



MCIA
Maestría en Ciencias
en Ingeniería Ambiental
UMSNH

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

FACULTAD DE BIOLOGÍA

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE
CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**

TESIS

para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

presenta

DAVID ALEJANDRO GÓMEZ MARÍN

Ingeniero Civil

Director de Tesis:

Dr. Ezequiel García Rodríguez

Co-Director de Tesis:

Dr. Rafael Soto Espitia

Morelia, Michoacán, noviembre de 2023

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Resumen

En el presente trabajo se efectúa el análisis de ciclo de vida en la construcción de pavimentos asfálticos, enfocada en el cuidado medioambiental. Se realiza la comparativa de un pavimento asfáltico convencional respecto a un pavimento asfáltico con incorporación de RAP (por sus siglas en inglés: Recycled Asphalt Pavement).

Se realizó un análisis del estado del arte, para determinar el avance en la materia. Es necesario analizar las mezclas asfálticas convencionales y adicionadas con RAP que existen, así como su proceso de elaboración, modificadores de desempeño y los procedimientos constructivos de los pavimentos carreteros.

Lo anterior permitió determinar las variables de entrada para el análisis correspondiente, así como los diversos factores que intervienen en la modelación del análisis de ciclo de vida de cada uno de ellos, y así determinar las fortalezas y debilidades que presenta cada uno.

Se llevó a cabo el análisis de ciclo de vida de un pavimento convencional y de un pavimento al que se le incorporó 50% de RAP en la capa de base.

El que mejor comportamiento de perfil medio ambiental presentó fue el pavimento con RAP, teniendo una reducción media de 10.78% de contaminación.

La metodología y el inventario de ciclo de vida son totalmente reproducibles para cualquier escenario de tipo de pavimentos carreteros que requiera una evaluación medio ambiental Utilizando el ACV.

Palabras clave: Pavimento, Asfalto, RAP, ACV, Ciclo de vida, Sostenible.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Abstract

In this work, a life cycle analysis is carried out in the construction of asphalt pavements, focused on environmental care. A comparison is made between a conventional asphalt pavement and an asphalt pavement with the incorporation of RAP (Recycled Asphalt Pavement).

An analysis of the state of the art was carried out to determine the progress in the matter. It is necessary to analyze the conventional and RAP-added asphalt mixtures that exist, as well as their production process, performance modifiers and the construction procedures of road pavements.

The above made it possible to determine the input variables for the corresponding analysis, as well as the various factors involved in the modeling of the life cycle analysis of each of them, and thus determine the strengths and weaknesses that each one presents.

The life cycle analysis of a conventional pavement and a pavement to which 50% of RAP was incorporated in the base layer was carried out.

The one with the best environmental profile performance was the pavement with RAP, having an average reduction of 10.78% in contamination.

The methodology and life cycle inventory are fully reproducible for any type of road pavement scenario that requires an environmental assessment using LCA.

Keywords: Pavement, Asphalt, RAP, LCA, Life cycle, Sustainable.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Índice

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ACRÓNIMOS	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación	4
1.2. Hipótesis	5
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos particulares	5
1.4. Contenido	6
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Marco conceptual	6
2.2. Pavimento	7
2.2.1. Pavimento asfáltico o flexible	7
2.2.2. Pavimento asfáltico reciclado	7
2.2.3. Agregado pétreo	7
2.2.3.1. Fuente de agregados	8

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



2.2.3.2.	Propiedades de los agregados	9
2.2.4.	Asfalto	10
2.2.4.1.	Cemento asfáltico	10
2.2.4.2.	Propiedades Químicas	11
2.2.4.3.	Propiedades Físicas	11
2.3.	Contaminación	12
2.3.1.	Huella de carbono	12
2.3.2.	Gases de efecto invernadero	13
2.3.3.	Ambiente	13
2.3.4.	Contaminante	13
2.3.5.	Ecosistema	13
2.3.6.	Desarrollo sustentable	13
2.3.7.	Equilibrio ecológico	14
2.3.8.	Emisión	14
2.3.9.	Impacto Ambiental	14
2.3.10.	Manifestación de Impacto ambiental	14
2.3.11.	Residuo	14
2.4.	Análisis de ciclo de vida	14
2.4.1.	Ciclo de vida	15
2.4.2.	Análisis del inventario del ciclo de vida	15
2.4.3.	Evaluación del impacto del ciclo de vida	15
2.4.4.	Interpretación del ciclo de vida	15
2.4.5.	Aseveración comparativa	15

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



2.4.6.	Transparencia	15
2.4.7.	Aspecto ambiental	16
2.4.8.	Producto	16
2.4.9.	Coproducto	17
2.4.10.	Proceso	17
2.4.11.	Flujo elemental	17
2.4.12.	Flujo de energía	17
2.4.13.	Energía base	17
2.4.14.	Materia prima	17
2.4.15.	Entrada auxiliar	18
2.4.16.	Asignación	18
2.4.17.	Criterios de corte	18
2.4.18.	Calidad de los datos	18
2.4.19.	Unidad funcional	18
2.4.20.	Entrada	18
2.4.21.	Flujo intermedio	18
2.4.22.	Producto intermedio	18
2.4.23.	Resultado del análisis del inventario del ciclo de vida	19
2.4.24.	Salida	19
2.4.25.	Energía de proceso	19
2.4.26.	Flujo de producto	19
2.4.27.	Sistema del producto	19
2.4.28.	Flujo de referencia	19
2.4.29.	Emisiones y vertidos	19

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



2.4.30.	Análisis de sensibilidad	20
2.4.31.	Límite del sistema	20
2.4.32.	Análisis de la incertidumbre	20
2.4.33.	Proceso unitario	20
2.4.34.	Residuo	20
2.4.35.	Punto final de categoría	20
2.4.36.	Factor de caracterización	20
2.4.37.	Mecanismo ambiental	21
2.4.38.	Categoría de impacto	21
2.4.39.	Indicador de categoría de impacto	21
2.4.40.	Verificación del análisis de integridad	21
2.4.41.	Verificación del análisis de coherencia	21
2.4.42.	Verificación del análisis de sensibilidad	21
2.4.43.	Evaluación	21
2.4.44.	Revisión crítica	22
3.	ESTADO DEL ARTE	22
4.	METODOLOGÍA	23
5.	RESULTADOS	27
5.1.	Análisis de pavimentos asfálticos convencionales	27
5.1.1.	Tipos de pavimentos	27
5.1.2.	Tipos de Mezclas asfálticas	29
5.1.3.	Clasificación de los productos asfálticos	35
5.1.4.	Metodologías de diseño de mezclas asfálticas	39

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



5.1.6. Metodologías de diseño estructuras de pavimentos	43
5.2. Análisis de pavimentos reciclados.	44
5.3. Análisis de los procesos constructivos	52
5.3.1. Proceso constructivo para conservación de un pavimento convencional	52
5.4. Caracterización de los materiales	74
5.5. Modelado del Análisis de ciclo de Vida.	95
5.5.1. Diseño de Sección de pavimento	95
5.5.2. Unidad Funcional	105
5.5.3. Flujo de referencia	107
5.5.4. Objetivo y Alcances	107
5.5.5. Límites del sistema	109
5.5.6. Validación ICV (Inventario de ciclo de vida)	113
5.6. Comparación.	137
CONCLUSIONES	143
REFERENCIAS	145

Índice de figuras

Ilustración 1 Metodología propuesta	26
Ilustración 2 Mezclas densas, discontinuas y abiertas.	31
Ilustración 3 Sistema de doble riego	33
Ilustración 4 Riego de sello reforzado con fibra de vidrio	34
Ilustración 5 Microaglomerado	34

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Ilustración 6	riego tipo CAPE SEAL	35
Ilustración 7	Niveles de diseño/ evaluación del protocolo AMAAC	42
Ilustración 8	Asfalto reciclado en Frío.....	51
Ilustración 9	Proceso constructivo de un pavimento convencional	63
Ilustración 10	Recuperado de material de un pavimento	64
Ilustración 11	Mezclado y tendido del material recuperado de un pavimento	67
Ilustración 12	Tendido de carpeta asfáltica	72
Ilustración 13	Proceso constructivo de pavimento con RAP.....	74
Ilustración 14	Pesaje del material	76
Ilustración 15	Prueba punto de reblandecimiento	88
Ilustración 16	Prueba de ductilidad.....	89
Ilustración 17	Grafica granulométrica de los materiales de banco	91
Ilustración 18	Grafica de composición granulométrica del material con 50% de RAP	94
Ilustración 19	Determinación del coeficiente de capa para una carpeta asfáltica	99
Ilustración 20	Determinación del coeficiente de capa para una base hidráulica.....	100
Ilustración 21	Sección propuesta obtenida por el método AASHTO Fuente: Elaboración propia.....	102
Ilustración 22	Estructura ACV Fuente: ISO 14044:2006.....	103
Ilustración 23	Estructura ACV propuesta	104
Ilustración 24	Límites del sistema del Pavimento convencional.	110
Ilustración 25	Límites del sistema de pavimento con RAP.....	111
Ilustración 26	Diagrama del Inventario de Ciclo de vida.	114
Ilustración 27	Inter fase del software SIMAPRO	127
Ilustración 28	Gráfica de resultado de categorías de Impacto Pavimento convencional.	130
Ilustración 29	Aportación porcentual por categoría Pavimento convencional.	131
Ilustración 30	Gráfica de resultado de categorías de Impacto Pavimento con RAP.	135

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



<i>Ilustración 31 Aportación porcentual por categoría Pavimento con RAP.</i>	136
Ilustración 32 Gráfica comparativa de Materiales Totales.	138
Ilustración 33 Gráfica comparativa de Energía total.	139
Ilustración 34 Gráfica comparativa de Transporte.	140
Ilustración 35 Gráfica comparativa de categorías de Impacto.	142
Ilustración 36 Gráfica comparativa de categorías de Impacto de manera porcentual.	142

Índice de Tablas

Tabla 1 Clasificación de los materiales asfálticos	36
Tabla 2 Propiedades de los materiales pétreos de banco	90
Tabla 3 Composición granulométrica	91
Tabla 4 Propiedades de los materiales de la base con 50% RAP	93
Tabla 5 Granulométrica del material con 50% RAP	94
Tabla 6 Nivel de confiabilidad	97
Tabla 7 Desviación estándar normal	97
Tabla 8 Coeficientes de capa para pavimento flexible	99
Tabla 9 Espesores de la sección del pavimento convencional	101
Tabla 10 Espesores de la sección del pavimento con RAP	101
Tabla 11 Unidad Funcional de ambos pavimentos	106
Tabla 12 Flujo de referencia de Ambos pavimentos.	107
Tabla 13 Objetivo y alcance del sistema	108
Tabla 14 Insumos Fresado	115
Tabla 15 Insumos Base Hidráulica.	116
<i>Tabla 16 Insumos Carpeta asfáltica</i>	117
Tabla 17 Insumos Vida útil conservación.	118
<i>Tabla 18 Insumos Vida Útil Rehabilitación</i>	119
<i>Tabla 19 Insumos Fin de Vida Útil</i>	120

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Tabla 20 Insumos Recuperado	121
Tabla 21 Insumos Base con RAP	122
Tabla 22 Insumos Carpeta asfáltica	123
Tabla 23 Insumos Vida Útil Conservación.	124
Tabla 24 Insumos Vida Útil Rehabilitación.	125
Tabla 25 Insumos Fin de Vida Útil.	126
Tabla 26 Resultados por categoría Pavimento convencional.	129
Tabla 27 Resultados por categoría Pavimento Con RAP.	133
Tabla 28 Resumen de cantidades Pavimento convencional.	137
Tabla 29 Resumen de cantidades Pavimento con RAP.	137
Tabla 30 Comparativa de resultados de categoría de Impacto	141

Acrónimos

CC: Cambio Climático

RAP: Pavimento asfáltico reciclado

ACV: Análisis de ciclo de vida

ICV: Inventario del ciclo de vida

EICV: Evaluación del impacto del ciclo de vida

° C: Grados Celsius

PIB: Producto interno bruto

MtCO₂: Megatoneladas de dióxido de carbono

COV: Compuestos orgánicos volátiles

RS: Residuos sólidos

CO₂: Bióxido de carbono

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



CH₄: Metano

N₂O: Óxido Nitroso

HFC: Hidrofluorocarbonos

PFC: Perfluorocarbonos

SF₆: Hexafluoruro de azufre

GEI: Gases de efecto Invernadero

LGEEPA: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

VRS: Valor Relativo de Soporte

WMA: Warm Mix Asphalt (mezclas asfálticas tibias)

NFU: Neumáticos fuera de uso

ISO: International Standards Organization (Organización Internacional de Normalización.

1. Introducción

El cambio climático (CC) y el aumento en la desaparición de los recursos naturales del Planeta, es uno de los retos que se enfrentan hoy en día.

El cambio climático tendrá graves repercusiones en México, pues se proyecta que la temperatura media anual podría aumentar entre 0.5 y 4.8° C en el periodo 2020-2100, mientras que la precipitación podría reducirse en hasta 15% en el invierno y 5% en el verano. Esto favorecería la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos que tendrían severos impactos en la salud, sistemas de distribución de agua y drenaje, agricultura, así como en la infraestructura carretera, en la generación de energía eléctrica y en la extracción y procesamiento de hidrocarburos. (Sosa-Rodríguez, 2015)

En México se considera una de las naciones más vulnerables a los efectos del CC, ya que 15% del territorio nacional, 68.2% de su población y 71% del producto interno bruto (PIB) están propensos a sufrir las consecuencias negativas de este fenómeno (BM, 2010)

Se obtuvo que en México se registraron 477 megatoneladas de dióxido de carbono (MtCO₂), por lo que es el país de América Latina que más emitió en 2018, según los datos más recientes, México está por delante de Brasil y Argentina, ya que respectivamente tienen 457 MtCO₂ y 196 MtCO₂. (Acevez Gutierrez, López Chávez, Mercado Ibarra, & Arevalo Razo, 2020)

Resultando así en el lugar número 13, los países que más contaminaron a nivel mundial fueron China con 10354 MtCO₂, Estados Unidos de América con 5378 MtCO₂, La India con 2593 MtCO₂.

Otro problema a nivel mundial, especialmente en las grandes ciudades de los países de América Latina y el Caribe, es el manejo de los residuos sólidos ha representado un problema debido, entre otras cosas, a los altos volúmenes de residuos sólidos

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



generados por los ciudadanos; cuando el manejo de éstos no es el adecuado, puede afectar la salud de los ciudadanos y al medio ambiente. (Sáez & Urdaneta, 2014)

En particular, en la Ingeniería Vial, donde la construcción de caminos es considerada una de las industrias con mayor consumo de materiales en el mundo y en consecuencia, con grandes efectos tanto económicos como ambientales, la sostenibilidad está enfocada fundamentalmente en la reducción de la huella de carbono (CO₂) en toda la vida de una carretera, desde la obtención de los materiales para su construcción y mantenimiento, hasta el fin de la vida útil o de servicio de la misma. (Huang et al, 2007)

En la década de los 70's y 80's, las principales preocupaciones ambientales en la producción de los pavimentos asfálticos fueron sido las emisiones y el impacto que podrían tener en la salud de las personas. Algunos años después, se empezó a considerar el impacto que podrían tener en el medio ambiente y los recursos naturales. En años recientes, las preocupaciones también se han enfocado en las emisiones de efecto invernadero las cuales son precursoras del cambio climático.

En términos generales, el impacto ambiental que genera un pavimento asfáltico está basado en el consumo energético en todo su ciclo de vida. Los consumos aproximados para la producción del asfalto representan entre el 45 y el 95%; la transportación al sitio va de 1 al 8%; la colocación y compactación genera del 1 al 12%; los trabajos de mantenimiento en sitio de 0 a 1%; y la disposición al final de su vida útil de 0 a 40%. Del impacto total en la fase de producción, la producción del asfalto representa entre el 56 y el 67%, el transporte de agregados vírgenes a la planta del 13 al 16% y la energía requerida para secar y calentar los agregados del 11 al 25%. (Mendoza, Adame, & Marcos, 2020)

La construcción de pavimentos asfálticos carreteros representa un reto fundamental y de mayor importancia donde la afectación ambiental juega un papel significativo,

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



ya que en su construcción se genera una serie de efectos negativos generando gases de efecto invernadero, explotación de bancos de materiales, y los correspondientes a los generados por la utilización de energías. Para mitigar los efectos ambientales negativos se considera necesario realizar una serie de evaluaciones que permitan determinar cuáles pavimentos son más amigables con el medio ambiente. En la actualidad para construir caminos se realizan estudios de impacto ambiental, sin embargo, no se realiza un análisis de ciclo de vida que permita aportar mayor luz a la toma de decisiones.

El análisis de ciclo de vida resulta una alternativa como herramienta de medida medioambiental al construir pavimentos carreteros.

Recordar que el análisis de ciclo de vida es una herramienta para una mejor comprensión de las dimensiones del perfil ambiental de los productos, procesos y servicios, es adecuado para comparar los impactos medioambientales potenciales de dos o más productos semejantes y, de ser necesario, puede ser combinado con consideraciones económicas y sociales, ya que dependiendo de los procesos que contemple el ACV, puede tener distintos alcances:

- “De la cuna a la tumba” : Incluye la extracción de materias primas y el procesamiento de los materiales necesarios para la manufactura de componentes, el uso del producto y finalmente su reciclaje y/o la gestión final. El transporte, almacenaje, distribución y otras actividades intermedias entre las fases del ciclo de vida, también se incluyen cuando tienen la relevancia suficiente.
- “De la cuna a la puerta” : El alcance del sistema se limita desde que se obtienen las materias primas hasta que el producto se pone en el mercado, al salir de la planta de fabricación.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



- “De la puerta a la puerta” : Sólo se tienen en cuenta los procesos de fabricación. (Acevez Gutierrez, López Chávez , Mercado Ibarra, & Arevalo Razo, 2020)

En la actualidad, en México, no se cuenta con una normativa acerca del análisis de ciclo de vida en pavimentos carreteros. por lo tanto, en el presente trabajo se pretende generar el conocimiento necesario para crear conciencia integral sobre la sustentabilidad al respecto, mediante la evaluación de dos escenarios de pavimentos, incluyendo el procedimiento constructivo y con características de los materiales distintos, para determinar el más favorable desde el punto de vista ambiental, basándose en su análisis de ciclo de vida.

Lo anterior representa una iniciativa importante relativa a la reutilización de los residuos para reducir la huella de carbono.

1.1. Justificación

El cambio climático, es un tema de preocupación, generado por, generación de gases de efecto invernadero de todos los sectores.

Existe una diversidad de ejemplos de efectos negativos a causa del cambio climático, como son: las pérdidas de biodiversidad, el adelgazamiento de la capa de ozono, los escasos de agua potable, reservas de energías, eutrofización del agua, etc.

La Industria de la construcción carretera es uno de los sectores que más materiales y energía utiliza. En la actualidad para construir pavimentos asfálticos, solo se realizan estudios de impacto ambiental, sin embargo, es fundamental tomar en cuenta el análisis de ciclo de vida, que brinda un panorama más completo y garantiza información más clara sobre el impacto ambiental que se tendrá desde su extracción de materiales, su vida útil, hasta el cumplimiento de esta última.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Existen normativas internacionales para realizar el Análisis de ciclo de vida. En México se cuenta con la norma mexicana NMX-SAA-14044-IMNC-2008” Gestión ambiental- análisis de ciclo de vida- requisitos y directrices, pero en términos generales, las normas tienen carácter general; por lo anterior no se cuenta con normativa específica para pavimentos carreteros y/o urbanos.

Esta investigación reunirá información valiosa y se apega a los objetivos de desarrollo sostenible que ha propuesto La Organización de las naciones Unidas (ONU), específicamente en los ejes 7.- Energía asequible y no contaminante, 13 Acción por el clima, 15 Vida de ecosistemas terrestres y también a la agenda por Michoacán que presenta el gobierno del estado de Michoacán en el ejes 3 Desarrollo Económico Sustentable y Competitivo y en el eje 5 Medio ambiente, Adaptación al Cambio Climático y Gestión del Riesgo.

1.2. Hipótesis

Utilizar el análisis de ciclo de vida para realizar comparaciones en pavimentos flexibles, permite optar por pavimentos flexibles más sostenibles.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar el Análisis de ciclo de vida a pavimentos asfálticos, en dos escenarios distintos, para elegir el más sostenible.

1.3.2. Objetivos particulares

1. Analizar el estado del arte.
2. Analizar los pavimentos convencionales y RAP.
3. Analizar la caracterización de los materiales.
4. Analizar los procesos constructivos de pavimentos.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



5. Modelar el Análisis de ciclo de vida de cada uno de los pavimentos: convencionales y RAP.
6. Efectuar la comparación de ambos escenarios.

1.4. Contenido

El capítulo 1 contiene la Introducción, una Justificación donde se explica la razón de esta investigación, además de la hipótesis del mismo, y los objetivos planteados.

El capítulo 2 contiene el marco teórico donde se presentan algunas definiciones que darán contexto al tema.

El capítulo 3 contiene el estado del arte donde se revisan diferentes literaturas y avances relacionados en el tema.

El capítulo 4 se presenta la metodología planteada para lograr los objetivos planteados.

El capítulo 5 se encuentra el desarrollo y procedimientos para obtener los resultados.

2. Marco teórico

2.1. Marco conceptual

Dentro de la industria carretera se ha generado la necesidad de construir pavimentos carreteros sustentables y amigables con el medio ambiente. El análisis de ciclo de vida es una herramienta potencial para aportar sostenibilidad al proceso de construcción de caminos. El análisis de ciclo de vida tiene como virtud proporcionar datos que nos permiten tener un conocimiento más certero de la técnica constructiva desde la perspectiva medio ambiental, además permite realizar comparaciones con escenarios de distintas características.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Dentro de este proyecto de investigación se pretende realizar el análisis de ciclo de vida a dos pavimentos carreteros asfálticos con distintas características, con la finalidad de poder determinar el más amigable con el medio ambiente de acuerdo a sus impactos ambientales generados de cada uno.

Para los fines de esta investigación se presentan los términos y conceptos siguientes:

2.2. Pavimento

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración, y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el período para el cual fue diseñada la estructura del pavimento. (Montejo Fonseca, 2002)

2.2.1. Pavimento asfáltico o flexible

Se le denomina Pavimento asfáltico porque está conformado de una carpeta con agregados pétreos y cemento asfáltico. (Montejo Fonseca, 2002)

2.2.2. Pavimento asfáltico reciclado

Es el término dado a los pavimentos que contienen materiales tales como asfalto y agregados pétreos que fueron removidos y reprocesados para ser incorporados como materiales en una nueva carpeta asfáltica. (Mendoza, Adame, & Marcos, 2020)

2.2.3. Agregado pétreo

Agregado, también conocido como roca, material granular, o agregado mineral, es cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, roca triturada, escoria y polvo de roca. (Medina, 2020)

2.2.3.1. Fuente de agregados

Los agregados usados en el pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, agregados procesados, y agregados sintéticos o artificiales.

Agregados Naturales: Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua, el movimiento del hielo. Los principales tipos de agregados naturales usados en la construcción de pavimentos son la grava y arena. (Osorio, s. f.)

Agregados Procesados: Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y cribados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimento de mezcla asfáltica, y fragmento de lecho de roca y de rocas grandes que deben ser reducidas en tamaño antes de ser usados en la pavimentación. (Castillo, 2019)

Agregados Sintéticos: Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales como el refinamiento de

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



metales. Otros son producidos mediante el procesamiento de materias primas, para ser usados específicamente como agregado. (Castillo, 2019)

2.2.3.2. Propiedades de los agregados

Los agregados pétreos deben poseer ciertas propiedades para poder ser considerados apropiados para los pavimentos asfálticos de buena calidad, estas propiedades son:

Graduación y tamaño máximo de partícula: Las especificaciones de pavimentos asfálticos requiere que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partícula esté presente en ciertas porciones. Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado, o graduación de la mezcla. (Asphalt Institute, 2014)

Limpieza y pureza: Las cantidades excesivas de vegetación, arcilla, partículas blandas en el agregado pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento, por tal motivo se determinan mediante inspección visual o a través de un tamizado por lavado, en donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparada con su peso después de ser lavada. (Asphalt Institute, 2014)

Dureza: Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla de pavimentación, y durante la vida de servicio del pavimento. (Asphalt Institute, 2014)

Forma de la partícula: La forma de la partícula es una propiedad que puede afectar la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. (Asphalt Institute, 2014)

Textura de la superficie: Es un factor que puede determinar la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, una textura áspera, como la del

papel lija aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento de tránsito sea más seguro. (Asphalt Institute, 2014)

Capacidad de absorción: La capacidad que tiene el agregado de absorber agua es un elemento importante de información ya que todos los agregados son porosos, y algunos más que otros, una forma de medirla es por medio de la cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño y con esto se puede determinar su porosidad. (Asphalt Institute, 2014)

Afinidad con el asfalto: La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto, a esto se le conoce como hidrofóbica (repelen el agua). (Asphalt Institute, 2014)

2.2.4. Asfalto

El asfalto es una mezcla natural o artificial en la que el betún está asociado con materia mineral inerte. Es de color negro o negro parduzco. A una temperatura entre 50 y 100 ° C está en estado líquido, mientras que a una temperatura inferior a esta permanece en estado sólido, debido a que es un material termoplástico. (Maldonado, 2021)

Los asfaltos de pavimentación pueden clasificarse bajo tres tipos generales: cemento asfáltico, asfalto diluido y asfalto emulsificante.

2.2.4.1. Cemento asfáltico

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso, espeso y pegajoso, que se obtienen del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites, se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y por lo tanto es un excelente cemento para unirlos. (SCT-Secretaría de Comunicación y Transporte, 2006)

2.2.4.2. Propiedades Químicas

La composición química de los asfaltos está constituida por cadenas de moléculas compuestas fundamentalmente por carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y complejos de vanadio níquel, hierro, calcio y magnesio, composición específica de un asfalto en particular dependerá de la procedencia del petróleo crudo del cual procede, y en el análisis químico del asfalto es posible distinguir dos grandes grupos que lo constituyen: los asfáltenos y máltenos. (SOL PETROLEO, s. f.)

Asfáltenos: Son estructuras complejas de compuestos aromáticos de color negro o marrón que contienen, además del carbón, otros elementos químicos tales como nitrógeno, azufre, oxígeno y, en general, son compuestos polares, de alto peso molecular.

Máltenos: Son sustancias solubles en normal heptano y está constituido por resinas, saturados y aromáticos.

2.2.4.3. Propiedades Físicas

Las propiedades físicas del asfalto, las cuales tienen una gran importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de las vías terrestres son: durabilidad, adhesión y cohesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento. (Asphalt Institute, 1992)

Durabilidad: Se le conoce como durabilidad a la medida en la que el asfalto puede retener sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad que se juzga principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en término de las propiedades del asfalto.

Adhesión y cohesión: Se le denomina adhesión a la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación, y se le denomina cohesión a

la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento.

Susceptibilidad a la temperatura: Los asfaltos son termoplásticos, se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura es disminuida, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta, esta característica es conocida como susceptibilidad a la temperatura. Esta característica varía entre los asfaltos de petróleo de diferente origen, aun si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

Envejecimiento y endurecimiento: Los asfaltos tienden a endurecer aumentando sus características de consistencia en la mezcla asfáltica durante la construcción, este endurecimiento es causado por el proceso de oxidación (asfalto combinándose con oxígeno), el cual ocurre más fácil a altas temperaturas y en películas delgadas de asfalto.

No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas, por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento y poder disminuir el endurecimiento.

2.3. Contaminación

Es la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico. (LEGEEPA, 2021)

2.3.1. Huella de carbono

se define como el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de CO₂ equivalentes, y sirve como herramienta de gestión para conocer las conductas o acciones que están

contribuyendo a aumentar las emisiones, determinas cómo se pueden mejorar y realizar un uso más eficiente de los recursos. (MMA, 2017)

2.3.2. Gases de efecto invernadero

Son componentes gaseosos de la atmósfera, naturales y resultantes de la actividad humana, que absorben y emiten radiaciones. Esta propiedad causa el efecto invernadero. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático reconoce seis: bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6). (IPCC, 2007)

2.3.3. Ambiente

Es el conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre, que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados. (LEGEEPA, 2021)

2.3.4. Contaminante

Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural. (LEGEEPA, 2021)

2.3.5. Ecosistema

La unidad funcional básica de interacción de los organismos vivos entre sí y de éstos con el ambiente, en un espacio y tiempo determinados. (LEGEEPA, 2021)

2.3.6. Desarrollo sustentable

El proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de

manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras. (LEGEEPA, 2021)

2.3.7. Equilibrio ecológico

La relación de interdependencia entre los elementos que conforman el ambiente que hace posible la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos. (LEGEEPA, 2021)

2.3.8. Emisión

Liberación al ambiente de toda sustancia, en cualquiera de sus estados físicos, o cualquier tipo de energía, proveniente de una fuente. (LEGEEPA, 2021)

2.3.9. Impacto Ambiental

Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza. (LEGEEPA, 2021)

2.3.10. Manifestación de Impacto ambiental

El documento mediante el cual se da a conocer, con base en estudios, el impacto ambiental, significativo y potencial que generaría una obra o actividad, así como la forma de evitarlo o atenuarlo en caso de que sea negativo. (LEGEEPA, 2021)

2.3.11. Residuo

Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó. (LEGEEPA, 2021)

2.4. Análisis de ciclo de vida

Recopilación y evaluación de las entradas, resultados y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto durante su ciclo de vida. (ISO 14044, 2006)

2.4.1. Ciclo de vida

Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final. (ISO 14044, 2006)

2.4.2. Análisis del inventario del ciclo de vida

Fase del análisis del ciclo de vida que implica la recopilación y la cuantificación de entradas y resultados de un sistema del producto durante su ciclo de vida. (ISO 14044, 2006)

2.4.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida

Fase del análisis del ciclo de vida dirigida a conocer y evaluar la magnitud y cuán significativos son los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a lo largo de todo el ciclo de vida del producto. (ISO 14044, 2006)

2.4.4. Interpretación del ciclo de vida

Fase del análisis del ciclo de vida en la que los hallazgos del análisis del inventario o de la evaluación del impacto, o de ambos, se evalúan en relación con el objetivo y el alcance definidos para llegar a conclusiones y recomendaciones. (ISO 14044, 2006)

2.4.5. Aseveración comparativa

Declaración ambiental en relación con la superioridad o la equivalencia de un producto con respecto a un producto competidor que realiza la misma función. (ISO 14044, 2006)

2.4.6. Transparencia

Presentación de información de forma abierta, exhaustiva y comprensible. (ISO 14044, 2006)

2.4.7. Aspecto ambiental

Elemento de las actividades, productos o servicios de una organización que puede interactuar con el medio ambiente. (ISO 14044, 2006)

2.4.8. Producto

Cualquier bien o servicio

Nota 1 a la entrada: El producto se puede categorizar como sigue:

- servicios (por ejemplo, transporte);
- software (por ejemplo, programas informáticos, diccionario);
- hardware (por ejemplo, parte mecánica de un motor);
- materiales procesados (por ejemplo, lubricante);

Nota 2 a la entrada: Los servicios tienen elementos tangibles e intangibles. La prestación de un servicio puede implicar, por ejemplo, lo siguiente:

- una actividad realizada sobre un producto tangible suministrado por el cliente (por ejemplo, reparación de un automóvil);
- una actividad realizada sobre un producto intangible suministrado por el cliente (por ejemplo, la declaración de ingresos necesaria para preparar la devolución de los impuestos);
- la entrega de un producto intangible (por ejemplo, la entrega de información en el contexto de la transmisión de conocimiento);
- la creación de una ambientación para el cliente (por ejemplo, en hoteles y restaurantes).

El software se compone de información, generalmente es intangible y puede estar bajo la forma de propuestas, transacciones o procedimientos. El hardware generalmente es tangible y su magnitud es una característica contable. Los

materiales procesados generalmente son tangibles y su magnitud es una característica continua. (ISO 14044, 2006)

2.4.9. Coproducto

Cualquier producto de entre dos o más productos provenientes del mismo proceso unitario o sistema del producto. (ISO 14044, 2006)

2.4.10. Proceso

Conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados. (ISO 14044, 2006)

2.4.11. Flujo elemental

Materia o energía que entra al sistema bajo estudio, que ha sido extraído del ambiente sin una transformación previa por el ser humano, o materia o energía que sale del sistema bajo estudio, que es liberado al medio ambiente sin una transformación posterior por el ser humano. (ISO 14044, 2006)

2.4.12. Flujo de energía

Entrada o resultado de un proceso unitario o sistema del producto, expresada en unidades de energía. (ISO 14044, 2006)

2.4.13. Energía base

Calor de combustión de una materia prima que no se utiliza como fuente de energía de un sistema del producto, expresada en términos de poder calorífico superior o de poder calorífico inferior. (ISO 14044, 2006)

2.4.14. Materia prima

Materia primaria o secundaria que se usa para elaborar un producto. (ISO 14044, 2006)

2.4.15. Entrada auxiliar

Materia que entra y se utiliza en el proceso unitario para obtener el producto, pero que no constituye una parte del producto. (ISO 14044, 2006)

2.4.16. Asignación

Distribución de los flujos de entrada o de salida de un proceso o un sistema del producto entre el sistema del producto bajo estudio y uno o más sistemas del producto diferentes. (ISO 14044, 2006)

2.4.17. Criterios de corte

Especificación de la cantidad de materia o de energía o del nivel de importancia ambiental asociado a los procesos unitarios o al sistema del producto para su exclusión del estudio. (ISO 14044, 2006)

2.4.18. Calidad de los datos

Característica de los datos que se relaciona con su capacidad para satisfacer los requisitos establecidos. (ISO 14044, 2006)

2.4.19. Unidad funcional

Desempeño cuantificado de un sistema del producto para su utilización como unidad de referencia. (ISO 14044, 2006)

2.4.20. Entrada

Flujo de producto, de materia o de energía que entra en un proceso unitario. (ISO 14044, 2006)

2.4.21. Flujo intermedio

Flujo de producto, materia o de energía que ocurre entre procesos unitarios del sistema del producto de producción en estudio. (ISO 14044, 2006)

2.4.22. Producto intermedio

Salida de un proceso unitario que es entrada de otros procesos unitarios que requiere una transformación adicional dentro del sistema. (ISO 14044, 2006)

2.4.23.Resultado del análisis del inventario del ciclo de vida

Resultado de un análisis del inventario del ciclo de vida que clasifica los flujos que atraviesan los límites del sistema y que proporciona el punto de partida para la evaluación del impacto del ciclo de vida. (ISO 14044, 2006)

2.4.24.Salida

Flujo de producto, materia o de energía que sale de un proceso unitario. (ISO 14044, 2006)

2.4.25.Energía de proceso

Entrada de energía requerida en un proceso unitario, para llevar a cabo el proceso o hacer funcionar el equipo, excluyendo las entradas de energía para la producción y suministro de esta energía. (ISO 14044, 2006)

2.4.26.Flujo de producto

Productos que entran o salen de un sistema del producto hacia otro. (ISO 14044, 2006)

2.4.27.Sistema del producto

Conjunto de procesos unitarios con flujos elementales y flujos de producto, que desempeña una o más funciones definidas, y que sirve de modelo para el ciclo de vida de un producto. (ISO 14044, 2006)

2.4.28. Flujo de referencia

Medida de las salidas de los procesos, en un sistema del producto determinado, requerida para cumplir la función expresada mediante la unidad funcional. (ISO 14044, 2006)

2.4.29.Emisiones y vertidos

Emisiones al aire y vertidos al agua y suelo. (ISO 14044, 2006)

2.4.30. Análisis de sensibilidad

Procedimiento sistemático para estimar los efectos sobre el resultado de un estudio de las opciones elegidas en lo que respecta a métodos y datos. (ISO 14044, 2006)

2.4.31. Límite del sistema

Conjunto de criterios que especifican cuáles de los procesos unitarios son parte de un sistema del producto. (ISO 14044, 2006)

2.4.32. Análisis de la incertidumbre

Procedimiento sistemático para cuantificar la incertidumbre introducida en los resultados de un análisis de inventario del ciclo de vida debido a los efectos acumulativos de la imprecisión del modelo, de la incertidumbre de las entradas y la variabilidad de los datos. (ISO 14044, 2006)

2.4.33. Proceso unitario

Elemento más pequeño considerado en el análisis del inventario del ciclo de vida para el cual se cuantifican datos de entrada y salida. (ISO 14044, 2006)

2.4.34. Residuo

Sustancias u objetos a cuya disposición se procede o se está obligado a proceder cuyo poseedor tiene la intención o le es requerido que los disponga. (ISO 14044, 2006)

2.4.35. Punto final de categoría

Atributo o aspecto del entorno natural, la salud humana o los recursos que identifica un asunto ambiental de interés. (ISO 14044, 2006)

2.4.36. Factor de caracterización

Factor que surge de un modelo de caracterización que se aplica para convertir el resultado del análisis del inventario del ciclo de vida asignado a la unidad común del indicador de categoría. (ISO 14044, 2006)

2.4.37.Mecanismo ambiental

Sistema de procesos físicos, químicos y biológicos para una categoría de impacto dada, que vincula los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida con indicadores de categoría y con puntos finales de categoría. (ISO 14044, 2006)

2.4.38.Categoría de impacto

Clase que representa asuntos ambientales de interés a la cual se pueden asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida. (ISO 14044, 2006)

2.4.39.Indicador de categoría de impacto

Representación cuantificable de una categoría de impacto. (ISO 14044, 2006)

2.4.40.Verificación del análisis de integridad

Proceso para verificar si la información de las fases de un análisis del ciclo de vida es suficientemente completa para llegar a conclusiones, de acuerdo con la definición del objetivo y el alcance. (ISO 14044, 2006)

2.4.41.Verificación del análisis de coherencia

Proceso realizado antes de llegar a conclusiones, para verificar que las suposiciones, los métodos y los datos se aplican de forma coherente en todo el estudio y están de acuerdo con la definición del objetivo y el alcance. (ISO 14044, 2006)

2.4.42.Verificación del análisis de sensibilidad

Proceso para verificar que la información obtenida de un análisis de sensibilidad es pertinente para extraer conclusiones y formular recomendaciones. (ISO 14044, 2006)

2.4.43.Evaluación

Elemento dentro de la fase de interpretación del ciclo de vida que pretende establecer confianza en los resultados del análisis del ciclo de vida. (ISO 14044, 2006)

2.4.44.Revisión crítica

Proceso que pretende asegurar la coherencia entre un análisis del ciclo de vida y los principios y requisitos de las Normas Internacionales sobre análisis del ciclo de vida. (ISO 14044, 2006)

3. Estado del Arte

La creciente crítica de la opinión pública a los procesos industriales, altamente contaminantes, ha lleva a varios investigadores a analizar, de alguna forma, los costos ambientales producidos por esos procesos. En base a esto se empieza a configurar el análisis de ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés para Life Cycle Assessment), para tener en cuenta cómo impacta en el planeta cada uno de los procesos que se lleva a cabo en un proceso industrial. De esta forma se hace un análisis de los recursos naturales utilizados, de la energía consumida y de las emisiones generadas en cada subproceso asociado. El análisis de ciclo de vida se remonta entre los años 60's y 70's.

En 1969 la empresa Coca Cola estadounidense financió un estudio destinado a relacionar y comparar el consumo de recursos para fabricar los envases para sus bebidas, con las emisiones asociadas a los procesos productivos correspondientes.

Por la misma época, también en Europa también se estaba estudiando una especie de inventario, que más tarde se conoció como «Ecobalance».

En 1972, en el Reino Unido, LAN BOUSTEAD, 1996 se dedicó a calcular la energía total que se requería para la fabricación de diversos tipos de envases (de vidrio, plástico, acero y aluminio) para bebidas.

Para el año de 1993 la familia de Normas ISO 14000 contempla el ACV en su serie 14040; la ISO 14040 elabora un tipo de norma (estableciendo un procedimiento común a todos) que sirva para evaluar los impactos medioambientales a lo largo de toda la vida de un producto. (Boruda, 2012)

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Conociendo la historia y evolución del análisis de ciclo de vida, a continuación, se citan algunos documentos recopilados y analizados, que aportan a la presente investigación.

Estudios de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de mezclas asfálticas concluyeron que la etapa más impactante en emisiones de CO₂ es la etapa de fabricación (50%). El propósito del proyecto es desvincular el sector de la fabricación asfáltica de los combustibles fósiles, eliminando el consumo de éstos en los dos procesos térmicos (calentamiento de áridos y calentamiento de betún). El cambio conceptual será validado en una planta industrial de COLLOSA, donde se instalará un prototipo demostrador para validar el proceso desde el punto de vista ambiental, económico y técnico. El proyecto generará una Declaración Ambiental de Producto fomentando así criterios de Compra Pública Verde y de Innovación. (Moral, García, Peña, & Pablos, 2017)

Se encuentran disminuciones en los impactos ambientales para las opciones que se combinan el uso de RAP Y WMA, alcanzando hasta un porcentaje de reducción del 12% para CO₂, 15 % para el consumo de energías, 15% para el agua utilizada durante el ciclo de vida y del 10 al 15 % para las tres macrocategorías de daño evaluadas en el método de punto final. (Giani, Dotelli, Brandino, & Zampori, 2015)

La inclusión de materiales reciclados, como puede ser el RAP (de sus siglas en inglés para Recycled Asphalt Pavement), el polvo de caucho (comúnmente denominado NFU por su procedencia de los Neumáticos Fuera de Uso) y plásticos, como última tendencia y con resultados promisorios en tiempos recientes. Santos *et al.* (2018), Heidari *et al.* (2020), Lu *et al.* (2019)

4. Metodología

A continuación, se presenta la propuesta de la metodología para alcanzar los objetivos anteriormente mencionados:

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



1. Análisis de los pavimentos
 - Análisis de Pavimentos convencionales.
 - Análisis de Pavimentos de Reciclados
 - Análisis de los procesos constructivos.
2. Caracterización de los materiales.
3. Análisis de ciclo de vida.
4. Análisis comparativo.
5. Determinación del pavimento que atiende mejor los criterios de sostenibilidad.

Donde se desarrolla a continuación

Fase 1. Análisis de Pavimentos

La primera fase consiste en una recolección de información de diferentes literaturas, la cual tiene como objetivo definir los diferentes tipos de pavimentos tanto convencionales como reciclados que se encuentran en el sector de la industria carretera y que actualmente se encuentran en servicio.

A partir de ello, se realizará un análisis de los pavimentos mencionados en el que se detallarán los materiales empleados en su construcción, los procesos constructivos, las metodologías de diseño existentes y los tipos de mezclas del pavimento flexible.

Fase 2. Caracterización de los materiales

La segunda fase consiste en una selección de los materiales empleados en los pavimentos convencionales y los pavimentos reciclados. Posterior a la selección, se deberán caracterizar los materiales pétreos y el asfalto que será utilizado en cada pavimento. Mediante la caracterización de los materiales del pavimento convencional se determinarán las propiedades físicas y mecánicas de los materiales granulares y las propiedades reológicas del asfalto. Con ello, se realizará una

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



propuesta de diseño de mezcla con la cual se podrá ejecutar un diseño de la estructura del pavimento convencional.

Para el desarrollo de esta fase es importante contar con suficiente información de calidad con la cual se debe realizar un inventario de los materiales, energías y recursos que se van a utilizar en cada pavimento, y el documento final será el inventario de entradas para el análisis de ciclo de vida.

Fase 3. Análisis de ciclo de vida

En esta fase se realizará el análisis de ciclo de vida tanto del pavimento convencional como del pavimento reciclado. Dicho análisis se realizará mediante la metodología de la Norma ISO 14040 en la cual se describen los procesos mediante las 4 etapas que se definen a continuación:

Definición de objetivos y alcances

Es necesario conocer los alcances y objetivos que perseguimos con el estudio antes de abordarlo, se deben exponer los motivos por los que se lleva a cabo el análisis de ciclo de vida y establecer el alcance del mismo.

Inventario de ciclo de vida (ACV)

Se identifican y cuantifican todas las entradas (consumo de recursos y materiales) y todas las salidas (emisiones al aire, suelo, aguas y generación de residuos) que potencialmente podrían causar un impacto durante el análisis de ciclo de vida. Se realizará una recopilación de datos y establecer los procedimientos.

Evaluación de los Impactos del Ciclo de Vida

Se establece una relación de entradas y salidas en el inventario, con los posibles impactos sobre el medio ambiente, la salud humana y los recursos, con el objetivo de clasificar, caracterizar y evaluar cuánto de importantes son los potenciales impactos que se generan. Se establecen las categorías de impacto y se asignan los

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



datos del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado.

Interpretación de resultados

Tras la realización del **ACV** se identificarán las fases o elementos del ciclo de vida del producto se generan las principales afectaciones ambientales, y por tanto esos elementos serán claves a la hora de implementar las mejoras, puesto que son los causantes del mayor impacto ambiental. Esta es probablemente la parte crítica y más importante de todo el **ACV**. En el caso de que el objetivo que persigamos sea la comparación de distintos productos, podremos saber cuál de ellos presenta un mejor comportamiento ambiental.

Puede ser que el cálculo de los daños ambientales suela ser un poco complejo al momento de realizar un ACV, es por ello que se hace uso de un software como herramienta de apoyo, basado en las metodologías implementadas por la ISO. En el mercado existe una variedad de softwares de este tipo que incluso cuentan con sus bases de datos, pueden variar de extensión y la calidad de sus datos, así mismo de precio para su obtención. Los programas más utilizados para el desarrollo de las ACV son: SimaPro, TEAM, Umberto, Open LCA y GaBi. Por otra parte, existen algunos especializados en construcción como son Bees, Ecoeffect, Eloide, Envest, Esquer, Athenas LCA.

Fase 4. Análisis comparativo

Esta es la fase más crítica y la más importante de todo el tema, ya que en ella se centra y recaba toda la información que ha generado a lo largo de la investigación, con la finalidad de poder determinar la comparación de los dos

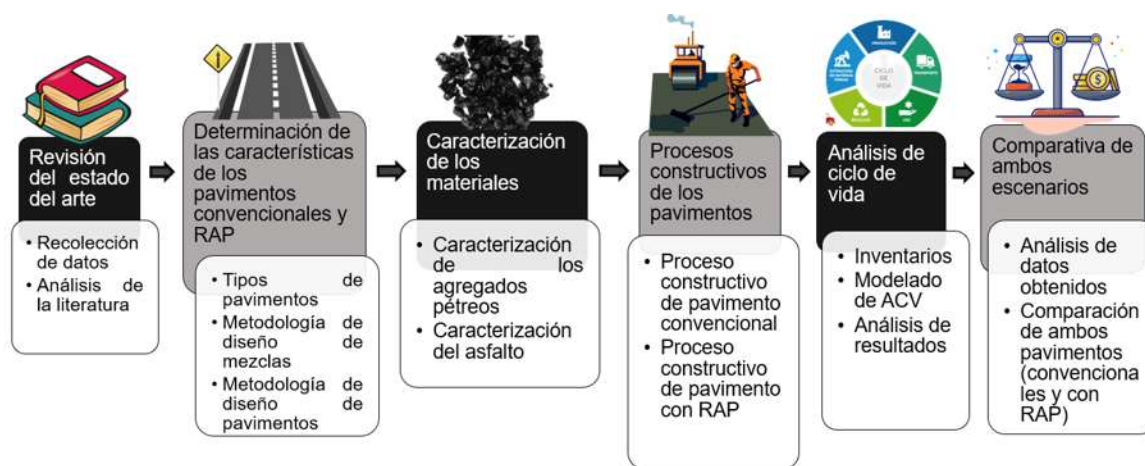
Ilustración 1 Metodología propuesta

Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



pavimentos, en indicadores de energías y afectaciones ambientales, tales como la generación de gases de efecto invernadero y otros indicadores de afectación medio ambiental.



5. Resultados

5.1. Análisis de pavimentos asfálticos convencionales

5.1.1. Tipos de pavimentos

En la actualidad existe una diversidad de tipos de pavimentos, gracias a los avances científicos y de investigación, así como el desarrollo de nuevos materiales, los pavimentos dependiendo su uso y solicitudes deberán elegirse los tipos y materiales para su conformación.

A continuación, se mencionan algunos tipos de pavimentos.

Pavimentos asfálticos o flexibles

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Los pavimentos flexibles son aquellos compuestos por una capa o carpeta asfáltica en la que se utiliza una mezcla de agregado fino o grueso con material bituminoso. (Hernández Gutierrez, 2005).

Esta mezcla asfáltica está sometida a los esfuerzos máximos y condiciones más severas impuestas por el clima y el tráfico por lo cuál debe ser diseñada y construida con materiales de buena calidad. Por ello, se apoya sobre una base y una capa de subbase de materiales granulares. En algunos casos, la capa de base es tratada con cemento, cal u otros agentes estabilizantes, para poder soportar de mejor manera las cargas aplicadas, el elevado volumen de tránsito y la distribución de cargas a la capa de subbase con el fin de proporcionar, junto con la mezcla asfáltica, un mejor soporte.

La capa de subbase se compone de materiales de menor calidad y costo que los empleados en la capa de base. Se componen de materiales estabilizados o no, o de terreno estabilizado. Las sub-bases transmiten las cargas al terreno y, en algunos casos, pueden actuar de colaborador del drenaje de las aguas del subsuelo y para prevenir la acción destructiva de las heladas. (Hernández Gutierrez, 2005)

Pavimento rígido.

Estos pavimentos se integran por una capa o losa de concreto de cemento portland que se apoya en una capa de base constituida por material granular. Esta capa descansa en una capa de suelo compactado, llamada subrasante. La resistencia estructural depende principalmente de la losa de concreto. Su resistencia estructural debe resistir los esfuerzos normales y tangenciales transmitidos por los neumáticos y su constitución estructural, además de ello debe estar previsto el pavimento rígido para un período de servicio largo y, o prever un bajo mantenimiento. (Mora, 2006)

Pavimento semirrígido

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Mantiene básicamente la misma estructura que un pavimento flexible, con la condición de que una de sus capas se encuentra rigidizada artificialmente con el uso de un aditivo que puede ser: asfalto, emulsión, cemento, cal y químicos. Con esto se busca corregir o modificar las propiedades mecánicas de los materiales locales que no cumplen con las especificaciones técnicas ni alcanzan la calidad requerida para la construcción de las capas del pavimento, teniendo en cuenta que los adecuados se encuentran a distancias tales que encarecerían considerablemente los costos de construcción.

Pavimento articulado

Están compuestos por una capa de rodadura que está construida con bloques de concreto prefabricado, llamados adoquines, de espesor uniforme e iguales entre sí. Esta puede ir sobre una capa delgada de arena la cual, a su vez, se apoya sobre la capa de base granular o directamente sobre la subrasante, dependiendo de la calidad de esta y de la magnitud y frecuencia de las cargas por dicho pavimento.

5.1.2. Tipos de Mezclas asfálticas

En la actualidad debido a la demanda de acuerdo al deterioro de la red de carreteras, actualmente se emplean diferentes capas de rodadura o mezclas asfálticas que a continuación se presentan.

Una mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación uniforme de un material asfáltico en un pétreo. (SCT,2008)

Las mezclas asfálticas, según la temperatura, se clasifican como: mezclas asfálticas en caliente, mezclas asfálticas en frío y mezclas asfálticas tibias.

Mezclas asfálticas en frío: Usualmente se mezclan a temperatura ambiente utilizando emulsiones.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Mezclas asfálticas tibias: Producidas típicamente a temperaturas en un rango entre 120°C a 140°C.

Mezclas asfálticas en caliente: Son producidas típicamente en un rango de 150°C a 180°C, de acuerdo al ligante asfáltico utilizado. (Calderón, 2011)

La mezcla asfáltica, según el procedimiento de mezclado, se clasifica como sigue:

Mezcla asfáltica en caliente: Son las elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provisional del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla. (SCT, 2008)

Las mezclas asfálticas en caliente se clasifican a su vez en:

Mezclas de granulometría densa

Es la mezcla en caliente, uniformemente homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre treinta y siete puntos cinco (37.5) milímetros (1 1/2 in) y nueve puntos cinco (9.5) milímetros (3/8 in). Normalmente se utilizan en construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural, o en renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes. (SCT, 2008)

Mezclas asfálticas de granulometría abierta

Es la mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme con tamaño nomina entre doce puntos cinco (12.5) milímetros (1/2 in) y seis punto tres (6.3) milímetros (1/4 in). Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, no tienen función estructural y generalmente se construyen sobre carpetas de granulometría densa, con la finalidad principal de satisfacer los requerimientos de calidad de rodamiento de tránsito, el permitir que el agua de lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupamos los vacíos de la carpeta,

con lo que se incrementa la fricción de las llantas con la superficie de rodadura, se minimiza el acuaplaneo, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal. Las mezclas asfálticas de granulometría abierta no deben colocarse en zonas susceptibles al congelamiento ni donde la precipitación sea menor de seiscientos (600) milímetros por año. (SCT,2008)

Mezclas asfálticas de granulometría discontinua, tipo SMA

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría discontinua, con tamaño nominal entre diecinueve punto cero (19.0) milímetros (3/4in) y nueve punto cinco (9.5) milímetros (3/8in). Estas mezclas normalmente pueden utilizarse en capas inferiores en carreteras de alto tránsito. Cuando son usadas como capas de rodadura su finalidad principal es mejorar las condiciones de circulación de los vehículos respecto a una carpeta asfáltica convencional. (SCT,2008)

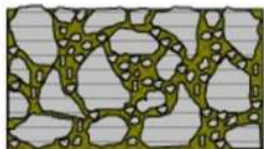
Al tener una elevada macro textura se evita que el agua de lluvia forme una película continua sobre la superficie del pavimento con lo que se incrementa la fricción de las llantas; se minimiza el acuaplaneo; se reduce la cantidad de agua que se proyecta sobre los vehículos y se reduce el ruido hacia el entorno por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura. (SCT, 2006)

Ilustración 2 Mezclas densas, discontinuas y abiertas.

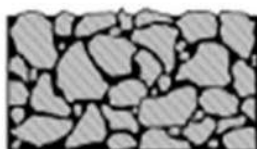
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



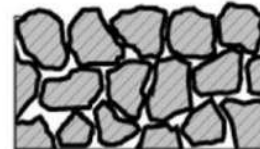
Fuente: Casos de estudio licitaciones SCT y CAPUFE, 2019.



MEZCLA DENSA



MEZCLA DISCONTINUA



MEZCLA ABIERTA

Capa de rodadura de granulométrica discontinua tipo CASSA

Son aquellas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos y cemento asfáltico, modificado o no, utilizando calor como vehículo de incorporación, para proporcionar al usuario una superficie de rodadura uniforme, bien drenada, resistente al derramamiento cómoda y segura. Estas capas de no tienen función estructural pues generalmente se construyen con espesores menores de cuatro (4) centímetros, sobre una carpeta de mezcla asfáltica o de concreto hidráulico, con la finalidad principal de permitir que el agua proveniente de la lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la capa de rodadura, con lo que se incrementa la fricción de las llantas con la superficie de rodadura, se minimiza el acuaplaneo, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal. (SCT, 2010)

Mezcla asfáltica en frío.

Son las elaboradas en frío, en una planta mezcladora móvil, utilizando emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados y materiales pétreos.

Las mezclas asfálticas en caliente se clasifican a su vez en:

Mezclas de granulometría densa

Es la mezcla en frío, uniformemente homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre treinta y siete punto cinco (37.5) milímetros (1 1/2 in) y nueve punto cinco (9.5) milímetros (3/8 in). Normalmente se utilizan en casos donde en que la intensidad del tránsito es igual a un millón de ejes equivalentes o menor, en donde no se requiera de una alta resistencia estructural. Para la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos y en carpetas para el refuerzo de pavimentos existentes, así como para la reparación de baches. (SCT, 2006)

Mortero asfáltico

Es la mezcla en frío, uniformemente homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado, agua y arena con tamaño máximo de dos puntos treinta y seis (2.36) milímetros (N°8). Normalmente se colocan sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, como capa de rodadura. (SCT, 2006)

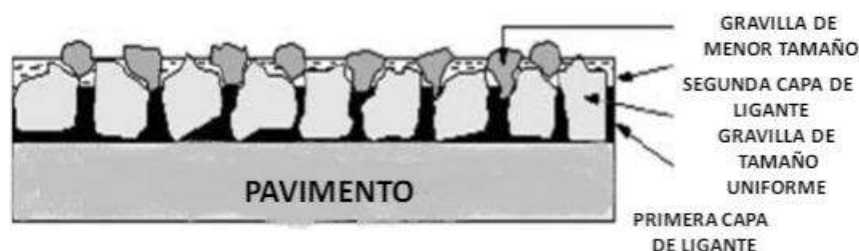
Mezclas asfálticas por el sistema de riegos

Son las que se sustituyen mediante la aplicación de uno o dos riegos de un material asfáltico, intercalados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de tamaños decrecientes que, según su denominación. Las carpetas por el sistema de riegos se clasifican en carpetas de uno, dos y de tres riegos. Las carpetas de un riego o la última capa de las carpetas de dos o tres riegos, pueden ser premezcladas o no. Normalmente se colocan sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, nueva o existente, como capa de rodadura con el objeto de proporcionar resistencia al derramamiento y al pulimento.

Ilustración 3 Sistema de doble riego

Fuente: Foro Tecnología e innovación en la construcción de carreteras.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



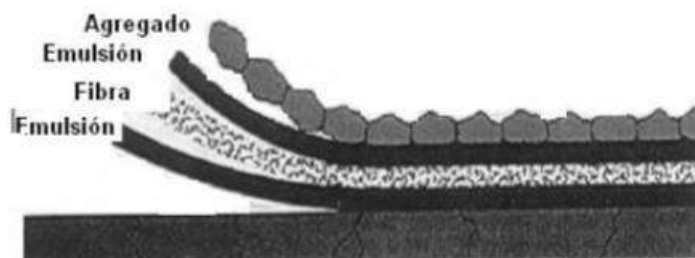
Existen nuevas mezclas y técnicas utilizadas en los temas de conservación.

Riego de Sello Reforzado con Fibras de Vidrio

Consiste en la aplicación de una membrana absorbente de esfuerzo, para utilizarse como capa de rodamiento o Inter capa, reduce la reflexión de grietas y los daños por introducción de agua superficial que aceleran el proceso de deterioros del pavimento. (Cincire, 2019)

Ilustración 4 Riego de sello reforzado con fibra de vidrio

Fuente: Cincire, 2010.



Microaglomerado

Es una capa delgada de rodadura de mezcla en frío, con un diseño especializado, constituida por emulsión de rompimiento controlado normalmente con polímero, fibras de vidrio, agregado fino triturado de granulometría densa, filler mineral y agua, para proporcionar una superficie de rodamiento y desgaste cómoda y segura al usuario del camino. (Cincire, 2019)

Ilustración 5 Microaglomerado

Fuente: Elaboración propia.



Riego tipo sello del cabo o CAPE SEAL

Es un riego de gravilla simple seguido de la aplicación de una lechada asfáltica o slurry seal. (Kao, 2017)

Ilustración 6 riego tipo CAPE SEAL

Fuente: Kao, 2017.



5.1.3. Clasificación de los productos asfálticos

Y a su vez los materiales asfálticos se emplean en la elaboración de carpetas, mezclas, morteros, riegos y estabilizaciones, ya sea para aglutinar los materiales pétreos utilizados, para ligar o unir diferentes capas del pavimento; o bien para estabilizar bases o subbases. También se pueden usar para construir, fabricar o

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



impermeabilizar otras estructuras, tales como obras complementarias de drenaje, entre otras.

Los materiales asfálticos se clasifican en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, dependiendo del vehículo que se emplee para su incorporación o aplicación, como se indica en la tabla 1. (SCT, 2006)

Material asfáltico	Vehículo para su aplicación	Usos más comunes
Cemento asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados.
Emulsión asfáltica	Agua	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones.
Asfalto rebajado	Solventes	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas y para la impregnación de subbases y bases hidráulicas.

Tabla 1 Clasificación de los materiales asfálticos

Fuente: (SCT. 2006)

Cementos asfálticos

Los cementos asfálticos son los que se obtienen del proceso de la destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo. (SCT, 2006)

Emulsiones asfálticas

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Son materiales asfálticos líquidos estables, constituidos por dos fases no miscibles, en los que la fase continua de la emulsión está formada por agua y un agente emulsificante, y la fase discontinua por pequeños glóbulos de cemento asfáltico. Se denominan emulsiones asfálticas aniónicas cuando el agente emulsificante confiere polaridad electronegativa a los glóbulos y emulsiones asfálticas catiónicas, cuando les confiere polaridad electropositiva.

Las emulsiones asfálticas pueden ser de los siguientes tipos:

- De rompimiento rápido, que generalmente se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos.
- De rompimiento medio, que normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en plantas, especialmente cuando el contenido de finos en la mezcla es igual a dos (2) por ciento o menor, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas.
- De rompimiento lento, que comúnmente se utilizan para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas.
- Para impregnación, que particularmente se utilizan para impregnaciones de subbases y/o bases hidráulicas.
- Superestables: que principalmente se emplean en estabilizaciones de materiales y en trabajos de recuperación. (SCT, 2006)

Asfaltos modificados

Son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de un hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añade al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación. (SCT, 2006)

Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos son:

Polímero Tipo I

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) o Estireno-Butadieno (SB), entre otras. (SCT, 2006)

Polímero Tipo II

Es un modificador de asfaltos que mejor el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales. (SCT, 2006)

Polímero Tipo III

Es un modificador de asfalto que mejora la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, disminuye la disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo plastómero, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE), entre otras. Se utilizan en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales. (SCT, 2006)

Hule Molido de Neumáticos

Es un modificador de asfaltos que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta, tratamientos superficiales. (SCT, 2006)

5.1.4. Metodologías de diseño de mezclas asfálticas

A consecuencia del gran avance tecnológico y a la demanda de poder construir más caminos de mejor calidad, los métodos de diseño de mezclas asfálticas han ido evolucionando considerablemente, por lo tanto, a continuación, se presentan las metodologías que se han utilizado para el diseño de mezclas.

Método Marshall.

El concepto del método Marshall fue desarrollado por Bruce Marshall, ex ingeniero de Bitúmenes del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi. Surgió de una investigación por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América en 1943.

La necesidad de construir pistas de aterrizaje durante la segunda guerra mundial, los ingenieros militares comenzaron a buscar un método que fuera fácil de usar en el campo.

El cuerpo de ingenieros decidió adoptar el método y desarrollarlo y adaptarlo para diseño y control de mezclas de pavimento bituminoso en el campo, debido en parte a que el método utilizaba equipo portátil.

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método Marshall, solo se aplica a mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación que usa cemento asfáltico clasificado con viscosidad o penetración y que contiene agregados con tamaños máximos de 25.0 mm o menos.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Actualmente el método Marshal es uno de los métodos más usados, el Ingeniero Marshall depuro y adiciono ciertos aspectos a las pruebas del método al punto de que el ensayo fue normalizado como ASTM D1559. El método Marshall es un experimento de laboratorio dirigido al diseño de una adecuada mezcla asfáltica por medio del análisis de estabilidad, fluencia, densidad y vacíos. (Caceres, 2017)

Método Hveem

Los conceptos del método Hveem de diseño de mezclas de pavimentación fueron desarrollados por Francis N. Hveem, anteriormente Ingeniero de Materiales e Investigación en la División de Carreteras de California, Estados Unidos de América.

El ensayo Hveem, en su forma actual, surgió de investigaciones indicadas por el Departamento de Carreteras de California en 1940. El método abarca la determinación de un contenido aproximado de asfalto por medio del ensayo de estabilidad. También se efectúan ensayos de expansión sobre una probeta que ha sido expuesta al agua.

Este procedimiento de diseño continúa siendo el principal método de diseño usado en California y en algunos otros estados de los Estados Unidos de América.

El propósito del Método Hveem es el determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre las propiedades de la mezcla asfáltica final.

El Método de Hveem, solo se aplica a mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación que usan cemento asfáltico clasificado por viscosidad o penetración, y que contienen agregados con tamaños máximos de 25 mm o menos. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para control de campo de mezclas asfálticas (en caliente).

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



El método Hveem usa una serie de pruebas para determinar el contenido óptimo de asfalto. Los procedimientos que el método incluye son:

- 1) Ensayo Equivalente centrífugo de queroseno (CKE) para determinar un contenido aproximado de asfalto.
- 2) Preparación de probetas de prueba con el contenido aproximado de asfalto, y con contenidos mayores y menores que el aproximado.
- 3) Ensayo de estabilidad para evaluar la resistencia a la deformación.
- 4) Ensayo de expansión para determinar el efecto del agua en el cambio de volumen y en la permeabilidad de la briqueta. (Caceres, 2017)

Diseño SUPERPAVE

En 1987, el SHRP (Strategic Highway Research Program) comenzó el desarrollo de un nuevo sistema para especificación de materiales asfálticos. El producto final de programa de investigación sobre asfalto de SHRP es un nuevo sistema conocido como SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement). El software de Superpave es más que un programa de computación. Fundamentalmente, representa un sistema más avanzado de especificación de los materiales componentes, diseño de mezcla asfálticas y su análisis, y la predicción de performance de los pavimentos, incluyendo equipos de ensayo, métodos de ensayo y criterios.

El sistema Superpave proporciona un medio completo y muy amplio para diseñar mezclas con base en los requerimientos específicos de comportamiento definidos por el tránsito, el clima y la sección estructural del pavimento en una cierta localización. Se facilita con este sistema, la selección y combinación de asfalto agregado y, de ser necesario, de un aditivo, para alcanzar el nivel requerido de comportamiento en el pavimento. El sistema es aplicable tanto en mezclas densas en caliente y vírgenes o recicladas. (Caceres, 2017)

Protocolo AMAAC

En el año 2013, la Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC) publicó el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013: diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño (en lo sucesivo protocolo AMAAC).

Además de especificar las características técnicas que deben reunir las mezclas asfálticas densas de alto desempeño, el protocolo AMAAC define unos “criterios de selección del nivel de evaluación requerido”, los cuales se refieren a “diferentes niveles de diseño en función de la importancia de la carretera determinada por el nivel de tránsito o el desempeño deseado”. (Solorio, Garnica, & Hernández , 2018)

Para cada nivel de evaluación, el protocolo especifica un conjunto de pruebas de laboratorio que deben llevarse a cabo a efecto de validar los diseños. En la siguiente figura se muestran las pruebas correspondientes a los diferentes niveles. Adicionalmente, el protocolo AMAAC establece los equipos y procedimientos de medición (a través de una serie de recomendaciones y normas) que los laboratorios deben emplear para la ejecución de las pruebas. (Solorio, Garnica, & Hernández , 2018)

Ilustración 7 Niveles de diseño/ evaluación del protocolo AMAAC

Fuente: Solorio, R., Garnica, P., & Hernández , R. 2018

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Con lo anterior, el protocolo AMAAC provee una referencia adaptada a nuestro medio para evaluar las competencias de un laboratorio en el diseño de mezclas de alto desempeño. (Solorio, Garnica, & Hernández , 2018)

5.1.6. Metodologías de diseño estructuras de pavimentos

Existen diferentes tipos de metodologías para el análisis y diseño de estructuras de pavimentos flexibles. Entre estos métodos se destacan los más usados en México. Están:

Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes maneja un catálogo de secciones con el fin de cubrir de manera práctica, la necesidad de una guía útil para recomendar y verificar que se proponga una estructura de pavimento que cumpla con las características mínimas, y que en los estudios y proyectos de pavimentos nuevos y de rehabilitación de la república mexicana se tengan estructuras de pavimentos de buena calidad.

Metodología UNAM: Mediante el software DISPAV-5 Versión 3.0

El método DISPAV-5 está basado en el extenso programa de investigación patrocinado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, junto con el Instituto de Ingeniería de la UNAM. El modelo de diseño incluye tanto carreteras de altas especificaciones como carreteras normales.

Para el diseño del pavimento mediante esta metodología, se requiere introducir datos de entrada al programa como son datos de tránsito (composición vehicular, numero de ejes equivalentes, etc.), el tipo de camino, característica de los materiales y la estructura de diseño.

Diseño mediante metodología AASHTO 93

En la metodología AASHTO-93 para diseño de estructuras de pavimento flexible, se presenta un modelo o ecuación a través de la cual se obtiene el parámetro llamado número estructural (SN) cuyo valor, además de ser un indicativo del espesor total requerido del pavimento, representa el aporte estructural. Mediante el cual por medio de iteraciones entre el número estructural por la ecuación y el número estructural que toma en cuenta los coeficientes estructurales de cada capa (Subbase, base y carpeta), se obtienen los espesores de cada una de ellas.

5.2. Análisis de pavimentos reciclados.

Los pavimentos sustentables tienen el objetivo principal el generar conciencia y la conservación ambiental, haciendo un esfuerzo ante las limitantes económicas y al mismo cumpliendo con los estándares y la demanda de la sociedad. Para ello se tiene un gran interés en los recursos renovables, ya que en la industria de la construcción se siguen sobre explotando lo recursos no renovables, y aún sin utilizar los renovables. En la investigación de campo y las nuevas técnicas en materiales alternativos e innovadores combinados, son de interés prioritario los pavimentos sustentables. Las variables más importantes en los pavimentos sustentables son el

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



consumo de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero, la calidad del aire y las escorrentías de agua superficial.

Recordar que la sustentabilidad o sostenibilidad, implica tres variables importantes: c los impactos a la economía, al medio ambiente y a la sociedad.

Mediante el reciclaje, la reutilización y la reducción se puede aportar positivamente a estos tres impactos y, específicamente, en los pavimentos se aporta positivamente mediante el reciclaje y la utilización de materiales estructurales de desechos, de los que existe una variedad de materiales sostenibles que pueden ser utilizados como agregados en los pavimentos: a continuación, se hace una recopilación de algunos de ellos.

Agregado de Concreto Reciclado (RCA)

Se deriva del concreto triturado, generalmente de capas de pavimento de concreto. Se utilizan principalmente como agregados gruesos para capas base o subbase aumentando el módulo y la rigidez; pero también puede sustituir a los áridos convencionales tanto de mezclas bituminosas como de concreto. La adición de RCA a las mezclas asfálticas, hasta en un 50%, se considera una práctica sostenible para la construcción de pavimentos, pero más del 25% requiere más cemento asfáltico y, por lo tanto, podría no ser sostenible a medida que aumentan los costos. La presencia de RCA en mezclas de concreto, hasta en un 50%, se puede lograr sin ningún medio tecnológico adicional mejorando simultáneamente algunas de las propiedades de la mezcla. En términos generales, las mezclas de concreto que incorporan RCA, presentan propiedades mecánicas similares o equivalentes en todos los aspectos, en comparación con las convencionales.

Tejas Asfálticas Recicladas (RAS)

Pueden ser utilizadas como ligante asfáltico o como fracción de agregado fino en mezclas asfálticas. Las investigaciones han demostrado que la presencia de RAS

en mezclas asfálticas a baja temperatura, hasta aproximadamente un 10 %, se puede combinar con éxito. El uso de RAS es una estrategia sustentable y amigable con el medio ambiente, pero se requiere investigación de campo sobre el desempeño de este tipo de mezclas asfálticas.

Escoria de Horno de Acero (SFS)

Proviene del horno de arco eléctrico (EAF) o alto horno (BF), y se puede utilizar como material agregado alternativo, tanto en mezclas de asfalto como de concreto. Las capas de rodadura de la superficie de asfalto que contienen escoria de acero se caracterizan por una mayor resistencia al deslizamiento. La escoria de acero combinada con RAP muestra un mejor rendimiento de fatiga de las mezclas bituminosas, mientras que el uso de escoria de acero como agregado en mezclas asfálticas muestra una resistencia significativa a la humedad y a la formación de surcos en comparación con las mezclas asfálticas convencionales, y se considera una opción de pavimento sostenible. La utilización de la escoria de acero BF como agregado puede ser beneficiosa para las mezclas de concreto, presentando propiedades relativas a los agregados convencionales, especialmente para pavimentos de concreto de aeropuertos. La escoria de acero BF también puede ser adecuada para pavimentos de asfalto, mejorando el rendimiento de formación de surcos y reduciendo la susceptibilidad a la deformación permanente. La escoria de acero EAF se recomienda para mezclas asfálticas de baja temperatura, mostrando propiedades de mezcla mejoradas. Además, la investigación muestra que la combinación de agua de mar, escoria de alto horno y RCA mejora las propiedades de la mezcla de concreto.

Residuos de arena de fundición (WFS)

Es un subproducto proveniente del procesamiento de acero y metales y se puede utilizar como reemplazo parcial de agregado fino en mezclas de asfalto y concreto. Las propiedades de resistencia de WFS indican que puede mejorar la calidad de las

mezclas de concreto. El reemplazo parcial de hasta el 20 % es aceptable y tiene un efecto positivo en las propiedades mecánicas de las mezclas de concreto. WFS también es adecuado para uso en subbases y muestra un buen rendimiento mecánico.

Residuos de Vidrio (WG)

Es una opción alternativa de reemplazo parcial de áridos, respecto a las mezclas asfálticas y de concreto. El uso de WG mejora el rendimiento estructural del pavimento, mejorando la resistencia, la durabilidad y también la estética. Se recomienda encarecidamente la incorporación de WG hasta un 15 % en mezclas de concreto que contengan RCA para capas base y subbase. Más específicamente, la presencia de WG en hormigones translúcidos y fotocatalíticos innovadores indica propiedades mecánicas positivas. Además, las pruebas específicas en WG mostraron una trabajabilidad y conductividad hidráulica significativas, pero también un bajo impacto ambiental, lo que hace que WG sea un sustituto agregado considerable para varias aplicaciones de pavimento.

Ladrillo triturado (CB)

También es una opción alternativa de material de desecho para aplicaciones de pavimento. La incorporación de CB hasta un 15% en capas base y subbase tratadas con cemento que contienen RCA, es una opción recomendada. CB y RCA combinados con cenizas volantes como agente estabilizador de capas base/subbase, conductores a la mejora de la resistencia y la durabilidad, mientras que las mezclas de concreto que contienen RCA y hasta un 50% de CB, estabilizadas con un 3% de cemento muestran propiedades significativas.

Asfalto extendido de Azufre (SEA)

El azufre es un modificador/extensor de mezcla asfáltica que se utiliza como reemplazo parcial del asfalto convencional para reducir la cantidad requerida de

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



asfalto. SEA requiere temperaturas de mezcla más bajas y también reduce el olor y los humos. La incorporación de azufre hasta un 40 % en masa en las mezclas asfálticas no tiene efecto sobre las propiedades de agrietamiento de las mezclas asfálticas a baja temperatura, mientras que mejora las características de rendimiento de la mezcla. Además, la investigación relativa ha demostrado que las mezclas SEA tienen el mismo rendimiento que las mezclas asfálticas convencionales. Asfalto de azufre espumado (FSA), que es similar al SEA y se puede usar con éxito para estabilizar capas base y subrasante.

Bioligantes asfálticos

Los bioconglomerantes están formados por biomasas, que proceden principalmente de plantas o residuos orgánicos y tienen propiedades similares al asfalto convencional. Algunos de estos son bioaglutinantes de microalgas, ácidos grasos de soja, nanoarcillas de organomontmorillonita y bioaceites, y pueden incorporarse condicionalmente en mezclas asfálticas. Los aditivos de origen biológico, como los aceites vegetales, son aplicables a las mezclas asfálticas que incorporan porcentajes de RAP, mejoran el flujo del betún y las propiedades de mezcla, a la vez que son ecológicos. El bioaceite y el aceite de cocina usado también pueden ser opciones alternativas, mostrando resultados similares a los aglutinantes convencionales en mezclas asfálticas.

Asfalto Espumado (FA)

Es una tecnología de mezcla bastante nueva, que cada vez se implementa más. El WMA espumado que también incorpora RAP indica una buena susceptibilidad a la humedad en comparación con las mezclas asfálticas convencionales. El FA a base de etanol muestra una viscosidad reducida, lo cual es esencial para la trabajabilidad y el recubrimiento de agregados a bajas temperaturas, mientras que la adición de cera Fischer- Tropsch (FT) a las mezclas de FA de baja temperatura muestra una buena resistencia a la deformación permanente, comparable a las mezclas

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



asfálticas convencionales. Además, FA se usa ampliamente para la rehabilitación de pavimentos in situ como agente estabilizador en las capas base que mejoran las propiedades mecánicas, además de ser rentable y tiene un bajo impacto ambiental.

(Plati, 2019)

Pavimento asfáltico reciclado (RAP)

Al reciclar el material de las mezclas asfálticas en caliente (HMA, por sus siglas en inglés de “Hot Mix Asphalt”) se obtiene, como resultado, una mezcla reutilizable de agregado y asfalto conocida como pavimento asfáltico recuperado o reciclado (RAP, por sus siglas en inglés de “Reclaimed Asphalt Pavement”). El RAP es el término dado a los pavimentos que contienen materiales tales como asfalto y agregados pétreos que fueron removidos y reprocesados para ser incorporados como materiales en una nueva carpeta asfáltica.

El Pavimento asfáltico reciclado, o RAP, suele ser incorporado a la estructura de la carretera generalmente en el pavimento asfáltico, aunque también se puede integrar a la base o subbase de una nueva estructura de pavimento.

Se usa principalmente para capas base y subbase hasta un porcentaje de 50%, pero comúnmente se recomienda para un uso de 15 a 30 por ciento, especialmente para capas superficiales, para no afectar las propiedades de la mezcla, mientras que algunos países no permiten ningún RAP en capas superficiales y otros permiten el 100% de reciclaje. No se recomienda un uso de RAP superior al 30 % sin precalentamiento para mezclas bituminosas, además, el RAP no se recomienda para uso estructural como agregado. Sin embargo, otros investigadores han demostrado que el uso de 20 % de RAP puede mejorar las propiedades de la mezcla bituminosa y el rendimiento general, y también que mayores porcentajes de RAP pueden mejorar la resistencia al ahuellamiento. Además, utilizando mezclas

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



específicas de ligantes asfálticos, se puede aumentar el porcentaje de RAP en mezclas asfálticas de capas de rodadura, alcanzando el 50-60%.

El reciclaje de pavimentos, a pesar de ser una técnica desarrollada desde principios del siglo XX, empezó a emplearse con mayor frecuencia en Estados Unidos de América durante la década de los setentas.

Fue en 1956 que en Estados Unidos fue concebida esta técnica y en Europa en los años setenta, desde entonces el reciclado ha ido en aumento en dichos países. En México, a diferencia de los Estados Unidos de América y Europa, existe un uso disminuido del rap en la pavimentación de calles y carreteras; debido a la inexistente normatividad nacional para este proceso, el poco uso de la técnica generalmente se hace con deficiencia. El uso de rap ha venido al alza en México, provocando que cada vez sea más amplia su utilización en las nuevas pavimentaciones de vías terrestres. La situación actual y su inexistente norma para el proceso, han provocado la baja calidad y deterioros a corto plazo en las carreteras o vías en que se emplea el uso del rap. (Limón Covarrubias, Davalos, Ávalos Cuevas, & Galaviz Gonzáles, 2022)

Originalmente el proceso de reciclaje se daba cuando recuperaban el material y lo transportaban a una planta en donde se le adicionaban aditivos tales como: agregado virgen, asfalto y agentes suavizantes o rejuvenecedores. Esto con el fin de recuperar las propiedades físicas, químicas y mecánicas del asfalto para obtener un desempeño aceptable del mismo. Sin embargo, debido a que este proceso de reciclaje implicaba la generación de distintos viajes que iban desde el sitio hasta la planta, surgió un nuevo método que permite realizar el proceso de reciclaje in situ (en caliente o en frío), mediante la instalación de plantas en la zona de trabajo.

Actualmente, el reciclaje ha ido evolucionado mediante trenes de trabajo que utilizan diferentes maquinarias, comenzando con el fresado y recuperación de material (el cual puede incluir un proceso de ablandamiento con calor), seguido de la mejora de

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



la mezcla, la colocación y la compactación en una sola línea de trabajo, la cual permite la apertura al tránsito en pocas horas.

Las principales metodologías/procesos para reciclar pavimentos asfálticos son:

- Reciclado en caliente (HMA): Mezcla de asfalto realizada a temperaturas de 165°C.
- Reciclado en tibio (WMA): Mezcla de asfalto realizada a temperatura de 100°C por medio de aditivos.
- Reciclado en frío (CMA): Mezcla del pavimento flexible retirado y molido con una emisión asfáltica o con asfalto espumado y puesto de nuevo en sitio, compactada y sellada con una última capa de asfalto mezclado en caliente. (Mendoza, Adame, & Marcos, 2020)

Ilustración 8 Asfalto reciclado en Frío

Fuente: Elaboración propia.



Hule molido de Llantas (RARx)

Es un producto fabricado a partir de polvo de NFU (60% de su composición) pretratado con betún y otros aditivos de origen mineral. El Rarx es una evolución de las tecnologías existentes hasta la fecha para incorporar polvo de caucho de NFU (Neumático Fuera de Uso) en mezclas asfálticas. Tiene mejoras medio ambientales como son:

- Mejora sustancial del ACV de las obras ejecutadas, protegiendo de este modo el medio ambiente.
- Permite la optimización de los firmes, y, por lo tanto, un menor uso de los recursos naturales.
- Permite la reutilización de los neumáticos usados.
- Permite fabricar mezclas asfálticas de baja sonoridad.

5.3. Análisis de los procesos constructivos

5.3.1. Proceso constructivo para conservación de un pavimento convencional

Previos a la ejecución de cualquier trabajo que se vaya a ejecutar, se deben de establecer ciertos procesos, con los cuales se garantiza la seguridad y las menores molestias al usuario. Así mismo se tienen que determinar los bancos de desperdicios, almacenes, talleres, comedores, campamentos, incluso el señalamiento de protección de obra.

Fresado del pavimento

Es el conjunto de actividades que se realizan con una fresadora para eliminar las deformaciones superficiales en carpetas asfálticas o para retirar capas de rodadura deterioradas, a fin de mejorar las características de comodidad y fricción de la superficie de rodadura o para desplantar la nueva capa de rodadura.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



El fresado se realizará de tal forma que no se dañen las cunetas u otras obras de drenaje, las guarniciones, zonas de la superficie de rodadura fuera del área de fresado y cualquier otra estructura. Cuando el proyecto o la Secretaría indiquen que el fresado no se realice sobre los elementos del señalamiento horizontal, la distancia entre el límite del fresado y las rayas, botones reflejantes u otros elementos, no será menor de ocho (8) centímetros.

A menos que el proyecto indique otra cosa, el fresado siempre se hará paralelamente al eje de la carretera, iniciando y terminando en franjas normales a dicho eje.

Si al final de la jornada, quedan desniveles mayores de tres (3) centímetros, se desvanecerá el fresado hasta llegar al nivel original de la superficie de rodadura, en una longitud mínima de cinco (5) metros, a menos que el proyecto indiquen otro valor.

Equipo

El equipo que se utilice para el fresado, será el adecuado para obtener la calidad especificada en el proyecto, en cantidad suficiente para fresar la superficie establecida en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación o la que indique el proyecto, conforme al programa de utilización de maquinaria, siendo responsabilidad del Contratista de Obra su selección.

Fresadoras

Autopropulsadas, con la masa suficiente para producir un fresado uniforme. Sus dimensiones serán tales que no obstruyan la operación de los carriles adyacentes al fresado. Contarán con:

- Cabeza de corte con ancho mínimo de cero punto nueve (0,9) metros y de preferencia del ancho del carril, capaz de controlar la profundidad del fresado

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



o generar un plano de corte geométricamente igual al de proyecto, mediante el uso de controles electrónicos.

- Discos de corte montados en la cabeza de corte, con dientes de carburo o diamantados, en cantidad tal que produzcan un patrón de corte fino con espaciamiento no mayor de ocho punto cinco (8,5) milímetros ($\frac{3}{8}$ in), con capacidad para cortar la carpeta asfáltica hasta cinco (5) centímetros de profundidad.
- Cilindros hidráulicos para mantener constante la presión sobre la cabeza de corte.
- Dispositivos para controlar su alineación, detectar variaciones en el nivel de la superficie por fresar y ajustar automáticamente la cabeza de corte para producir una superficie nivelada, de acuerdo con lo indicado en el proyecto o aprobado por la Secretaría.
- Dispositivo integral de enfriamiento mediante agua.
- Banda elevadora para cargar el producto del corte directamente al equipo de transporte.

Camión cisterna

Para el suministro de agua a la fresadora, con capacidad suficiente para minimizar las paradas del equipo.

Existe una variedad de camiones cisterna comúnmente llamados PIPA, de diferentes capacidades, que dependiendo de la necesidad se elige el más conveniente.

Camiones de volteo

Para recibir el producto del fresado y transportarlo al banco de desperdicios. Existe una diversidad de camiones, entre los cuales podemos mencionar; los Off-Road, de

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



transferencia, con descarga lateral, Góndolas y los tradicionales, existen de diferente capacidad, pero los más comunes son los de 7 y 14 m³.

Transporte

El transporte de todos los materiales producto del fresado se realizará de forma tal que no contamine. Se sujetará, en lo que corresponda, a las leyes y reglamentos de protección ecológica vigentes. Los desperdicios o residuos producto del fresado se cargarán y transportarán al banco de desperdicios que establezca el proyecto, en vehículos con cajas cerradas y protegidos con lonas, que impidan la contaminación del entorno o que se derramen. Cuando sean depositados en un almacén temporal, se tomarán las medidas necesarias para evitar la contaminación del entorno, trasladándolos al banco de desperdicios lo más pronto posible.

Obtención de materiales

Obtención de materiales pétreo

De acuerdo a lo establecido a las especificaciones del proyecto sobre la calidad de los materiales, previamente se deben realizar una caracterización de los materiales cumplirán con lo establecido en las Normas *N-CMT-4-04/17 Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, *N-CMT-4-05-001, Calidad de Materiales Asfálticos*, o la *Secretaría y cumplirán con lo establecido en las Normas N-CMT-4-02-001, Materiales para Subbases* y *N-CMT-4-02-002, Materiales para Bases Hidráulicas*, o salvo que el proyecto indique otra cosa. Los materiales pétreos procederán de los bancos indicados en el proyecto.

Los bancos de materiales son las excavaciones a cielo abierto destinadas a extraer material para la formación de cuerpos de terraplenes; ampliaciones de las coronas, bermas o tendido de los taludes de terraplenes existentes; capas subyacentes o subrasantes; terraplenes reforzados; rellenos de excavaciones para estructuras o cuñas de terraplenes contiguas a estructuras; capas de pavimento; protección de

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



obras y trabajos de restauración ecológica, así como para la fabricación de mezclas asfálticas y de concretos hidráulicos.

Cuando sea necesario mezclar dos o más materiales de dos o más bancos diferentes, se mezclarán con las proporciones necesarias para obtener un material uniforme, con las características establecidas en el proyecto.

Una vez que los materiales han cumplido con lo establecido anteriormente ya en la ejecución de la obra, el banco de materiales seleccionado es explotado por medios mecánicos y son llenados los camiones volteo para su traslado a la obra.

Equipo

El equipo que se utilice para la explotación de bancos, será el adecuado para obtener la selección de materiales especificada en el proyecto, en cantidad suficiente para producir el volumen establecido en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, conforme al programa de utilización de maquinaria. Dicho equipo será mantenido en óptimas condiciones de operación durante el tiempo que dure la obra y será operado por personal capacitado. Los equipos que se utilicen en la excavación y explotación de los bancos de materiales, será el adecuado para ejecutar los trabajos de excavación y llenado de camiones.

Excavadoras

Serán autopropulsadas de operación manual, con la potencia y capacidad adecuada en su aguilón.

Tractores

Montados sobre orugas, reversibles, con la potencia y capacidad compatibles con el frente de ataque.

Motoescrepas

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Autopropulsadas, reversibles y autocargables, con capacidad de ocho punto cuatro (8,4) metros cúbicos (11 yd³) como mínimo.

Cargadores frontales

Autopropulsados y reversibles, de llantas o sobre orugas, con la potencia y capacidad compatibles con el frente de ataque, para la extracción y carga de los materiales producto de la excavación.

Transporte de materiales pétreos

El material pétreo extraído del banco de material se transportará en camiones de volteo con cajas cerradas y protegidos con lonas, para evitar la contaminación. Este material será vaciado directamente en el tramo cuando sea el caso, o en almacenes temporales previamente seleccionados y como lo indique el proyecto, para evitar contaminación del material hasta su uso. O en su caso, cuando el material pétreo sea para la fabricación de mezcla asfáltica, el material pétreo se vaciará en el almacén de la planta de fabricación.

Transporte de asfalto

El asfalto regularmente se transporta en Carros Autopropulsados, regularmente de capacidades de 37 mil litros, este se hace de la refinería hasta la planta de fabricación de carpeta asfáltica.

Tendido y conformación de base hidráulica

Teniendo los materiales pétreos, se mezclan con la dosificación adecuada de finos, gravas y arenas tal como lo indique el proyecto, el mezclado debe ser homogéneo. Y ya que se tenga lista la mezcla, se procederá al tendido del material sobre la franja del tramo a conservación, deberá ser en capas no mayores a 20 cm de espesor y en cadenamientos de 20 metros y sobre el ancho que establezca el proyecto, con equipo que tenga la capacidad y potencia suficientes para realizar dicho trabajo.

Compactación

Como resultado anterior, se tendrá la base hidráulica, inmediatamente se procederá a compactar hasta el % establecido en el proyecto, para esta parte del proceso se darán riegos superficiales durante el tiempo que dure la compactación de tal manera que se pueda compensar la pérdida de la humedad por la evaporación.

Se debe cuidar el % de compactación, ya que, si este se excede de acuerdo a lo especificado en el proyecto, deberá reducir, en vez de aumentar, ya que se rompe la estructura de las capas inferiores.

Equipo

Para la conformación y tendido de la base hidráulica se contará con el equipo suficiente y con capacidad de realizar los trabajos con el fin de lograr el objetivo de la conformación de la capa anterior mencionada.

Motoconformadora

Serán autopropulsadas de operación manual, con la potencia y capacidad adecuada en hoja extendedora.

Camión cisterna

Para el suministro de agua para los riegos de la base hidráulica, con capacidad suficiente para eficientizar la compactación del material.

Fabricación de mezcla asfáltica en caliente

Recepción de materia prima

El primer paso en la fabricación de la mezcla asfáltica es la recepción de materias primas, es decir de los agregados pétreos y del asfalto, estos serán almacenados en el espacio destinado dentro de la planta productora de mezcla asfáltica.

Llenado de tolvas

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



El llenado de tolvas se realizará con un cargador frontal y será de acuerdo a lo solicitado por la planta productora de carpeta asfáltica, que estará configurada de acuerdo al diseño del pavimento previamente elegido de acuerdo a la caracterización de los materiales.

Del mismo modo, la dosificación del asfalto estará configurada en la planta productora, con lo especificado por el proyecto.

Transporte de mezcla asfáltica

La carpeta asfáltica producida se transportará en camiones de volteo, con cajas cerrada y con lonas para evitar la contaminación y la expulsión de la carpeta, con tal de no afectar al entorno por el que pasará, ya que la mezcla asfáltica estará a temperaturas muy elevadas. La capacidad de los camiones será variable, siempre y cuando cumpla con lo anteriormente mencionado o lo indicado en la normativa o el proyecto.

Los acarreo de los materiales hasta el sitio de su utilización, se harán de tal forma que el tránsito sobre la superficie donde se construirá la capa estabilizada, se distribuya sobre todo el ancho de la misma, evitando la concentración en ciertas áreas y, por consecuencia, su deterioro.

No se permitirá que los camiones que transportan la mezcla asfáltica, hagan maniobras que puedan distorsionar, disgregar u ondular las orillas de una capa recién tendida.

Tendido y conformación

Inmediatamente y antes de iniciar la construcción de la capa de carpeta asfáltica, la superficie sobre la que se colocará estará debidamente terminada dentro de líneas y niveles, sin irregularidades y reparados satisfactoriamente los baches que hubieran existido. No se permitirá la construcción sobre superficies que no hayan sido previamente aceptadas.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Si así lo indica el proyecto o lo aprueba la Secretaría, cuando la carpeta asfáltica con mezcla en caliente se construya sobre una base, ésta se impregnará de acuerdo con lo indicado en la Norma N·CTR·CAR·1·04·004, Riegos de Impregnación. Es responsabilidad del Contratista de Obra establecer el lapso entre la impregnación y el inicio de la construcción de la carpeta.

Si así lo indica el proyecto o lo aprueba la Secretaría, inmediatamente antes de iniciar el tendido de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, se aplicará un riego de liga en toda la superficie, del tipo y con la dosificación establecidos en el proyecto o aprobados por la Secretaría, de acuerdo con lo indicado en la Norma N·CTR·CAR·1·04·005, Riegos de Liga.

Sobre la superficie donde se construirá la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, el Contratista de Obra ejecutará previamente un tramo de prueba con una longitud de cuatrocientos (400) metros, con la finalidad de evaluar el procedimiento y los equipos que se utilizarán.

La mezcla se extenderá en todo el ancho de la corona empleando una extendedora, de manera que se obtenga una capa de espesor uniforme. La mezcla se extenderá en capas sucesivas, con un espesor no mayor que aquel que el equipo sea capaz de compactar al grado indicado en el proyecto.

La tolva de descarga de la extendedora permanecerá llena para evitar la segregación de los materiales. No se permitirá el tendido de la mezcla asfáltica si existe segregación.

Al final de cada jornada y con la frecuencia necesaria, se limpiarán perfectamente todas aquellas partes de la pavimentadora que presenten residuos de mezcla asfáltica.

Compactación

La capa extendida se compactará hasta alcanzar el grado indicado en el proyecto o el que apruebe la Secretaría. La compactación se hará longitudinalmente, de las orillas hacia el centro en las tangentes y del interior al exterior, en las curvas, con un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada.

La compactación se terminará cuando la mezcla asfáltica tenga una temperatura igual a la mínima conveniente para la compactación. Se tendrá cuidado en mantener siempre bien humedecidos los rodillos compactadores para evitar que la mezcla caliente se adhiera y se provoquen imperfecciones en el acabado de la carpeta asfáltica.

Equipo

Pavimentadoras

Autopropulsadas, capaces de esparcir y precompactar la carpeta asfáltica con mezcla en caliente que se tienda, con el ancho, sección y espesor establecidos en el proyecto, incluyendo los acotamientos y zonas similares. Estarán equipadas con los dispositivos necesarios para un adecuado tendido de la carpeta asfáltica, como son: un enrasador o aditamento similar, que pueda ajustarse automáticamente en el sentido transversal, ser calentado en caso necesario y proporcionar una textura lisa y uniforme, sin protuberancias o canalizaciones; una tolva receptora de la mezcla asfáltica con capacidad para asegurar un tendido homogéneo, equipada con un sistema de distribución mediante el cual se reparta la mezcla uniformemente frente al enrasado, y sensores de control automático de niveles.

Compactadores

Compactadores de rodillos metálicos

Autopropulsados, reversibles, provistos de un sistema de rocío por agua y de petos limpiadores para evitar que el material se adhiera a los rodillos. Pueden ser de tres

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



(3) rodillos metálicos en dos (2) ejes, o de dos (2) o tres (3) ejes con rodillos en tándem, con diámetro mínimo de un (1) metro (40 in), en todos los casos.

Compactadores neumáticos

Remolcados o autopropulsados. Tendrán nueve (9) ruedas como mínimo, de igual tamaño, montadas sobre dos ejes unidos a un chasis rígido, equipado con una plataforma o cuerpo que pueda ser lastrado, de forma que la masa total del compactador se distribuya uniformemente en ellas, dispuestas de manera que las llantas del eje trasero cubran, en una pasada, el espacio completo entre las llantas adyacentes en el eje delantero. Las llantas serán lisas, con tamaño mínimo de 7.50-15 de cuatro (4) capas e infladas uniformemente a la presión recomendada por el fabricante, con una tolerancia máxima de treinta y cuatro punto cinco (34,5) kilopascales (5 lb/in²).

Puesto en servicio

Una vez que los trabajos de la conformación de la carpeta asfáltica o carpeta de rodadura han terminado, la carretera se pone en uso, para que la carretera se mantenga en óptimas condiciones, es necesario hacerles trabajos preventivos de mantenimiento, los cuales ayudaran a que la vialidad se mantenga en buenas condiciones y que cumpla con su función, de esto dependerá su vida útil.

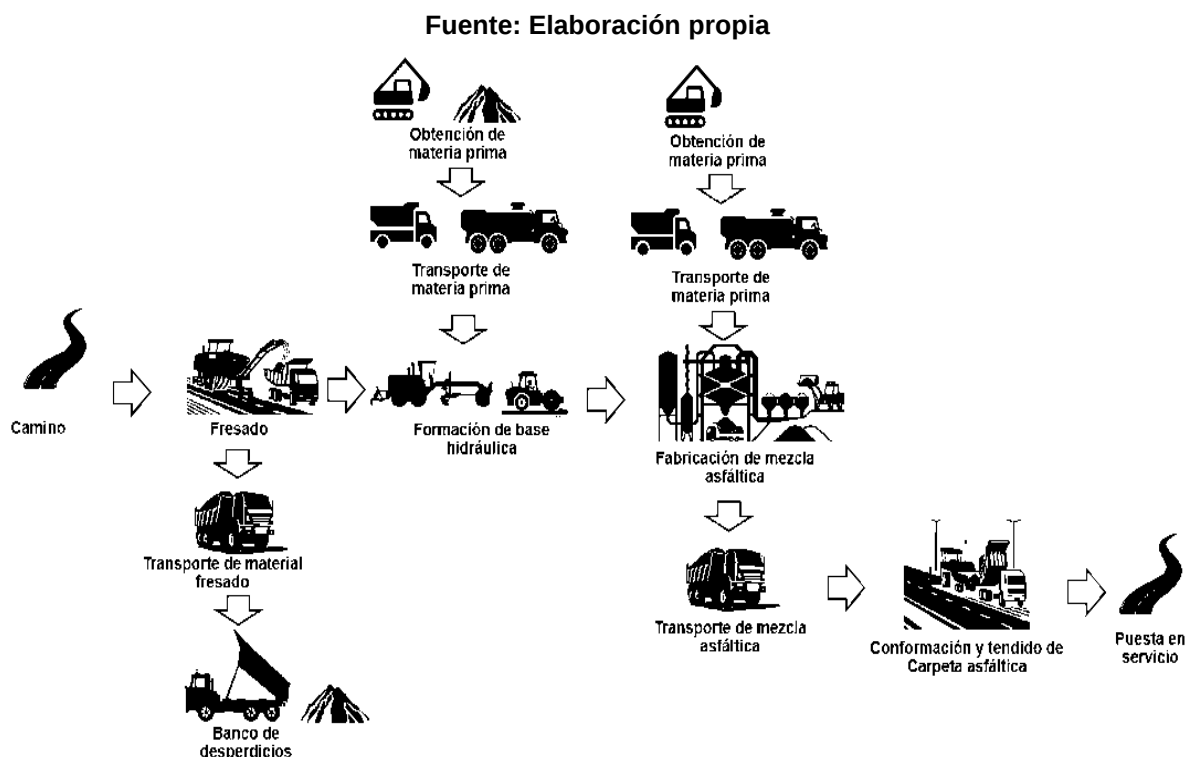
Proceso constructivo para conservación de un pavimento con RAP

Los procesos constructivos que a continuación se enuncian fueron obtenidos bajo las normas vigentes de la SCT, y estos procesos depende del país en que se realicen. Para poder tener buena referencia es recomendable consultar sus normativas vigentes y aplicables para el país en que se realicen los trabajos.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Ilustración 9 Proceso constructivo de un pavimento convencional



Recuperado del material

Es el conjunto de actividades que se realizan para desintegrar la carpeta asfáltica y parte o la totalidad del material de base o subbase, por medios mecánicos en frío; remezclar en el lugar el material recuperado con materiales pétreos nuevos, modificados o estabilizados con materiales asfálticos, cemento Portland, cal u otros o transformarlo en concreto hidráulico de baja resistencia; tender y compactar el material recuperado para formar una base o subbase sobre la que, posteriormente, se construirá una nueva carpeta.

Previamente a los trabajos de recuperado del material, se deben tomar ciertas consideraciones, como lo son el trazar desviaciones y colocar el señalamiento de protección de obra.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



El equipo de recuperación cortará la carpeta y las capas inferiores con una tolerancia de más menos dos puntos cinco centímetros ($\pm 2,5$ cm).

La recuperación se realizará siguiendo una trayectoria paralela al eje de la carretera, iniciando y terminando en líneas normales a dicho eje. A lo largo de las aproximaciones a guarniciones o pavimentos adyacentes, los cortes a la carpeta se realizarán con los cuidados necesarios para no dañarlos.

Ilustración 10 Recuperado de material de un pavimento

Fuente: Elaboración propia



Equipo

El equipo que se utilice para la recuperación en frío de pavimentos asfálticos, será el adecuado para obtener la calidad especificada en el proyecto, en cantidad suficiente para producir el volumen establecido en el programa de ejecución detallado por concepto, conforme al programa de utilización de maquinaria. Dicho equipo será mantenido en óptimas condiciones de operación durante el tiempo que duren los trabajos y será operado por personal capacitado.

Recuperadora

La recuperadora será autopropulsada y estará equipada con las unidades necesarias específicamente diseñadas para disgregar la carpeta asfáltica y las capas inferiores, así como con dispositivos para la reducción de emisiones de polvo

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



y de preferencia una regla de extendido. En caso de no contar con ésta última, será necesario utilizar una motoconformadora.

Será capaz de cortar y desintegrar el material de la capa asfáltica y las capas inferiores del pavimento, al tamaño y hasta la profundidad indicados en el proyecto.

Cuando se vaya a realizar el mezclado de los nuevos materiales adicionados con el equipo de recuperación, éste preferentemente contará, además, con un dispositivo para la adición del asfalto, cemento portland, cal o el material que indique el proyecto. La adición de cemento portland o cal, siempre se hará en lechada o mediante algún procedimiento aprobado por la Secretaría, que garantice la homogeneidad de la mezcla.

Motoconformadoras

Para la conformación de las capas recuperadas cuando la recuperadora no cuente con regla de extendido. Serán autopropulsadas, con cuchillas cuya longitud sea mayor de tres punto sesenta y cinco (3,65) metros, y con una distancia entre ejes mayor de cinco punto dieciocho (5,18) metros.

Compactadores

Compactadores de rodillos metálicos

Autopropulsados, reversibles y provistos de petos limpiadores para evitar que el material se adhiera a los rodillos; en el caso de compactadores vibratorios, éstos estarán equipados con controles para modificar la amplitud y frecuencia de vibración. Pueden ser de tres (3) rodillos metálicos en dos (2) ejes, o de dos (2) o tres (3) ejes con rodillos en tándem, con diámetro mínimo de un (1) metro (40") y con la masa que garantice la compactación uniforme en todo el espesor de la capa.

Compactadores neumáticos

Remolcados o autopropulsados, con una masa total mínima de treinta y cinco (35) toneladas. Tendrán nueve (9) ruedas como mínimo, de igual tamaño, montadas sobre dos ejes unidos a un chasis rígido, equipado con una plataforma o cuerpo que pueda ser lastrado, de forma que la masa total del compactador se distribuya uniformemente en ellas, dispuestas de manera que las llantas del eje trasero cubran, en una pasada, el espacio completo entre las llantas adyacentes en el eje delantero. Las llantas serán lisas, con tamaño mínimo de 7.50-15 de cuatro (4) capas e infladas uniformemente a la presión recomendada por el fabricante, con una tolerancia máxima de diecisiete puntos veinticinco (17.25) kilopascales (2.5 lb/in²).

Mezclado y tendido

El material recuperado será mezclado en el sitio utilizando el equipo de recuperación, añadiéndole en su caso materiales pétreos nuevos, emulsión asfáltica, cemento portland, cal o aditivos, según lo indique el proyecto o la Secretaría para formar una nueva base o subbase; el cemento portland y la cal serán añadidos en lechada.

El material recuperado, los materiales pétreos nuevos, los materiales asfálticos, el cemento portland, la cal y los aditivos que se empleen en la elaboración de las mezclas, se mezclarán con el proporcionamiento necesario para producir un producto homogéneo, con las características establecidas en el proyecto.

En el caso de ser necesaria la incorporación de agua para alcanzar el contenido de agua óptimo de compactación, el agua se agregará junto con la emulsión o en la lechada de cemento portland o cal.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Ilustración 11 Mezclado y tendido del material recuperado de un pavimento

Fuente: Elaboración propia



Compactación

Inmediatamente después de conformada la mezcla o bien cuando la emulsión haya comenzado a romper, será compactada. La capa recuperada se compactará lo necesario para lograr que cumpla con las características indicadas en el proyecto, en general esto requiere una alta energía de compactación, por lo que el proceso será definido en un tramo de prueba, hasta alcanzar el cien (100) por ciento de la

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



masa volumétrica seca máxima, obtenida en la prueba AASHTO modificada, según lo indicado en el Manual M·MMP·1·09, Compactación AASHTO.

La compactación se hará longitudinalmente a la carretera, de las orillas hacia el centro en las tangentes y del interior al exterior en las curvas, con un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada.

Obtención de materiales

Obtención de materiales pétreo

De acuerdo a lo establecido a las especificaciones del proyecto sobre la calidad de los materiales, previamente se deben realizar una caracterización de los materiales cumplirán con lo establecido en las Normas *N-CMT-4-04/17 Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, *N-CMT-4-05-001, Calidad de Materiales Asfálticos*, o la *Secretaría* y cumplirán con lo establecido en las Normas *N-CMT-4-02-001, Materiales para Subbases* y *N-CMT-4-02-002, Materiales para Bases Hidráulicas*, o salvo que el proyecto indique otra cosa. Los materiales pétreos procederán de los bancos indicados en el proyecto.

Los bancos de materiales son las excavaciones a cielo abierto destinadas a extraer material para la formación de cuerpos de terraplenes; ampliaciones de las coronas, bermas o tendido de los taludes de terraplenes existentes; capas subyacentes o subrasantes; terraplenes reforzados; rellenos de excavaciones para estructuras o cuñas de terraplenes contiguas a estructuras; capas de pavimento; protección de obras y trabajos de restauración ecológica, así como para la fabricación de mezclas asfálticas y de concretos hidráulicos.

Cuando sea necesario mezclar dos o más materiales de dos o más bancos diferentes, se mezclarán con las proporciones necesarias para obtener un material uniforme, con las características establecidas en el proyecto.

Una vez que los materiales han cumplido con lo establecido anteriormente ya en la ejecución de la obra, el banco de materiales seleccionado es explotado por medios mecánicos y son llenados los camiones volteo para su traslado a la obra.

Transporte de materiales pétreos

El material pétreo extraído del banco de material se transportará en camiones de volteo con cajas cerradas y protegidos con lonas, para evitar la contaminación. Este material será vaciado directamente en el tramo cuando sea el caso, o en almacenes temporales previamente seleccionados y como lo indique el proyecto, para evitar contaminación del material hasta su uso. O en su caso, cuando el material pétreo sea para la fabricación de mezcla asfáltica, el material pétreo se vaciará en el almacén de la planta de fabricación.

Transporte de asfalto

El asfalto regularmente se transporta en Carros Autopropulsados, regularmente de capacidades de 37 mil litros, este se hace de la refinería hasta la planta de fabricación de carpeta asfáltica.

Fabricación de mezcla asfáltica en caliente

Recepción de materia prima

El primer paso en la fabricación de la mezcla asfáltica es la recepción de materias primas, es decir de los agregados pétreos y del asfalto previamente caracterizados, estos serán almacenados en el espacio destinado dentro de la planta productora de mezcla asfáltica, la cual será la responsable de mantenerlos cubiertos de tal manera que estos se contaminen.

Llenado de tolvas

El llenado de tolvas se realizará con un cargador frontal y será de acuerdo a lo solicitado por la planta productora de carpeta asfáltica, que estará configurada de

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



acuerdo al diseño del pavimento previamente elegido de acuerdo a la caracterización de los materiales.

Del mismo modo, la dosificación del asfalto estará configurada en la planta productora, con lo especificado por el proyecto.

Producción de mezcla asfáltica

La producción de la mezcla asfáltica se hará en plantas con la capacidad y potencia necesaria para cumplir con las necesidades del proyecto.

Una planta de asfalto es un conjunto de equipos mecánicos electrónicos en donde los agregados son combinados, calentados, secados y mezclados con asfalto para producir una mezcla asfáltica en caliente que debe cumplir con ciertas especificaciones.

Transporte de mezcla asfáltica

La carpeta asfáltica producida se transportará en camiones de volteo, con cajas cerrada y con lonas para evitar la contaminación y la expulsión de la carpeta, con tal de no afectar al entorno por el que pasará, ya que la mezcla asfáltica estará a temperaturas muy elevadas. La capacidad de los camiones será variable, siempre y cuando cumpla con lo anteriormente mencionado o lo indicado en la normativa o el proyecto.

Los acarreo de los materiales hasta el sitio de su utilización, se harán de tal forma que el tránsito sobre la superficie donde se construirá la capa estabilizada, se distribuya sobre todo el ancho de la misma, evitando la concentración en ciertas áreas y, por consecuencia, su deterioro.

No se permitirá que los camiones que transportan la mezcla asfáltica, hagan maniobras que puedan distorsionar, disgregar u ondular las orillas de una capa recién tendida.

Tendido y conformación

Inmediatamente y antes de iniciar la construcción de la capa de carpeta asfáltica, la superficie sobre la que se colocará estará debidamente terminada dentro de líneas y niveles, sin irregularidades y reparados satisfactoriamente los baches que hubieran existido. No se permitirá la construcción sobre superficies que no hayan sido previamente aceptadas.

Si así lo indica el proyecto o lo aprueba la Secretaría, cuando la carpeta asfáltica con mezcla en caliente se construya sobre una base, ésta se impregnará de acuerdo con lo indicado en la Norma N·CTR·CAR·1·04·004, Riegos de Impregnación. Es responsabilidad del Contratista de Obra establecer el lapso entre la impregnación y el inicio de la construcción de la carpeta.

Si así lo indica el proyecto o lo aprueba la Secretaría, inmediatamente antes de iniciar el tendido de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, se aplicará un riego de liga en toda la superficie, del tipo y con la dosificación establecidos en el proyecto o aprobados por la Secretaría, de acuerdo con lo indicado en la Norma N·CTR·CAR·1·04·005, Riegos de Liga.

Sobre la superficie donde se construirá la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, el Contratista de Obra ejecutará previamente un tramo de prueba con una longitud de cuatrocientos (400) metros, con la finalidad de evaluar el procedimiento y los equipos que se utilizarán.

La mezcla se extenderá en todo el ancho de la corona empleando una extendedora, de manera que se obtenga una capa de espesor uniforme. La mezcla se extenderá en capas sucesivas, con un espesor no mayor que aquel que el equipo sea capaz de compactar al grado indicado en el proyecto.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



La tolva de descarga de la extendedora permanecerá llena para evitar la segregación de los materiales. No se permitirá el tendido de la mezcla asfáltica si existe segregación.

Al final de cada jornada y con la frecuencia necesaria, se limpiarán perfectamente todas aquellas partes de la pavimentadora que presenten residuos de mezcla asfáltica.

Ilustración 12 Tendido de carpeta asfáltica

Fuente: Elaboración propia



Compactación

La capa extendida se compactará hasta alcanzar el grado indicado en el proyecto o el que apruebe la Secretaría. La compactación se hará longitudinalmente, de las orillas hacia el centro en las tangentes y del interior al exterior, en las curvas, con un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



La compactación se terminará cuando la mezcla asfáltica tenga una temperatura igual a la mínima conveniente para la compactación. Se tendrá cuidado en mantener siempre bien humedecidos los rodillos compactadores para evitar que la mezcla caliente se adhiera y se provoquen imperfecciones en el acabado de la carpeta asfáltica.

Puesto en servicio

Una vez que se han concluido los trabajos de construcción de todas las etapas, la carretera se pondrá en servicio. Toda obra civil está diseñada para un periodo de retorno o de vida útil, tal que debe permanecer en óptimas condiciones, sin embargo para que esto se cumpla, se le deben dar ciertos cuidados, los cuales se denominan mantenimiento, los cuales pueden ser distintos como la limpieza del camino, limpieza de sus obras complementarias (cunetas bordillos), el bacheo profundo y superficial, e incluso en algunos casos, se tiene que colocar renivelaciones y sobre carpetas, para así mismo cumplir con lo establecido anteriormente y pueda permanecer transitable y en condiciones donde el usuario se sienta seguro de transitar sobre ellas, todos estos trabajos son preventivos y de mejoras.

Disposición final y abandono

Cada producto, proceso o servicio tienen el proceso de disposición final, hablando específicamente de las carreteras cumplen con una tendencia que es concluir con el propósito para el que fueron proyectadas, entonces para este punto existen dos opciones que marcaría el rumbo de la misma; la primera es la disposición final y

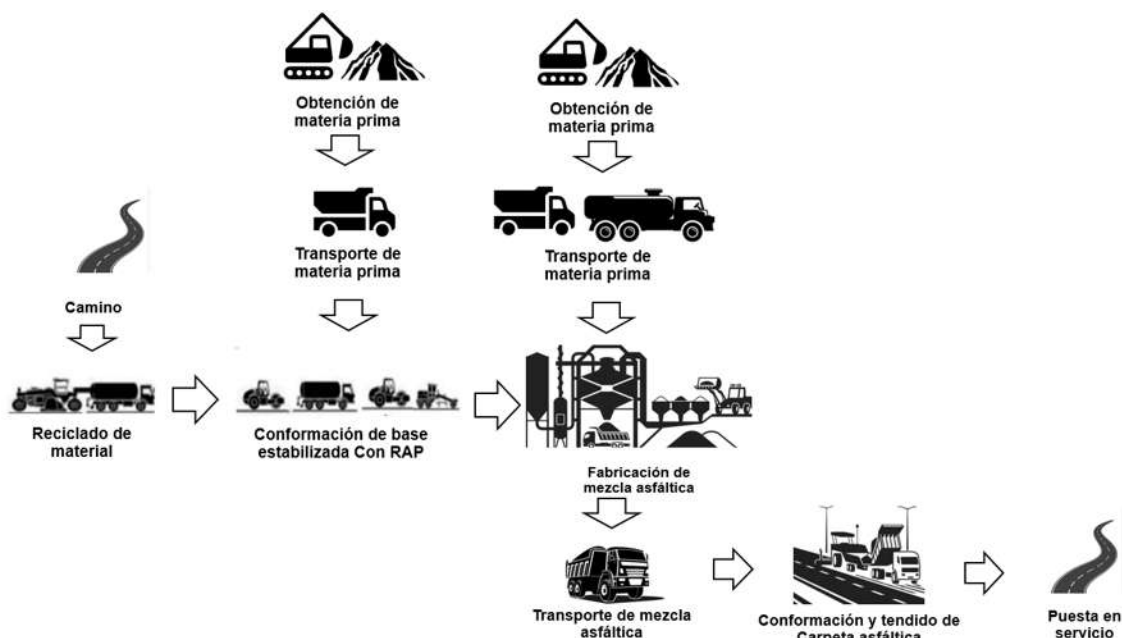
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



abandono. O la otra es realizarse una reconstrucción de la misma, es decir se sometería a procesos para volver a construirla.

Ilustración 13 Proceso constructivo de pavimento con RAP

Fuente: Elaboración propia.



5.4. Caracterización de los materiales

La caracterización de los materiales es una parte importante para realizar el inventario de ciclo de vida, ya que nos aporta datos más confiables, que nos ayudan a determinar las cantidades y volúmenes de manera que los resultados son más confiables, ya que garantiza la precisión, congruencia calidad de los mismos.

Densidad relativa del material pétreo seco m·mmp·4·04·003/18

Equipo y materiales:

Balanzas, canastilla de acero, tanque de agua, recipiente para saturar el material, dispositivo de suspensión, horno.

Procedimiento:

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Se obtuvo una porción de prueba del material que retenía en la malla N°4, se lavó con el fin de eliminar cualquier residuo de polvo o material contaminante que contenga. Luego, se secó la porción lavada hasta masa constante a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Enseguida se sumergió la porción de prueba de la muestra en un recipiente con agua limpia a una temperatura entre 15 y 25°C y se mantuvo en estas condiciones durante 24 ± 4 horas. Se obtuvo la masa de la canastilla vacía y sumergida en el agua y se registró como W_c , en g.

Posteriormente, se extrajo del agua la porción de prueba y se colocó sobre un paño absorbente; el paño se envuelve en forma de rodillo hasta que no haya agua visible en la superficie del material; las partículas más grandes se secaron en forma individual. La condición de superficialmente seco se logra cuando las partículas están húmedas y hayan perdido la película brillante de agua.

Se obtuvo la masa del material saturado y superficialmente seco y se registró como W_{sat} , en g. Inmediatamente después se colocó el material dentro de la canastilla, se sumergieron ambos en el tanque con el agua limpia a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y se colgaron en el centro del platillo de la balanza, cuando no salían burbujas de la canastilla y el material sumergidos, se determinó la masa sumergida del material con la canastilla y se registró como W_1 , en g.

Se sacó del agua la canastilla con el material, se virió el material en una charola, colocándolo dentro del horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, para su secado hasta masa constante. Después de secado el material, se dejó enfriar hasta que alcanzó la temperatura ambiente de 1 a 3 horas y a continuación se determinó su masa como W_s , en g. Finalmente, se determinó la masa del material sumergido en el agua restando a la masa W_1 , la masa W_c , de la canastilla sumergida y se registró como W_2 , en g para posteriormente hacer el cálculo para obtener la densidad relativa del material pétreo mediante la ecuación 1:

$$d_{Gd} = \frac{W_s}{W_{sat} - W_2} \text{-----} 1$$

Ilustración 14 Pesaje del material

Fuente: Elaboración propia



Desgaste de los ángeles m·mmp·4·04·006/02

Equipo y materiales:

Máquina de Los Ángeles, carga abrasiva, horno

Procedimiento:

Una vez cuarteada la muestra y clasificada obteniendo su granulometría, se integró la muestra de prueba con las proporciones correspondientes a cada rango de tamaños y se definió la cantidad de esferas, luego, se obtuvo la masa de la muestra de prueba integrada, registrándola como P_i en g y se introdujo a la máquina de Los Ángeles, se hace funcionar a una velocidad angular de 30 a 33 rpm, durante 500 revoluciones.

Se retiró el material del interior de la máquina depositándolo en una charola. Posteriormente se desechó la fracción de la muestra de prueba que pasaba la malla N°12, el material menor se lavó y se secó en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

Finalmente se dejó enfriar la muestra de prueba a temperatura ambiente, para determinar su masa, registrándola como P_f . De esta manera, se calculó utilizando la ecuación 2:

$$P_a = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) * 100 \text{ ----- 2}$$

Desgaste microdeval ASTM d 6928-06

Equipo y materiales:

Máquina de abrasión Microdeval, carga de abrasión, molino de golpeo capas de efectuar 100 ± 5 revoluciones por minuto, mallas, horno, balanza

Procedimiento:

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



La muestra debe ser lavada y se secó en un horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante, de acuerdo a la granulometría de la mezcla se estableció el peso en g de la muestra con una mezcla representativa de 1500 ± 5 g, luego se determinó la masa A en g y se sumergió la muestra en 2 ± 0.05 litros de agua por un mínimo de 1 hora. Se colocó la muestra en la máquina con 5000 ± 5 g de bolas de acero y el agua utilizada anteriormente para saturar la muestra, se puso en marcha la máquina a un número de revoluciones indicado según la granulometría. Luego se frenó la máquina y se vertió la muestra y las bolas de acero sobre una malla 4,75 mm superpuesta en otra de 1,18mm lavando y cribando el material con cuidado hasta que todo el material restante pasara la última malla, se retiraron las bolas de acero y se combinaron ambos materiales, luego se secaron al horno las muestras a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante. Una vez seco se registra la masa como B en g. Finalmente se calculó el desgaste por abrasión Microdeval por medio de la ecuación 3:

$$\text{Desgaste Microdeval (\%)} = \frac{A-B}{A} * 100 \text{-----} 3$$

Intemperismo acelerado m·mmp·4·04·008/03

Equipo y materiales:

Mallas, balanza, horno, agitador metálico, máquina agitadora, reactivos (Solución de sulfato de sodio, solución de sulfato de magnesio) y charolas de acero galvanizado

Procedimiento:

Una vez preparada la mezcla mediante cuarteo y separación y preparada la solución de la prueba, se colocó cada muestra en una charola de peltre que contenía la solución de prueba por un periodo de 16 a 18 h a una temperatura de 21°C . Se escurrió las muestras y se secaron en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Se repitió este proceso de inmersión y secado hasta completar cinco ciclos, al terminar el último ciclo, se lavaron las muestras hasta eliminar toda la solución y se secaron

nuevamente en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C. Una vez enfriadas a temperatura ambiente, se cribó cada muestra con la malla de menor tamaño del intervalo considerado. Finalmente, se calculó el intemperismo con la ecuación 4:

$$P_{(t)} = \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \right) * 100 \text{-----} 4$$

Partículas alargadas y lajeadas m·mmp·4·04·005/02

Equipo y materiales:

Cribas, balanza, maquina agitadora, calibrador de espesores, calibrador de longitudes y charola

Procedimiento para las partículas con forma alargada:

Una vez se seleccionó el material para la prueba, del número de partículas retenido en cada malla, se verificó que cada pieza pasara por la ranura correspondiente del calibrador de longitudes. Finalmente, se reunieron todas las partículas que pasaron por las ranuras del calibrador de longitudes y se determinó su masa, designándola como m_a , en g.

Para determinar su porcentaje de las partículas con forma alargada, se usa la expresión:

$$C_a = \left(\frac{m_a}{M} \right) * 100 \text{-----} 5$$

Procedimiento para las partículas con forma de laja:

Igualmente, se verificó que cada pieza pase por la ranura correspondiente del calibrador de espesores, buscando la posición más adecuada. Finalmente, se reunieron todas las partículas que hayan pasado y se determina su masa, designándola como m_e , en g.

Para el cálculo del porcentaje de las partículas con forma de laja

$$C_p = \left(\frac{m_e}{M}\right) * 100 \text{-----} 6$$

Partículas trituradas m·mmp·4·04·013/09

Equipo y materiales:

Malla No. 4, cubo de lámina, horno, balanza, charola, regla y brocha.

Procedimiento:

Ya que se preparó la muestra y se separó en dos porciones de prueba, la primera porción se extendió sobre una superficie seca y limpia para hacer la inspección de cada partícula, se tomó cada partícula con la mano y se examinó visualmente. Si alguna de las caras de la partícula se observaba fracturada al menos en $\frac{1}{4}$, se consideraba como una cara fracturada. En una charola se colocaron todas las partículas que tengan sólo una cara fracturada y en otra charola, las que tengan dos o más caras fracturadas.

Se determinó la masa de todas las partículas juntas que hayan presentado sólo una cara fracturada en g registrada como W1C1. De la misma forma se obtuvo la masa de todas las partículas juntas que hayan presentado dos o más caras fracturadas y se registró como W2C1.

Se realizó exactamente el mismo procedimiento para la segunda porción cambiando sus variables por W1C2 y W2C2 respectivamente.

Para partículas trituradas con una cara el cálculo es:

$$PT_{1C1} = \frac{W_{1C1} + W_{2C1}}{W_{P1}} * 100 \text{-----} 7$$

$$PT_{1C2} = \frac{W_{1C2} + W_{2C2}}{W_{P2}} * 100 \text{-----} 8$$

Y para partículas trituradas con dos o más caras:

$$PT_{2C1} = \frac{W_{2C1} + W_{2C1}}{W_{P1}} * 100 \text{-----} 9$$

$$PT_{2C2} = \frac{W_{2C2} + W_{2C2}}{W_{P2}} * 100 \text{-----} 10$$

Para finalmente obtener un promedio de los contenidos de partículas trituradas con una sola cara y con dos o más caras.

Desprendimiento por fricción m·mmp·4·04·009/03

Equipo y materiales:

Mallas, frasco de vidrio, balanza, agitador mecánico, horno, cemento asfáltico.

Procedimiento:

Se prepararon los materiales pétreos y el material asfáltico para que después dichos materiales fueran calentados a la temperatura indicada, se agregó el producto asfáltico a cada una de las 6 porciones de agregado pétreo dentro de la charola y se distribuye uniformemente. Luego, se tomaron 2 porciones de estas pruebas de aproximadamente 50 g cada una, se dejaron enfriar cada una de las fracciones a temperatura ambiente.

Posteriormente se pusieron las 2 porciones en frascos de vidrio y se le agregó a cada una 200 cm³ de agua destilada a 25 °C, luego se tapó y dejó reposar por 24 horas. Como no se observó desprendimiento de la película de asfalto del agregado se puso un agitador mecánico sometido a 4 periodos consecutivos de agitación de 15 minutos cada uno.

Finalmente se debe calcular en porcentaje el promedio del desprendimiento por fricción de la película de asfalto con la ecuación 11.

$$P_{FR} = \frac{\sum P_{FR}}{N} \text{-----} 11$$

Límite Líquido M·MMP·1·07/07

Para obtener el Límite líquido se realizó el siguiente procedimiento

El equipo necesario para efectuar esta prueba es: copa de Casagrande, balanza, horno, desecador, vaso o recipiente, cápsulas de porcelana, espátula, cuentagotas, vidrios de reloj y paño.

Procedimiento:

De la fracción del material preparada, se toma una porción de aproximadamente 150 g que se coloca en la cápsula de porcelana donde se homogeneiza utilizando la espátula.

En la copa de Casagrande, previamente calibrada como se indica en la Cláusula E. de este Manual, se coloca una cantidad suficiente de material para que, una vez extendido con la espátula, se alcance un espesor de 8 a 10 mm en la parte central de la copa, considerando lo siguiente:

- Para evitar que el material colocado sobre la copa sea insuficiente, es conveniente poner una cantidad ligeramente mayor y eliminar el sobrante al enrasarlo con la espátula.
- Para extender el material se procede del centro hacia los lados sin aplicar una presión excesiva y con el mínimo de pasadas de la espátula.
- Mediante una pasada firme del ranurador se hace una abertura en la parte central del material contenido en la copa, para lo cual, el ranurador se mantendrá siempre normal a la superficie interior de la copa.
- Inmediatamente después de colocado y ranurado el material, se acciona la manivela del aparato para hacer caer la copa a razón de dos golpes por segundo, y se registra el número de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13.mm.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



- Logrado lo anterior se toman con la espátula aproximadamente 10 g de material de la porción cerrada de la ranura y, para determinar su contenido de agua w_n , de acuerdo con el procedimiento indicado en el Manual M·MMP·1·04, Contenido de Agua, se colocan en un vidrio de reloj del que previamente se ha determinado su masa.
- Una vez que se ha tomado la porción requerida para la determinación del contenido de agua, el material restante se reintegra a la cápsula de mezclado, para lavar y secar la copa y el ranurador.
- Inmediatamente, mediante el cuentagotas, se agrega agua al material en la cápsula y se homogeneiza con la espátula, este procedimiento se repite hasta completar cuatro determinaciones.

Límite Plástico M·MMP·1·07/07

Equipo

El equipo necesario para efectuar esta prueba es la balanza, horno, desecador, cápsulas de porcelana, espátula, vidrios de reloj, placa de vidrio y alambre de acero.

Procedimiento:

De la fracción del material preparada, se toma una porción de tamaño tal que se pueda formar una pequeña esfera de aproximadamente 12.mm de diámetro, la que se moldea con los dedos para que pierda agua y se manipula sobre la palma de la mano para formar un cilindro.

A continuación, el cilindro se hace girar con los dedos de las manos sobre la placa de vidrio para reducir su diámetro hasta que sea aproximadamente de 3 mm en toda su longitud. La velocidad de girado será de 60 a 80 ciclos por minuto, entendiéndose por "ciclo" un movimiento de la mano hacia adelante y hacia atrás, hasta volver a la posición de partida.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Si al alcanzar un diámetro de 3 mm el cilindro no se rompe en tres secciones simultáneamente, significa que su contenido de agua es superior al del límite plástico (ω_P). En tal caso se junta nuevamente todo el material para formar la pequeña esfera, manipulándola con los dedos para facilitar su pérdida de agua y lograr una distribución uniforme de la misma, repitiendo el procedimiento descrito, hasta que el cilindro se rompa en tres segmentos precisamente en el momento de alcanzar dicho diámetro, el cual se verifica comparándolo contra el alambre de referencia.

Inmediatamente se colocan sobre un vidrio de reloj los fragmentos del cilindro y se determina el contenido de agua de ese material, ω_i , de acuerdo con el procedimiento indicado en el Manual M·MMP·1·04, Contenido de Agua. Para mayor seguridad en los resultados, la prueba se efectuará por triplicado, obteniendo para cada una de las determinaciones, el contenido de agua, ω_i .

Equivalente de arena m·mmp·4·04·004/02

Equipo y materiales:

Cilindro de prueba, tapón de hule, sifón, tubo irrigador, botella, pisón, embudo para filtrar, papel filtro y balanza, matraces Erlenmeyer, agitador.

Procedimiento:

Primero se preparó la solución de reserva con cloruro de calcio y demás componentes y luego solución de trabajo con la dilución de la solución de reserva y agua destilada.

Por medio del sifón, se introdujo la solución de trabajo al cilindro hasta una altura de 10 cm y con el embudo se puso la muestra de material eliminando burbujas de aire. Se dejó reposar la muestra por aproximadamente 10 minutos y se tapó el cilindro con el tapón, se insertó el tubo irrigador con el cual se lavaron las paredes del cilindro de arriba a abajo hasta concluir en el fondo. Cuando el nivel del líquido

llegó a 38 cm. Posteriormente, se dejó reposar el cilindro durante 20 min, evitando cualquier movimiento o vibración durante este período de tiempo esperando la sedimentación de la arena y que los finos queden en suspensión. Se registra el nivel superior de los finos en suspensión en mm como (LNSfinos).

Luego, se introdujo lentamente la varilla con pisón dentro del cilindro sin formar turbulencias, hasta que la base se asentara en la arena, se registra el nivel de la parte superior del indicador en la escala del cilindro restándole 254 mm y se pone como (LNSarena) para poder llevar a cabo el cálculo siguiente:

$$\%EA = \left(\frac{LNSarena}{LNSfinos} \right) * 100 \text{ ----- 12}$$

Azul de metileno m·mmp·4·04·014/09

Equipo y materiales:

Malla No.200, agitador mecánico, balanza, matraz volumétrico, cronómetro, vaso de precipitado, charola, azul de metileno grado reactivo, papel de filtro, agua destilada

Procedimiento:

Una vez preparada la muestra y la solución realizada en un matraz volumétrico con la relación 1/1000 donde se disuelve 1 g de azul de metileno grado reactivo en 1 000 g de agua destilada, al vaso que tiene la porción de prueba se le añadieron 30 mL de agua destilada y se colocó sobre el agitador magnético. Luego se llenó la bureta graduada con la solución hasta que llegó a 50 mL.

Cuando en el vaso de precipitado se observó que la suspensión de finos en el agua destilada era uniforme, sin detener su agitación, con la bureta se le adicionó la solución en proporciones de 1 mL cada vez.

Al término de 1 min después de cada adición de 1 mL de la solución, con la punta de la varilla de vidrio se tomó una gota de la suspensión en agitación y se vertió sobre el papel de filtro para observar la apariencia de la gota sobre el papel hasta que se formara un círculo azul alrededor de la gota, se continuó con la agitación 4 min más y se registró el contenido de la bureta como C_{sol} en mL para realizar el siguiente cálculo:

$$AM = \frac{50 - C_{sol}}{W_f} \text{-----13}$$

Prueba al asfalto

Penetración m·mmp-4-05-006/00

Equipo y materiales:

Penetrómetro para asfaltos, agujas, capsula de penetración, baño de agua, termómetro, cronómetro,

Procedimiento:

Primero se puso el asfalto en la cápsula cuidando que quedara totalmente cubierto, luego se acondiciona el asfalto en baño maría a una temperatura de 25°C y se mantuvo ahí por 2 h. Por otra parte, se colocó el penetrómetro sobre una superficie plana y firme, poniendo la aguja y la masa de $100 \pm 0,1$ en el elemento que se desplaza. Después de las 2 horas se sacó del baño de agua la cápsula, cuidando que tuviera agua en la parte superior de la capsula. Se colocó sobre la base del penetrómetro, de tal manera que la muestra quedara bajo la aguja. Se ajusta la altura de la aguja hasta que haga contacto con la superficie de la muestra (juntando la aguja con la película de agua), se puso la manecilla del penetrómetro con el cero de su carátula y se oprimió el sujetador para liberar la aguja únicamente durante 5 segundos, después se tomó la lectura registrándola en décimos de milímetro. Este procedimiento se hizo tres veces en puntos diferentes de la superficie de la muestra.

Punto de reblandecimiento m·mmp·4·05·009/00

Equipo y materiales:

Vaso de vidrio, anillos, soporte, esferas, placas de apoyo, mechero, termómetro, agua, cronómetro

Procedimiento:

Primero se ensambló el sistema de soporte colocando en su lugar los anillos con la muestra de asfalto y el termómetro de manera que la parte inferior de su bulbo quedara al mismo nivel que la parte inferior de los anillos cuidando que no tocara las paredes del orificio central del porta anillos. Luego se llenó el vaso de vidrio hasta una altura de 10 cm con agua a $5 \pm 1^{\circ}\text{C}$. Una vez alcanzada la temperatura se ponen las esferas en las guías de los anillos dentro del vaso.

Luego se colocó en el mechero y se incrementó uniformemente la temperatura del líquido con una razón de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, se tomaron lecturas de la temperatura cada minuto después de los primeros 3 min. En el momento que cae la esfera a la placa inferior del soporte se toma la temperatura cuidando finalmente que las tres esferas no tengan una temperatura diferente entre sí de más de 1°C ,

Ilustración 15 Prueba punto de reblandecimiento

Fuente: Elaboración propia



Ductilidad m·mmp·4·05·011/07

Equipo y materiales:

Ductilómetro, molde, placa de apoyo, baño de agua, termómetro, espátula, antiadherente.

Procedimiento:

Primero se preparó la muestra con el cemento asfáltico caliente en la briqueta la cual se apoyaba con una placa, luego se colocó dentro del baño de agua a una

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



temperatura de 25°C durante 30 min; posteriormente se sacó del baño y se enrasó la briqueta cortando el exceso de material asfáltico con la espátula caliente para facilitar el enrasado. Luego se volvió a introducir en el baño a la misma temperatura durante 1 hora 30 min.

A continuación, se retiró la briqueta de la placa quitando los elementos laterales del molde y se pusieron las mordazas en el ductilómetro con agua a 25°C, se puso en marcha el mecanismo de prueba a una velocidad de 5cm/min, hasta que se rompiera de la briqueta. Como resultado se reportó la longitud que se desplazó la mordaza para lograr la ruptura de la briqueta, en cm, la ilustración 16 muestra la prueba de ductilidad.

Ilustración 16 Prueba de ductilidad

Fuente: Elaboración propia



**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



PROPIEDAD	UNIDAD	RESULTADO	NORMA
Valor de soporte California (CBR)	%	101.8	100 min
Expansión	%	0.45	
Masa Vol. Seca Máxima	Kg/m ³	2233	
Humedad Óptima	%	9.9	
Densidad aparente		2.8	
Absorción del pétreo	%	0.9	
Partículas Alargadas y Lajeadas	%	31.8	35 máx.
Equivalente de arena	%	69.0	50 máx.
Contenido de Finos (pasa malla 200)	%	11.2	
Desgaste de los Ángeles	%	27.3	30 máx.
Límite Líquido	%	18.4	25 máx.
Límite Plástico	%	11.2	
Índice Plástico	%	7.2	6 máx.
Contracción Lineal	%	1.8	

Tabla 2 Propiedades de los materiales pétreos de banco

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos de los pétreos, donde se realiza también la comparativa con la normativa aplicable. Así mismo en la Tabla 3 se presentan los resultados de la composición granulometría, con los límites permisibles de normativa, lo cual garantiza la calidad de los materiales a utilizar.

Lo cual también se presenta la gráfica en la Ilustración 17, donde se muestran los pesos retenidos de los pétreos, se presenta un buen comportamiento, cumpliendo.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Composición Granulométrica				
Criba (mm)	Designación	% que pasa	Limites normativa	
0.075	200	3%	0%	5%
0.15	100	4%	3%	9%
0.25	60	4%	5%	12%
0.425	40	5%	8%	17%
0.85	20	7%	13%	25%
2	10	13%	21%	36%
4.75	4	31%	30%	50%
9.5	3/8	51%	40%	65%
19	3/4	83%	54%	83%
25	1	94%	62%	90%
37.5	1 1/2	100%	75%	100%
50	2	100%	85%	100%

Tabla 3 Composición granulométrica

Fuente: Elaboración propia

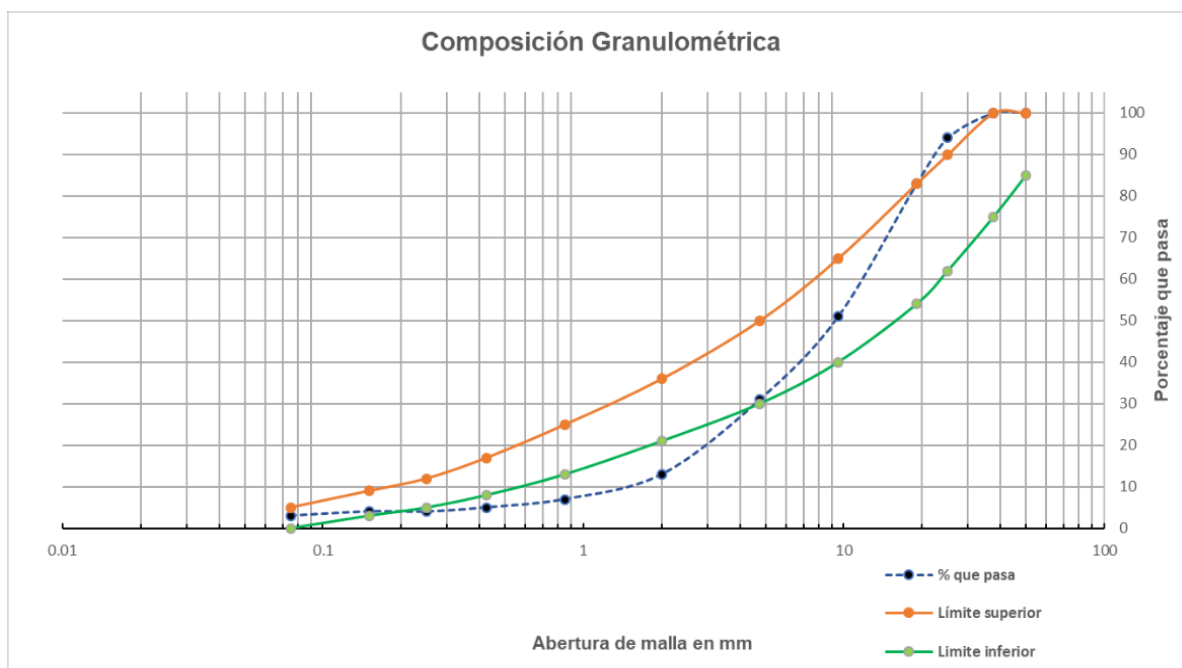


Ilustración 17 Grafica granulométrica de los materiales de banco

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Los resultados obtenidos fueron debidamente verificados de acuerdo a la normativa vigente de la SCT N-CMT-4-02-002/16, donde se establecen los límites permisibles para los materiales pétreos para la capa de base, los materiales analizados vírgenes o en breña. De acuerdo a lo que se obtuvo se puede decir que los materiales evaluados cumplen, con la normativa y por lo tanto son aptos para usarse en la construcción de la capa de base hidráulica.

El análisis de los materiales, nos proporciona certeza y calidad sobre las características de los materiales, esto es una parte esencial que nos ayudará a construir con una mayor certeza los inventarios de ciclo de vida.

Resultados de Base con 50% de RAP

PROPIEDAD	UNIDAD	VALOR	ESPECIFICACIÓN
Valor de soporte California (CBR)	%	109.9	100 min
Expansión	%	0.08	
Masa Vol. Seca Máxima	Kg/m ³	2210	
Humedad Óptima	%	8	
Densidad aparente		2.85	
Absorción del pétreo	%	0.37	
Partículas Alargadas y Lajeadas	%	28.5	35 máx.
Equivalente de arena	%	70.0	50 máx.
Contenido de Finos (pasa malla 200)	%	10.2	
Desgaste de los Ángeles	%	28.7	30 máx.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Límite Líquido	%	14.12	25 máx.
Límite Plástico	%	9.98	
Índice Plástico	%	4.14	6 máx.
Contracción Lineal	%	NP	

Tabla 4 Propiedades de los materiales de la base con 50% RAP

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos de la mezcla de la base con RAP. Para la caracterización de la base con RAP se realizó una mezcla agregando 50% de RAP y 50% de Base Hidráulica, todos los resultados obtenidos se evaluaron de acuerdo a la normativa vigente de la SCT, para Bases y subbases, *N-CMT-4-02-002/16*, los resultados obtenidos indican que se tiene un buen comportamiento y por lo tanto cumplen con lo requerido en la norma.

Así mismo en la Tabla 5 se presenta la granulometría obtenida de la mezcla con RAP, como tabla resumen podemos considerar que, de acuerdo a normativa, es un comportamiento que entra dentro de los límites permisibles de la normativa, así mismo se presenta en la Ilustración 18 la gráfica de la granulometría que caracteriza el material.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

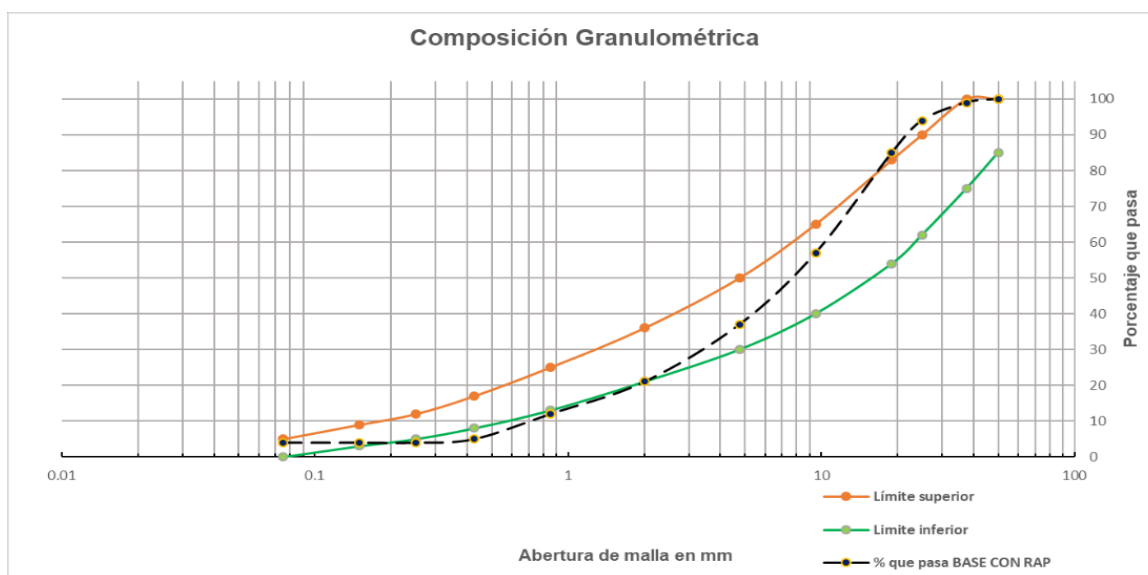
Composición Granulométrica				
Criba (mm)	Designación	% que pasa	Limites normativa	
0.075	200	4%	0%	5%
0.15	100	4%	3%	9%
0.25	60	4%	5%	12%
0.425	40	5%	8%	17%
0.85	20	12%	13%	25%
2	10	21%	21%	36%
4.75	4	37%	30%	50%
9.5	3/8	57%	40%	65%
19	3/4	85%	54%	83%
25	1	94%	62%	90%
37.5	1 1/2	99%	75%	100%
50	2	100%	85%	100%

Tabla 5 Granulométrica del material con 50% RAP

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 18 Grafica de composición granulométrica del material con 50% de RAP

Fuente: Elaboración propia



5.5. Modelado del Análisis de ciclo de Vida.

El análisis de ciclo de vida, es una metodología que durante años ha existido y se ha desarrollado para diversos usos, sin embargo, la actualización de la norma lleva vigente desde el año 2006, por lo cual, esta investigación tiene la base de la norma ISO, sin embargo, en base a la experiencia y después de una extensa investigación se hace la propuesta de los siguientes pasos, que nos servirán de guía para realizar el ACV ante cualquier tipo de pavimento carretero.

Principalmente para poder realizar el modelado del ACV, es necesario diseñar la sección del pavimento, con ella podremos definir espesores del pavimentos, que nos servirán para obtener las cantidades de los materiales.

5.5.1. Diseño de Sección de pavimento

Para realizar el diseño de la estructura del pavimento desde el punto de vista funcional, se empleó el método establecido por la AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, en la guía AASHTO 1993.

Dado a que la propuesta de pavimento es de tipo flexible, la ecuación aplicada es la siguiente:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_o + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \frac{\Delta PSI}{2.7}}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10} M_R - 8.07$$

Donde:

W18 = Ejes sencillos equivalentes de 18,000 libras acumulados en el periodo de análisis. (8.2 ton)

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



- ZR = Desviación estándar, que depende del nivel de confianza seleccionado.
- So = Error estándar combinado de la predicción del tránsito y la predicción del comportamiento del pavimento.
- Δ PSI = Diferencia entre las calificaciones de servicio inicial y final ($P_o - P_t$).
- MR = Módulo resiliente de la capa de apoyo en psi.
- P_o = Índice de servicio inicial
- P_t = Índice de servicio terminal
- SN = Número estructural del pavimento, $SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$
- D1 = Espesor de la carpeta asfáltica en in.
- D2 = Espesor de la capa de base en in.
- D3 = Espesor de la capa de subbase en in.
- a_1, a_2 y a_3 = Coeficientes de la carpeta asfáltica, de la base y la subbase, respectivamente.
- m_2, m_3 = Coeficientes de drenaje para las capas de base y subbase.

Para determinar el diseño de la estructura de pavimento mediante la metodología propuesta por la AASHTO 1993, se consideraron los siguientes parámetros:

Parámetros de diseño

Confiabilidad (ZR)

La confiabilidad para este proyecto se estimó como una vialidad de segundo orden, por lo tanto, se le asignó el 90% de acuerdo con la Guía AASHTO 1993.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Table 2.2. Suggested Levels of Reliability for Various Functional Classifications

Functional Classification	Recommended Level of Reliability	
	Urban	Rural
Interstate and Other Freeways	85–99.9	80–99.9
Principal Arterials	80–99	75–95
Collectors	80–95	75–95
Local	50–80	50–80

NOTE: Results based on a survey of the AASHTO Pavement Design Task Force.

Tabla 6 Nivel de confiabilidad

Fuente: AASHTO 1993)

El parámetro Z_R depende del nivel de confianza elegido y fue obtenido en tablas estadísticas que el mismo método AASHTO recomienda, el cual corresponde a -1.282.

Table 4.1. Standard Normal Deviate (Z_R) Values Corresponding to Selected Levels of Reliability

Reliability, R (percent)	Standard Normal Deviate, Z_R
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
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	-3.090
99.99	-3.750

Tabla 7 Desviación estándar normal

Fuente: AASHTO 1993

Desviación estándar total (SO)

La desviación estándar total (inherente a los materiales, a la construcción y a la predicción del tránsito), se consideró de 0.45 para un pavimento flexible, de acuerdo con la Guía AASHTO 1993.

- (3) The range of S_o values provided in Part II (Section 2.1.3) are based on the values identified above:

0.30–0.40	Rigid Pavements
0.40–0.50	Flexible Pavements

Serviciabilidad (Δ PSI)

El valor del Índice de Servicio Inicial (PO) propuesto es de 4.2.

El valor del Índice de Servicio Terminal (Pt) es de 2.5, de acuerdo con la Guía AASHTO 1993.

Módulo resiliente (MR)

El módulo resiliente de la capa de apoyo se obtuvo a través de la ecuación para capas granulares empleada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en donde se correlaciona directamente con el CBR mínimo indicado en la Normativa para la Infraestructura del Transporte de la SCT, utilizando la siguiente ecuación:

$$MR = 130 * CBR^{0.7}$$

En dónde:

MR = Módulo resiliente (kg/cm²)

CBR = Valor de Soporte California (%)

Coeficientes de capa para pavimento flexible

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



CAPA	CBR (%)	E (psi)	ai
Carpeta Asfáltica		426,699.00	0.420
Base Hidráulica	109.9	39,728.92	0.135
Subrasante	20.00	15,054.44	

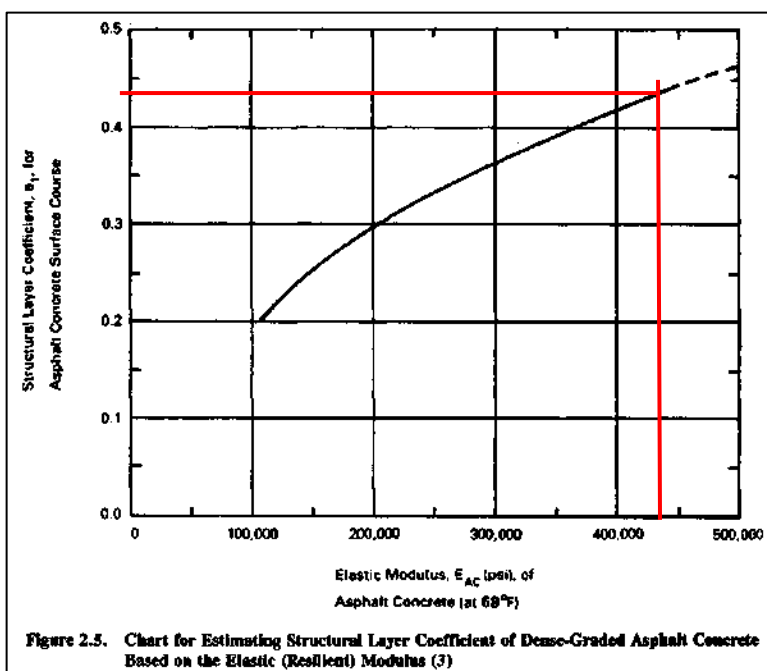
Tabla 8 Coeficientes de capa para pavimento flexible

Fuente: Elaboración propia.

Los coeficientes de capa se obtuvieron de acuerdo con la Guía AASHTO 1993

Ilustración 19 Determinación del coeficiente de capa para una carpeta asfáltica

Fuente: AASHTO 1993

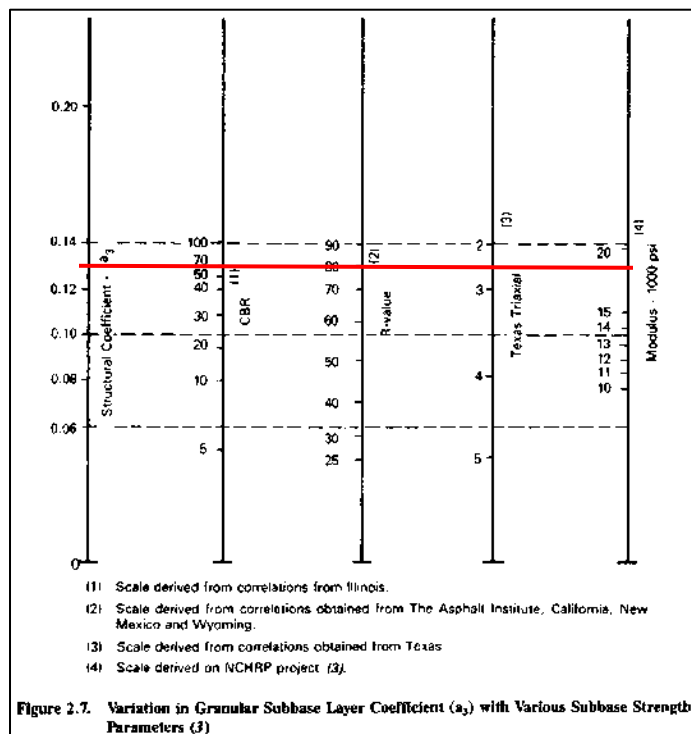


ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Ilustración 20 Determinación del coeficiente de capa para una base hidráulica

Fuente: AASHTO 1993)



El coeficiente de drenaje se asignó de acuerdo con la intensidad de precipitación que se presenta en la zona, además de considerar obras complementarias y de drenaje para desalojar el agua de la superficie, por lo tanto, se propone un coeficiente de drenaje para capas granulares de 1.15.

La calidad de los materiales propuestos para la estructura del pavimento, se consideraron de acuerdo con las características que debe cumplir cada capa conforme con lo establecido en la Normativa SCT vigente.

Las cargas utilizadas para calcular el número de ESAL'S de diseño son de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-02-2017.

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Conforme con la metodología establecida por la AASHTO versión 1993, los espesores de pavimento propuestos son:

CAPA	Espesor (cm)	CBR (%)	E (psi)	ai
Carpeta Asfáltica	10		426,699.00	0.420
Base Hidráulica	30	101.8	49,618	0.14
Subrasante	30	20.00	15,054.44	

Tabla 9 Espesores de la sección del pavimento convencional

Fuente: Elaboración propia.

Espesores propuestos del pavimento convencional obtenidos por la metodología
AASHTO

CAPA	Espesor (cm)	CBR (%)	E (psi)	ai
Carpeta Asfáltica	10		426,699.00	0.420
Base Hidráulica con RAP	30	101.8	47,029	0.135
Subrasante	30	20.00	15,054.44	

Tabla 10 Espesores de la sección del pavimento con RAP

Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



El resultado del diseño del pavimento es el siguiente:

Ilustración 21 Sección propuesta obtenida por el método AASHTO

Fuente: Elaboración propia



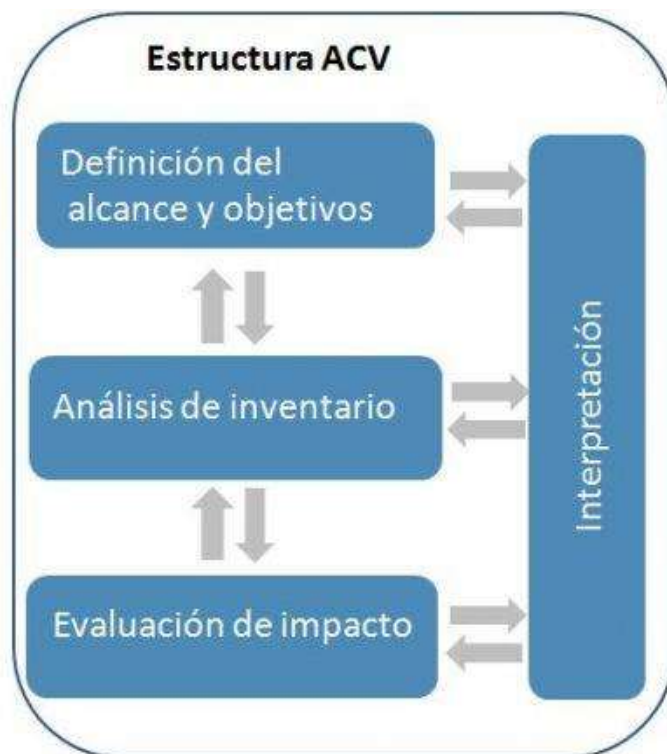
Sección propuesta de pavimento por el método AASHTO

El resultado de la sección de acuerdo al método AASHTO, fue igual teniendo como estructura del pavimento la siguiente composición: una carpeta de 0.10 m y una base para ambos pavimentos de 0.30 m y 0.30 m de subrasante.

Para cualquier producto proceso y servicio se puede realizar el ACV, sin embargo, es necesario tener una guía o para que los resultados tengan mayor certidumbre es necesario referirlos a normas ya sean nacionales o internacionales que le den certidumbre a los resultados que se están obteniendo, en este caso a normativa ISO 14044, para llevar a cabo un estudio de Análisis de ciclo de vida propone el siguiente proceso:

Ilustración 22 Estructura ACV

Fuente: ISO 14044:2006



El cual consta de 4 etapas, que tienen flechas dobles, que garantizan el análisis y permiten perfeccionar el estudio una vez avanzando el análisis, es decir, que puedes estar en la parte de la interpretación de resultados y percatarte que los alcances y objetivos planteados, no cumplen con los resultados y es necesario acotarlos o ampliarlos.

En base a la experiencia obtenida durante la investigación, nos percatamos que es necesario profundizar en varias etapas que consideramos se deben detallar, por lo cual hemos propuesto nuestro propio esquema para llevar a cabo el modelado de Análisis de ciclo de vida, el cual consiste en lo siguiente:

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Ilustración 23 Estructura ACV propuesta

Fuente: Elaboración propia.



El Esquema presenta 7 etapas, donde cada una está interconectada con flechas dobles, las cuales nos sirven para garantizar y hacer que el modelo sea tal cual, que se pueda seguir mejorando conforme avanza la investigación, por lo tanto, se puede sensibilizar tanto como sea posible.

5.5.2. Unidad Funcional

Se define la unidad funcional para cada uno de los pavimentos, de la siguiente manera:

Pavimento convencional

Construcción de pavimento carretero con una capa o recubrimiento que favorece el tránsito para una vialidad y una capa inferior favoreciendo a la resistencia y durabilidad del mismo, de un 1 km, para un periodo de retorno de 15 años, en Ario de Rosales, Michoacán, México de pavimento flexible, compacto, corrido, espesor definido, dimensiones definidas, diseñado con metodologías que cumplan con la calidad, comodidad y desempeño de acuerdo a la normativa nacional aplicable. Los materiales empleados deben cumplir con los límites permisibles de las normativas nacionales aplicables, así mismo los procesos de construcción deben ser correctamente ejecutados cumpliendo con los estándares normativos. Un espesor de 0.10 m de carpeta asfáltica y 0.30 m de base hidráulica.

Pavimento con RAP

Construcción de pavimento carretero con una capa o recubrimiento que favorece el tránsito para una vialidad y una capa inferior con 50% de RAP y el otro 50% con material directo de banco, favoreciendo a la resistencia y durabilidad del mismo, de un 1 km, para un periodo de retorno de 15 años, en Ario de Rosales, Michoacán, México de pavimento flexible, compacto, corrido, espesor definido, dimensiones definidas, diseñado con metodologías que cumplan con la calidad, comodidad y desempeño de acuerdo a la normativa nacional aplicable. Los materiales

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



empleados deben cumplir con los límites permisibles de las normativas nacionales aplicables, así mismo los procesos de construcción deben ser correctamente ejecutados cumpliendo con los estándares normativos. Un espesor de 0.10 m de carpeta asfáltica y 0.30 m de base hidráulica con 50% de RAP.

La unidad funcional del pavimento debe cumplir y contestar las siguientes preguntas planteadas en la Tabla 11, para que pueda considerarse integral.

	Pavimento convencional	Pavimento RAP
¿Qué hace?	Construcción de pavimento carretero con una capa o recubrimiento que favorece el tránsito para una vialidad y una capa inferior favoreciendo a la resistencia y durabilidad del mismo.	Construcción de pavimento carretero con una capa o recubrimiento que favorece el tránsito para una vialidad y una capa inferior con 50% de RAP y el otro 50% con material directo de banco, favoreciendo a la resistencia y durabilidad del mismo.
¿Cuánto?	de un 1km	
Para cuanto tiempo/ ¿Cuántas veces?	para un periodo de retorno de 15 años	
¿Dónde?	Ario, Michoacán, México	
¿Qué tan bien?	Pavimento Flexible, compacto, corrido, espesor definido, dimensiones definidas, diseñado con metodologías que cumplan con la calidad, comodidad y desempeño de acuerdo a la normativa nacional aplicable.	
¿Qué características de composición tiene?	Los materiales empleados deben cumplir con los límites permisibles de las normativas nacionales aplicables, así mismo los procesos de construcción deben ser correctamente ejecutados cumpliendo con los estándares normativos.	
¿Qué estructura de pavimento tiene?	Un espesor de 0.10 m de carpeta asfáltica y 0.30 m de base hidráulica	Un espesor de 0.10 m de carpeta asfáltica y 0.30 m de base hidráulica con 50% de RAP

Tabla 11 Unidad Funcional de ambos pavimentos

Fuente: Elaboración propia

5.5.3. Flujo de referencia

El flujo de referencia, está definido en base a varias consideraciones, entre ellas cabe destacar que se tiene un ancho de la carretera de 7 metros, la sección definida anteriormente, de 0.10 m de carpeta, 0.3 m de base y una longitud de 1000 m, es decir un kilómetro, por lo tanto, el flujo de referencia queda como se presenta en la Tabla 12:

Tabla 12 Flujo de referencia de Ambos pavimentos.

Fuente: elaboración propia.

Proceso	Pavimento carretero convencional	Pavimento carretero con 50% RAP
Flujo de referencia	Para 1 km de pavimento carretero convencional, se necesitan 7559.42 ton de arena, 4992.2906 ton de grava, 982.68 ton de cemento asfáltico, 818.88 ton de Agua.	Para 1 km de pavimento carretero con 50% de RAP en la capa base, se necesitan 5182.39 ton de arena, 4992.29 ton de grava, 2320.50 ton de RAP, 982.68 ton de cemento asfáltico y 655.1 ton de Agua.

5.5.4. Objetivo y Alcances

Los objetivos y alcance de cada análisis de ciclo de vida son la pieza importante para saber hasta dónde y cómo se hará el análisis de ciclo de vida, ya que en ellos se expresan las peticiones y se traza la guía del estudio. Es importante mencionar que estos pueden cambiar conforme se va avanzando en el análisis, así que es común que los objetivos y alcances con los que se inicia no coincidan con los finales.

De acuerdo a nuestro estudio utilizaremos nuestros objetivos y alcances como “*De la cuna a la tumba*”, y se presenta el resultado de los mismos.

Objetivo

Realizar la comparación de dos pavimentos en dos escenarios distintos utilizando la metodología Análisis de ciclo de vida.

Alcance

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Para el estudio se considera el flujo de entradas y salidas para las etapas de Fresado, Construcción de base hidráulica o base Hidráulica con RAP, Construcción de carpeta asfáltica, Vida útil y disposición final, en ambos casos, por lo cual el sistema será “*De la cuna a la Tumba*”.

Los objetivos y alcances deben cumplir con la calidad de los datos, a continuación, se presenta el resumen de ellos.

Objetivo y Alcance		
	Pavimento Convencional	Pavimento Con RAP
Producto (o servicio) a estudiar	Pavimento carretero convencional	Pavimento carretero con 50% de RAP en la base
La función del producto	Pavimento carretero	Pavimento carretero con RAP
La unidad funcional	Construcción de pavimento carretero de 1 km de longitud con un ancho de 7 metros, para un periodo de retorno de 20 años puesto en uso en el estado de Michoacán, México	
Flujo de referencia	Para 1 km de longitud con un ancho de 7 metros, con un espesor en la carpeta de 10 centímetros y 30 centímetros de base.	Para 1 km de longitud con un ancho de 7 metros, con un espesor en la carpeta de 10 centímetros y 30 centímetros de base modificada con 50% de RAP respecto al volumen total.
Límites del sistema, identificar los límites que son importantes desde la perspectiva de quien lo analiza	Fresado, Obtención de materia prima, Construcción de base, Elaboración de mezcla asfáltica, Construcción de carpeta, uso, fin de vida útil.	Recuperación, Obtención de materia prima, Construcción de base Modificada con RAP, Elaboración de mezcla asfáltica, Construcción de carpeta, uso, fin de vida útil.
Procesos de asignación	Económico y social	
Fuentes de información a considerar	Revistas científicas, artículos no mayor a 5 años, libros, actualizaciones, normas, reglamentos y elaboración propia.	
Suposiciones	Ninguna	
Los juicios de valor y elementos opcionales	No aplica	
Limitaciones	Construcción un pavimento convencional	Construcción un pavimento con 50% de RAP en la base hidráulica

Tabla 13 Objetivo y alcance del sistema

Fuente: elaboración propia

5.5.5. Límites del sistema

Límites del sistema Pavimento convencional

Los límites del sistema fueron determinados, a partir de las necesidades del presente proyecto donde se tienen 5 etapas considerablemente importantes.

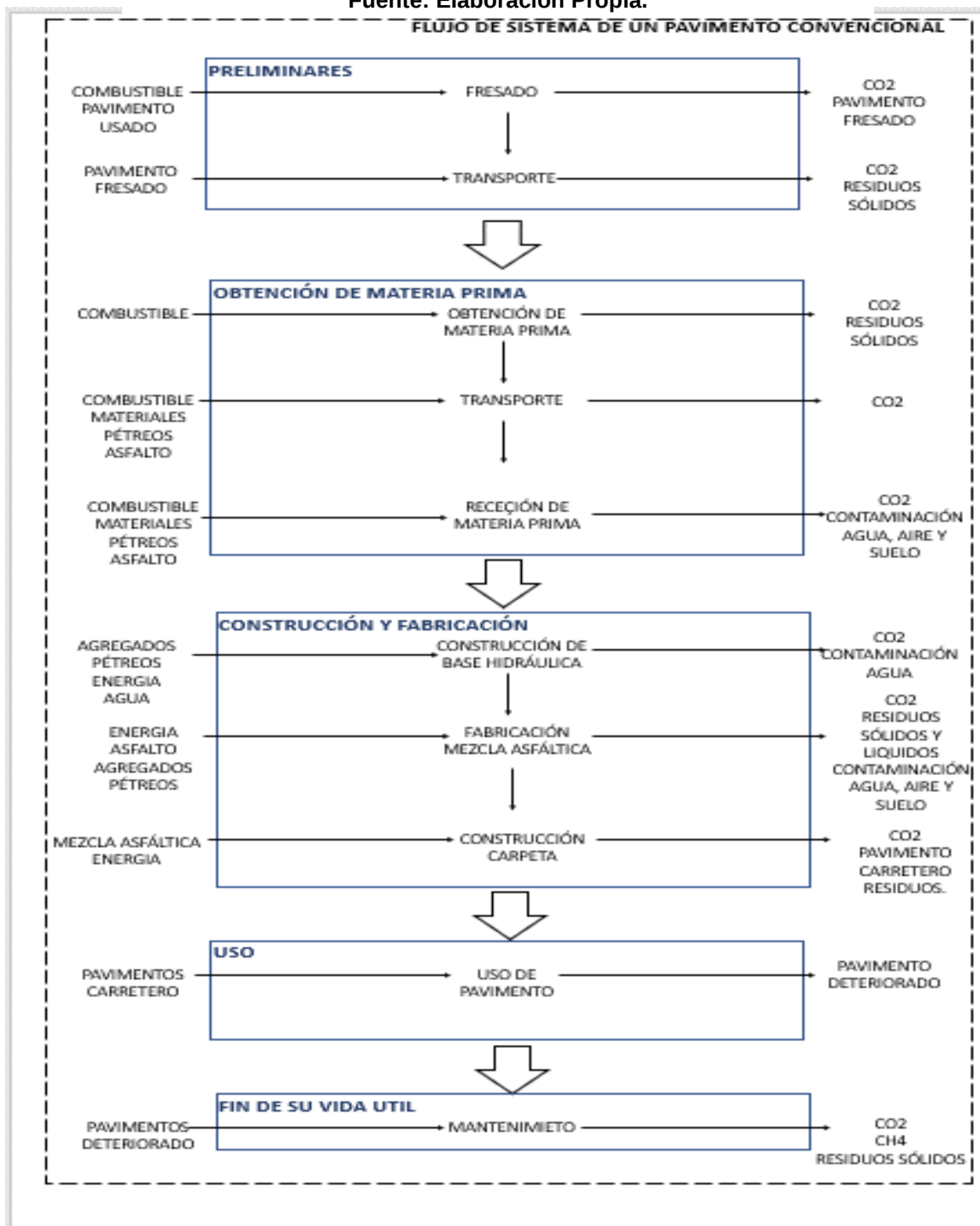
Para poder comprender el procedimiento para evaluación del ciclo de vida es necesario realizar esquemas que ayudan a identificar las etapas y las entradas y salidas de cada una. En la Ilustración 24 se presenta los límites del sistema para el pavimento convencional, además también indican que tanto alcance tendrá el análisis.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Ilustración 24 Límites del sistema del Pavimento convencional.

Fuente: Elaboración Propia.



**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Los límites del sistema se consideran de los preliminares, como son el fresado del pavimento, que el espesor de corte fue determinado a partir del diseño de la sección del pavimento, dando como resultado de 0.30 m de corte por medio del fresado, así como el transporte del mismo a la disposición final en el banco de desperdicios.

La obtención de la materia prima se define en la obtención de todos los insumos, así como la energía que se requiere y el transporte del mismo material hacia el sitio, es importante definir bancos de materiales lo más cercanos posible, ya que el transporte del material juega un papel importante.

En la etapa de Fabricación y construcción consiste en tomar en cuenta todos los insumos de la construcción y fabricación de todas las etapas.

La etapa de uso o vida útil consiste en considerar los insumos conservación a lo largo de los años, así mismo como rehabilitación a medio término de la proyección de su ciclo de vida del pavimento.

Finalmente, la etapa de fin de vida útil, se consideran los insumos a realizarle un fresado y ahí podrían ocurrir dos sucesos, hacer una reconstrucción completa o abandonar el camino, el cual no se considera en este análisis, el sistema se restringe a de la cuna a la tumba.

Límites del sistema Pavimento con RAP

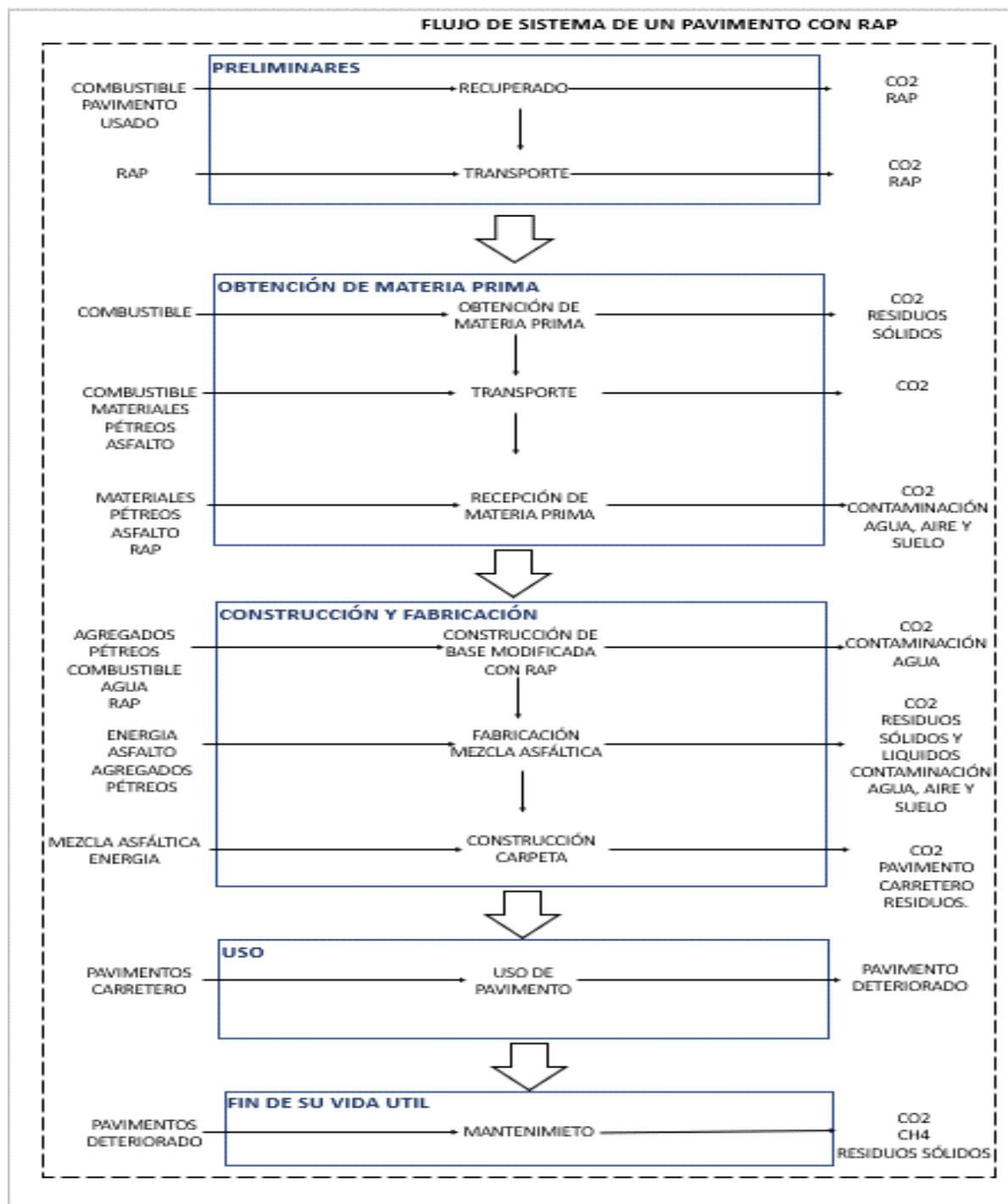
Los límites del sistema fueron determinados, a partir de las necesidades del presente proyecto donde se tienen 5 etapas importantes.

Para el Pavimento convencional con RAP se tienen los siguientes límites del sistema.

Ilustración 25 Límites del sistema de pavimento con RAP

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



Los límites del sistema presentados en la Ilustración 26 se consideran de los preliminares, como son el fresado del pavimento, que el espesor de corte fue determinado a partir del diseño de la sección del pavimento, dando como resultado de 0.30 m de corte por medio del fresado, así como el transporte del mismo a la disposición final en el banco de desperdicios.

La obtención de la materia prima se define en la obtención de todos los insumos, así como la energía que se requiere y el transporte del mismo material hacia el sitio, es importante definir bancos de materiales lo más cercanos posible, ya que el transporte del material juega un papel importante.

En la etapa de Fabricación y construcción consiste en tomar en cuenta todos los insumos de la construcción y fabricación de todas las etapas entre ellas la construcción de capa de base con RAP.

La etapa de uso o vida útil consiste en considerar los insumos conservación a lo largo de los años, así mismo como rehabilitación a medio término de la proyección de su ciclo de vida del pavimento.

Finalmente, la etapa de fin de vida útil, se consideran los insumos a realizarle un fresado y ahí podrían ocurrir dos sucesos, hacer una reconstrucción completa o abandonar el camino, el cual no se considera en este análisis, el sistema se restringe a de la cuna a la tumba.

5.5.6. Validación ICV (*Inventario de ciclo de vida*)

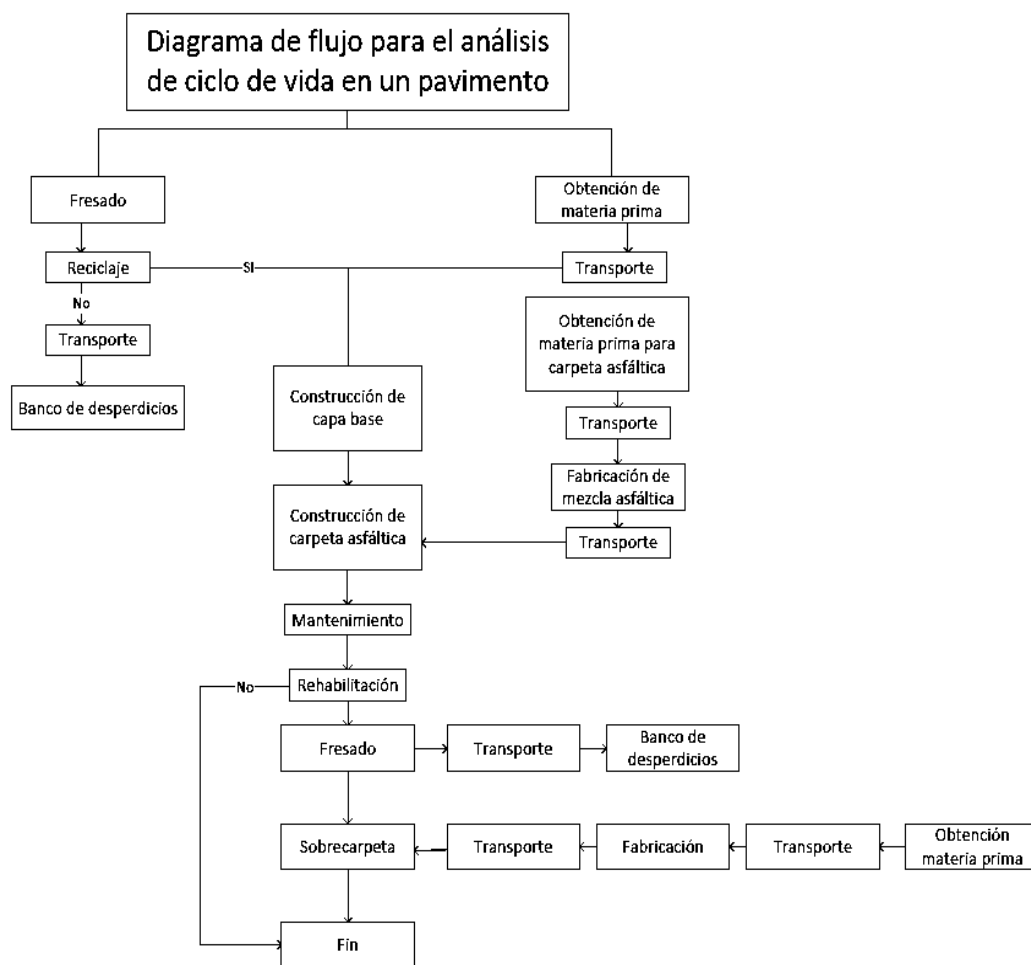
Para que el análisis sea preciso, debe haber una validación, el procedimiento para realizar el inventario de ciclo de vida se presenta en la Ilustración 26, donde se propone un diagrama de decisiones el cual aporta un control al momento de querer realizar el estudio, este diagrama debe garantizar la reproducibilidad del sistema.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Ilustración 26 Diagrama del Inventario de Ciclo de vida.

Fuente: Elaboración propia



ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Para realizar el inventario de ciclo de vida, es necesario hacer un análisis general de todos los insumos que se emplean para producto, proceso o servicio, en esta investigación se obtienen materiales, energía y transporte, en unidades compatibles con el software en cada etapa.

Pavimento convencional.

Fresado

La consideración para el cálculo de esta etapa, fue de 0.30 m espesor de fresado, por la longitud de 1 km, y 7 m de ancho. Además de que se investigaron rendimientos de maquinaria y tipos de maquinarias en el medio y se tomaron las más estables y con mejor comportamiento en el medio. En la conversión de la energía a kwh, se toma una relación de 10.96 kwh por 1 litro de combustible (diésel), los resultados para la etapa se presentan en la Tabla 14.

Fresado				
Materiales				
Descripción	Cantidad (m3)	Cantidad (Kg)	Cantidad (ton)	Transparencia
RAP	2800	6188000	6188	Material que se fresa del pavimento existente a reconstruir
Agua	2.98	2984.8	2.98	Agua que necesita la fresadora
Energía				
Equipo	Rendimiento (l/m3)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Fresadora De pavimento en frío Caterpillar modelo PM200	0.0112	10.96	343.21	Perfiladora de pavimento en frío marca Caterpillar modelo PM200
Camión Cisterna MV International	0.0006	10.96	0.02	Camión cisterna MV International 4x2, modelo 2015
Transporte				
Equipo	Capacidad (m3)	Distancia (km)	Cantidad (Tkm)	Transparencia
Camión Cisterna MV International	10	5	14.924	
Camión de Volteo International HV	14	9.4	58167.20	https://mexico.internationaltrucks.com/camion-de-volteo

Tabla 14 Insumos Fresado

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Base Hidráulica

En la etapa de la base hidráulica se considera, de acuerdo a los resultados de los materiales, las características de los mismos, para poder determinar rendimientos, y cantidades de cada material, así como la maquinaria con el mejor comportamiento y más adecuada en el medio.

Base Hidráulica				
Materiales				
Descripción	Cantidad (m3)	Cantidad (Kg)	Cantidad (ton)	Transparencia
Arena	1449	3235617	3235.62	Banco de Materiales El Arenal
Grava	651	1453683	1453.68	Banco de Materiales El Arenal
Agua	6.3	6300	6.30	Ojo de Agua Tunacuario
Energía				
Equipo	Rendimiento (l/m3)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Motoconformadora CAT 120K	0.5710	10.96	13142.56	Motoconformadora marca CAT modelo 120K
Rodillo Tandem CAT CB44B	0.0536	10.96	1233.00	Compactador Tandem marca CAT modelo CB44B
Camión Cisterna MV International	0.0006	10.96	0.04	Bomba para llenado de cisterna
Cargador frontal CAT 950L	0.6460	10.96	20490.22	Cargador Frontal marca CAT modelo 950L
Transporte				
Equipo	Capacidad (m3)	Distancia (km)	Cantidad (Tkm)	Transparencia
Camión de Volteo International HV	14	14.6	47240.01	https://mexico.internationaltrucks.com/camion-de-volteo
Camión Cisterna MV International	10	5	31.50	https://latin-america.internationalcamiones.com/camiones/serie-mv
Camión de Volteo International HV	14	14.6	21223.77	https://mexico.internationaltrucks.com/camion-de-volteo

Tabla 15 Insumos Base Hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

Carpeta Asfáltica

En la etapa de la carpeta asfáltica se considera de acuerdo a los resultados de los materiales, las características de los mismos, para poder determinar rendimientos, y cantidades de cada material, así como la maquinaria con el mejor comportamiento y más adecuada en el medio.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Carpeta Asfáltica				
Materiales				
Descripción	Cantidad (m3)	Cantidad (Kg)	Cantidad (ton)	Transparencia
Arena	318.78	720634.07	720.63	Banco de Materiales El Arenal
Grava	260.89	589767.93	589.77	Banco de Materiales El Arenal
Asfalto	72.45	163780.47	163.78	Salamanca
Aire	47.88	108237.53	108.24	
Energía				
Equipo	Rendimiento (ton/hr)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Planta de asfalto	100	10.96	18479.31	Planta de asfalto marca ADM modelo SPL 110
Equipo	Rendimiento (l/m3)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Cargador frontal CAT 950L	0.6460	10.96	4104.16	Cargador Frontal marca CAT modelo 950L para materia prima
Cargador frontal CAT 950L	0.6460	10.96	4104.16	Cargador Frontal marca CAT modelo 950L para llenado de tolvas
Pavimentadora CAT AP500E	0.1111	10.96	852.33	Pavimentadora marca CAT modelo AP500E para la carpeta asfáltica
Compactador Tándem CAT CB44B	0.0540	10.96	414.29	Compactador tándem marca CAT modelo CB44B para compactación de carpeta asfáltica
Compactador Neumático CAT CW34	0.0404	10.96	310.05	Compactador neumático marca CAT modelo CW34 para compactación de carpeta asfáltica
Transporte				
Equipo	Capacidad (m3)	Distancia (km)	Cantidad (Tkm)	Transparencia
Camión de Volteo International HV	14	4.5	7120.89	Material que se va a transportar para fabricación de mezcla asfáltica
Tracto camión	37	207	33902.56	Asfalto que se va a transporta para fabricación de la mezcla asfáltica
Camión de Volteo International HV	14	14.6	19131.87	Transporte de mezcla asfáltica

Tabla 16 Insumos Carpeta asfáltica

Fuente: Elaboración propia

Vida útil

En la etapa de la Vida útil se considera unas etapas para realizar conservación a lo largo de la vida útil, así como una rehabilitación a mitad de ciclo de vida considerado. Las estimaciones de los insumos se realizaron de acuerdo a los resultados de los materiales y las características de los mismos, para poder determinar rendimientos y cantidades de cada material, así como la maquinaria con el mejor comportamiento y más adecuada en el medio.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Vida útil Conservación				
Materiales				
Descripción	Cantidad (m3)	Cantidad (Kg)	Cantidad (ton)	Transparencia
Arena	1434.51	3242853.31	3242.85	Banco de Materiales El Arenal
Grava	1174.01	2653955.70	2653.96	Banco de Materiales El Arenal
Asfalto	326.03	737012.12	737.01	Salamanca
Aire	215.46	487068.88	487.07	
RAP				
Agua	3.3579	3357.9	3.3579	
	3150.00	7120890.00	7124.25	
Energía				
Equipo	Rendimiento (l/m3)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Camión de Volteo International HV	0.0514	10.96	1776.20	Utilizado para tapar los baches
Cortadora	0.0404	10.96	1395.23	Cortadora para cuadrar los baches
Compactador	0.0540	10.96	1864.30	Compactador para compactar baches
Equipo	Rendimiento (ton/hr)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Planta de asfalto	100	10.96	83156.90	Planta de asfalto marca ADM modelo SPL 110
Transporte				
Equipo	Capacidad (m3)	Distancia (km)	Cantidad (Tkm)	Transparencia
Camión de Volteo International HV	14	14.6	47345.66	Para arena
Tracto camión	37	207	152561.51	Para asfalto
Camión de Volteo International HV	14	14.6	38747.75	Para grava
Camión de Volteo International HV	14	4.5	32044.01	Para mezcla asfáltica

Tabla 17 Insumos Vida útil conservación.

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Vida útil Rehabilitación				
Materiales				
Descripción	Cantidad (m3)	Cantidad (Kg)	Cantidad (ton)	Transparencia
Arena	159.39	360317.03	360.32	Banco de Materiales El Arenal
Grava	130.45	294883.97	294.88	Banco de Materiales El Arenal
Asfalto	36.23	81890.24	81.89	Salamanca
Aire	23.94	54118.76	54.12	
RAP				
Agua	0.37	373.10	0.04	Ojo de Agua Tunacuaro
	350.37	791583.10	791.25	
Energía				
Equipo	Rendimiento (l/m3)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Fresadora De pavimento en frío Caterpillar modelo PM200	0.0112	10.96	42.90	Perfiladora de pavimento en frío marca Caterpillar modelo PM200
Camión Cisterna MV International	0.0006	10.96	0.00	Camión cisterna MV International 4x2, modelo 2015, llenado de camion
Cargador frontal CAT 950L	0.6460	10.96	2052.08	Cargador Frontal marca CAT modelo 950L para llenado de camiones materia prima
Cargador frontal CAT 950L	0.6460	10.96	2052.08	Cargador Frontal marca CAT modelo 950L para llenado de tolvas
Pavimentadora CAT AP500E	0.1111	10.96	426.17	Pavimentadora marca CAT modelo AP500E para la carpeta asfáltica
Compactador Tandem CAT CB44B	0.0540	10.96	207.14	Compactador tandem marca CAT modelo CB44B para compactación de carpeta asfáltica
Compactador Neumático CAT CW34	0.0404	10.96	155.03	Compactador neumático marca CAT modelo CW34 para compactación de carpeta asfáltica
Equipo	Rendimiento (ton/hr)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Planta de asfalto	100	10.96	9239.66	Planta de asfalto marca ADM modelo SPL 110
Transporte				
Equipo	Capacidad (m3)	Distancia (km)	Cantidad (Tkm)	Transparencia
Camión de Volteo International HV	14	14.6	9565.93	https://mexico.internationaltrucks.com/camion-de-volteo
Camión Cisterna MV International	10	5	0.19	https://latin-america.internationalcamiones.com/camiones/serie-mv
Tracto camión	37	207	16951.28	Tracto camión Marca KENWORTH T680 Modelo 2018 de 455 HP con tren Motriz de capacidad 37 mil litros.
Camión de Volteo International HV	14	4.5	3560.45	https://mexico.internationaltrucks.com/camion-de-volteo

Tabla 18 Insumos Vida Útil Rehabilitación

Fuente: Elaboración propia

Etapas finales

En la etapa del fin de su vida útil se considera un fresado de 0.05 m, por el ancho de 7 m, por la longitud de 1 km, tomando en cuenta la energía, materiales y

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



transporte. Se podrían tener dos elecciones, la disposición final y el abandono; o realizar una reconstrucción completa del mismo. Sin embargo, esas etapas ya no se consideran en este estudio.

Fin de vida útil				
Materiales				
Descripción	Cantidad (m3)	Cantidad (Kg)	Cantidad (ton)	Transparencia
Arena				
Grava				
Asfalto				
Aire				
RAP	700.00	1547000.00	1547.00	
Agua	0.7462	746.2	0.7462	
Energía				
Equipo	Rendimiento (l/m3)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Fresadora De pavimento en frío Caterpillar modelo PM200	0.0112	10.96	85.80	
Transporte				
Equipo	Capacidad (m3)	Distancia (km)	Cantidad (Tkm)	Transparencia
Camión de Volteo International HV	14	9.4	14541.80	La mezcla asfáltica será traída de Nueva Italia cada año

Tabla 19 Insumos Fin de Vida Útil

Fuente: Elaboración propia

Pavimento convencional.

Recuperado

La consideración para el cálculo de los insumos de la etapa de recuperado, fue de 0.30 m de espesor de fresado, por la longitud de 1 km y 7 m de ancho. Además de que se investigaron rendimientos de maquinaria y tipos de maquinarias en el medio y se tomaron las más estables y con mejor comportamiento en el medio.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Recuperado				
Materiales				
Descripción	Cantidad (m3)	Cantidad (Kg)	Cantidad (ton)	Transparencia
RAP	2800	6188000	6188	Material que se fresa del pavimento existente a reconstruir
Agua	2.9848	2984.8	2.9848	Agua que necesita la fresadora
	2802.9848	6190984.8	6190.9848	
Energía				
Equipo	Rendimiento (l/m3)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Fresadora De pavimento en frío Caterpillar modelo PM200	0.0112	10.96	343.21	Perfiladora de pavimento en frío marca Caterpillar modelo PM200
Camión Cisterna MV International	0.0006	10.96	0.02	Camión cisterna MV International 4x2, modelo 2015
Transporte				
Equipo	Capacidad (m3)	Distancia (km)	Cantidad (Tkm)	Transparencia
Camión Cisterna MV International	10	5	14.924	
Camión de Volteo International HV	14	9.4	29083.60	https://mexico.internationaltrucks.com/camion-de-volteo

Tabla 20 Insumos Recuperado

Fuente: Elaboración propia

Base Hidráulica con RAP

En la etapa de la base hidráulica con RAP se considera de acuerdo a los resultados de los materiales las características de los mismos, así mismo se consideró que se le agregaría el 50% de rapa en volumen total, para poder determinar rendimientos, y cantidades de cada material, así como la maquinaria con el mejor comportamiento y más adecuada en el medio.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Base con RAP				
Materiales				
Descripción	Cantidad (m3)	Cantidad (Kg)	Cantidad (ton)	Transparencia
Arena	388.5	858585	858.59	Banco de Materiales El Arenal
Grava	661.5	1453683	1453.68	Banco de Materiales El Arenal
RAP	1050	2320500	2320.50	Producto del recuperado solo el 50%
Agua	2.2386	2238.6	2.24	Ojo de Agua Tunacuaro
	2102.2386	4635006.6	4635.0066	
Energía				
Equipo	Rendimiento (l/m3)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Motoconformadora CAT 120K	0.5710	10.96	13142.56	Motoconformadora marca CAT modelo 120K
Rodillo Tandem CAT CB44B	0.0536	10.96	1233.00	Compactador Tandem marca CAT modelo CB44B
Camión Cisterna MV International	0.0006	10.96	0.01	Bomba para llenado de cisterna
Cargador frontal CAT 950L	0.6460	10.96	8941.49	Cargador Frontal marca CAT modelo 950L
Transporte				
Equipo	Capacidad (m3)	Distancia (km)	Cantidad (Tkm)	Transparencia
Camión de Volteo International HV	14	14.6	33759.11	https://mexico.internationaltrucks.com/camion-de-volteo
Camión Cisterna MV International	10	5	11.19	https://latin-america.internationalcamiones.com/camiones/serie-mv
Camión de Volteo International HV	14	14.6	33879.30	https://mexico.internationaltrucks.com/camion-de-volteo

Tabla 21 Insumos Base con RAP

Fuente: Elaboración propia

Carpeta Asfáltica

En la etapa de la carpeta asfáltica se considera de acuerdo a los resultados de los materiales las características de los mismos, para poder determinar rendimientos, y cantidades de cada material, así como la maquinaria con el mejor comportamiento y más adecuada en el medio.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Carpeta Asfáltica				
Materiales				
Descripción	Cantidad (m3)	Cantidad (Kg)	Cantidad (ton)	Transparencia
Arena	318.78	720634.07	720.63	Banco de Materiales El Arenal
Grava	260.89	589767.93	589.77	Banco de Materiales El Arenal
Asfalto	72.45	163780.47	163.78	Salamanca
Aire	47.88	108237.53	108.24	
Energía				
Equipo	Rendimiento (ton/hr)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Planta de asfalto	100	10.96	18479.31	Planta de asfalto marca ADM modelo SPL 110
Equipo	Rendimiento (l/m3)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Cargador frontal CAT 950L	0.6460	10.96	4104.16	Cargador Frontal marca CAT modelo 950L para materia prima
Cargador frontal CAT 950L	0.6460	10.96	4104.16	Cargador Frontal marca CAT modelo 950L para llenado de tolvas
Pavimentadora CAT AP500E	0.1111	10.96	852.33	Pavimentadora marca CAT modelo AP500E para la carpeta asfáltica
Compactador Tándem CAT CB44B	0.0540	10.96	414.29	Compactador tándem marca CAT modelo CB44B para compactación de carpeta asfáltica
Compactador Neumático CAT CW34	0.0404	10.96	310.05	Compactador neumático marca CAT modelo CW34 para compactación de carpeta asfáltica
Transporte				
Equipo	Capacidad (m3)	Distancia (km)	Cantidad (Tkm)	Transparencia
Camión de Volteo International HV	14	4.5	7120.89	Material que se va a transportar para fabricación de mezcla asfáltica
Tracto camión	37	207	33902.56	Asfalto que se va a transporta para fabricación de la mezcla asfáltica
Camión de Volteo International HV	14	14.6	19131.87	Transporte de mezcla asfáltica

Tabla 22 Insumos Carpeta asfáltica

Fuente: Elaboración propia

Vida útil

En la etapa de la Vida útil se considera unas etapas para realizar conservación a lo largo de la vida útil, así como una rehabilitación a mitad de ciclo de vida considerado, las estimaciones de los insumos se realizaron de acuerdo a los resultados de los materiales las características de los mismos, para poder determinar rendimientos, y cantidades de cada material, así como la maquinaria con el mejor comportamiento y más adecuada en el medio.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Vida útil
Conservación

Materiales				
Descripción	Cantidad (m3)	Cantidad (Kg)	Cantidad (ton)	Transparencia
Arena	1434.51	3242853.31	3242.85	Banco de Materiales El Arenal
Grava	1174.01	2653955.70	2653.96	Banco de Materiales El Arenal
Asfalto	326.03	737012.12	737.01	Salamanca
Aire	215.46	487068.88	487.07	
RAP				
Agua	3.3579	3357.9	3.3579	
	3150.00	7120890.00	7124.25	
Energía				
Equipo	Rendimiento (l/m3)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Camión de Volteo International HV	0.0514	10.96	1776.20	Utilizado para tapar los baches
Cortadora	0.0404	10.96	1395.23	Cortadora para cuadrar los baches
Compactador	0.0540	10.96	1864.30	Compactador para compactar baches
Equipo	Rendimiento (ton/hr)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Planta de asfalto	100	10.96	83156.90	Planta de asfalto marca ADM modelo SPL 110
Transporte				
Equipo	Capacidad (m3)	Distancia (km)	Cantidad (Tkm)	Transparencia
Camión de Volteo International HV	14	14.6	47345.66	Para arena
Tracto camión	37	207	152561.51	Para asfalto
Camión de Volteo International HV	14	14.6	38747.75	Para grava
Camión de Volteo International HV	14	4.5	32044.01	Para mezcla asfáltica

Tabla 23 Insumos Vida Útil Conservación.

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Vida útil Rehabilitación				
Materiales				
Descripción	Cantidad (m3)	Cantidad (Kg)	Cantidad (ton)	Transparencia
Arena	159.39	360317.03	360.32	Banco de Materiales El Arenal
Grava	130.45	294883.97	294.88	Banco de Materiales El Arenal
Asfalto	36.23	81890.24	81.89	Salamanca
Aire	23.94	54118.76	54.12	
RAP				
Agua	0.37	373.10	0.04	Ojo de Agua Tunacuaro
	350.37	791583.10	791.25	
Energía				
Equipo	Rendimiento (l/m3)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Fresadora De pavimento en frío Caterpillar modelo PM200	0.0112	10.96	42.90	Perfiladora de pavimento en frío marca Caterpillar modelo PM200
Camión Cisterna MV International	0.0006	10.96	0.00	Camión cisterna MV International 4x2, modelo 2015, llenado de camion
Cargador frontal CAT 950L	0.6460	10.96	2052.08	Cargador Frontal marca CAT modelo 950L para llenado de camiones materia prima
Cargador frontal CAT 950L	0.6460	10.96	2052.08	Cargador Frontal marca CAT modelo 950L para llenado de tolvas
Pavimentadora CAT AP500E	0.1111	10.96	426.17	Pavimentadora marca CAT modelo AP500E para la carpeta asfáltica
Compactador Tándem CAT CB44B	0.0540	10.96	207.14	Compactador tándem marca CAT modelo CB44B para compactación de carpeta asfáltica
Compactador Neumático CAT CW34	0.0404	10.96	155.03	Compactador neumático marca CAT modelo CW34 para compactación de carpeta asfáltica
Equipo	Rendimiento (ton/hr)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Planta de asfalto	100	10.96	9239.66	Planta de asfalto marca ADM modelo SPL 110
Transporte				
Equipo	Capacidad (m3)	Distancia (km)	Cantidad (Tkm)	Transparencia
Camión de Volteo International HV	14	14.6	9565.93	https://mexico.internationaltrucks.com/camion-de-volteo
Camión Cisterna MV International	10	5	0.19	https://latin-america.internationalcamiones.com/camiones/serie-mv
Tracto camión	37	207	16951.28	Tracto camión Marca KENWORTH T680 Modelo 2018 de 455 HP con tren Motriz de capacidad 37 mil litros.
Camión de Volteo International HV	14	4.5	3560.45	https://mexico.internationaltrucks.com/camion-de-volteo

Tabla 24 Insumos Vida Útil Rehabilitación.

Fuente: Elaboración propia

Etapas finales

En la etapa del fin de su vida útil se considera un fresado de 0.05 m, por el ancho de 7 m, por la longitud de 1 km, tomando en cuenta la energía, materiales y

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



transporte. Se podrían tener dos elecciones, la disposición final y el abandono; o realizar una reconstrucción completa del mismo. Sin embargo, esas etapas ya no se consideran en este estudio.

Fin de vida útil				
Materiales				
Descripción	Cantidad (m3)	Cantidad (Kg)	Cantidad (ton)	Transparencia
Arena				
Grava				
Asfalto				
Aire				
RAP	700.00	1547000.00	1547.00	
Agua	0.7462	746.2	0.7462	
Energía				
Equipo	Rendimiento (l/m3)	Rendimiento l/kwh	Cantidad (KwH)	Transparencia
Fresadora De pavimento en frío Caterpillar modelo PM200	0.0112	10.96	85.80	
Transporte				
Equipo	Capacidad (m3)	Distancia (km)	Cantidad (Tkm)	Transparencia
Camión de Volteo International HV	14	9.4	14541.80	La mezcla asfáltica será traída de Nueva Italia cada año

Tabla 25 Insumos Fin de Vida Útil.

Fuente: Elaboración propia

Modelado en SIMAPRO

El modelado de ambos pavimentos se realizó con la ayuda de la herramienta digital SIMAPRO 8.2.3.0. El SIMAPRO es un software de análisis de perfiles ambientales, huella de carbono, que desde hace más de 30 años es implementado en productos procesos y servicios, evaluando el ciclo de vida basándose en la norma ISO 14040.

Es de mencionar que la etapa de mayor importancia es la del inventario de ciclo de vida, ya que los datos deben ser precisos, correctos y con una consistentes. Para realizar este tipo de inventarios, las herramientas digitales son muy útiles, pero con un inventario incorrecto, se tendrán inconsistencias en los resultados, por lo tanto,

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

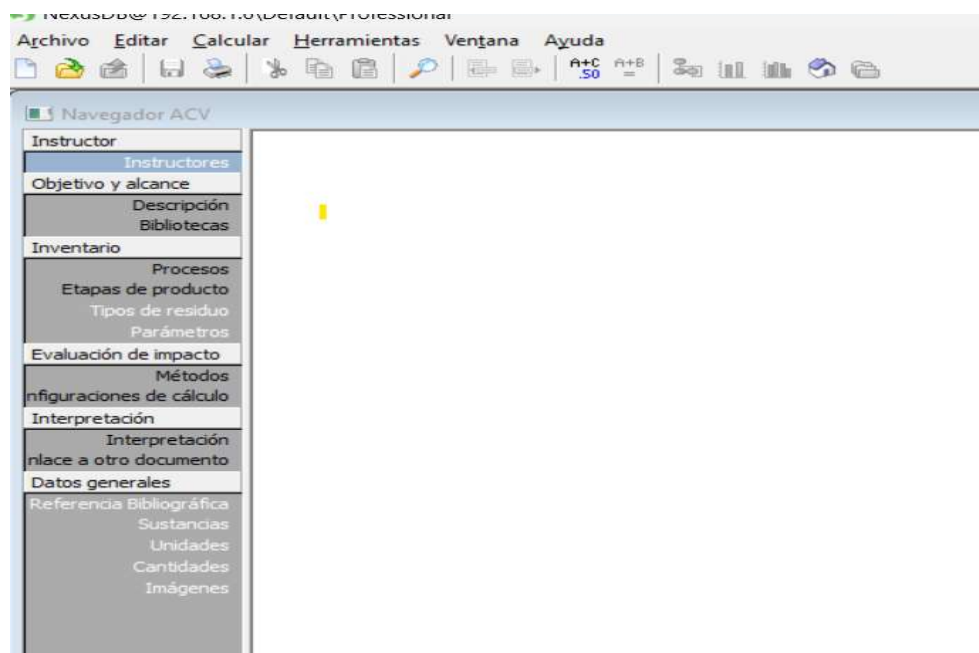


generar una reproducibilidad es importante puesto que le da soporte a la investigación.

La interfase del SIMAPRO se muestra en la Ilustración 27, y se muestran las mismas etapas propuestas por la Normativa ISO, donde cada proceso es ligado, para poder mejorar el sistema.

Ilustración 27 Inter fase del software SIMAPRO

Fuente: SIMAPRO 8.2.3.0



El análisis de ciclo de vida se realiza en el orden que lo propone la norma ISO, donde se Ingresan los objetivos y alcances. En esta investigación se presenta un análisis que va “De la cuna a tumba”

Evaluación del Impacto

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN
CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**



En este estudio se utilizará el método de evaluación del Re Cipe, dicho análisis comprende dos niveles de indicadores de contaminación, de los cuales se tomarán en cuenta las siguientes categorías de impacto:

1. Cambio climático
2. Desgaste de la capa de ozono
3. Acidificación Terrestre
4. Eutrofización de Agua dulce
5. Eutrofización Marina
6. Toxicidad humana
7. Formación de oxidantes Fotoquímicos
8. Formación de material particulado
9. Ecotoxicidad Terrestre
10. Ecotoxicidad en Agua fresca
11. Ecotoxicidad Marina
12. Radiación ionizante
13. Ocupación del suelo Agrícola
14. Ocupación suelo urbano
15. Transformación suelo natural
16. Uso de agua
17. Agotamiento de los metales
18. Uso de combustibles fósiles

Interpretación de resultados

Pavimento convencional

La Tabla 26 los resultados obtenidos de acuerdo a la evaluación realizada con el software SIMAPRO, que representan cada una de la categoría de afectación en las unidades correspondientes, las cuales afectan en diferentes aspectos, como la afectación a los seres humanos, al suelo, al aire, al agua, entre otros. Las tres categorías que mayor afectación generan en el pavimento convencional son: Cambio climático, Toxicidad humana y Ecotoxicidad Marina.

Cada una de estas categorías, está contemplada en el ACV, como indicadores potenciales de contaminación, y cada una de ellas se complementan, de tal manera que el análisis de los productos, procesos o servicios sea integral y completo, que indique en todos los aspectos de interés, que ayudarán en la toma de decisiones en la solución a proyectos de pavimentos carreteros.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Categoría de impacto	Unidad	Fresado	Base Hidráulica	Carpeta asfáltica	Vida Útil	Fin	Total
Cambio climático	kg CO2 eq	15977.9377	128888.6324	53140.5072	399387.1500	2453.8435	599848.0708
Desgaste de la capa de Ozono	kg CFC-11 eq	0.0028	0.0155	0.0251	0.0702	0.0005	0.1141
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	94.5760	791.5715	382.6382	2789.4557	15.6619	4073.9033
Eutrofización de Agua Fresca	kg P eq	1.8607	49.6611	20.3995	132.0463	0.2305	204.1979
Eutrofización Marina	kg N eq	4.2324	32.5648	19.1801	93.5651	0.7162	150.2586
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq	116156.1005	1801568.4309	959849.5917	4678238.7274	19567.5979	7575380.4483
Formación de oxidantes fotoquímico	kg NMVOC	111.9403	622.3001	348.1046	2028.9982	19.4267	3130.7700
Formación de material particulado	kg PM10 eq	38.8318	413.5265	177.1064	1176.7135	7.2970	1813.4752
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq	49.1407	284.6338	128.3805	545.0253	20.0926	1027.2729
Ecotoxicidad de Agua fresca	kg 1,4-DB eq	126.2720	2838.8838	1004.1624	5209.8808	22.4248	9201.6238
Ecotoxicidad Marina	kg 1,4-DB eq	101167.1395	1842649.1086	1000272.5634	4261594.6093	19050.8294	7224734.2501
Radiación ionizante	kBq U235 eq	1213.9096	11884.3869	10033.5660	38702.4622	190.7867	62025.1115
Ocupación de suelo Agrícola	m2a	248.9836	4280.1734	12967.8271	45608.7029	35.8197	63141.5066
Ocupación de Suelo Urbano	m2a	543.3660	4782.9705	3212.6438	9560.5199	130.3213	18229.8215
Transformación natural del Suelo	m2	6.0003	75.1723	60.9206	219.0521	0.9707	362.1160
Uso de agua	m3	58.6543	5479.0904	2055.3772	8728.2540	8.9087	16330.2846
Agotamiento de los metales	kg Fe eq	848.6985	6175.5266	9139.4882	13996.9146	85.9805	30246.6084
Agotamiento del recurso fósil	kg oil eq	5716.7821	42301.0789	30291.2786	177157.9139	902.5104	256369.5640

Tabla 26 Resultados por categoría Pavimento convencional.

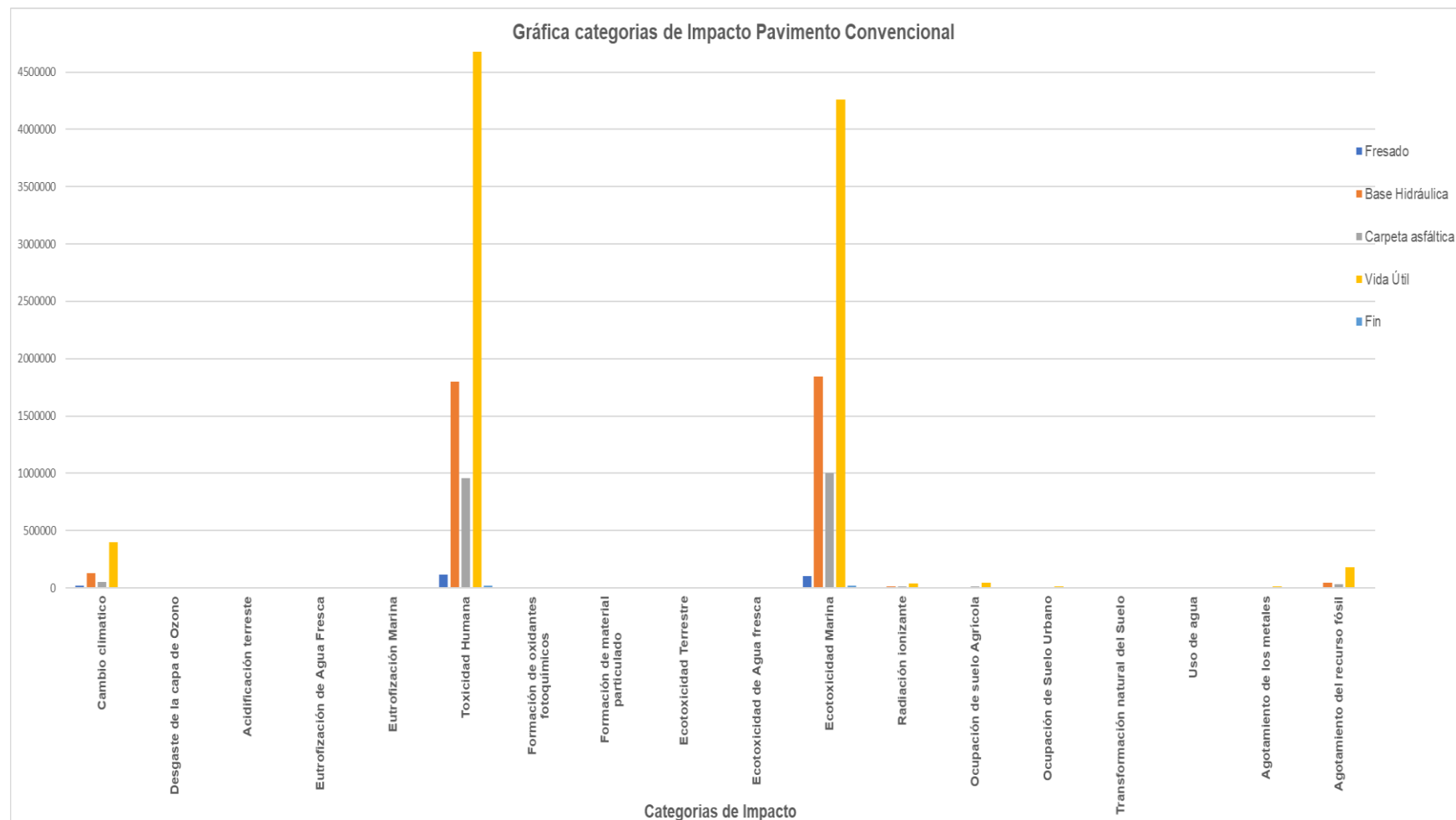
Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD



Ilustración 28 Gráfica de resultado de categorías de Impacto Pavimento convencional.

Fuente: Elaboración propia



ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

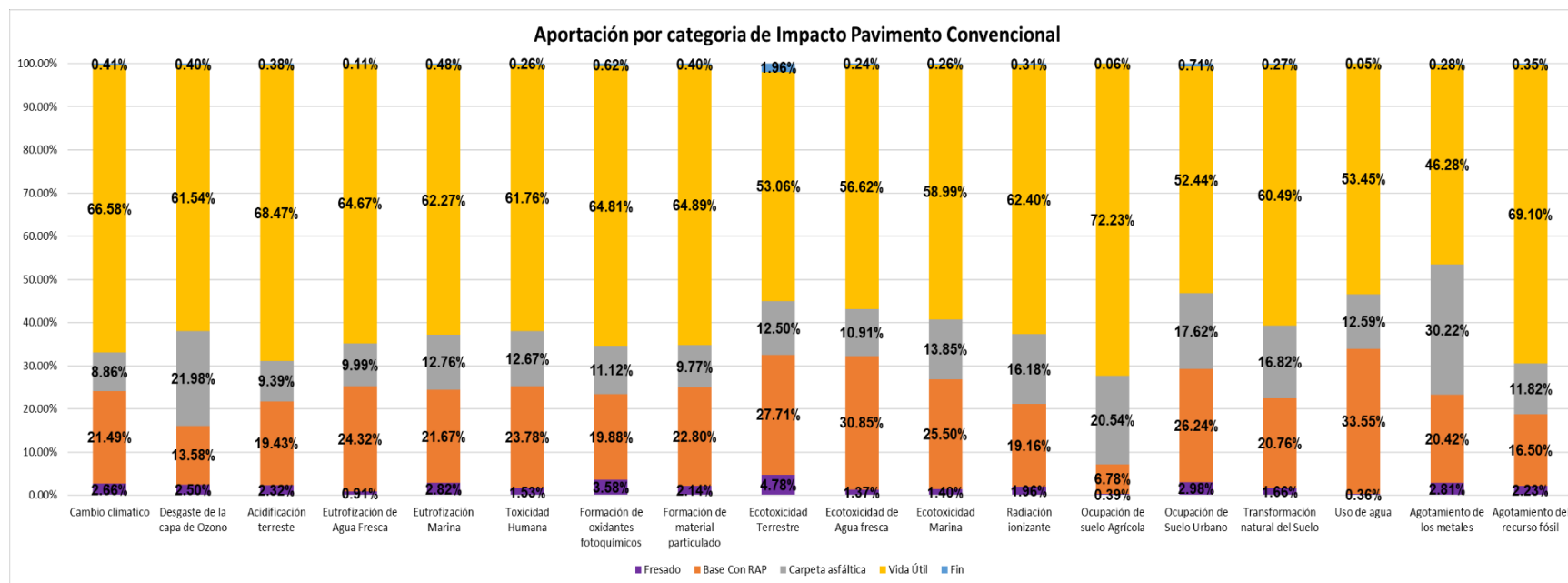


Ilustración 29 Aportación porcentual por categoría Pavimento convencional.

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

Del pavimento convencional, existe una afectación en la toxicidad Humana principalmente, después la ecotoxicidad marina, en los procesos de Vida útil y de base hidráulica principalmente.

En la Ilustración 29 se presentan las contaminaciones medio ambientales de catada categoría en porcentaje.

De manera porcentual, se ve que la etapa que más contamina en la mayoría de las categorías es la etapa de la vida útil, en segundo lugar, la base Hidráulica y tercero la construcción de la carpeta asfáltica.

.



Pavimento con RAP

Categoría de impacto	Unidad	Recuperado	Base Con RAP	Carpeta asfáltica	Vida Útil	Fin	Total
Cambio climático	kg CO2 eq	15977.9372	68805.4093	53140.5072	400444.7149	2453.8435	540822.4120
Desgaste de la capa de Ozono	kg CFC-11 eq	0.0028	0.0078	0.0251	0.0704	0.0005	0.1065
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	94.5760	438.0644	382.6382	2796.8421	15.6619	3727.7825
Eutrofización de Agua Fresca	kg P eq	1.8607	18.7568	20.3995	132.3959	0.2305	173.6433
Eutrofización Marina	kg N eq	4.2324	17.2257	19.1801	93.8129	0.7162	135.1672
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq	116156.0968	735681.5068	959849.5917	4690626.5593	19567.5979	6521881.3525
Formación de oxidantes fotoquímico	kg NMVOC	111.9403	390.9303	348.1046	2034.3710	19.4267	2904.7728
Formación de material particulado	kg PM10 eq	38.8318	201.7703	177.1064	1179.8294	7.2970	1604.8349
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq	49.1407	180.0416	128.3805	546.4686	20.0926	924.1239
Ecotoxicidad de Agua fresca	kg 1,4-DB eq	126.2720	1060.9720	1004.1624	5223.6764	22.4248	7437.5076
Ecotoxicidad Marina	kg 1,4-DB eq	101167.1362	733955.4803	1000272.5634	4272879.1804	19050.8294	6127325.1898
Radiación ionizante	kBq U235 eq	1213.9096	5400.7852	10033.5660	38804.9451	190.7867	55643.9927
Ocupación de suelo Agrícola	m2a	248.9836	1752.0612	12967.8271	45729.4734	35.8197	60734.1649
Ocupación de Suelo Urbano	m2a	543.3660	2643.7809	3212.6438	9585.8359	130.3213	16115.9478
Transformación natural del Suelo	m2	6.0003	37.3251	60.9206	219.6322	0.9707	324.8489
Uso de agua	m3	58.6543	2689.3180	2055.3772	8751.3662	8.9087	13563.6244
Agotamiento de los metales	kg Fe eq	848.6985	4058.6244	9139.4882	14033.9780	85.9805	28166.7695
Agotamiento del recurso fósil	kg oil eq	5716.7819	23067.9638	30291.2786	177627.0226	902.5104	237605.5573

Tabla 27 Resultados por categoría Pavimento Con RAP.

Fuente: Elaboración propia



ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

En la Tabla 27 se presentan los resultados obtenidos del modelado, para cada una de las categorías de impacto y de acuerdo a los resultados de las entradas de ICV.

Del pavimento con RAP, presenta una contaminación en las categorías de Cambio climático, Toxicidad Humana y Ecotoxicidad Marina. Es de mencionar que las categorías que impacta es importante tomarla en cuenta no solo en la parte económica, ya que en general afectan al medio ambiente contribuyendo potencialmente a la contaminación humana, la huella de carbono y la afectación del medio marino.

La Ilustración 30 muestra las afectaciones de cada categoría, con sus correspondientes unidades.

En la Ilustración 30, se ve que la etapa que más contamina en la mayoría de las categorías es la etapa de la vida útil, en segundo lugar, la base Hidráulica con RAP y tercero la construcción de la carpeta asfáltica. Se ve una reducción en los porcentajes de algunas categorías respecto a las del pavimento convencional.

Ilustración 30 Gráfica de resultado de categorías de Impacto Pavimento con RAP.

Fuente: Elaboración propia

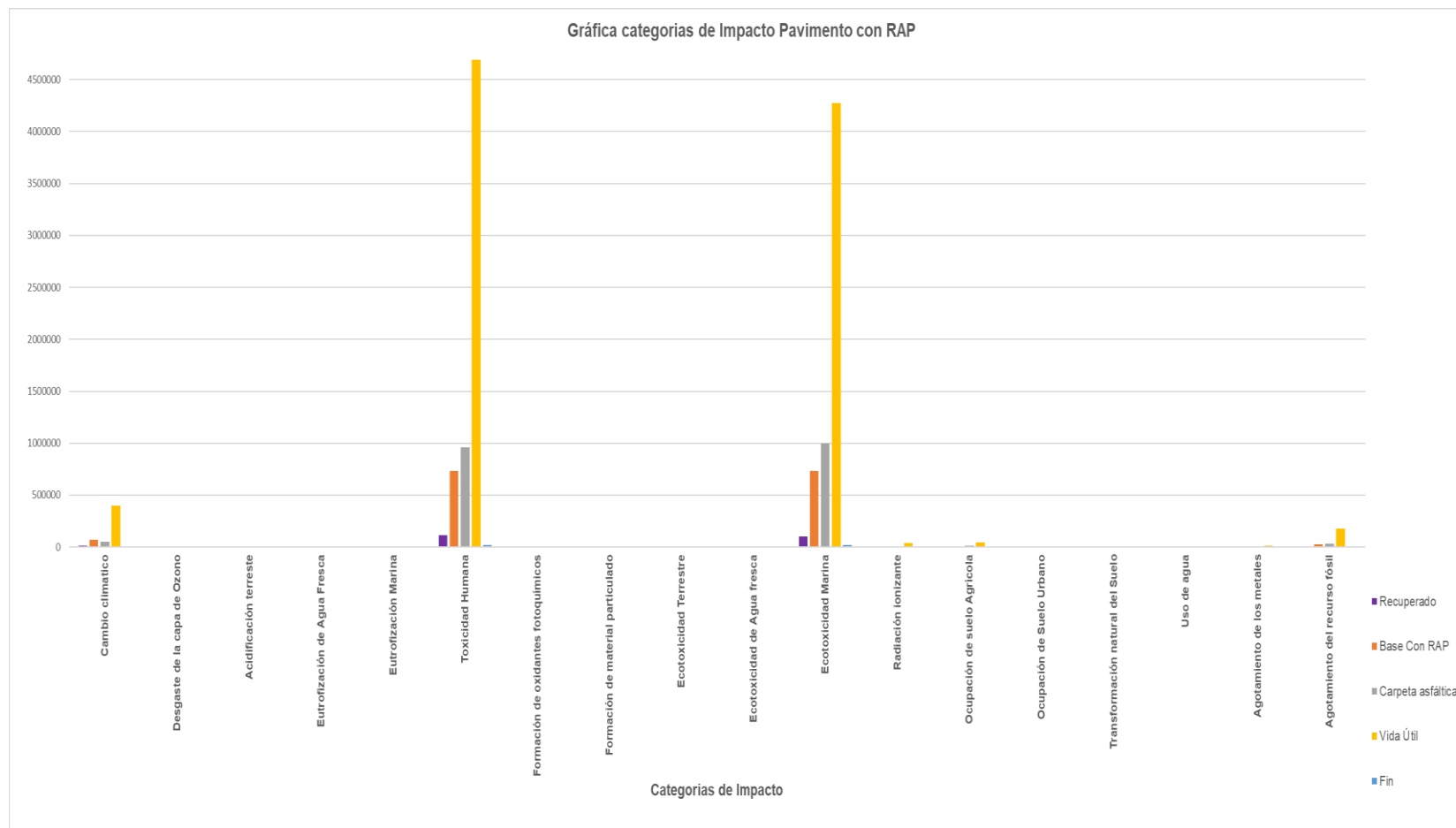
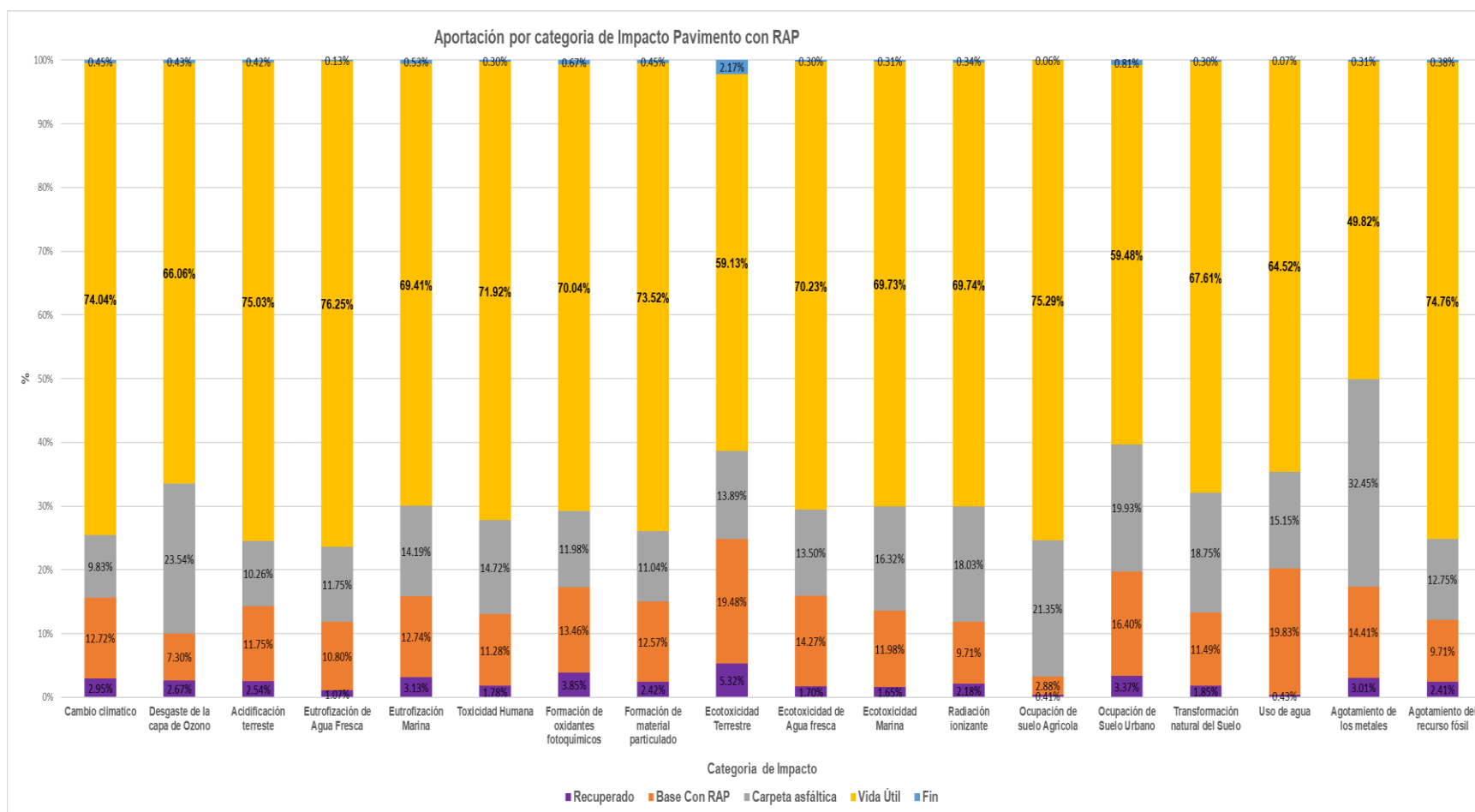


Ilustración 31 Aportación porcentual por categoría Pavimento con RAP.

Fuente: Elaboración propia



ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

5.6. Comparación.

En base a los datos obtenidos, se realizó la comparación de cada uno de los escenarios, con la ayuda de la herramienta digital SIMAPRO. Los datos se exportaron a Excel, y se hicieron las siguientes comparaciones:

Resumen por procesos Pavimento convencional			
Proceso	Materiales (ton)	Energía(KWH)	Transporte (Tkm)
Fresado	6190.9848	343.23	58167.20
Base Hidráulica	4695.6	34865.83	68495.28
Carpeta Asfáltica	1582.42	28264.30	60155.32
Conservación	7120.89	5035.73	270698.92
Rehabilitación	791.25	14175.05	30077.84
Fin de vida útil	0.7462	85.80	14541.80

Tabla 28 Resumen de cantidades Pavimento convencional.

Fuente: Elaboración propia

Resumen por procesos Pavimento RAP			
Proceso	Materiales (ton)	Energía(KWH)	Transporte (Tkm)
Recuperado	6190.9848	343.23	29098.52
Base con RAP	4635.01	23317.06	67649.61
Carpeta Asfáltica	1582.42	28264.30	60155.32
Conservación	7120.89	5035.73	270698.92
Rehabilitación	812.21	14176.45	30182.66
Fin de vida útil	0.7462	85.80	14541.80

Tabla 29 Resumen de cantidades Pavimento con RAP.

Fuente: Elaboración propia



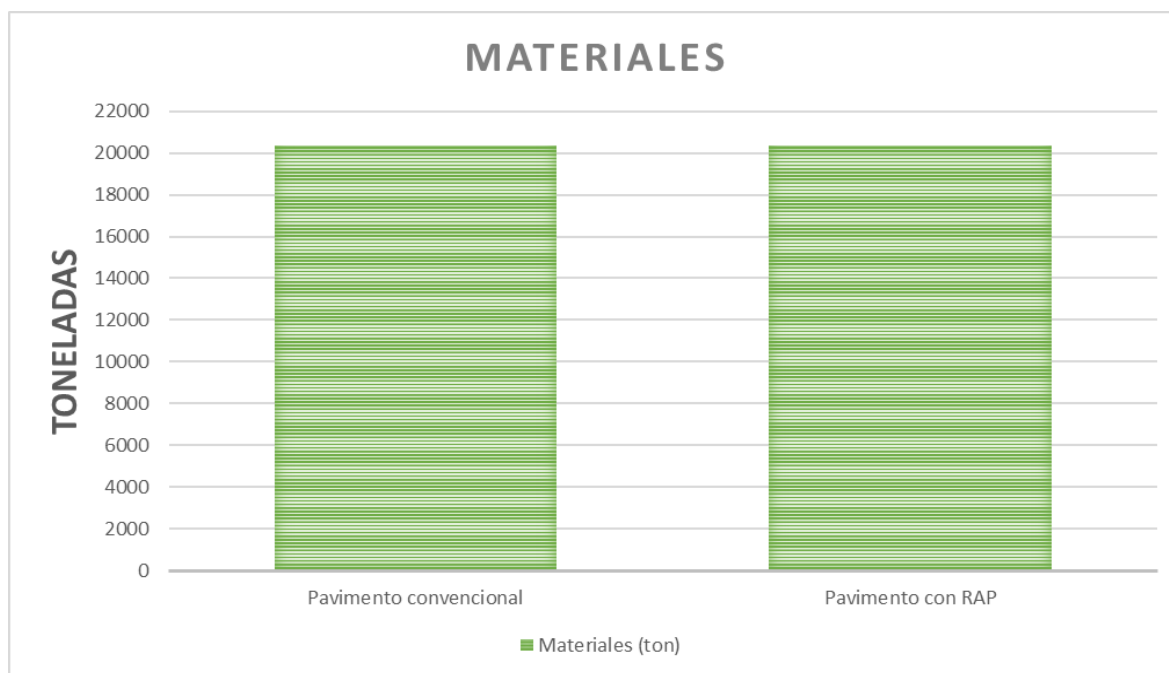
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

Las Tablas 28 y 29 se encuentra un resumen del cálculo de los insumos, divididos en 3 rubros principalmente: Materiales, Energía y Transporte.

Se puede notar que existe una reducción de utilización de materiales de 0.19%, basándonos en el total de toneladas de materiales para Pavimento convencional de 20381.88 toneladas y para Pavimento con RAP 20342.25.

Ilustración 32 Gráfica comparativa de Materiales Totales.

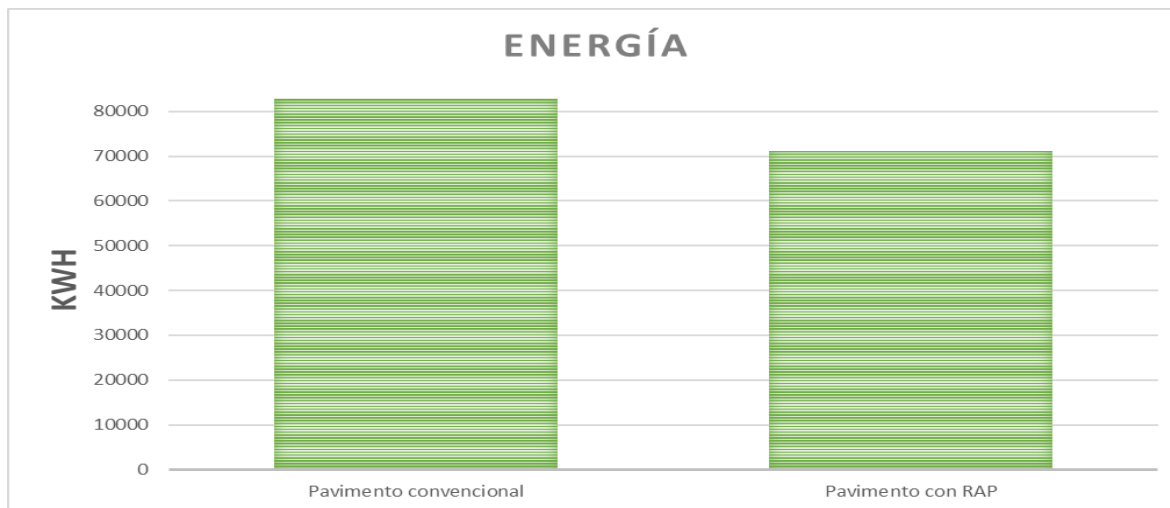
Fuente: Elaboración propia



ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

Ilustración 33 Gráfica comparativa de Energía total.

Fuente: Elaboración propia



En cuanto a energía total, en la Ilustración 33 se muestra que también existe una reducción en la construcción de pavimento con RAP, Pavimento convencional 82769.94 Kwh y Pavimento con RAP de 71222.58 Kwh, teniendo una reducción de 13.95% la energía fue convertida en KWH (kilowatts hora) para un mejor manejo, ya que el software así lo solicita.

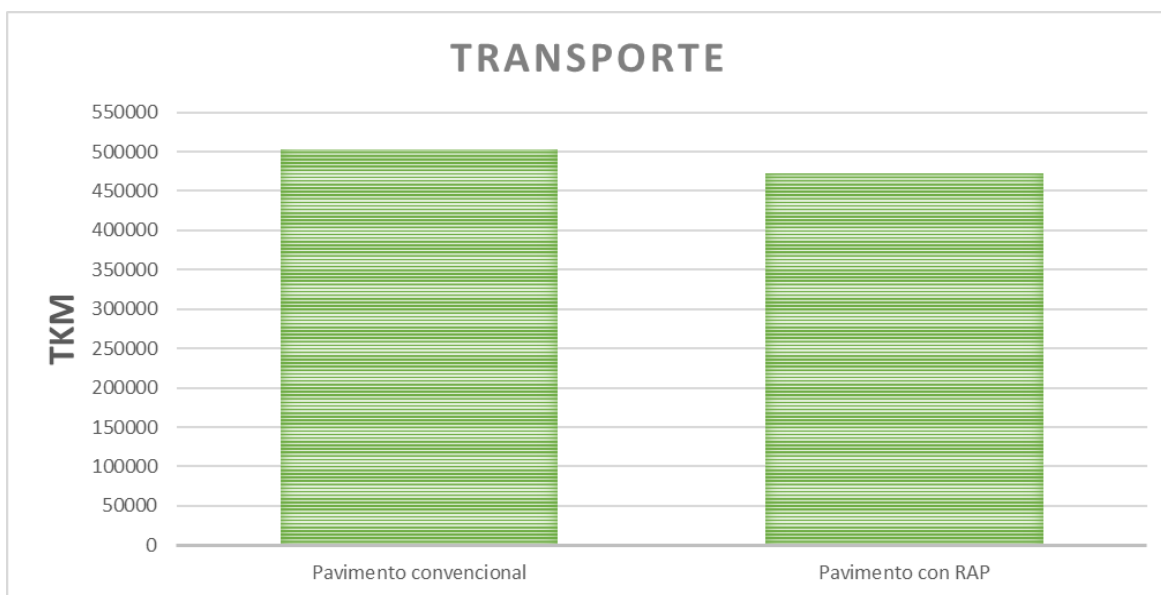
Finalmente, en la Ilustración 34 se presenta que en el transporte existe una reducción en cuanto a las toneladas kilómetro de 5.94%, con 502136.36 TKm para el Pavimento convencional y 472326.82 Tkm para pavimento con RAP, ya que el 50% del material cortado, fue utilizado para la construcción de pavimento con RAP, en general en los tres rubros existen reducciones considerables.



ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

Ilustración 34 Gráfica comparativa de Transporte.

Fuente: Elaboración propia



De la misma manera una vez obtenidos los resultados del SIMAPRO, se realizó una comparación, con las 18 categorías dando como resultado lo siguiente.

En las tres categorías con mayor impacto, el pavimento con RAP presento un mejor comportamiento respecto al pavimento convencional, reduciendo el impacto considerablemente. Las categorías con la reducción más significativa fueron: Toxicidad Humana, Cambio climático y Ecotoxicidad Marina.



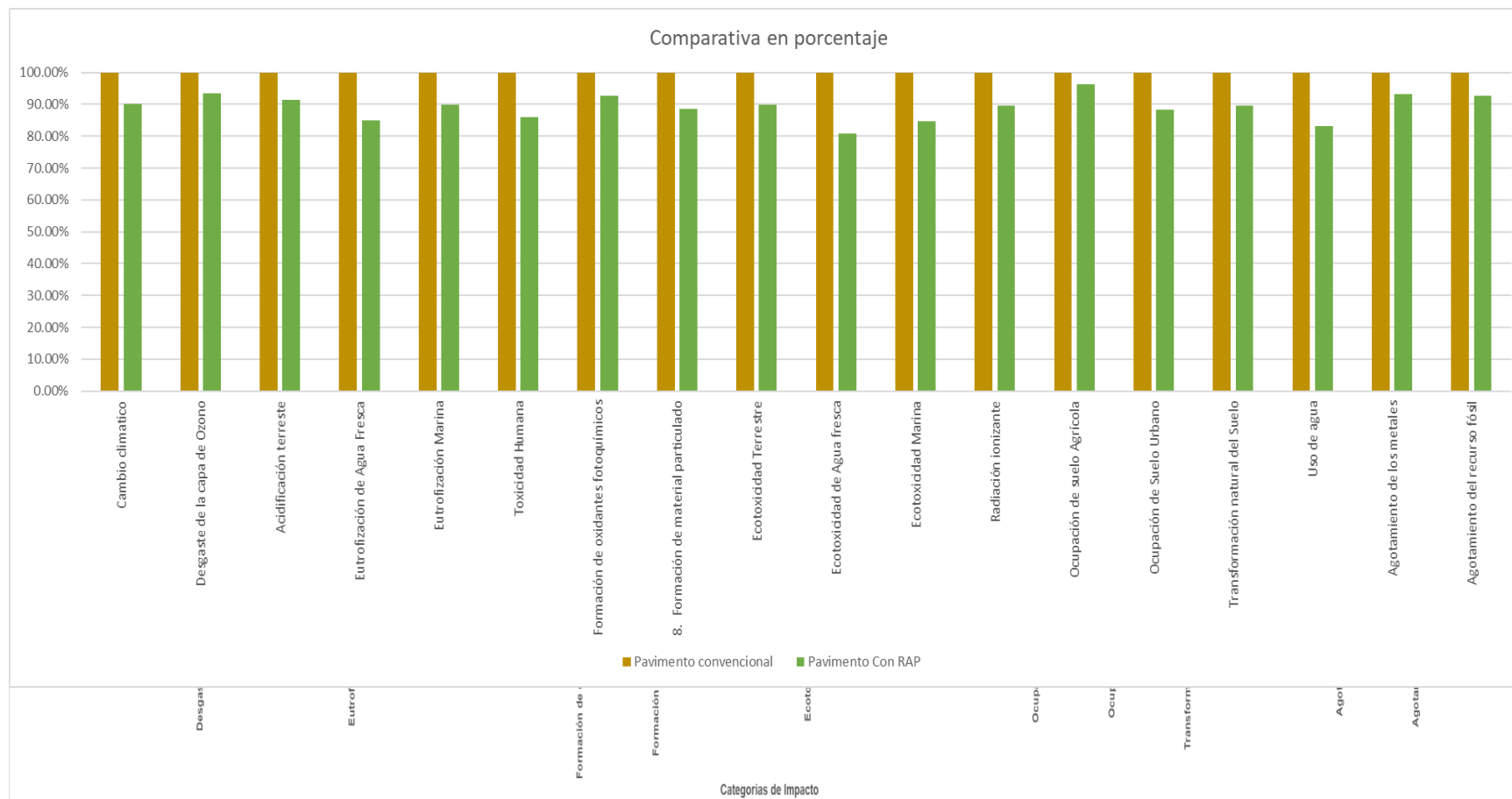
Categoría de impacto	Unidad	Pavimento convencional	Pavimento Con RAP
Cambio climatico	kg CO2 eq	599848.0708	540822.4120
Desgaste de la capa de Ozono	kg CFC-11 eq	0.1141	0.1065
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	4073.9033	3727.7825
Eutrofización de Agua Fresca	kg P eq	204.1979	173.6433
Eutrofización Marina	kg N eq	150.2586	135.1672
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq	7575380.4483	6521881.3525
Formación de oxidantes fotoquímico	kg NMVOC	3130.7700	2904.7728
Formación de material particulado	kg PM10 eq	1813.4752	1604.8349
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq	1027.2729	924.1239
Ecotoxicidad de Agua fresca	kg 1,4-DB eq	9201.6238	7437.5076
Ecotoxicidad Marina	kg 1,4-DB eq	7224734.2501	6127325.1898
Radiación ionizante	kBq U235 eq	62025.1115	55643.9927
Ocupación de suelo Agrícola	m2a	63141.5066	60734.1649
Ocupación de Suelo Urbano	m2a	18229.8215	16115.9478
Transformación natural del Suelo	m2	362.1160	324.8489
Uso de agua	m3	16330.2846	13563.6244
Agotamiento de los metales	kg Fe eq	30246.6084	28166.7695
Agotamiento del recurso fósil	kg oil eq	256369.5640	237605.5573

Tabla 30 Comparativa de resultados de categoría de Impacto

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 35 Gráfica comparativa de categorías de Impacto.



Conclusiones

El análisis de ciclo de vida, es una herramienta medio ambiental poderosa, que ayuda a tomar decisiones acertadas cuando se emplean criterios de sostenibilidad.

Se puede realizar el análisis de ciclo de vida a cualquier producto proceso o servicio.

La etapa de mayor impacto al realizar un análisis de ciclo de vida ,es el inventario de ciclo de vida, ya que es la etapa donde se definen cantidades y rendimientos, y es donde se evalúan las métricas para obtener los totales de materiales, energía y transporte.

El pavimento con RAP, presentó un mejor comportamiento en la mayoría de las categorías de impacto. En la categoría que más impacto tuvo fue en la de ecotoxicidad en Agua fresca y en segundo en la ecotoxicidad marina.

Hubo una reducción respecto al pavimento convencional en las categorías de cambio climático con 9.84 %, en la Toxicidad Humana en un 13.91 % y en la ecotoxicidad marina en hasta un 15.91%, siendo reducciones de importancia al momento de elegir la opción de mejor comportamiento medio ambiental.

La etapa que más contaminación genera, en ambos casos, es la etapa de vida útil, ya que contempla el mantenimiento, sin embargo, hablando de la construcción, principalmente las etapas que más contaminan son las etapas de construcción de base y de carpeta asfáltica.

La utilización de un 50% de RAP en la capa de base puede reducir en promedio un 10.78% de contaminación respecto a la construcción de un pavimento convencional. La categoría que más reducción presento fue la “Ecotoxicidad en Agua Fresca” con 19.17% y la categoría que menos reducción presento en la utilización de RAP fue “Ocupación de Suelo Agrícola”.



La hipótesis planteada se comprobó positivamente, ya que, si se puede hacer la comparación por medio del análisis de ciclo de vida en pavimentos, en diferentes escenarios con diferentes características.

Finalmente se concluye que el proyecto es exitoso, y tanto la metodología como el inventario de ciclo de vida son reproducibles, para cualquier escenario de pavimento que se requiera.



Referencias

- Acevez Gutierrez, H., López Chávez , O., Mercado Ibarra, S., & Arevalo Razo, J. (2020). Huella de carbono de una pavimentación con la metodología del ACV y SIMAPRO. *Energías Renovables*, 8-20.
- Boruda, B. (2012). *Análisis de ciclo de vida para el proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio utilizadas como retardante*. Chihuahua.
- Caceres. (2017). Diseño de mezclas asfálticas.
- Calderón, A. U. (2011). Mezclas Asfálticas Tibias. *Programa de Infraestructura del transporte*, 2.-3.
- Cauhape Casaux, M., Zorzutti, L., Martínez, F., Angelone, S., Balige, M., & Lucci, G. (2012). Carreteras sustentables. tramo experimental con mezclas asfálticas elaboradas con plásticos reciclados. *Vial-IMAE-FCEIA-UNR*, 3-5.
- Cincire, V. (2019). Casos de Estudio Licitaciones SCT y Capufe. *AMAAC*.
- Giani, M., Dotelli, G., Brandino, N., & Zampori, L. (2015). Evaluación comparativa del ciclo de vida de los pavimentos asfálticos utilizando asfalto recuperado, tecnología de mezcla en caliente y reciclaje en frío en el lugar. *ELSEVIER*, 224-238.
- Hernández Acosta, L., & Jiménez Zapata, K. (2017). Mezclas asfálticas: una alternativa para el tratamiento de residuos. *KUXULKAN'*, 23-27.
- Hernández Gutierrez, E. (2005). Pavimentación de la carretera México-Tuxpan.
- Huang, Y., Blrd, R. N., & Heidrich, O. (2007). A review of the use recycled solid waste materials in asphalt pavements Resources, Conservation and Recycling. 58-73.
- ISO 14044. (2006). ISO 14044:2006 Gestión ambiental- Análisis del ciclo de vida- Requisitos y directrices. *Normas ISO*.
- Kao. (2017). Tratamientos superficiales. *Tecnología e innovación de carreteras*.



- Limón Covarrubias, P., Davalos, B. A., Ávalos Cuevas, D., & Galaviz Gonzáles, J. (22). Análisis del agrietamiento de la carpeta asfáltica con 30% de RAP de la Carretera Guadalajara-Barra de Navidad en el Estado de Jalisco. *Asfáltica* 69, 34-36.
- LEGGEPA. (20021). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente.
- Mendoza, J. F., Adame, E., & Marcos, O. A. (2020). Beneficios ambientales del reciclaje de pavimentos. *Instituto Mexicano del Transporte*.
- Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Bogota, Colombia: Stella Valbuena de Fierro .
- Mora, S. (2006). Pavimentos de concreto hidráulico. Ministerio de transportes y comunicaciones direccion general de caminos y ferrocarriles III seminario nacional de gestion y normatividad vial .
- Moral, A., García, C., Peña, J. L., & Pablos, L. (2017). Proyecto Life Battle CO2. Sostenibilidad en la fabricación de mezclas asfálticas utilizando biomasa como Combustible alternativo. Congreso ibero-latinoamericano del asfalto, medellín 2017.
- Plati, C. (2019). Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Construction and Building Materials*.
- ramos, R. T. (2013). Vías, Carreteras y otras calzadas: Breve Historia de las mismas. *Cimbra*, 20-23.
- Sáez, a., & Urdaneta, j. (214). Manejo de residuos sólidos en América latina y el Caribe. *omnia*, 121-135.
- SCT. (2006). Calidad de los Materiales Asfálticos modificados. *Normas SCT*.
- SCT. (2006). Características de los Materiales. En Sct, *Materiales asfálticos, Aditivos y Mazclas " Calidad de los materiales Asfálticos*.



- SCT. (2010). Cornservación. En SCT, *Capas de rodadura de Granulometría Discontinua Tipo CASSA*. N_CSV_CAR_3_02_015/10.
- Solorio, R., Garnica, P., & Hernández , R. (2018). Un protocolo para la Gestión de Activos Carreteros en México. *Instituto Mexicano del Transporte*.
- Sosa-Rodríguez, F. S. (2015). Política del cambio climático en méxico. *revista internacional de estadística y geografica*, 6-7

