

Tabla 07.

Valores de Desviación Estándar Normal correspondiente a los Niveles de Confiabilidad

Confiabilidad R%	Desviación Estándar Normal. Zr
50	0
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.262
91	-1.34
92	-1.405

93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.09
99.99	-3.75

Fuente. MTC (2014) Manual de Carreteras

1.7. Número Estructural de Diseño:

Ecuación 08.

Ecuación General de Diseño:

$$\text{Log}W_{18} = Z_R \cdot S_0 + 9.36 \cdot \text{Log}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log} \frac{(\Delta PSI)}{4.2 - 1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \text{Log}M_R - 8.07$$

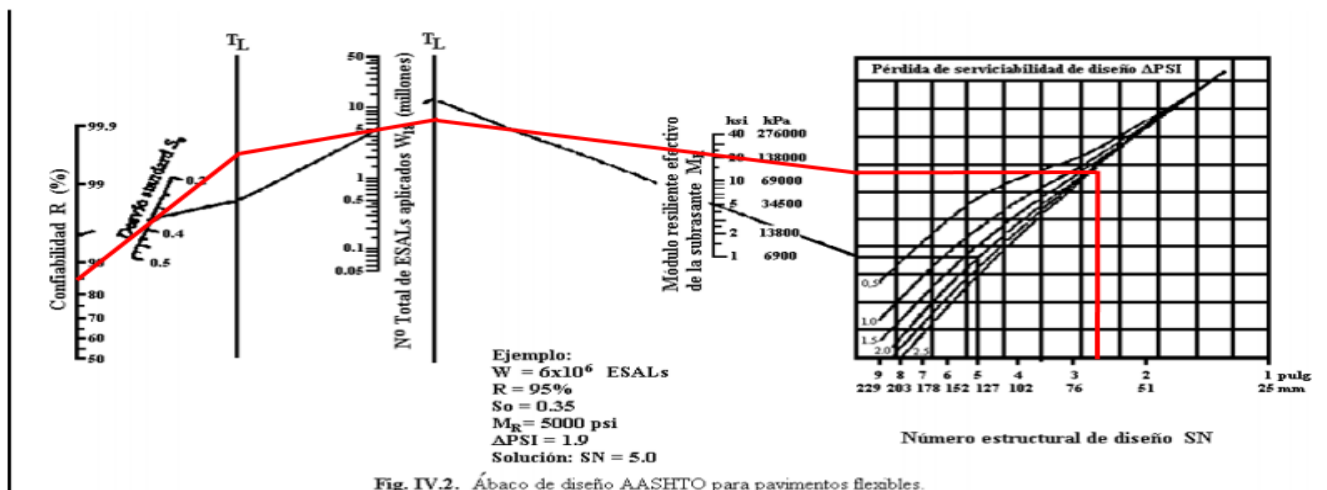
Fuente: Guía AASHTO 93. Diseño de Pavimentos.

Donde $W_{18} = 4696928$ $\Delta PSI = 2.5$.

$Z_R = -1.037$ $M_R = 21060$

$S_0 = 0.45$ $SN = \text{Variable}$

SN para tanteo Inicial: 2.7



En el Excel variamos el SN, hasta igualar la Ecuación General

$$\text{Log}W_{18} = Z_R \cdot S_0 + 9.36 \cdot \text{Log}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log} \frac{(\Delta PSI)}{4.2 - 1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \text{Log}M_R - 8.07$$

SN REQUERIDO: 2.77, con este valor se cumple la igualdad de la Ecuación General

1.8. Condiciones de Drenaje:

Tabla08

Valores m, para modificar los Coeficientes Estructurales o de Capa de Base y Subbase sin tratamiento, en pavimentos flexibles

Capacidad de Drenaje	% de tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación			
	Menos del 1%	Del 1% al 5%	Del 5% al 25%	Más del 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Malo	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy Malo	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Fuente. MTC (2014) Manual de Carreteras.

Según las condiciones de precipitaciones de la zona de proyección del pavimento se tiene una precipitación de 15% con lo cual se obtiene que

$$m_3 = 0.80 \text{ base, } m_2 = 0.60 \text{ subbase}$$

1.9. Valores de Coeficientes Estructurales:

Tabla 09

Coeficientes estructurales de materiales en el pavimento.

Componente del Pavimento	Coefficiente	Valor Coeficiente Estructural a/cm	Observación
Capa Superficial			
Carpeta Asfáltica en Caliente Modulo 2965 MPa (430000 PSI) a 20°C (68°F)	a1	0.170/ cm	Capa Superficial recomendada para todos los tipos de Trafico
Carpeta Asfáltica en Frío, mezcla asfáltica con emulsión.	a1	0.125/cm	Capa Superficial recomendada para Trafico < 1'000,000EE
Micro pavimento 25 mm.	a1	0.130/cm	Capa Superficial recomendada para Trafico < 1'000,000EE
Tratamiento Superficial Bicapa	a1	(*)	Capa superficial recomendada para Trafico <500,000EE. No aplica en tramos con pendiente mayor a 8%, y en vías con curvas pronunciadas, curvas de volteo, curva y contra curvas, y en tramos que obliguen al frenado de vehículos.
Lechada Asfáltica /Slurry Seal) de 12 mm.	a1	(*)	Capa Superficial recomendada para Trafico <500,000EE. No aplica en tramos con pendiente mayor a 8%, y en tramos que obliguen al frenado de vehículos.
(*) No se considera por no tener aporte estructural			
Base			
Base Granular CBR 80% compactada al 100% de la MDS	a2	0.052/cm	Capa de Base recomendada para Trafico <10'000,000
Base Granular CBR 100% compactada al 100% de la MDS	a2	0.054/cm	Capa de Base recomendada para Trafico <10'000,000
Base Granular Tratada con Asfalto (Estabilidad Marshall= 1500lb.)	a2	0.115/cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico.

Base Granular Tratada con Cemento (Resistencia a la Compresión 7 días=35kg/cm ²)	a2	0.070/cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico.
Base Granular Tratada con Cemento (Resistencia a la Compresión 7 días=12kg/cm ²)	a2	0.05	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico.
Subbase			
Subbase Granular CBR 40% compactada al 100% de la MDS.	a3	0.047/cm	Capa de Subbase recomendada con CBR mínimo 40% para todos los tipos de Tráfico.

Fuente: MTC (2014). Manual de Carreteras.

1.10. Cálculo del Número estructural y Espesores.

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3$$

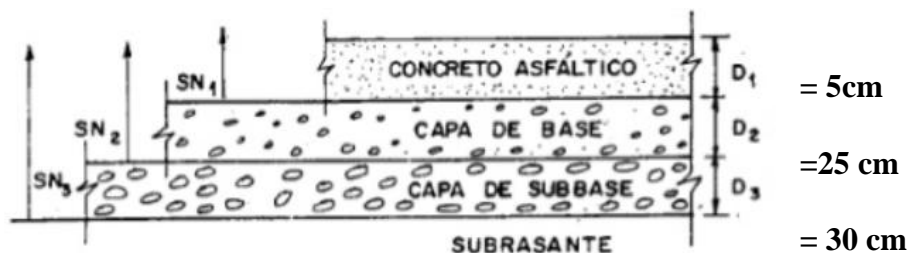
Donde:

a_1, a_2 y a_3 = Coeficientes estructurales de capa de carpeta, base y sub-base respectivamente.

D_1, D_2 y D_3 = Espesor de la carpeta, base y sub-base respectivamente, en pulgadas.

m_2 y m_3 = Coeficientes de drenaje para base y sub-base, respectivamente.

Hacemos cumplir la igualdad iterando los valores D (ESPESORES DE LAS CAPAS DE PAVIMENTO), hasta obtener el valor SN requerido. De 2.7



ANEXO 02. DISEÑO DE PAVIMENTO. METODO AASHTO 93 EN EXCEL.

**DISEÑO DEL PAVIMENTO
METODO AASHTO 1993**

PROYECTO : EJEMPLO APLICATIVO
SECCION 1 : km - km

FECHA : 08/2020

1. REQUISITOS DEL DISEÑO

46969282

a. PERIODO DE DISEÑO (Años)	10
b. NUMERO DE EJES EQUIVALENTES TOTAL (W18)	4696928
c. SERVICIABILIDAD INICIAL (pi)	4.5
d. SERVICIABILIDAD FINAL (pt)	2.0
e. FACTOR DE CONFIABILIDAD (R)	85%
STANDARD NORMAL DEVIATE (Zr)	-1.036
OVERALL STANDARD DEVIATION (So)	0.45

2. PROPIEDADES DE MATERIALES

a. MODULO DE RESILIENCIA DE LA BASE GRANULAR (KIP/IN ²)	43.88
b. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUB-BASE	34.92
c. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUBRASANTE (Mr, ksi)	21.06

3. CALCULO DEL NUMERO ESTRUCTURAL (Variar SN Requerido hasta que N18 Nominal = N18 Calculo)

SN Requerido	G _t	N18 NOMINAL	N18 CALCULO
2.77	-0.03342	6.67	6.67

3. ESTRUCTURACION DEL PAVIMENTO

a. COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA	
Concreto Asfáltico (a1)	0.43
Base granular (a2)	0.14
Subbase (a3)	0.12
b. COEFICIENTES DE DRENAJE DE CAPA	
Base granular (m2)	0.80
Subbase (m3)	0.60

ALTERNATIVA	SNreq	SNresul	D1(cm)	D2cm)	D3(cm)
1	2.77	2.83	6	25	25
2	2.77	2.80	5	25	30

(*) HOJA DE CALCULO DESARROLLADA POR EL DR. CARLOS M. CHANG