



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

**“Análisis ambiental respecto a la emisión de CO<sub>2</sub> producida en mezclas asfálticas con adición de hule molido de NFU”**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

**Ing. Katia Torres Moreno**

Dirigido por:

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Dra. María de la Luz Pérez Rea

**Presidente**

Dra. Genoveva Hernández Padrón

**Secretario**

Dr. Eduardo Rojas González

**Vocal**

Dr. Jorge Alarcón Ibarra

**Suplente**

Dra. Viviana Palos Barba

**Suplente**

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Fecha de Aprobación por el consejo (Mayo /2026)

México

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

## **Dedicatoria**

A mi familia, por ser el fundamento de cada uno de mis logros.

## **Agradecimientos**

Agradezco profundamente a la Universidad Autónoma de Querétaro por abrirme las puertas y permitirme formar parte del programa de Maestría en Vías Terrestres y Movilidad. Haber cursado estos estudios representa uno de los logros más significativos de mi vida profesional y personal.

Deseo expresar mi agradecimiento a la Dra. María de la Luz Pérez Rea y a la Dra. Genoveva Hernández por su orientación académica a lo largo de este trabajo. Su experiencia y acompañamiento fueron elementos importantes en el desarrollo de esta investigación y en mi formación dentro del programa.

De manera muy especial, expreso mi más profunda gratitud al Dr. Jorge Alarcón Ibarra, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, mismo lugar donde estudie mi licenciatura. Su apoyo, tiempo, dedicación y compromiso fueron decisivos para la consolidación de este trabajo. También agradezco a la Ing. Anilú Pichardo, por su acompañamiento cercano, retroalimentación constante y disposición siempre presente.

Extiendo mi reconocimiento a los demás miembros del sínodo, quienes aportaron valiosas observaciones y comentarios para fortalecer este proyecto: la Dra. Viviana Palos y el Dr. Eduardo Rojas, su participación, experiencia, tiempo y dedicación fueron esenciales para consolidar este documento con el nivel académico requerido. Asimismo, agradezco al Dr. Montoya, coordinador del programa, por su acompañamiento, disposición y asesoría durante el desarrollo del programa.

A mi familia, el pilar más importante en mi vida. A mis padres, por enseñarme el valor del esfuerzo, la constancia y la responsabilidad. A mis hermanos, gracias por inspirarme a ser un mejor ejemplo cada día y por motivarme a seguir creciendo profesional y personalmente. A mi ahora esposo, gracias por tu amor, tu paciencia y tu apoyo incondicional; por caminar conmigo en este proceso y sostenerme en los momentos más retadores de la maestría.

A mis compañeras de la maestría, Leslie, Betsie y Yadira, quienes se convirtieron en una parte esencial de esta etapa. Gracias por su amistad, por los trabajos en

equipo, por las jornadas de estudio, por el apoyo mutuo en los momentos de presión y por las risas que hicieron más ligera la carga académica. Su compañía no solo enriqueció mi aprendizaje profesional, sino que también dejó una huella personal que llevaré siempre conmigo.

A las empresas SURFAX, NEOTECH Y COVIMEXI por apoyarme con las instalaciones de sus laboratorios para realizar las pruebas durante mi periodo de estancia y recorridos tanto en los tramos como en las plantas de producción.

A CONAHCYT, expreso agradecimiento profundo y especial por el apoyo recibido como becaria. Su respaldo económico y académico hizo posible mi dedicación plena a este posgrado, permitiéndome concentrarme en mi formación, en el desarrollo de esta investigación y en mi crecimiento profesional. Esta oportunidad representó no solo un apoyo financiero, sino también un reconocimiento a mi esfuerzo.

Finalmente, agradezco a todas las personas que han sido parte de este proceso de formación: profesores, amigos, colegas y personal administrativo. Cada conversación, cada clase, cada gesto de apoyo y cada experiencia compartida contribuyeron de manera significativa a estos dos años de crecimiento profesional y personal.

A Dios, agradezco por darme la fortaleza, la claridad y la serenidad necesarias para avanzar incluso en los momentos más difíciles. Gracias por acompañarme en cada paso y permitirme llegar hasta aquí.

A todas y todos, gracias por formar parte de este camino que hoy concluye, pero que también abre nuevas oportunidades y horizontes.

## Contenido

Agradecimientos .....	2
Resumen .....	12
Abstract .....	13
1. Introducción.....	14
1.1 Descripción del problema .....	15
1.2 Justificación .....	15
2. Antecedentes .....	17
2.1 Estado del arte.....	20
2.1.1 Métodos de adición de NFU: Vía seca, vía húmeda, Terminal Blend y RAR.....	20
2.1.2 Aplicación del análisis de ciclo de vida en infraestructura vial.....	21
2.1.3 Estudios con polvo de neumático tratado o pretratado...22	
2.1.4 ACV aplicado a mezclas asfálticas convencionales y modificadas. ....	23
2.1.5 Integración del ACV con análisis económico y multicriterio. ....	23
2.1.6 ACV en mezclas asfálticas con RAP y otras tecnologías sostenibles.....	24
3. Fundamentación teórica .....	27
3.1 Mezclas asfálticas.....	28
3.1.1 Definición y componentes básicos .....	28
3.1.2 Relación entre diseño de mezcla y emisiones.....	29
3.1.3 Tipos y tecnologías de adición de NFU .....	30
3.2 Polvo de neumático pretratado .....	33
3.2.1 Tecnología RAR (Reacted and Activated Rubber) .....	33
3.2.2 Proceso de obtención y fabricación.....	35
3.2.3 Propiedades físicas y químicas .....	38
3.2.4 Aplicaciones en construcción vial .....	39
3.3 Análisis de ciclo de vida.....	41
3.3.1 Norma ISO 14040:2006.....	41

3.3.2 Norma ISO 21930:2017 – Sostenibilidad en la construcción .....	43
3.3.3 Etapas del Ciclo de Vida.....	45
3.3.4 Softwares para el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	47
3.3.5 Selección del software de ACV .....	48
3.3.6 Indicadores ambientales y dióxido de carbono equivalente. ....	51
4. Hipótesis.....	53
5. Objetivo .....	54
5.1 Objetivo general.....	54
5.2 Objetivos específicos .....	54
6. Metodología.....	55
6.1 ACV Caso estudio 1: Autopista México – Tuxpan.....	56
6.1.1 Primer etapa de la metodología : Definición del objetivo y alcance. ....	58
6.1.2 Análisis del inventario.....	60
6.1.2.1 Etapa de diseño de las mezclas asfálticas.....	61
6.1.2.2 Producción de materiales y fabricación de la mezcla.....	65
6.1.2.3 Traslados y acarreos. ....	68
6.1.2.4 Etapa de construcción .....	71
6.1.2.5 Etapa de uso y conservación .....	75
6.1.2.6 Etapa de fin de vida útil.....	80
6.1.3 Fase de evaluación .....	82
6.1.3.1 Modelado en software de ACV .....	83
6.1.4 Interpretación y resultados del caso de estudio de la autopista México – Tuxpan.....	86
6.2 Caso estudio Autopista México – Pachuca.....	91
6.2.1 Primer etapa de la metodología: Definición del objetivo y alcance. ....	93
6.2.2 Análisis del inventario.....	96
6.2.2.1 Diseño de las mezclas asfálticas .....	97
6.2.2.2 Producción de materiales y fabricación de la mezcla.....	99
6.2.2.3 Etapa de construcción. ....	102
6.2.2.4 Etapa de uso y conservación .....	107
6.2.2.5 Etapa fin de vida útil.....	115

6.2.3 Fase de evaluación .....	116
6.2.3.1 Modelado en software de ACV .....	117
6.2.4 Interpretación y resultados del caso de estudio de la autopista México – Pachuca.....	120
7. Análisis y conclusiones.....	124
8. Recomendaciones y trabajo futuro .....	129
9.    Referencias.....	131
10.   Anexos.....	141
10.1 Caracterización de materiales y pruebas de desempeño para las mezclas asfálticas analizadas. ....	141
10.1.1 Mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado. .....	141
10.1.2 Mezcla densa convencional.....	149
10.1.3 Mezcla densa modificada con polímero y escoria de alto horno. ....	152
10.1.4 Mezcla densa convencional con refuerzo de geomalla de fibra de vidrio.....	160
10.1.5 Reporte de calidad de la geomalla de fibra de vidrio..	171

## Índice de figuras

Figura 2-1 Emisiones de CO <sub>2</sub> procedentes por cada sector. ....	19
Figura 3-1 Componentes básicos de mezclas asfálticas (ligante asfáltico y agregados pétreos).28	
Figura 3-2 Tipos de mezclas asfálticas: I) Densa, II) SMA, III) Abierta. ....	29
Figura 3-3 Tipos de adición de NFU en las mezclas asfálticas de acuerdo con el orden cronológico de investigación. ....	30
Figura 3-4 Componentes principales del polvo de neumático pretratado utilizando la tecnología Reacted and Activated Rubber. ....	33
Figura 3-5 A) Caucho pulverizado y B) Polvo de neumático pretratado. ....	36
Figura 3-6 Planta industrial para el procesamiento y acondicionamiento del caucho para la obtención del polvo de neumático pretratado. ....	37
Figura 3-7 Estructura del Ciclo de Vida. ....	42
Figura 3-8 Etapas del ciclo de vida. ....	45
Figura 3-9 Etapas del ciclo de vida de los pavimentos. ....	46
Figura 3-10 Resultados de la comparativa de los softwares para ACV. ....	50
Figura 4-1 Hipótesis de la investigación	53
Figura 6-1 Estructura metodológica de la investigación.	56
Figura 6-2 Tramo de prueba en autopista México – Tuxpan. ....	58
Figura 6-3 Kilometro de carril asignado como unidad funcional para caso estudio 1. ....	60
Figura 6-4 Formatos para recolección de información en campo. ....	61
Figura 6-5 Ensayes de laboratorio para los diseños de las alternativas evaluadas. ....	62
Figura 6-6 Resumen de los resultados de diseño de las tres alternativas analizadas. ....	64
Figura 6-7 Modelo de planta de producción de mezcla asfáltica iNOVA 2000. ....	65
Figura 6-8 Planta de producción de mezcla asfáltica "Pitula". ....	68
Figura 6-9 Ubicación de los bancos de materiales para caso estudio 1. ....	69

Figura 6-10 Equipo utilizado para proceso de fresado y barrido.....	73
Figura 6-11 Equipo utilizado en la etapa de colocación.....	73
Figura 6-12 Equipo utilizado en la etapa de compactación.....	74
Figura 6-13 Modelo en software HDM-4 del caso estudio 1. ....	76
Figura 6-14 Modelado de primer caso estudio 1 en LCA Pave.....	83
Figura 6-15 Emisiones totales para unidad de 1 km por 10 m de ancho en la etapa inicial. (producción al tendido).....	87
Figura 6-16 Emisiones totales de CO2 equivalente para cada alternativa de mezcla en la etapa total, incluyendo el programa de mantenimiento y conservación a lo largo de 30 años. ....	87
Figura 6-17 Distribución de emisiones por tipo de actividad en caso estudio 1. ....	89
Figura 6-18 Reflexión de grietas en el tramo de interés previas a la intervención. ....	91
Figura 6-19 Unidad funcional de 1 km de carril pavimentado en caso estudio 2. ....	95
Figura 6-20 Ubicación de bancos de materiales para caso estudio 2.....	95
Figura 6-21 Diseños de la alternativa 1 y 2 para el caso estudio 2.....	99
Figura 6-22 Planta de producción de mezcla asfáltica “La Providencia”.....	100
Figura 6-23 Fresado y barrido en caso estudio 2.....	104
Figura 6-24 Colocación de la mezcla en caso estudio 2.....	105
Figura 6-25 Colocación de geomalla de fibra de vidrio. ....	105
Figura 6-26 Etapa de compactación en caso estudio 2. ....	106
Figura 6-27 Modelo en software HDM-4 del caso estudio 2. ....	109
Figura 6-28 Histograma TDPA General, datos viales sobre el tramo de prueba. ....	110
Figura 6-29 Histograma TDPA Camiones unitarios y su evolución sobre el tramo de prueba.....	112
Figura 6-30 Evolución del TDPA de camiones articulados simples sobre el tramo de prueba.....	113
Figura 6-31 Histograma TDPA camiones articulados dobles y su evolución sobre el tramo de prueba.....	114
Figura 6-32 Modelado de primer caso estudio 2 en LCA Pave.....	117
Figura 6-33 Emisiones totales para unidad de 1 km por 10 m de ancho en la etapa	

inicial (producción al tendido).....	121
Figura 6-34 Emisiones totales de CO <sub>2</sub> equivalente para cada alternativa de mezcla en la etapa total, incluyendo el programa de mantenimiento y conservación a lo largo de 30 años. ....	121
Figura 6-35 Distribución de emisiones por tipo de actividad en el caso estudio 2. ....	123

## Índice de tablas

Tabla 2-1 Estado del arte.....	26
Tabla 3-1 Criterios y ponderaciones asignadas para la comparativa. ....	49
Tabla 3-2 Resultados finales de la comparativa entre softwares. ....	49
Tabla 6-1 Consumos energéticos de las alternativas en caso de estudio 1. ....	67
Tabla 6-2 Resumen de los equipos utilizados en el proceso constructivo y sus características para caso estudio 1.....	71
Tabla 6-3 Plan de mantenimiento y conservación para caso estudio 1. ....	77
Tabla 6-4 Consumos energéticos del caso estudio 2. ....	102
Tabla 6-5 Resumen de los equipos utilizados en el proceso constructivo para caso estudio 2. ....	106
Tabla 6-6 Plan de mantenimiento y conservación para caso estudio 2. ....	107
Tabla 6-7 Volumen de la clasificación vehicular en el tramo de prueba. ....	110

## Abreviaturas y siglas

**ACV:** Análisis de ciclo de vida  
**AMAAC:** Asociación Mexicana del Asfalto A.C.  
**AR6:** Sexto Informe de Evaluación del IPCC  
**CH<sub>4</sub>:** Metano  
**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono  
**CO<sub>2</sub> eq:** Dióxido de carbono equivalente  
**CR:** Crumb Rubber  
***Cradle to Gate:*** Enfoque de la cuna a la puerta  
***Cradle to Grave:*** Enfoque de la cuna a la tumba  
***Cradle to Laid:*** Enfoque de la cuna a la colocación  
**EPA:** *Environmental Protection Agency*  
**FHWA:** *Federal Highway Administration*  
**GEI:** Gases de efecto invernadero  
**GWP:** *Global Warming Potential*  
**HDM-4:** *Highway Development and Management Model*  
**INEGEI:** Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero  
**IPCC:** Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático  
**ISO:** *International Organization for Standardization*  
**LCA:** *Life Cycle Assessment*  
**LCA Pave:** Software de análisis de ciclo de vida para pavimentos  
**N<sub>2</sub>O:** Óxido nitroso  
**NFU:** Neumáticos fuera de uso  
**PIARC:** Asociación Mundial de la Carretera  
**RAP:** *Reclaimed Asphalt Pavement*  
**RAR:** *Reacted and Activated Rubber*  
**SEMARNAT:** Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
**SMA:** *Stone Mastic Asphalt*  
**TDPA:** Tránsito diario promedio anual  
**UAQ:** Universidad Autónoma de Querétaro  
**WMA:** *Warm Mix Asphalt*

## Resumen

En el contexto actual de creciente exigencia ambiental y de transición hacia prácticas más sostenibles en la infraestructura vial, la evaluación del impacto ecológico de los materiales utilizados en pavimentación se ha vuelto fundamental. Las mezclas asfálticas representan un área estratégica para la implementación de soluciones sustentables debido a su alto consumo de recursos y energía, así como a las emisiones asociadas a su producción y mantenimiento. El objetivo de este trabajo es analizar y comparar el impacto ambiental de diferentes mezclas asfálticas modificadas mediante la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) bajo el enfoque *Cradle to Grave*, considerando todas las etapas desde la extracción de materias primas hasta el final de la vida útil del pavimento. El estudio se desarrolló a partir de dos casos de estudio en tramos reales de autopistas mexicanas. El primero se ubica en la autopista México-Tuxpan, donde se compararon tres alternativas: una mezcla densa convencional, una mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado y una mezcla densa modificada con polímero y escoria de alto horno. El segundo caso corresponde a la autopista México-Pachuca, donde se evaluó una mezcla densa reforzada con geomalla de fibra de vidrio frente a una mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado. El análisis ambiental se realizó conforme a las normas ISO 14040 e ISO 14044 utilizando las herramientas LCA Pave y HDM-4, considerando como indicador ambiental principal las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente. Los resultados mostraron que las mezclas con polvo de neumático pretratado presentan las menores emisiones tanto en la etapa inicial como en el ciclo de vida completo de la mezcla asfáltica, con reducciones de entre 15.0 % y 20.0 % respecto a las otras alternativas, confirmando su viabilidad ambiental y su contribución a una infraestructura vial más sostenible.

**Palabras clave:** Análisis de ciclo de vida, polvo de neumático pretratado, emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, mezclas asfálticas.

## Abstract

In the current context of increasing environmental requirements and the transition toward sustainable practices in road infrastructure, evaluating the ecological impact of materials used in pavement construction has become essential. Asphalt mixtures represent a strategic area for implementing sustainable solutions due to their high consumption of resources and energy, as well as the emissions associated with their production and maintenance. The objective of this study is to analyze and compare the environmental impact of different modified asphalt mixtures using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology under a Cradle-to-Grave approach, considering all stages from raw material extraction to the end of the pavement service life. The research was conducted through two case studies on real sections of Mexican highways. The first case corresponds to the Mexico-Tuxpan highway, where three alternatives were compared: a conventional dense-graded mixture, a gap-graded mixture incorporating pre-digested tire rubber powder, and a dense-graded mixture modified with polymer and blast furnace slag. The second case study was carried out on the Mexico-Pachuca highway, where a dense-graded mixture reinforced with fiberglass geogrid was evaluated against a gap-graded mixture with pre-digested tire rubber powder. The environmental life cycle analysis was performed in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 standards using the LCA Pave and HDM-4 tools, considering CO<sub>2</sub> equivalent emissions as the main environmental indicator. The results showed that mixtures incorporating pre-digested tire rubber powder consistently exhibited the lowest emissions both in the initial stage and throughout the full life cycle of the asphalt pavement, achieving reductions between 15.0 % and 20.0 % compared with the other alternatives. These findings confirm the environmental viability of this technology and its contribution to the development of more sustainable road infrastructure.

**Keywords:** Life Cycle Assessment, pre-digested tire rubber powder, CO<sub>2</sub> equivalent emissions, asphalt mixtures.

## 1. Introducción

El sector del transporte es fundamental para el desarrollo económico y social, pero también representa una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Según la PIARC (2023), el transporte genera el 31.2 % de las emisiones globales, de las cuales el 71.1 % corresponde al transporte carretero, lo que evidencia la necesidad de implementar estrategias de mitigación que incluyan no solo la operación vehicular, sino también la construcción y mantenimiento de la infraestructura vial. En este contexto, los pavimentos flexibles contribuyen de manera importante a las emisiones debido al consumo energético en la producción de materiales, fabricación de mezclas asfálticas y procesos constructivos. La FHWA (2022) destaca la importancia de adoptar prácticas más sostenibles sin comprometer el desempeño estructural. Para evaluar estos impactos, el dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> eq) se emplea como indicador principal, conforme a lo establecido por el IPCC (2014).

El uso de neumáticos fuera de uso (NFU) como aditivo en mezclas asfálticas ha ganado relevancia por sus beneficios mecánicos y su contribución a la economía circular. No obstante, persisten vacíos de información respecto a su impacto ambiental, particularmente en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> eq, lo que limita la toma de decisiones basadas en la sostenibilidad.

Para abordar esta problemática, el análisis de ciclo de vida (ACV), regulado por las normas ISO 14040 y 14044, permite cuantificar los impactos ambientales desde la extracción de materias primas hasta la disposición final. El enfoque “*Cradle to Grave*” resulta especialmente adecuado para pavimentos, al considerar también las etapas de mantenimiento y conservación.

El estudio se centra en las autopistas México- Tuxpan y Mexico-Pachuca, corredores estratégicos con altos volúmenes de tránsito pesado, lo que incrementa las exigencias estructurales y las intervenciones de mantenimiento. Estas condiciones permiten evaluar escenarios reales y obtener resultados aplicables al contexto nacional.

En este marco, la presente investigación tiene como objetivo cuantificar y comparara las emisiones de CO<sub>2</sub> eq de distintas mezclas asfálticas, incluyendo aquellas con materiales reciclados como NFU. Para ello, se emplea la herramienta LCA Pave de la FHWA, especializada en el área de pavimentos. Los resultados buscan aportar evidencia técnica que apoye la toma de decisiones en infraestructura vial sostenible, promoviendo el uso de tecnologías con menor huella de carbono.

### **1.1 Descripción del problema**

En la actualidad existe una carencia de información suficiente y estudios concluyentes que permitan evaluar de manera integral el impacto ambiental de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de neumático pretratado, particularmente bajo condiciones reales de producción, construcción, mantenimiento y fin de vida del pavimento y en términos de emisiones de dióxido de carbono equivalente.

Aunque esta tecnología se reconoce como una alternativa viable para el aprovechamiento de residuos y la mejora del desempeño mecánico de los pavimentos, su huella ambiental no ha sido cuantificada con precisión mediante metodologías estandarizadas que consideren todas las etapas del pavimento, desde la extracción de las materias primas hasta el fin de su vida útil. Esta limitación dificulta la comparación objetiva con mezclas convencionales y restringe la toma de decisiones informadas en el ámbito de la infraestructura vial.

En consecuencia, se identifica la necesidad de desarrollar estudios comparativos basados en el análisis de ciclo de vida, que permitan generar información confiable y cuantificable para evaluar el desempeño ambiental de estas mezclas y sustentar su adopción como una alternativa sostenible.

### **1.2 Justificación**

La incorporación de polvo de neumático pretratado con asfalto en mezclas asfálticas representa una tecnología emergente con alto potencial para mejorar la sostenibilidad de la infraestructura vial, tanto desde el punto de vista ambiental como

técnico. No obstante, a pesar de los beneficios mecánicos reportados en diversas investigaciones, persiste un vacío en el conocimiento respecto a su impacto ambiental real, particularmente en términos de emisiones de dióxido de carbono equivalente, lo que limita su evaluación integral y dificulta la toma de decisiones informadas en proyectos carreteros.

En este contexto, resulta necesario desarrollar un análisis de ciclo de vida comparativo, que permita cuantificar de manera objetiva y sistemática las emisiones asociadas a las distintas etapas del pavimento, desde la producción de materiales y la construcción, hasta el mantenimiento y el fin de vida útil utilizando tramos carreteros reales que se tengan en operación. La aplicación de esta metodología posibilita comparar el desempeño ambiental de mezclas asfálticas con polvo de neumático pretratado frente a mezclas convencionales y otras alternativas modificadas, bajo un enfoque normado y reproducible.

La presente investigación aporta evidencia científica cuantificable sobre el impacto ambiental de estas tecnologías, contribuyendo a validar su viabilidad como una alternativa sostenible en la infraestructura vial. Asimismo, los resultados obtenidos permiten fortalecer los criterios técnicos para la selección de materiales, apoyar la formulación de estrategias de mitigación de emisiones y fomentar la adopción responsable de materiales reciclados en el sector carretero en México.

De esta manera, el estudio se alinea con los objetivos globales de reducción de emisiones, el impulso a la economía circular y las directrices establecidas en normas internacionales de evaluación ambiental, proporcionando información relevante para organismos, proyectistas y tomadores de decisión interesados en avanzar hacia sistemas de transporte más sostenibles.

## 2. Antecedentes

En las últimas décadas, la preocupación por el impacto ambiental de los procesos industriales y de infraestructura ha adquirido una relevancia creciente tanto en el ámbito científico como en la agenda pública internacional. En particular, el sector transporte se reconoce como uno de los principales contribuyentes a las emisiones de GEI, debido a su alta dependencia de combustibles fósiles y a la magnitud de la infraestructura necesaria para su operación. En México, de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2019), el 71.0 % de las emisiones generadas por el sector transporte proviene del transporte carretero, lo que evidencia la importancia de este subsector en la huella de carbono nacional. A escala global, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos reporta que el transporte es responsable de aproximadamente el 24.0 % de las emisiones totales de dióxido de carbono, consolidándose como uno de los sectores clave en la mitigación del cambio climático (EPA, 2021).

De manera consistente con estos datos, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) señala en su Sexto Informe de Evaluación (AR6) que las emisiones globales han alcanzado niveles históricamente altos, siendo el dióxido de carbono el principal responsable del calentamiento global antropogénico. El IPCC estima que el sector transporte contribuye con aproximadamente el 23.0 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía, y destaca que la infraestructura vial desempeña un papel importante indirecto pero determinante en dichas emisiones, al influir en el consumo energético, la eficiencia vehicular y la frecuencia de intervenciones de mantenimiento (IPCC, 2021). Asimismo, el informe subraya que la reducción de emisiones en sectores intensivos en materiales y energía, como la infraestructura de transporte, es indispensable para limitar el calentamiento global a 1.5 °C, objetivo central de los acuerdos climáticos internacionales.

Paralelamente, el manejo de residuos sólidos representa otro desafío ambiental relevante, particularmente en el caso de los neumáticos fuera de uso, los cuales presentan una alta complejidad de gestión debido a su volumen, durabilidad y

composición. Se estima que a nivel mundial se generan más de 290 millones de NFU anualmente (IEA, 2021), mientras que en México la cifra asciende a aproximadamente 40 millones de neumáticos por año, de acuerdo con los inventarios nacionales de emisiones (INEGEI, 1990-2018). En muchos casos, estos residuos son dispuestos en vertederos o sometidos a procesos de incineración, prácticas que generan emisiones contaminantes y desaprovechan su potencial como material reciclable.

Ante este panorama, surge la necesidad de evaluar de manera integral los impactos ambientales asociados a los materiales empleados en la infraestructura vial a lo largo de todo su ciclo de vida. Esta necesidad ha impulsado el desarrollo y aplicación del ACV como una herramienta metodológica capaz de cuantificar de forma sistemática los consumos energéticos y las emisiones generadas desde la extracción de materias primas, pasando por la producción, construcción y mantenimiento, hasta el fin de vida de los pavimentos. El ACV se estructura en cuatro fases fundamentales que son: (1) definición del objetivo y alcance del estudio, (2) análisis del inventario de entradas y salidas, (3) evaluación de impactos ambientales y (4) interpretación de resultados.

Diversos autores han aplicado el análisis de ciclo de vida (ACV) al análisis ambiental de pavimentos, incorporando materiales alternativos como RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), plásticos reciclados y polvo de caucho derivado de NFU. Estudios desarrollados por Santos et al. (2018), Lu et al. (2019) y Heidari et al. (2020) demuestran que el uso de estos materiales no solo responde a estrategias de gestión de residuos, sino que también puede contribuir a la reducción de emisiones asociadas a la producción de mezclas asfálticas, siempre que se evalúe adecuadamente su comportamiento durante la vida útil del pavimento. Dentro de los impactos ambientales evaluados en este tipo de estudios, destacan las emisiones de GEI, particularmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), los cuales se integran mediante el indicador Potencial de Calentamiento Global (GWP), comúnmente expresado en kilogramos de  $\text{CO}_2$  equivalente. El IPCC identifica al  $\text{CO}_2$  como el gas con mayor contribución al calentamiento global de

origen antropogénico, representando más del 65.0 % del forzamiento radiactivo total, lo que justifica su uso como indicador principal en estudios de impacto climático (IPCC, 2014; IPCC, 2021). En el caso de los pavimentos asfálticos, las etapas de producción de materiales, transporte y colocación en sitio representan fases de alto consumo energético, donde el tipo de mezcla, la eficiencia de la maquinaria y las distancias de acarreo influyen directamente en el impacto ambiental total. En este contexto, el uso de polvo de neumático pretratado en mezclas asfálticas ha emergido como una alternativa con alto potencial ambiental y técnico. Finalmente, considerando que la construcción, explotación, mantenimiento y uso de la infraestructura vial son responsables de una proporción significativa de las emisiones globales de carbono, estimadas en alrededor del 31.2 % a nivel mundial (Figura 2-1), resulta indispensable identificar tanto las prácticas actuales como las tecnologías emergentes que contribuyan al avance hacia la neutralidad de carbono en el sector carretero (Lamb, 2023). En este sentido, la evaluación ambiental de mezclas asfálticas con incorporación de NFU mediante metodologías estandarizadas constituye un paso fundamental para sustentar la toma de decisiones en materia de infraestructura vial sostenible.

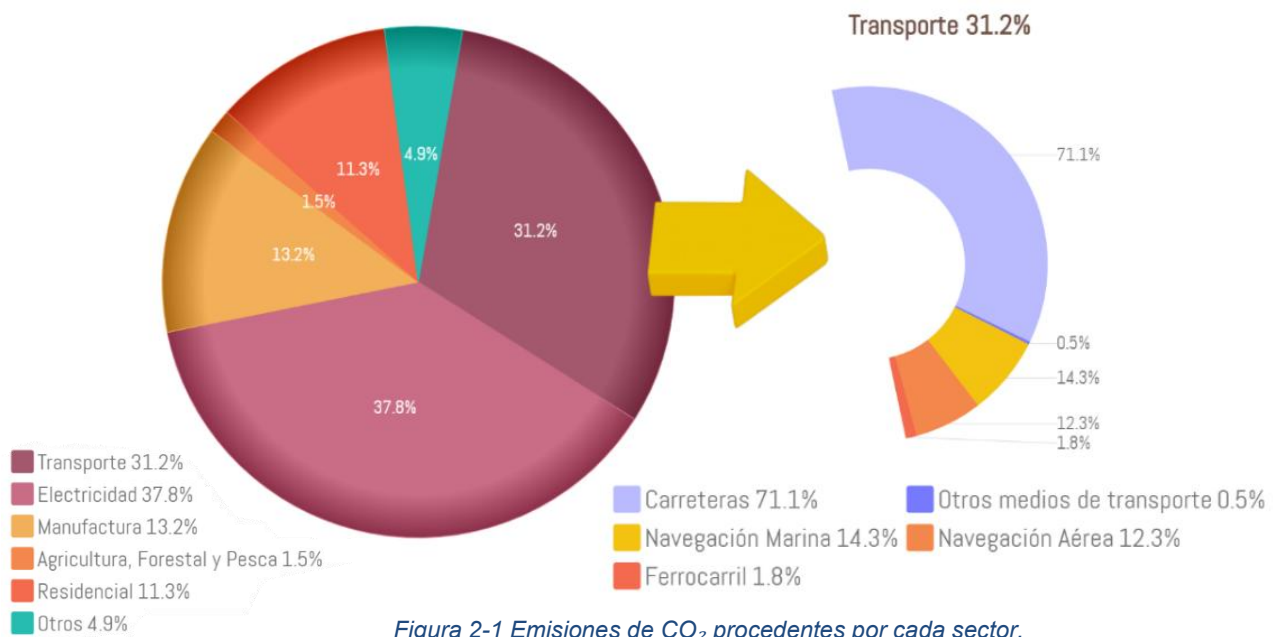


Figura 2-1 Emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes por cada sector.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos reflejados por Lamb 2023.

## 2.1 Estado del arte

Existe una amplia literatura sobre ACV aplicado a mezclas asfálticas y al uso de *Crumb Rubber*, RAP y polímeros. Sin embargo, los resultados dependen fuertemente del límite del sistema, predominando enfoques parciales como *Cradle to Gate* o “de la cuna a la puerta”, enfocados únicamente en la producción de las mezclas asfálticas u otros materiales de construcción. Es importante recalcar que, aunque las tecnologías de caucho tratado y RAR han demostrado ventajas mecánicas y operativas, son escasos los estudios que evalúan su impacto ambiental mediante ACV y con un enfoque que abarque todo su ciclo de vida, especialmente en condiciones reales de operación. La mayoría de los estudios se desarrollan en contextos europeos, asiáticos o norteamericanos, existiendo una brecha de conocimiento en el contexto mexicano, donde las condiciones de producción, transporte y construcción pueden modificar de manera significativa los resultados ambientales. A continuación, se describen diferentes investigaciones de los diferentes autores que han tenido relevancia en temas como mezclas asfálticas con adición de neumático, mezclas asfálticas con la tecnología de adición RAR o polvo de neumático pretratado y análisis de ciclo de vida.

### *2.1.1 Métodos de adición de NFU: Vía seca, vía húmeda, Terminal Blend y RAR*

Desde el punto de vista tecnológico, diversos autores han estudiado los métodos de adición de NFU en mezclas asfálticas. McDonald (1966) sentó las bases del uso de caucho mediante la vía húmeda, mientras que Heitzman (1992) documentó el desarrollo de asfaltos-caucho y su desempeño en campo.

Estudios posteriores de Lo Presti (2013) y Sousa et al. (2012) compararon las principales tecnologías de incorporación de caucho, destacando que la vía seca presenta ventajas operativas, pero limitaciones en compatibilidad, mientras que la vía húmeda y el Terminal Blend ofrecen mejor interacción con el ligante a costa de mayor complejidad operativa.

La tecnología RAR (*Reacted and Activated Rubber*) ha sido documentada por Sousa (2013), Willis et al. (2014) y García – Pérez et al. (2021) como una alternativa que combina facilidad de incorporación con mejoras mecánicas, actuando como un extensor elastómero. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se centran en desempeño mecánico, dejando un vacío en la evaluación ambiental integral de esta tecnología.

Estos estudios no solo difieren en materiales, sino en cómo se incorpora el caucho. Esto es crucial porque define energía de proceso, emisiones asociadas y desempeño esperado.

Zhang et al. (2020) también se inclinan hacia la vía húmeda, pero al combinar rejuvenecedores, sus resultados no deben compararse directamente con estudios predominantemente vía seca sin ajustar supuestos.

Morales et al. (2021) aportan comparabilidad tecnológica al contrastar vía seca vs vía húmeda. Su hallazgo recurrente (compartido por literatura técnica clásica de asfaltos-caucho) es que la vía húmeda suele cargar más impactos iniciales por control térmico/mezclado y exigencias operativas, pero puede justificarlo si mejora desempeño (menor mantenimiento, mayor vida).

En resumen, Morales et al. (2021) permiten ver la diferencia de un proceso dependiente del impacto. En cambio, estudios que reportan solo mezcla con caucho, sin separar vía seca o húmeda pueden estar agregando tecnologías con inventarios muy distintos, lo cual reduce la compatibilidad. Al final de este capítulo se resumen las investigaciones más recientes sobre los temas seleccionados en el marco teórico, su aportación principal y la relación que se tiene con la presente investigación.

### *2.1.2 Aplicación del análisis de ciclo de vida en infraestructura vial.*

El análisis de ciclo de vida (ACV) se ha consolidado como una metodología fundamental para evaluar el impacto ambiental de la infraestructura vial, particularmente en el contexto de la mitigación del cambio climático. Autores como

Huang et al. (2009) y Santero, Masanet y Horvath (2011) establecieron las bases para la aplicación del ACV en pavimentos y materiales asfálticos, identificando que la producción del ligante asfáltico y el consumo energético durante la fabricación de mezclas representan las principales fuentes de emisiones.

Posteriormente, estudios desarrollados por Stripple (2001), Miliutenko et al. (2012) y Aurangzeb et al. (2014) ampliaron el análisis hacia enfoques más integrales, incorporando mantenimiento y fin de vida, lo que evidenció que el desempeño del material a lo largo del tiempo es un factor determinante en el impacto ambiental acumulado. Estos trabajos sentaron las bases conceptuales para el uso de enfoques *Cradle to Grave* en la infraestructura vial.

Una diferencia central entre estudios no es solo si usan ACV, sino qué parte del sistema modelan. Trabajos basados en ACV de infraestructura (como Huang et al, 2009; Santero, Masanet y Horvath, 2011) muestran que la comparación ambiental entre alternativas cambia drásticamente según el límite del sistema (*Cradle to Gate vs Cradle to Grave*), porque las fases de construcción, mantenimiento y fin de vida pueden modificar el balance final incluso si la fase de producción (A1-A3) domina en emisiones.

### *2.1.3 Estudios con polvo de neumático tratado o pretratado.*

Un aporte relevante dentro de este contexto es el estudio de Jiménez del Barco–Carrión et al. (2023), quienes evaluaron mezclas con polvo de neumático pretratado mediante ACV bajo un enfoque *Cradle to Gate*, reportando reducciones en ciertos impactos ambientales. No obstante, al limitar el análisis a las etapas de producción, el estudio no evalúa el impacto acumulado durante la colocación, la vida útil ni el fin de vida, aspectos clave para tecnologías que prometen mayor durabilidad.

Otros autores, como Arabani y Azarhoosh (2012) y Lu et al. (2019), han documentado mejoras significativas en resistencia a fatiga y deformación permanente en mezclas con caucho tratado, lo que sugiere que estas tecnologías podrían generar beneficios ambientales indirectos al reducir necesidades de

mantenimiento, hipótesis que aún requiere validación mediante ACV con enfoque integral.

#### *2.1.4 Análisis de ciclo de vida (ACV) aplicado a mezclas asfálticas convencionales y modificadas.*

Diversos autores han aplicado el ACV directamente a mezclas asfálticas, comparando formulaciones convencionales con alternativas modificadas. Bressi et al. (2019) realizaron un análisis comparativo entre mezclas con Crumb Rubber (CR) y RAP, demostrando que el beneficio ambiental depende de la eficiencia del procesamiento y de los supuestos del inventario.

De manera complementaria, Zhang et al. (2020) y Zhengyin et al. (2021) evaluaron mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado mediante ACV conforme a ISO 14040, enfocándose en impactos climáticos y energéticos. Sus resultados coinciden en que las mezclas con NFU pueden reducir emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, aunque destacan que el aumento en consumo energético durante la modificación del ligante puede compensar parcialmente estos beneficios si no se optimizan los procesos.

Morales et al. (2021) y Garcilazo et al. (2022) ampliaron este enfoque comparando tecnologías de vía seca y húmeda, concluyendo que la vía húmeda suele presentar mayores impactos iniciales, pero potenciales beneficios a largo plazo cuando se consideran mejoras en durabilidad. En la misma línea, Silverio Lima et al. destacan la importancia de incorporar la vida útil como variable clave en el análisis de ciclo de vida.

#### *2.1.5 Integración del ACV con análisis económico y multicriterio.*

La literatura reciente muestra una tendencia hacia la integración del ACV con enfoques económicos y multicriterio. Kumar et al. (2022) desarrollaron un estudio combinado de ACV y análisis costo – beneficio para pavimentos con caucho reciclado, destacando que la sostenibilidad debe evaluarse de manera integral. De forma similar, Liu et al. (2023) incorporaron criterios de economía circular,

mostrando que el reciclaje de neumáticos puede aportar beneficios ambientales adicionales cuando se consideran escenarios de recuperación de materiales.

Silva et al. (2022) compararon mezclas modificadas con polímeros y caucho, concluyendo que ambas tecnologías pueden reducir impactos ambientales frente a mezclas convencionales, aunque con diferencias importantes en consumo energético y emisiones asociadas a la fabricación del modificador.

Silverio et al. (2022) y Kumar et al. (2022) son más fuertes en conectar impacto con desempeño/decisión. En cambio, estudios centrados en inventario de producción pueden sobre o subestimar ventajas reales si no convierten mejoras mecánicas en escenarios de mantenimiento.

#### *2.1.6 ACV en mezclas asfálticas con RAP y otras tecnologías sostenibles.*

Además del uso de NFU, numerosos estudios han evaluado el impacto ambiental de mezclas con RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*). Chiu et al. (2008) y Bartolozzi et al. (2013) demostraron que el uso de RAP puede reducir significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, principalmente por la disminución en el consumo de ligante virgen.

Investigaciones más recientes, como las de Lee et al. (2017), Mukherjee y Cass (2018) y Zhao et al. (2020), han analizado combinaciones de RAP con aditivos rejuvenecedores, destacando que el beneficio ambiental depende del balance entre la reducción de materiales vírgenes y el impacto adicional del aditivo. Estos trabajos son relevantes porque presentan metodologías comparables a las empleadas en estudios con NFU.

En paralelo, estudios sobre mezclas tibias (*Warm Mix Asphalt*) realizados por Butt et al. (2014) y Kristjansdottir et al. (2007) evidencian que la reducción de temperatura de producción puede generar disminuciones significativas en consumo energético y emisiones, lo que refuerza la importancia de evaluar tecnologías de modificación bajo un enfoque del ciclo de vida.

En estudios comparativos de mezclas asfálticas con caucho reciclado y RAP, la

evidencia coincide en que los beneficios ambientales no son automáticos, dependen de cuanto material virgen se evita, cuánta energía adicional se introduce y, sobre todo, de los supuestos sobre desempeño.

El trabajo de Bressi et al. (2019) es clave porque compara alternativas como *Crumb Rubber* y RAP y muestra que el beneficio depende del equilibrio entre sustitución de materiales vírgenes y cargas adicionales (procesamiento, logística y energía). Su contribución es hacer visible que “reciclado” no equivale necesariamente a “menor impacto” si el sistema agrega consumos relevantes. En línea con eso, Zhang et al. (2020) introducen la variable de rejuvenecedores, que en muchos estudios se omite. La crítica aquí es metodológica, ya que cuando se agregan rejuvenecedores, el inventario ya no es comparable con estudios que solo comparan caucho vs control, porque el aditivo puede aumentar impactos en producción, aunque mejore trabajabilidad y potencialmente desempeño.

En este sentido Bressi et al. (2019) resaltan el papel del RAP (sustitución del ligante y agregados) como palanca de reducción; Zhang et al. (2020) muestran que esa reducción puede “competir” con el impacto añadido de aditivos rejuvenecedores, por lo que dos estudios pueden concluir cosas distintas, aunque ambos usen materiales reciclados.

En la tabla 2-1 se muestra un resumen de las últimas investigaciones realizadas con relación a los principales temas de esta investigación, mencionados en el estado que se desarrolla esta tesis: (1) Mezclas asfálticas con neumático, (2) Mezclas asfálticas polvo de neumático pretratado y (3) Análisis de ciclo de vida (ACV).

Tabla 2-1 Estado del arte.

No	Autor (es)	Tema	Documento / Referencia	Enfoque	Metodología	(1)	(2)	(3)
1	Bressi et al. (2019)	Análisis comparativo de mezclas con caucho y RAP	Bressi, S., et al. (2019). A Comparative Environmental Impact Analysis of Asphalt Mixtures Containing Crumb Rubber and Reclaimed Asphalt Pavement Using Life Cycle Assessment. Resources, Conservation and Recycling, 146, 50–59. <a href="https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.016">https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.016</a>	Impacto ambiental de mezclas con CR (Crumb Rubber) o neumático molido y RAP	ACV ISO 14040	✓	✗	✓
2	Zhang et al. (2020)	ACV de mezclas con neumático reciclado y aditivos	Zhang, X., et al. (2020). Environmental assessment of crumb rubber modified asphalt mixtures with rejuvenators. The International Journal of Life Cycle Assessment, 25, 1275–1288. <a href="https://doi.org/10.1007/s11367-019-01696-y">https://doi.org/10.1007/s11367-019-01696-y</a>	Evaluación del impacto ambiental de aditivos rejuvenecedores y mezclas asfálticas con neumático vía húmeda.	ACV ISO 14040	✓	✗	✓
3	Zhengyin et al. (2021)	Evaluación ACV de pavimentos con caucho reciclado	Zhengyin, L., et al. (2021). Life Cycle Assessment of Asphalt Pavements Using Crumb Rubber. Asphalt Plus. Disponible en: <a href="https://asphaltplus.com/wp-content/uploads/2021/07/LCA-of-asphalt-pavements-using-crumb-rubber_Zhengyin.pdf">https://asphaltplus.com/wp-content/uploads/2021/07/LCA-of-asphalt-pavements-using-crumb-rubber_Zhengyin.pdf</a>	Impactos climáticos y energéticos de mezclas con CR (Crumb Rubber) o neumático molido	ACV con indicadores cambio climático	✗	✗	✓
4	Morales et al. (2021)	Sostenibilidad de mezclas con caucho en pavimentos	Morales, A., et al. (2021). Life Cycle Assessment of Rubber Modified Asphalt. <a href="https://www.researchgate.net/publication/350345678_Life_Cycle_Assessment_of_Rubber_Modified_Aspphalt">https://www.researchgate.net/publication/350345678_Life_Cycle_Assessment_of_Rubber_Modified_Aspphalt</a>	Evaluación ciclo de vida y emisiones de mezclas con neumático por vía seca y húmeda	ACV basado en ISO 14040	✓	✗	✓
5	Garcilazo et al. (2022)	Impacto ambiental de mezclas asfálticas con caucho	Garcilazo, J. R., et al. (2022). Life cycle assessment of hot mix asphalt with crumb rubber modifier. Journal of Cleaner Production, 338, 130574. <a href="https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130574">https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130574</a>	Evaluación ambiental de pavimentos sostenibles en mezclas con CR (Crumb Rubber) o neumático molido	ACV según ISO 14040	✓	✗	✓
6	Siverio Lima et al. (2022)	Evaluación ambiental de mezclas asfálticas con caucho	Siverio Lima, J., et al. (2022). Life Cycle Assessment of Innovative Asphalt Mixtures Made with Crumb Rubber for Impact-Absorbing Pavements. Sustainability, 14(22), 14798. <a href="https://doi.org/10.3390/su142214798">https://doi.org/10.3390/su142214798</a>	Impacto ambiental en pavimentos absorbentes con mezclas con CR (Crumb Rubber) o neumático molido	ACV ISO 14040, duración vida útil	✓	✗	✓
7	Kumar et al. (2022)	ACV y análisis económico de pavimentos con caucho reciclado	Kumar, A., et al. (2022). Life Cycle and Economic Assessment of Rubber Modified Asphalt Pavements. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 101, 103154. <a href="https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103154">https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103154</a>	ACV y costo-beneficio para pavimentos sostenibles	ACV ISO 14040 + análisis económico	✓	✗	✓
8	Silva et al. (2022)	ACV comparativo de mezclas con neumático y polímeros	Silva, F., et al. (2022). Comparative Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures Modified with Polymers and Rubber. Cerâmica, 68(374), 106-114. <a href="https://doi.org/10.1590/0366-69132022683742364">https://doi.org/10.1590/0366-69132022683742364</a>	Comparación ambiental entre mezclas con polímeros	ACV ISO 14040	✓	✗	✓
9	Liu et al. (2023)	Estudio de ACV para mezclas asfálticas con neumático	Liu, Y., et al. (2023). Environmental and economic assessment of crumb rubber modified asphalt mixtures. Journal of Cleaner Production, 399, 136374. <a href="https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136374">https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136374</a>	Evaluación de impacto ambiental y económico y economía circular	ACV, análisis multi-criterio	✓	✗	✓
10	Jiménez del Barco-Carrión et al. (2023)	Evaluación ambiental de mezclas con polvo de neumático.	Jiménez del Barco-Carrión, I., et al. (2023). Environmental assessment of asphalt mixtures with digested tire rubber powder. Journal of Cleaner Production, 389, 136267. <a href="https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136267">https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136267</a>	Análisis de sostenibilidad en pavimentos en mezclas <b>Enfoque de la cuna a la puerta (Cradle to Gate) con información teórica</b>	ACV ISO 14040,	✓	✓	✓
	Tesis	<b>Evaluación ambiental de mezclas con polvo de neumático pretratado. Enfoque de la cuna a la tumba (Cradle to Grave)</b>	<b>Tesis Propuesta de investigación</b>	<b>Análisis de sostenibilidad en mezclas con polvo de neumático pretratado. Enfoque de la cuna a la tumba (Cradle to Grave) y evaluando casos estudio.</b>	<b>ACV ISO 14040. Software LCA Pave</b> <b>Casos estudio en México</b>	✓	✓	✓

Fuente: Elaboración propia.

### 3. Fundamentación teórica

Las principales preocupaciones ambientales asociadas a la infraestructura vial se han centrado históricamente en las emisiones generadas durante la producción y colocación de materiales, así como en sus posibles efectos sobre la salud humana y el medio ambiente. En años recientes, estas preocupaciones se han ampliado para incluir el impacto de las emisiones de GEI como uno de los principales factores que contribuyen al cambio climático. En este contexto, el uso de mezclas asfálticas modificadas con materiales reciclados ha cobrado relevancia como una estrategia para reducir el impacto ambiental del sector carretero.

Diversos estudios han documentado que la incorporación de caucho proveniente de NFU en mezclas asfálticas aporta beneficios tanto mecánicos como ambientales, entre los que destacan la mejora en la resistencia a la fatiga, la reducción del ruido y un aumento en la elasticidad del ligante asfáltico (Bahía et al., 2012; Zalman y Spacek, 2012; Skotnicki, Koba y Szydlo, 2012; Sousa et al., 2012). No obstante, la evaluación ambiental de estas tecnologías requiere de un sustento teórico sólido que permita comprender su comportamiento y sus implicaciones a lo largo del ciclo de vida.

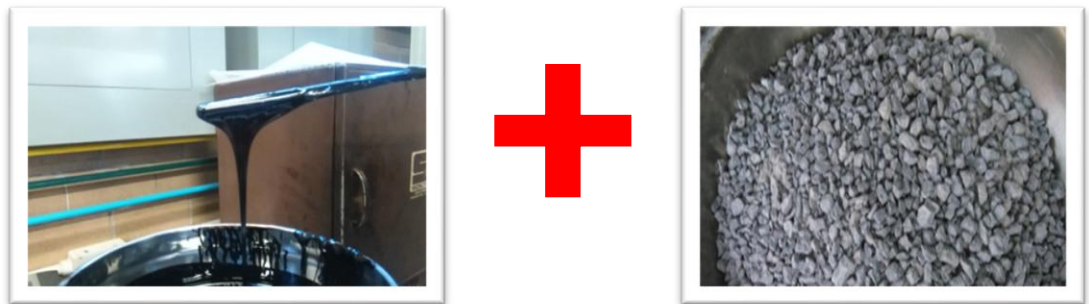
En este capítulo se expone la fundamentación teórica que sustenta el desarrollo de la investigación, este se estructura en tres apartados fundamentales: en primer lugar, se describen las mezclas asfálticas, sus componentes y las tecnologías de adición de NFU. Posteriormente, se analiza el polvo de neumático pretratado, abordando su origen, propiedades y aplicaciones en infraestructura vial. Finalmente, se desarrolla el marco conceptual del análisis de ciclo de vida (ACV), incluyendo las normas ISO aplicables, las etapas de ciclo, el papel del CO<sub>2</sub> equivalente como indicador ambiental y los softwares especializados utilizados en este tipo de evaluaciones.

### 3.1 Mezclas asfálticas

#### 3.1.1 Definición y componentes básicos

Las mezclas asfálticas son materiales compuestos utilizados principalmente en la construcción de carpetas de rodadura, conformadas por un agregado pétreo (grava, arena y filler mineral), un ligante asfáltico de origen petrolero y, en algunos casos, aditivos que modifican sus propiedades físicas, mecánicas o ambientales (ver Figura 3-1). Su función principal es proporcionar resistencia estructural, flexibilidad y durabilidad frente a las cargas del tránsito y las condiciones climáticas.

Los agregados constituyen entre el 90.0 % y 95.0 % del peso total de la mezcla y aportan la estructura granular encargada de resistir los esfuerzos mecánicos. El ligante asfáltico actúa como agente cohesivo, permitiendo la adherencia entre partículas y aportando flexibilidad a la mezcla. Los aditivos, como polímeros, fibras o modificadores de caucho se emplean para mejorar el comportamiento frente a deformación permanente, fatiga, envejecimiento y humedad.



*Figura 3-1 Componentes básicos de mezclas asfálticas (ligante asfáltico y agregados pétreos).*

Fuente: [pavementengineering.blogspot.com](http://pavementengineering.blogspot.com)

Las mezclas asfálticas pueden clasificarse según diversos criterios:

A) Fracciones de agregado utilizadas:

Pueden ser continuas (mezclas densas), discontinuas (mezclas tipo SMA o tipo *gap-graded*) o abiertas (mezclas drenantes) como se observa en la Figura 3-2.

B) Relación con la temperatura:

Se distingue entre mezclas en caliente (convencionales), mezclas tibias (*warm mix asphalt*) y mezclas en frío, dependiendo del rango de temperatura de fabricación y colocación.

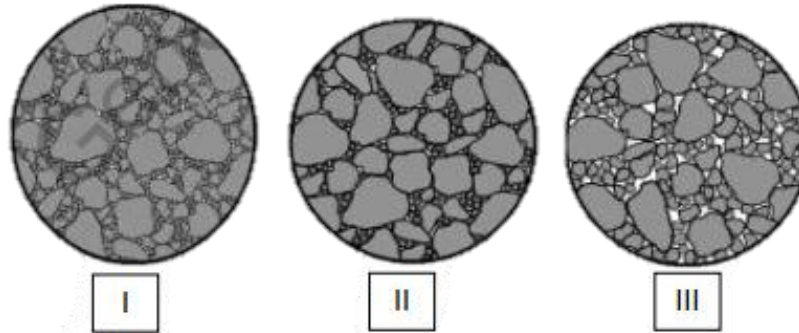


Figura 3-2 Tipos de mezclas asfálticas: I) Densa, II) SMA, III) Abierta.

Fuente: pavementengineering.blogspot.com

### 3.1.2 Relación entre diseño de mezcla y emisiones

El diseño de la mezcla asfáltica no solo determina su desempeño estructural, sino que también influye de manera directa en su impacto ambiental. Factores como el contenido de ligante, la densidad, la granulometría, el tipo de aditivos y la temperatura de producción afectan el consumo energético y, por ende, las emisiones asociadas a su fabricación y colocación.

Bahía y Davies (1995) y Bahía et al. (2012) señalan que las mezclas con mayor contenido de ligante o con materiales de mayor densidad suelen requerir mayor energía durante su producción. Asimismo, Lo Presti (2013) indica que la incorporación de modificadores de caucho puede alterar el balance energético del proceso, pero también mejorar la durabilidad, reduciendo la necesidad de mantenimiento y compensando el impacto inicial.

Desde una perspectiva ambiental, el diseño de mezcla se convierte en una herramienta clave para optimizar la huella de carbono, ya que una mezcla con mayor vida útil puede generar menores emisiones acumuladas a lo largo del ciclo de vida. Este enfoque es particularmente relevante cuando se incorporan materiales reciclados, como el polvo de neumático pretratado, cuyo efecto ambiental debe evaluarse más allá de la etapa inicial de producción.

### 3.1.3 Tipos y tecnologías de adición de NFU

El aprovechamiento del hule proveniente de neumáticos fuera de uso en mezclas asfálticas ha sido objeto de investigación y aplicación desde hace varias décadas, principalmente como una estrategia para la valorización de residuos y la mejora del desempeño mecánico de las mezclas. A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas tecnologías para incorporar el caucho a las mezclas asfálticas (ver Figura 3-3), las cuales se diferencian principalmente por el momento y la forma en que el hule interactúa con el ligante asfáltico. Las tecnologías más empleadas se clasifican en vía seca, vía húmeda, Terminal Blend y Tecnología RAR o polvo de neumático pretratado con asfalto, cada una con características, ventajas y limitaciones específicas.



Figura 3-3 Tipos de adición de NFU en las mezclas asfálticas de acuerdo con el orden cronológico de investigación.

Fuente: Elaboración propia.

a) Vía seca.

En la técnica de vía seca, el hule molido se incorpora directamente a la mezcla de agregados pétreos durante el proceso de fabricación, actuando como un componente adicional del agregado mineral. En este caso, el caucho no modifica químicamente el ligante asfáltico, sino que funciona principalmente como un modificador físico que influye en el comportamiento volumétrico y superficial de la mezcla.

Entre las principales ventajas de esta tecnología se encuentran su simplicidad operativa, la facilidad de implementación en plantas convencionales y su menor costo inicial, ya que no requiere equipos especiales ni modificaciones significativas al proceso de producción. No obstante, diversos estudios han señalado limitaciones importantes, como una interacción limitada entre caucho y el ligante asfáltico, lo que puede derivar en una dispersión no homogénea y en resultados variables en el desempeño mecánico. Olivera et al. (2012) indican que, aunque la vía seca puede mejorar ciertas propiedades, no alcanza el nivel de desempeño ni la estabilidad que se logra con procesos húmedos más controlados.

En conjunto, estas tecnologías evidencian la evolución en el aprovechamiento del caucho de NFU dentro en la ingeniería vial. La selección del proceso más adecuado depende de factores técnicos, económicos, logísticos y ambientales, así como del objetivo del proyecto.

b) Vía húmeda

La vía húmeda consiste en modificar previamente el ligante asfáltico mediante la incorporación del polvo de caucho bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de digestión y agitación. Este proceso permite una interacción más efectiva entre el caucho y el asfalto, dando lugar a un ligante modificado con mayor elasticidad, resistencia al envejecimiento y mejor comportamiento frente a temperaturas extremas.

Esta tecnología fue ampliamente desarrollada en Estados Unidos a partir de los trabajos de Charles McDonald en la década de 1960, bajo el concepto de *Asphalt Rubber*. En sus principales ventajas se encuentran las mejoras significativas en las

propiedades reológicas del ligante y el buen desempeño estructural de las mezclas. Sin embargo, su implementación presenta retos operativos, como la necesidad de equipos especializados, control estricto de viscosidad, tiempos limitados de almacenamiento y mayor consumo energético, lo que puede incrementar costos y emisiones si no se gestiona adecuadamente (Bahía et al., 2012; Lo Presti, 2013).

#### c) Terminal Blend

La tecnología *Terminal Blend* surge como una evolución de la vía húmeda, con el objetivo de resolver algunas de sus limitaciones logísticas. En este proceso, el caucho se mezcla con el asfalto en refinerías o terminales especializadas, generalmente sin agitación posterior, permitiendo que el hule se digiera y disperse completamente en el ligante antes de su transporte.

El producto resultante es un asfalto modificado homogéneo y estable, con mayor facilidad de almacenamiento y transporte a largas distancias. Entre sus ventajas destacan la estabilidad del ligante, la uniformidad del producto y una logística más eficiente en comparación con la vía húmeda tradicional. No obstante, algunos autores señalan que el grado de elasticidad puede ser inferior al de otros asfaltos con caucho altamente reactivos y que el control del proceso en refinería es crítico para garantizar un desempeño adecuado (Pérez – Martínez et al., 2014; Lo Presti, 2013).

#### d) Polvo de neumático pretratado.

La tecnología RAR (*Reacted and Activated Rubber*) representa una alternativa reciente para la incorporación del NFU en mezclas asfálticas. En este proceso, el caucho es sometido previamente a un tratamiento térmico y químico que lo activa con el asfalto, permitiendo su incorporación directa en planta como un aditivo sólido, sin necesidad de equipos especiales ni procesos prolongados de digestión.

Entre sus principales ventajas se encuentran la facilidad de manejo, la compatibilidad con plantas convencionales, la estabilidad del material y la posibilidad de obtener mejoras en el desempeño mecánico del ligante y de la mezcla. Además de reducciones en los espesores de carpeta (García-Pérez et al., 2021) estudios que se hablarán a detalle en los siguientes capítulos.

### 3.2 Polvo de neumático pretratado

El polvo de neumático pretratado con asfalto, creado a base de la tecnología RAR no corresponde únicamente a caucho molido convencional, sino que se trata de un material compuesto, diseñado a partir de una combinación optimizada de distintos componentes que actúan de manera conjunta durante su incorporación en mezclas asfálticas. De manera general, este material está conformado por ligante asfáltico, caucho proveniente de neumáticos fuera de uso y materiales de relleno como fillers, los cuales se integran bajo condiciones controladas de activación. El caucho molido constituye la fracción principal del material y aporta las propiedades elastómericas características, mientras que el ligante asfáltico y los fillers cumplen una función clave en la estabilización, compatibilidad y activación del sistema. La interacción entre estos componentes permite obtener un producto final con características diferenciadas respecto al caucho molido tradicional (Ver figura 3-4).



*Figura 3-4 Componentes principales del polvo de neumático pretratado utilizando la tecnología Reacted and Activated Rubber.*

Fuente: Akhavan, Kolahchi y Chang (2023).

#### 3.2.1 Tecnología RAR (Reacted and Activated Rubber)

El polvo de neumático pretratado como se mencionó anteriormente es un material obtenido a partir del reciclaje de NFU, sometido a un proceso de activación térmica y química que mejora su compatibilidad con el ligante asfáltico. A diferencia del caucho molido convencional, este material puede integrarse directamente en la mezcla sin requerir digestión adicional en planta.

Este polvo utiliza la tecnología RAR (*Reacted and Activated Rubber*), la cual se basa en la modificación previa del caucho proveniente de NFU mediante un proceso de pretratamiento térmico y químico, cuyo objetivo es mejorar su compatibilidad y desempeño al incorporarse en mezclas asfálticas. A diferencia del caucho molido convencional, el polvo de neumático utilizado en esta tecnología no se incorpora en su estado original, sino que es sometido a un proceso de activación y reacción controlada, lo que justifica su denominación.

Desde el punto de vista químico, el caucho de los neumáticos es un material polimérico vulcanizado, en donde las cadenas elastómericas están entrecruzadas o reticuladas con azufre, responsables de su elevada elasticidad y estabilidad. Sin embargo, esta estructura reticulada limita su interacción con el ligante asfáltico cuando se incorpora sin tratamiento previo, ya que dificulta su dispersión y reduce su compatibilidad con los componentes del asfalto.

En la tecnología RAR, el polvo de neumático es sometido a un proceso de activación o pretratamiento, en el que se combina con asfalto y otros aditivos de origen mineral. Este tratamiento favorece condiciones más adecuadas para su incorporación al ligante asfáltico y, de acuerdo con la literatura sobre caucho activado o devulcanizado en asfaltos, puede mejorar la compatibilidad entre el caucho y el asfalto y favorecer una dispersión más uniforme dentro de la matriz asfáltica. No obstante, estas afirmaciones deben corroborarse experimentalmente mediante ensayos de estabilidad de almacenamiento, análisis morfológicos y caracterización reológica.

De manera simultánea, el proceso induce una reacción parcial del caucho, principalmente mediante la ruptura controlada de algunos enlaces de azufre presentes en la red polimérica. Esta reacción parcial, también conocida como predigestión, reduce la rigidez de la estructura vulcanizada y genera fracciones poliméricas más compatibles con los componentes aromáticos y resinosos del asfalto. A diferencia de otros procesos de modificación, esta reacción ocurre antes de la incorporación del caucho en planta, evitando la necesidad de tiempos prolongados de digestión durante la fabricación de la mezcla.

Como consecuencia de este pretratamiento, el polvo de neumático pretratado se comporta como un aditivo sólido estable, capaz de incorporarse directamente en plantas de mezcla convencionales, manteniendo una distribución homogénea y aportando elasticidad al ligante sin comprometer la estabilidad del proceso. Este comportamiento químicamente modificado explica las ventajas operativas, mecánicas y ambientales asociadas a la tecnología RAR, así como su potencial para mejorar el desempeño de las mezclas asfálticas y optimizar su impacto ambiental, aspectos que se analizan con mayor detalle en los capítulos posteriores de esta investigación.

### *3.2.2 Proceso de obtención y fabricación*

El comportamiento diferenciado del polvo de neumático pretratado en mezclas asfálticas se explica, en primera instancia, por los principios químicos asociados a su activación y reacción controlada. No obstante, para comprender su aplicación práctica, resulta necesario describir su origen y el proceso industrial mediante el cual se obtiene este material, así como las propiedades físicas y químicas resultantes que condicionan su desempeño en la construcción vial.

El polvo de neumático pretratado tiene su origen en el reciclaje de NFU, los cuales constituyen uno de los residuos sólidos de mayor complejidad debido a su volumen, durabilidad y composición polimérica. Los neumáticos están formados principalmente por elastómeros vulcanizados, cargas minerales, negro de humo, acero y fibras textiles, lo que hace indispensable un proceso de separación y acondicionamiento previo para su aprovechamiento en aplicaciones viales (Lo Presti, 2013).

El proceso de obtención del polvo de neumático pretratado inicia con la recolección y selección de los NFU, asegurando que el material esté libre de contaminantes externos. Posteriormente, los neumáticos son sometidos a procesos mecánicos de trituración y granulación, en los cuales se reduce progresivamente su tamaño mediante trituradoras primarias y secundarias. Durante esta etapa, se lleva a cabo

la separación de componentes metálicos y textiles, generalmente mediante sistemas magnéticos y de aspiración, con el fin de obtener un material predominante polimérico. Una vez separado el caucho, este se somete a un proceso de pulverización controlada, que permite obtener partículas finas con una granulometría específica, usualmente menor a 1 mm. El control del tamaño de partícula es un aspecto fundamental, ya que influye directamente en la homogeneidad del material y en su comportamiento durante la fabricación de mezclas asfálticas. Posteriormente, el material pulverizado es sometido a un tratamiento previo de acondicionamiento, el cual distingue al polvo de neumático pretratado con asfalto del caucho molido convencional (ver Figura 3-5). Este tratamiento como ya se explicó anteriormente consiste en un proceso industrial controlado que combina condiciones térmicas y la incorporación de agentes activadores, con el objetivo de preparar el material para su uso directo en mezclas asfálticas. Como resultado de este proceso, se obtiene un aditivo sólido pretratado, con características controladas de tamaño de partícula, estabilidad y facilidad de manejo. Este material puede ser transportado, almacenado y dosificado de manera similar a otros aditivos sólidos empleados en plantas de asfalto, sin requerir equipos especiales ni procesos adicionales de digestión en sitio, lo que representa una ventaja operativa significativa frente a otras tecnologías de incorporación de NFU (García – Pérez et al.,2021).



A)



B)

*Figura 3-5 A) Caucho pulverizado y B) Polvo de neumático pretratado.*

Fuente: Elaboración propia.

En México, el desarrollo de este tipo de materiales se lleva a cabo en plantas industriales especializadas en el reciclaje y acondicionamiento de NFU, las cuales cuentan con sistemas de trituración, pulverización, separación de componentes y tratamiento previo del caucho. Estas instalaciones permiten procesar grandes volúmenes de NFU de manera controlada, garantizando un producto homogéneo y con propiedades adecuadas para su uso en mezclas asfálticas (ver Figura 3-6), la operación de plantas de este tipo representa un avance significativo en la valorización de residuos, al integrar procesos industriales que cumplen con criterios de control de calidad, seguridad y desempeño ambiental, además de contribuir al desarrollo de tecnologías nacionales orientadas a la sostenibilidad de la infraestructura vial.



*Figura 3-6 Planta industrial para el procesamiento y acondicionamiento del caucho para la obtención del polvo de neumático pretratado.*

Fuente: Elaboración propia.

### *3.2.3 Propiedades físicas y químicas*

Como resultado del proceso de obtención y acondicionamiento previo, el polvo de neumático pretratado presenta un conjunto de propiedades físicas y químicas que lo diferencian de manera significativa del caucho convencional. Desde el punto de vista físico, una de las características más relevantes es su granulometría fina y controlada, generalmente inferior a 1 mm. Este tamaño de partícula favorece una distribución homogénea del material dentro de la mezcla asfáltica y reduce el riesgo de segregación durante el proceso de producción. Además, este polvo presenta una superficie específica elevada, lo que incrementa el área de contacto con el ligante asfáltico y mejora la interacción entre ambos componentes (Lo Presti, 2013).

Otra propiedad física importante es su capacidad de hinchamiento controlado al entrar en contacto con el asfalto caliente. A diferencia del caucho molido sin tratamiento, cuyo hinchamiento puede ser excesivo o poco uniforme, el polvo pretratado muestra un comportamiento más estable, lo que contribuye a mantener la trabajabilidad de la mezcla y a evitar incrementos indeseados de viscosidad durante la producción. Este comportamiento facilita su incorporación en plantas convencionales sin requerir modificaciones operativas significativas.

En términos de estabilidad térmica, el polvo de neumático pretratado presenta un comportamiento favorable frente a las temperaturas de fabricación de mezclas asfálticas en caliente, manteniendo sus propiedades sin degradarse ni generar emisiones adicionales durante el proceso. Esta estabilidad permite su uso en rangos térmicos habituales de producción, contribuyendo a un proceso más controlado y repetible.

Desde el punto de vista químico, este polvo se caracteriza por una mayor compatibilidad con el ligante asfáltico, derivado de la modificación previa de su estructura polimérica. Esta compatibilidad se traduce en una mejor dispersión del caucho dentro de la matriz asfáltica, reduciendo la formación de fases separadas y favoreciendo un comportamiento más uniforme del ligante modificado. Diversos estudios han señalado que esta interacción mejorada se asocia con un incremento

en la elasticidad del ligante y una reducción de su susceptibilidad térmica (Bahía et al., 2012; Sousa et al., 2012).

Asimismo, el polvo de neumático pretratado contiene una mayor proporción de componentes activos, como resinas y aceites presentes en el caucho tratado, los cuales facilitan su integración con los componentes aromáticos del asfalto. Esta característica contribuye a mejorar la resistencia al envejecimiento del ligante, ya que limita la oxidación prematura y favorece un comportamiento más estable a lo largo del tiempo.

En conjunto, las propiedades físicas y químicas del polvo de neumático pretratado permiten que este material actúe de manera eficiente como modificador del ligante asfáltico, aportando elasticidad, estabilidad y durabilidad sin afectar negativamente la trabajabilidad de la mezcla.

#### *3.2.4 Aplicaciones en construcción vial*

La incorporación de polvo de neumático pretratado en la construcción vial se ha consolidado como una alternativa técnica viable para mejorar el desempeño de las mezclas asfálticas, al mismo tiempo que contribuye a objetivos de sostenibilidad, reciclaje y economía circular. Diversos estudios internacionales y aplicaciones en proyectos reales han validado su uso, demostrando que este material puede integrarse de manera eficiente en procesos constructivos convencionales sin comprometer la calidad ni la durabilidad de la carpeta asfáltica.

Una de las principales aplicaciones del polvo de NFU pretratado es en la fabricación de mezclas asfálticas modificadas, particularmente en mezclas discontinuas tipo SMA (*Stone Mastic Asphalt*) y en mezclas densas, donde su incorporación mejora la cohesión del ligante, incrementa la resistencia al envejecimiento y favorece una distribución más uniforme de tensiones dentro de la mezcla. Estas mejoras se traducen en un mejor comportamiento frente a cargas repetidas y en una reducción de las intervenciones de conservación a lo largo de la vida útil de la carpeta asfáltica. Debido a su capacidad para modificar el ligante asfáltico sin incrementar de manera

significativa la rigidez global de la mezcla, el polvo de neumático pretratado permite diseñar carpetas asfálticas de menor espesor con alto desempeño estructural. García-Pérez et al. (2021) reportan la posibilidad de reducir el espesor de carpeta de 8 a 7 cm sin afectar la resistencia a la fatiga ni el desempeño esperado, lo que presenta un ahorro en el consumo de materiales y una disminución del impacto ambiental asociado a la producción y colocación de la mezcla.

Otra aplicación relevante se observa en la reducción de roderas y deformaciones permanentes, especialmente en zonas sometidas a altas cargas de tránsito y condiciones térmicas elevadas. El comportamiento elástico del acucho activado contribuye a disipar tensiones y a mantener la estabilidad volumétrica de la mezcla, mejorando su resistencia al ahuellamiento. Arabani y Azarhoosh (2012) documentan mejoras significativas en este tipo de desempeño al emplear mezclas modificadas con caucho tratado.

Asimismo, el uso de mezclas asfálticas con neumático puede contribuir a la reducción del ruido generado por el tránsito, debido a la combinación de una textura superficial más flexible y a la capacidad de absorción acústica del material elastomérico. Esta característica resulta particularmente favorable en entorno urbanos o zonas con alta sensibilidad al ruido, donde el control acústico constituye un criterio relevante de diseño.

Desde una perspectiva ambiental, la aplicación de este tipo de mezclas favorece la valorización de residuos al reincorpora neumáticos fuera de uso en la infraestructura vial, reduciendo su disposición final y disminuyendo la demanda de modificadores sintéticos o poliméricos de origen petroquímico. Además, diversos estudios han señalado que las mejoras en el desempeño mecánico se asocian con una mayor vida a fatiga de la carpeta asfáltica, lo que implica menores requerimientos de mantenimiento y, por ende, beneficios ambientales indirectos. Investigaciones desarrolladas por Lu et al. (2019) y Nahvi et al. (2019) respaldan estas observaciones al reportar incrementos significativos en la durabilidad de mezclas asfálticas modificadas con caucho tratado.

### 3.3 Análisis de ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida (ACV), también conocido como *Life Cycle Assessment* (LCA), es una metodología estandarizada que permite evaluar de forma integral los impactos ambientales potenciales de un producto, proceso o servicio a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. En el contexto de infraestructura vial y, específicamente, en el análisis de mezclas asfálticas, el ACV resulta especialmente útil para identificar etapas críticas del sistema y comparara alternativas tecnológicas bajo criterios ambientales cuantificables.

Desde un punto de vista conceptual, el ACV se asocia con la identificación y cuantificación de consumos de materiales y energía, así como de emisiones y residuos, con el propósito de evaluar impactos ambientales y orientar mejoras en el sistema evaluado. Esta lógica lo convierte en una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en proyectos de infraestructura que buscan incorporar estrategias de sostenibilidad y reducción de emisiones.

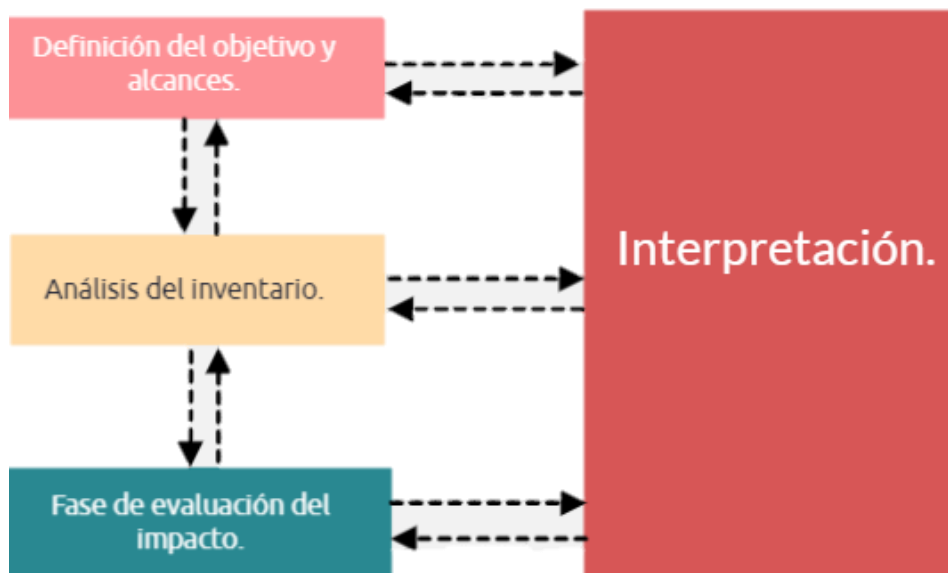
El origen del análisis de ciclo de vida (ACV) se remota a finales de la década de 1960 y principios de 1970, en el contexto de estudios energéticos y de optimización de recursos impulsados por la industria y organismos gubernamentales, especialmente en Estados Unidos y Europa. Posteriormente, su desarrollo metodológico se consolidó a través de la normalización internacional mediante normas ISO 14040 y 14044, que establecen su marco conceptual y procedimental. De manera resumida, el ACV consiste en cuatro fases principales: definición del objetivo y alcance, análisis de inventario (recopilación de entradas y salidas del sistema), evaluación de impactos ambientales e interpretación de resultados, lo que permite una visión sistemática y comparable del desempeño ambiental de distintas alternativas.

#### 3.3.1 Norma ISO 14040:2006

La norma ISO 14040 establece el marco general para desarrollar un estudio de ACV

de manera coherente, reproducible y estructurada. Esta norma define cuatro fases principales: (1) Definición del objetivo y alcance, (2) Análisis del inventario, (3) Evaluación del impacto y (4) Interpretación de los resultados. La interacción entre esas fases es iterativa, ya que los resultados obtenidos pueden requerir ajustes en el alcance, en los datos de inventario o en los supuestos de modelación, con el fin de mejorar la consistencia del estudio (ver Figura 3-7).

- 1) Definición del objetivo y alcance: Delimita el propósito del estudio, establece la unidad funcional y fija los límites del sistema.
- 2) Inventario del ciclo de vida (LCI): Integra datos cuantitativos sobre flujos de materiales y energía, así como emisiones y residuos asociados.
- 3) Evaluación del impacto (LCIA): Convierte el inventario en indicadores ambientales, entre ellos el Potencial de Calentamiento Global (GWP), además de otras categorías como acidificación o eutrofización, entre otras.
- 4) Interpretación: Permite analizar los resultados, identificar las etapas críticas y verificar coherencia con el objetivo planteado.



*Figura 3-7 Estructura del Ciclo de Vida.*

Fuente: Adaptada de ISO 14040:2006.

### 3.3.2 Norma ISO 21930:2017 – Sostenibilidad en la construcción

La norma ISO 21930:2017 complementa los lineamientos establecidos en la ISO 14040 y 14044, enfocándose específicamente en la evaluación ambiental de productos y sistemas utilizados en la construcción. Esta norma proporciona un marco metodológico que permite estructurar los estudios de análisis de ciclo de vida mediante la definición de módulos y etapas estandarizadas, facilitando la comparabilidad entre diferentes materiales, procesos y alternativas constructivas. Uno de los principales aportes de la ISO 21930 es la definición del enfoque de evaluación del ciclo de vida, los cuales determinan el alcance del análisis y las etapas que se incluyen dentro del sistema evaluado. Estos enfoques se expresan comúnmente mediante términos en inglés ampliamente aceptados en la literatura técnica, los cuales describen el inicio y el fin del sistema analizado.

El enfoque *Cradle to Grave* (de la cuna a la tumba) considera todas las etapas del ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. En este contexto, el término *Cradle* (cuna) hace referencia al origen de los materiales naturales, mientras que *Grave* (tumba) representa el final de la vida útil del producto, incluyendo procesos como demolición, transporte, tratamiento de residuos y disposición final. Este enfoque permite evaluar el impacto ambiental acumulado a lo largo de toda la vida del sistema y es especialmente adecuado para estudios comparativos de sostenibilidad en infraestructura vial.

Otro enfoque ampliamente utilizado es *Cradle to Gate* (de la cuna a la puerta), el cual considera únicamente las etapas que van desde la extracción de materias primas hasta la salida del producto de la planta de fabricación. En este caso, *Gate* (puerta) representa el punto en el que el producto está listo para su distribución o uso, sin incluir las fases de construcción, uso o fin de vida. Este enfoque es común en estudios de productos industriales y en Declaraciones Ambientales de Producto (EPD o DAP), pero no captura los impactos asociados al desempeño en servicio. Asimismo, la norma contempla también el enfoque *Gate to Gate* (de puerta a puerta), que evalúa únicamente una etapa específica del proceso productivo, por

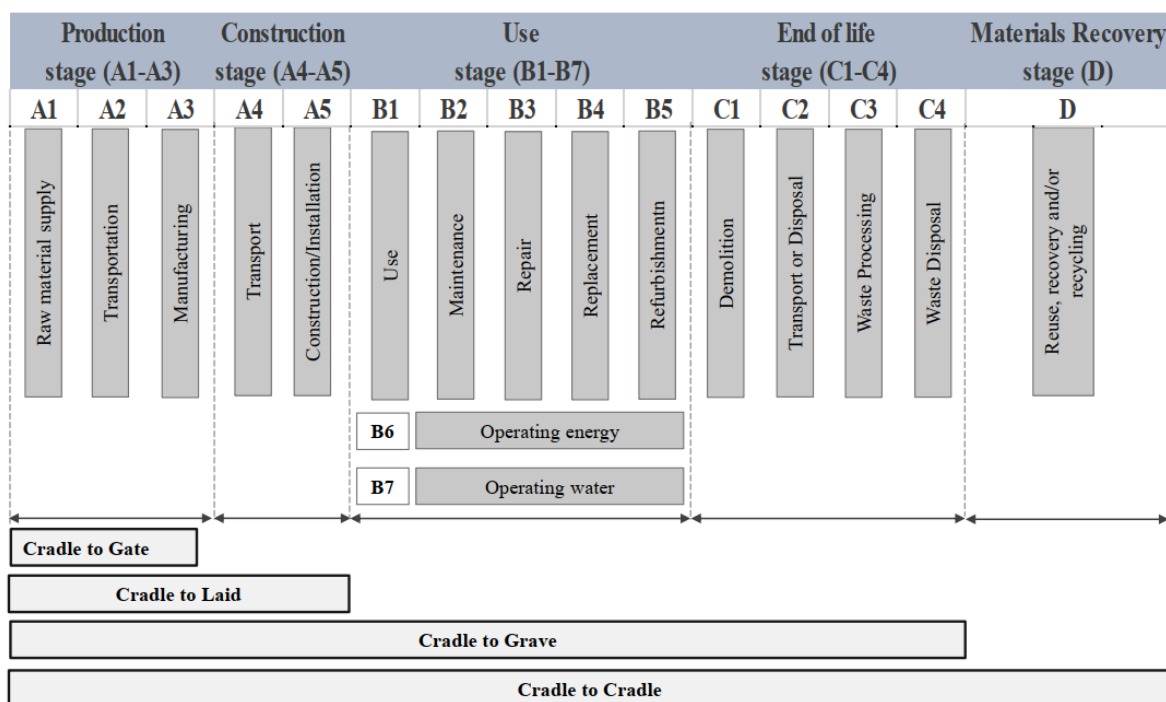
ejemplo, la fabricación de un material dentro de una planta. Este enfoque resulta útil para análisis internos de procesos o para identificar oportunidades de mejora en etapas puntuales, aunque no permite una comparación integral del impacto ambiental del producto completo.

Un enfoque adicional es *Cradle to Cradle* (de la cuna a la cuna), el cual extiende el análisis más allá del fin de vida tradicional, considerando la recuperación, reutilización o reciclaje del material como insumo para un nuevo ciclo productivo. En este caso, el concepto de *Grave* se reemplaza por un nuevo *Cradle*, promoviendo los principios de economía circular. Este enfoque es especialmente relevante cuando se analizan materiales con alto potencial de reciclaje, como las mezclas asfálticas. La ISO 21930 estructura estos enfoques mediante módulos normalizados, comúnmente identificados como A, B, C y D, los cuales representan las distintas fases del ciclo de vida (ver Figura 3-8):

- A1– A3 (Producción): Extracción de materias primas, transporte y fabricación.
- A4 – A5 (Construcción): Transporte al sitio y colocación.
- B1 – B7 (Uso): Uso, mantenimiento, reparación y reemplazo.
- C1 – C4 (Fin de vida): Demolición, transporte, tratamiento y disposición final.
- D (Beneficios más allá del sistema): Reciclaje o reutilización que genera beneficios en ciclos posteriores.

La selección del enfoque de evaluación depende del objetivo del estudio y del nivel de detalle requerido. En el caso de la presente investigación, se adopta el enfoque *Cradle to Grave*, ya que permite evaluar de manera integral el impacto ambiental de las mezclas asfálticas considerando todas las etapas relevantes, desde la producción de materiales hasta el fin de vida de la carpeta asfáltica, lo cual resulta coherente con los objetivos de comparación planteados.

Figura 3-8 Etapas del ciclo de vida.



Fuente: Carbono incorporado en los servicios de construcción: una metodología de cálculo. CIBSE TM 65; Chartered Institution of Building Services Engineers, Londres, Reino Unido 2021.

### 3.3.3 Etapas del Ciclo de Vida

En estudios orientados a infraestructura vial, la FHWA propone una estructura operativa para capturar de manera más detallada los impactos asociados al ciclo de vida. En términos generales, esta estructura incluye decisiones de diseño, producción, construcción, uso, mantenimiento y fin de vida (ver Figura 3-9), lo cual es particularmente relevante cuando se incorporan materiales alternativos, pues sus beneficios ambientales pueden observarse en más de una etapa (por ejemplo, ahorro de material, reducción de mantenimiento o facilidades de reciclaje).

De forma sintética, las etapas se describen como:

1. Producción de materiales: Extracción, procesamiento y fabricación de agregados, ligante y aditivos; suele tener carga ambiental alta por consumo

energético y emisiones industriales.

2. Diseño de mezcla asfáltica: Selección de materiales y definición de propiedades que cumplan con el diseño esperado; decisiones con efecto directo en impactos posteriores.
3. Construcción: Transporte, tendido, compactación y uso de maquinaria; incluye consumo de combustibles e impactos asociados a obra.
4. Uso: Etapa en servicio; puede incluir impactos indirectos (por ejemplo, efectos en resistencia al rodamiento o frecuencia de intervenciones).
5. Mantenimiento y conservación: Actividades para preservar funcionalidad; su frecuencia depende del desempeño inicial de la mezcla y condiciones de operación.
6. Fin de vida útil: Retiro, transporte, tratamiento y disposición; puede considerar recuperación de materiales mediante reciclaje como el fresado.



Figura 3-9 Etapas del ciclo de vida de los pavimentos.

Fuente: Elaboración propia adaptada de la FHWA

### *3.3.4 Softwares para el Análisis de Ciclo de Vida (ACV)*

Para llevar a cabo un análisis de ciclo de vida (ACV) conforme a las normas internacionales y con base en datos confiables, es necesario apoyarse en herramientas informáticas especializadas. Estos softwares permiten modelar sistemas complejos, organizar inventarios, calcular impactos ambientales y presentar resultados de forma estandarizada y reproducible.

Existen múltiples opciones con diferentes características, enfoques y niveles de complejidad. A continuación, se presentan algunos de los softwares más relevantes identificados en el marco de esta investigación, seleccionados por su utilidad en el análisis ambiental de procesos relacionados con la infraestructura vial y mezclas asfálticas:

#### A) LCA Pave

Desarrollado por la Federal Highway Administration (FHWA) de los Estados Unidos, LCA Pave está diseñado específicamente para analizar el ciclo de vida de pavimentos. Su enfoque sectorial, centrado en mezclas asfálticas, permite modelar detalladamente etapas como producción de materiales, construcción, uso, mantenimiento y fin de vida útil. Además, utiliza bases de datos públicas de materiales y procesos, lo que lo hace ideal para fines comparativos, de formación y toma de decisiones. Por estas razones, fue elegido como herramienta principal en el presente estudio.

#### B) OpenLCA

OpenLCA es un software de código abierto y gratuito, desarrollado por GreenDelta (Alemania) en 2006. Su flexibilidad lo convierte en una de las herramientas más utilizadas en instituciones académicas, gubernamentales y ONG. Permite una modelación detallada del ACV, con clasificación por procesos, categorías de impacto y localización geográfica. Es compatible con bases de datos como Ecoinvent y AGRIBALYSE, y facilita el desarrollo de análisis personalizados en proyectos de sostenibilidad.

#### C) Umberto LCA+

Este software fue creado por el Instituto de Informática Ambiental de Hamburgo (IFU Hamburg) en 1998 y es ampliamente reconocido en la industria por su capacidad para modelar flujos de energía y materiales mediante esquemas visuales. Umberto LCA+ es muy utilizado por consultores, empresas e investigadores para desarrollar análisis comparativos, optimización de procesos y generación de reportes de sustentabilidad. Su enfoque intuitivo permite representar gráficamente los flujos del sistema evaluado.

#### D) SimaPro

Desarrollado por la empresa PRé Sustainability en los Países Bajos, SimaPro es uno de los programas más consolidados en el ámbito del ACV. Con más de 30 años en el mercado y usuarios en más de 80 países, se caracteriza por su profundidad analítica y compatibilidad con una amplia gama de metodologías de evaluación de impacto. Es especialmente útil para generar Declaraciones Ambientales de Producto (EPD), evaluar huellas de carbono y realizar análisis multicriterio de sostenibilidad.

Cada una de estas herramientas posee ventajas particulares, y su elección depende del tipo de estudio, los recursos disponibles y el nivel de especialización requerido. En esta tesis, se optó por LCA Pave debido a su enfoque especializado en pavimentación, facilidad de uso y utilidad para simular comparaciones entre diferentes mezclas asfálticas bajo criterios ambientales.

#### *3.3.5 Selección del software de ACV*

Derivado de la variedad que existe sobre los diferentes programas y eco calculadoras, para esta investigación se llevó a cabo un proceso riguroso de selección de la herramienta informática adecuada para el estudio, basado en una evaluación comparativa entre los softwares y programas más utilizados en el análisis de ciclo de vida en el sector vial. La elección final fue realizada tras una revisión exhaustiva de la literatura técnica, las características funcionales de cada programa y las experiencias de uso documentadas en estudios previos. Para

facilitar el análisis, se desarrolló una matriz de decisión que contempló seis criterios de evaluación clave, a los cuales se asignaron ponderaciones en función de su relevancia para los objetivos específicos de este estudio como se observa en la Tabla 3-1.

Cuatro herramientas informáticas fueron evaluadas y comparadas: LCA Pave, OpenLCA, Umberto y SimaPro, a cada uno se le asignó una puntuación del 1 al 10 por criterio, con base en su desempeño relativo tras una revisión exhaustiva de la literatura técnica, las características funcionales de cada programa y las experiencias de uso documentadas en estudios previos mencionados en capítulos anteriores. Posteriormente, se calcularon los puntajes ponderados para obtener un valor total y se obtuvieron los resultados del análisis comparativo como se muestra en las siguientes tablas:

*Tabla 3-1 Criterios y ponderaciones asignadas para la comparativa.*

Criterio	Peso	LCA Pave	Open LCA	Umberto	SimaPro
Costo	30	7	10	6	5
Enfoque en mezclas asfálticas y pavimentos	15	9	6	7	9
Facilidad de uso	15	7	6	6	6
Calidad bases de datos	15	8	8	7	9
Precisión resultados y cálculos	15	7	7	7	9
Prestigio	10	7	7	6	10

Fuente: Elaboración propia.

*Tabla 3-2 Resultados finales de la comparativa entre softwares.*

Criterio	Peso	LCA Pave	Open LCA	Umberto	SimaPro
Costo	30	21.0	30.0	18.0	15.0
Enfoque en mezclas asfálticas y pavimentos	15	13.5	9.0	10.5	13.5
Facilidad de uso	15	10.5	9.0	9.0	9.0
Calidad bases de datos	15	12.0	12.0	10.5	13.5
Precisión resultados y cálculos	15	10.5	10.5	10.5	13.5
Prestigio	10	7.0	7.0	6.0	10.0
Total	100	74.5	77.5	64.5	74.5

Fuente: Elaboración propia.

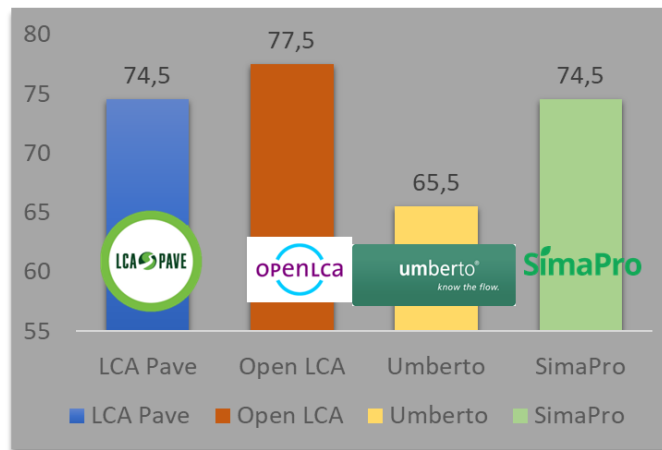


Figura 3-10 Resultados de la comparativa de los softwares para ACV.

Fuente: Elaboración propia.

La matriz de decisión mostró los puntajes de las cuatro herramientas informáticas evaluadas: LCAPave, OpenLCA, Umberto y SimaPro, cada uno de estos programas fue evaluado en función del costo, enfoque específico en pavimentos y mezclas asfálticas, facilidad de uso, calidad de las bases de datos disponibles, precisión de los resultados y cálculos y prestigio en la comunidad científica y profesional.

Aunque OpenLCA obtuvo el puntaje total más alto en la evaluación, LCA Pave fue seleccionado para este estudio debido a los siguientes motivos técnicos y prácticos:

- 1) Costo: LCA Pave es gratuito y de código abierto, lo que lo hace especialmente adecuado para investigaciones académicas, sin necesidad de inversiones adicionales en licencias o suscripciones, este criterio fue de gran importancia dado el enfoque presupuestario de la investigación.
- 2) Especialización en pavimentos y mezclas asfálticas: LCA Pave fue desarrollado específicamente por la Federal Highway Administration (FHWA) para el análisis de mezclas asfálticas y pavimentos, lo que lo hizo particularmente adecuado para el análisis de ciclo de vida de pavimentos viales. Este enfoque especializado lo convirtió en la mejor opción para este estudio, ya que se adapta directamente a las características del proyecto y sus necesidades técnicas.

- 3) Facilidad de uso: LCA Pave tiene una interfaz amigable y fácil de navegar, lo que simplificó la ejecución del análisis y permitió obtener los resultados de manera eficiente, sin la necesidad de un entrenamiento extensivo previo en el uso del programa.
- 4) Calidad de las bases de datos: LCA Pave proporciona acceso a bases de datos públicas relevantes y validadas, específicamente orientadas al análisis de infraestructura vial, estas bases de datos incluyen factores de emisión, consumos energéticos y materiales utilizados en la construcción y mantenimiento de pavimentos, lo que facilitó la integración de datos precisos para la evaluación ambiental.
- 5) Precisión en los resultados: Si bien SimaPro y OpenLCA tienen una excelente precisión en sus resultados, sin embargo, el enfoque especializado de LCA Pave en la industria vial permitió obtener resultados precisos y ajustados a las especificaciones del área de pavimentos, lo que aumentó la fiabilidad de los análisis.
- 6) Prestigio: Aunque SimaPro tiene un alto prestigio internacional y es considerado uno de los softwares de LCA más completos, el enfoque especializado de LCA Pave y su costo cero lo hacen más atractivo para proyectos académicos centrados en la infraestructura vial.

### *3.3.6 Indicadores ambientales y dióxido de carbono equivalente.*

En los estudios de ACV aplicados a infraestructura vial, la selección de indicadores ambientales es un elemento fundamental para evaluar y comparar alternativas tecnológicas. Entre las distintas categorías de impacto, el Potencial de Calentamiento Global (GWP) por sus siglas en inglés, se ha considerado como uno de los indicadores más utilizados, al estar directamente asociado a las emisiones de gases de efecto invernadero y a su contribución al cambio climático.

El dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> eq) es la unidad empleada para expresar el GWP, ya que permite integrar en una sola métrica las emisiones de diferentes

gases, ponderadas según su potencial de calentamiento global relativo. El IPCC reconoce al CO<sub>2</sub> como el principal contribuyente al calentamiento global de origen antropogénico y establece al CO<sub>2</sub> equivalente como la referencia estándar para la evaluación de impactos climáticos (IPCC, 2014;2021).

En el ámbito de la infraestructura vial, organismos como la Federal Highway Administration (FHWA) destacan que la cuantificación de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente mediante ACV constituye una herramienta clave para apoyar la toma de decisiones orientadas a la reducción de la huella de carbono.

## 4. Hipótesis

Considerando la falta de información cuantitativa y la ausencia de criterios estandarizados para evaluar el impacto ambiental de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de neumático pretratado, se plantea la hipótesis de que el polvo de neumático pretratado constituye una alternativa ambientalmente sostenible para la producción de mezclas asfálticas, ya que permite reducir las emisiones de dióxido de carbono equivalente hasta en un 15.0 % en comparación con mezclas convencionales sin incorporación de este material.

Asimismo, se propone que la aplicación de indicadores y criterios de análisis basados en la metodología de ACV comparativo y bajo la perspectiva de un enfoque *Cradle to Grave* o de la cuna a la tumba, permita generar una estimación más precisa y consistente del impacto ambiental asociado a estas mezclas, contribuyendo a mejorar la evaluación ambiental en ausencia de metodologías estandarizadas específicas para este tipo de materiales.



Figura 4-1 Hipótesis de la investigación

Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial (Google Gemini, 2026)

## **5. Objetivo**

### **5.1 Objetivo general**

Evaluar comparativamente, mediante la metodología de análisis de ciclo de vida el impacto ambiental en mezclas asfálticas elaboradas con polvo de neumático pretratado y mezclas asfálticas convencionales sin este material.

### **5.2 Objetivos específicos**

1. Identificar las etapas del ciclo de vida que presentan mayor contribución a las emisiones totales de CO<sub>2</sub> equivalente en cada alternativa analizada.
2. Evaluar la influencia del diseño de mezcla asfáltica y los programas de mantenimiento y conservación en el impacto ambiental acumulado de los pavimentos a lo largo de su vida útil.
3. Analizar la viabilidad ambiental del uso de polvo de neumático pretratado en mezclas asfálticas, a partir de los resultados obtenidos, como alternativa para reducir emisiones en la infraestructura vial.

## 6. Metodología

La metodología de la presente investigación se fundamenta en la aplicación del análisis de ciclo de vida (ACV) conforme a los lineamientos establecidos en las normas ISO 14040 y 14044, con el objetivo de evaluar y comparar el impacto ambiental de distintas mezclas asfálticas mediante un enfoque estructurado y reproducible. El procedimiento metodológico se organiza en las cuatro fases del ACV: Definición del objetivo y alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación de resultados; las cuales se desarrollan de manera secuencial para cada caso de estudio, garantizando la coherencia del análisis y la trazabilidad de los resultados obtenidos.

La Figura 6-1 presenta de manera esquemática la estructura general de la metodología aplicada, donde se identifica el indicador ambiental seleccionado, correspondiente al Potencial de Calentamiento Global expresado en kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente, así como el enfoque *Cradle to Grave*, que abarca las etapas de producción de materiales, diseño de la mezcla asfáltica, construcción, mantenimiento y fin de vida útil. Asimismo, las alternativas de mezcla evaluadas en los dos casos de estudio considerados en la investigación.

El primer caso de estudio corresponde a un tramo de la autopista México-Tuxpan, en el cual se comparan distintas alternativas de mezcla asfáltica modificada, incluyendo una mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado frente a una mezcla densa modificada con polímero y escoria de alto horno. El segundo caso de estudio se desarrolla en la autopista México-Pachuca, donde se evalúa una mezcla asfáltica con polvo de neumático pretratado en comparación con una alternativa convencional reforzada mediante geomalla. Para cada uno de estos casos, las cuatro fases del ACV se describen de forma completa e independiente, permitiendo una evaluación ambiental consistente y comparable entre las alternativas analizadas.



Figura 6-1 Estructura metodológica de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

### 6.1 ACV Caso estudio 1: Autopista México – Tuxpan.

El primer caso de estudio se desarrolla en un tramo de la autopista México – Tuxpán, correspondiente a los cadenamientos 137+900 al 138+900, ubicado a la altura de la comunidad de Cuacuila, en el estado de Puebla. Este tramo forma parte de una autopista de altas especificaciones, destinada a la alta demanda de tránsito y caracterizada por una alta proporción de vehículos pesados, lo que genera

demandas mecánicas significativas sobre la carpeta asfáltica.

El segmento analizado se localiza en el carril derecho del sentido Tuxpan – México, en una pendiente ascendente considerable, donde el transporte de carga circula a velocidades aproximadas de 50 km/h. estas condiciones operativas provocan la aplicación de altas tensiones repetidas, favoreciendo la aparición de deformación permanente, fatiga y desprendimiento de agregados, fallas que ya se habían manifestado previamente en la carpeta existente, lo que motivó la intervención del tramo (ver Figura 6-2). Con el objetivo de atender estas problemáticas, el tramo fue seleccionado como tramo de prueba, en el cual se evaluaron distintas alternativas de mezcla asfáltica como parte de labores de conservación periódica, permitiendo analizar su desempeño técnico y su impacto ambiental bajo condiciones reales de servicio. En este contexto, se planteó inicialmente la sustitución de la carpeta existente mediante una mezcla asfáltica de 8 cm de espesor, diseñada para satisfacer los requerimientos estructurales del tránsito esperado.

No obstante, como parte de la estrategia de optimización estructural y sostenibilidad, se propuso una alternativa de mezcla asfáltica discontinua tipo SMA (*Stone Mastic Asphalt*) modificada con polvo de neumático pretratado, colocada con un espesor reducido de 7 cm. Esta reducción fue posible gracias al alto desempeño mecánico de la mezcla respaldado por su módulo dinámico superior a 5,000 MPa, así como por su elevada resistencia a la deformación permanente y a la fatiga, validada mediante ensayos de laboratorio como TSR, rueda cargada de Hamburgo, módulo dinámico y fatiga en viga a flexión en cuatro puntos, para ver los resultados de los ensayos de laboratorio ver el Anexo I.

De acuerdo con la literatura técnica y con lineamientos de organismos como la National Asphalt Pavement Association (NAPA) y la Federal Highway Administration (FHWA), las mezclas tipo SMA con tamaño nominal máximo de 12.5 mm, pueden colocarse en espesores compactados dentro del intervalo de 3.2 a 7.5 cm, sin comprometer su integridad estructural. En este caso, el espesor adoptado de 7 cm se encuentra dentro de dicho rango, garantizando un adecuado comportamiento estructural y funcional del pavimento.



*Figura 6-2 Tramo de prueba en autopista México – Tuxpan.*

Fuente: Elaboración propia.

#### *6.1.1 Primer etapa de la metodología: Definición del objetivo y alcance.*

El objetivo del ACV en este caso de estudio es evaluar y comparar el impacto ambiental de distintas mezclas asfálticas empleadas en la carpeta asfáltica del tramo analizado, bajo condiciones reales de operación, el análisis se centra en la cuantificación de las emisiones de dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2$  eq) asociadas a cada una de las tres alternativas a lo largo de su ciclo de vida, con el propósito de identificar diferencias atribuibles al tipo de mezcla, al consumo de materiales y a los procesos constructivos involucrados. De manera específica, el ACV busca determinar si la utilización de una mezcla asfáltica discontinua tipo SMA modificada con polvo de neumático pretratado, colocada con un espesor reducido, representa una alternativa ambientalmente más favorable en comparación con una mezcla asfáltica densa convencional y una modificada con polímero y escoria de alto horno, considerando todas las etapas relevantes del ciclo de vida de la carpeta asfáltica.

El alcance del ACV se definió conforme a los lineamientos establecidos en las normas ISO 14040 y 14044, adoptando un enfoque *Cradle to Grave* (de la cuna a la tumba) excluyendo únicamente la etapa de uso. El sistema analizado se limita exclusivamente a la carpeta asfáltica, sin incluir capas estructurales inferiores como base o subbase, con el fin de asegurar coherencia entre las alternativas evaluadas y enfocar el análisis en la solución superficial aplicada en el tramo de prueba.

El ciclo de vida considerado incluye las siguientes etapas:

- 1) Producción de materiales, que abarca la extracción y procesamiento de agregados, la producción del ligante asfáltico y de los modificadores utilizados en cada alternativa.
- 2) Fabricación de la mezcla asfáltica, correspondiente al proceso de mezclado en planta.
- 3) Transporte, tanto de materias primas como de la mezcla asfáltica hasta el sitio de obra.
- 4) Construcción, que incluye las actividades de colocación y compactación de la carpeta asfáltica.
- 5) Mantenimiento y conservación, considerando las intervenciones previstas durante la vida útil de la carpeta.
- 6) Fin de vida útil, que contempla el retiro del material y su disposición final o posible reciclaje.

La unidad funcional definida para este caso de estudio es de 1 km de carril pavimentado con un ancho de 10 m (ver Figura 6-3), lo que permite normalizar los resultados del ACV y garantizar la comparabilidad entre las alternativas evaluadas, aun cuando existan diferencias en espesor de carpeta, tipo de mezcla y consumo total de materiales.

Esta unidad funcional representa una condición típica de intervención en carreteras de altas especificaciones y resulta adecuada para evaluar el impacto ambiental de soluciones en tramos de prueba bajo condiciones reales de tránsito pesado.



*Figura 6-3 Kilometro de carril asignado como unidad funcional para caso estudio 1.*

Fuente: Google Earth.

El indicador ambiental seleccionado para la evaluación es el Potencial de Calentamiento Global (GWP), expresado en kilogramos de dióxido de carbono equivalente (kg CO<sub>2</sub> eq). La elección de este indicador se fundamenta en su relevancia para la evaluación de impactos climáticos asociados a la infraestructura vial y en su amplia aceptación en estudios de ACV aplicados al sector del transporte.

#### *6.1.2 Análisis del inventario.*

El análisis del inventario del ciclo de vida para el caso de estudio de la autopista México–Tuxpan se desarrolló a partir de una recopilación exhaustiva de información técnica, operativa y de campo, con el objetivo de representar de manera fiel los consumos reales de materiales, energía y combustibles asociados a cada alternativa de mezcla asfáltica. Para garantizar la trazabilidad y consistencia del

inventario, la información fue organizada siguiendo un formato de recopilación de datos de las guías de ACV para pavimentos del Departamento de Transporte de California (CALTRANS), el cual fue ajustado al contexto del proyecto y a los lineamientos de la norma ISO 14040 (ver ejemplo en la Figura 6-4).

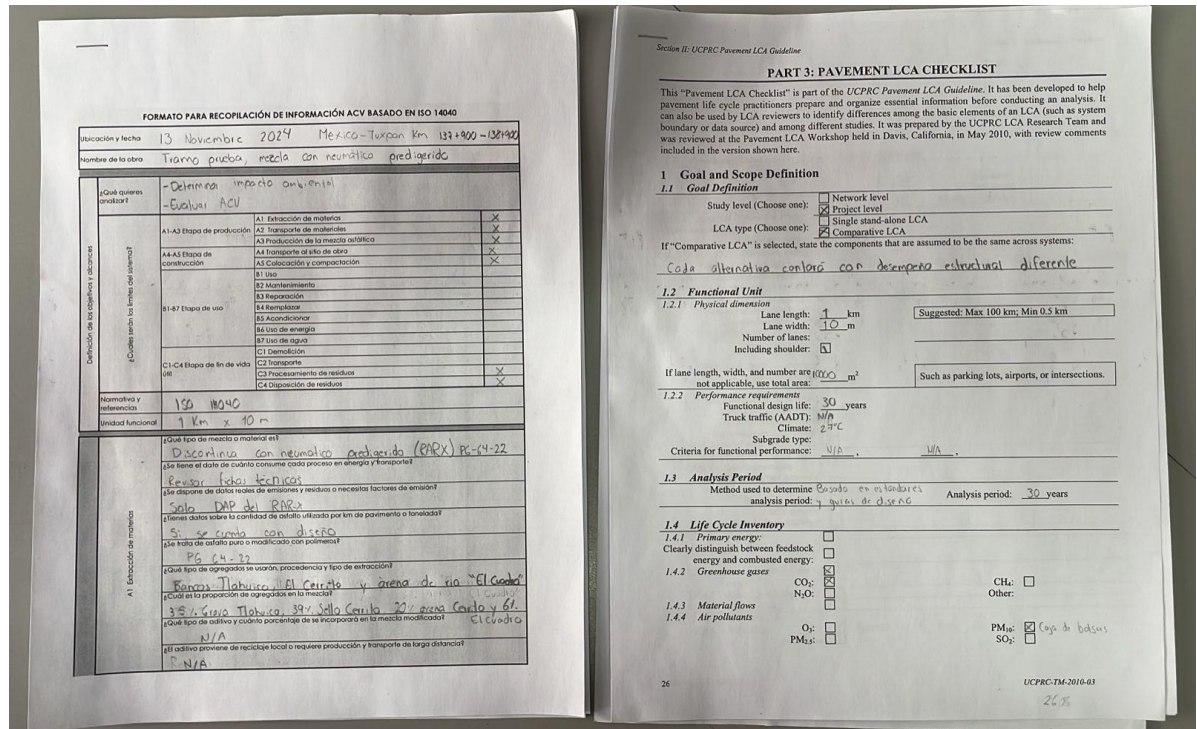


Figura 6-4 Formatos para recolección de información en campo.

Adaptados del departamento de transporte de CALTRANS.

Este formato permitió estructurar el inventario conforme a las etapas del ciclo de vida consideradas en el estudio: Diseño de mezcla, producción de materiales, fabricación de la mezcla en planta, construcción, uso y conservación, y fin de vida útil. La información se obtuvo a partir de diseños de mezclas validados, observación directa en obra, registros de planta, fichas técnicas de maquinaria, y mediciones de distancias y tiempos de traslados.

### 6.1.2.1 Etapa de diseño de las mezclas asfálticas.

La etapa de diseño de las tres alternativas de mezclas evaluadas constituye un

componente fundamental del inventario, ya que define las dosificaciones, densidades, espesores y volúmenes de material que posteriormente se traducen en consumos energéticos y emisiones.

Los diseños de mezcla fueron desarrollados durante un periodo de estancia en el laboratorio de mezclas asfálticas de LASFALTO, ubicado en Zapopan, Jalisco, donde se realizaron los ensayos necesarios para la caracterización de acuerdo con el protocolo de diseño de mezclas asfálticas de la Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC). Con estos ensayos se permitió no solo llegar a analizar las propiedades volumétricas, sino también el desempeño mecánico de las mezclas, asegurando que las alternativas evaluadas cumplieran con los requerimientos estructurales y funcionales del tramo de estudio (ver Figura 6-5). De acuerdo con el protocolo AMAAC, se llevaron a cabo ensayos correspondientes a:

- 1) Caracterización volumétrica (vacíos, VMA, VFA y densidad de la mezcla).
- 2) Resistencia a la humedad mediante el ensayo TSR.
- 3) Evaluación de deformación permanente, a través de la rueda cargada de Hamburgo.
- 4) Módulo dinámico y resistencia a la fatiga.



*Figura 6-5 Ensayes de laboratorio para los diseños de las alternativas evaluadas.*

Fuente: Elaboración propia.

Se evaluaron tres alternativas de mezclas asfálticas y los resultados de sus diseños se pueden ver en la Figura 6-6:

- 1) Alternativa 1: Mezcla asfáltica densa convencional, diseñada con un espesor de 8 cm, empleando asfalto PG 64-22, con una dosificación típica de agregados (grava y arena) y una densidad de mezcla de 2.29.
- 2) Alternativa 2: Mezcla discontinua tipo SMA con polvo de neumático pretratado, diseñada con un espesor reducido de 7 cm, incorporando hule de neumático como aditivo y con una densidad de 2.16.
- 3) Alternativa 3: Mezcla asfáltica densa modificada con polímero y escoria de alto horno, diseñada con un espesor de 8 cm, utilizando asfalto modificado STY 76V-22 y agregados alternativos con escoria de alto horno, lo que la hace obtener una densidad de 2.38.

Estos parámetros permitieron calcular el volumen total de mezcla requerido para la unidad funcional (1 km x 10 m), así como la masa total de mezcla y de cada componente, constituyendo la base del inventario de materiales.



Figura 6-6 Resumen de los resultados de diseño de las tres alternativas analizadas.

Fuente: Elaboración propia

### 6.1.2.2 Producción de materiales y fabricación de la mezcla.

La etapa de producción de materiales y fabricación de la mezcla asfáltica representa una de las principales fuentes de consumo energético dentro del ciclo de vida de la carpeta asfáltica. Para este caso de estudio, dicha etapa fue modelada a partir de datos reales de operación obtenidos en la planta de asfalto “Pitula”, una planta de producción continua con quemador a contraflujo CIBER modelo INOVA 2000, con una capacidad operativa promedio de 100 a 200 toneladas por hora (ver Figura 6-7).

## iNOVA 2000



*Figura 6-7 Modelo de planta de producción de mezcla asfáltica iNOVA 2000.*

Fuente: <https://www.wirtgen-group.com>

El cálculo de los consumos energéticos se realizó de manera diferenciada para cada una de las tres alternativas de mezcla, considerando tanto la energía térmica asociada al uso de combustible (diésel) como la energía eléctrica requerida para el funcionamiento de los equipos de la planta. El consumo de combustible se expresó inicialmente en litros de diésel por tonelada de mezcla producida (L/ton), con base en registros de operación y rendimiento del quemador de la planta. Para cada alternativa se obtuvieron valores promedio representativos:

- Mezcla convencional: 7 L/ton.
- Mezcla con polvo de neumático pretratado: 9 L/ton.
- Mezcla con polímero y escoria de alto horno: 8 L/ton.

Estas diferencias se explican por las condiciones de producción específicas de cada mezcla, particularmente por las temperaturas de mezclado, la viscosidad del ligante modificado y los tiempos de ciclo, los cuales se pueden observar en la Tabla 6-1. Siendo la mezcla con polvo de neumático pretratado la que requiere mayor energía térmica por tonelada, debido a las temperaturas de mezclado más elevadas y a un tiempo de mezclado ligeramente mayor.

La energía térmica por tonelada (MJ/ton) se calculó a partir del consumo de diésel, utilizando el poder calorífico inferior del diésel, y posteriormente se obtuvo la energía térmica total (MJ) multiplicando este valor por la masa total de mezcla producida para cada alternativa, correspondiente a la unidad funcional. Este procedimiento permitió cuantificar de forma directa el impacto energético asociado a la fabricación de cada tipo de mezcla.

El consumo de energía eléctrica se determinó a partir de la potencia instalada de los equipos de la planta (secador, elevadores, cribas, mezclador, bandas transportadoras y sistemas auxiliares), así como del tiempo efectivo de operación requerido para la producción de cada alternativa. Los resultados se expresaron en kilowatt-hora por tonelada (kWh/ton), obteniendo valores diferenciados para cada mezcla, los cuales reflejan la complejidad del proceso y los tiempos de ciclo.

Posteriormente, la energía eléctrica total (kWh) se calculó multiplicando el consumo unitario por la producción total de mezcla asociada a la unidad funcional, permitiendo integrar este consumo dentro del inventario energético global del ACV. Las temperaturas de mezclado y compactación consideradas en el inventario se obtuvieron a partir de los rangos reales de operación observados durante la producción de las mezclas en planta. En particular, la mezcla con polvo de neumático pretratado presentó temperaturas de mezclado entre 178 y 182 °C, superiores a la mezcla convencional, mientras que la mezcla modificada con polímero y escoria de alto horno se produjo en un rango intermedio.

Asimismo, se consideraron los tiempos de mezclado por ciclo, expresados en segundos, los cuales influyen directamente en el consumo energético total. Los valores de energía térmica (MJ) y energía eléctrica total (kWh) obtenidos para cada

alternativa fueron incorporados directamente al inventario de ciclo de vida como flujos de entrada energéticos en la etapa de fabricación de la mezcla. Estos flujos constituyen una parte significativa de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente asociadas a la producción, y permiten evaluar de manera comparativa el efecto de las distintas tecnologías de modificación, considerando no solo el consumo energético por tonelada, sino también el efecto de la reducción del espesor de la carpeta asfáltica en el impacto total por unidad funcional.

Tabla 6-1 Consumos energéticos de las alternativas en caso de estudio 1.

Tipo de mezcla	Diesel (L/ton)	Energía térmica MJ/ton	Energía eléctrica kWh/ton	Temp. mezclado (°C)	Temp. compactación (°C)	Tiempo mezclado por ciclo (s)	Energía térmica total (MJ)	Energía eléctrica total (kWh)
1) Convencional	7	270.2	75.96	150 – 160	135 – 145	35 – 45	546,360.37	153,595.61
2) Con neumático pretratado	9	347.4	96.55	178 – 182	168 – 172	50 – 60	578,199.63	160,694.23
3) Con polímero y escoria de alto horno	8	308.8	85.77	160 – 170	140 – 150	40 – 60	648,375.32	180,087.92

Fuente: Elaboración propia.

Para la conversión de los consumos energéticos y de combustibles cuantificados en la etapa de producción y fabricación de la mezcla en indicadores ambientales, se emplearon factores de emisión e inventarios provenientes de bases de datos reconocidas y ampliamente utilizadas en estudios de ACV. En particular, los consumos de diésel asociados a la operación del quemador de la planta de producción de mezcla, al transporte de materiales y a la maquinaria utilizada en obra fueron modelados mediante factores de emisión obtenidos de bases de datos integradas en el software LCA Pave, las cuales se basan en inventarios consolidados como U.S. *Life Cycle Inventory* (USLCI) y bases de datos desarrolladas por la FHWA para aplicar en la infraestructura vial.

Asimismo, la conversión del consumo de energía eléctrica (kWh) a emisiones se

realizó empleando factores de emisión representativos de la matriz eléctrica, incorporados en la herramienta de modelación, los cuales consideran el origen y composición del suministro eléctrico. Estos factores permiten estimar de manera consistente las emisiones asociadas a la generación de electricidad utilizada en los equipos de la planta de producción de mezcla asfáltica y en los procesos auxiliares.



*Figura 6-8 Planta de producción de mezcla asfáltica "Pitula".*

Fuente: Elaboración propia.

### 6.1.2.3 Traslados y acarreos.

En el análisis del inventario del ciclo de vida, la etapa de transporte juega un papel importante en el cálculo de las emisiones y el consumo de combustible asociado a la producción y colocación de la mezcla asfáltica. Para el caso de la autopista México – Tuxpan, se modelaron de manera detallada los traslados de los agregados, el transporte de la mezcla asfáltica desde la planta hasta el sitio de obra, así como el acopio de RAP para la posible reutilización del material retirado de cada etapa existente.

Los agregados pétreos requeridos para la producción de las mezclas asfálticas provienen de diferentes bancos de material, localizados en zonas cercanas a la planta de producción conocida como “Planta Pitula”. Los bancos resultantes del proceso de caracterización de agregados fueron:

- La Providencia
- Tlahuico



Una vez que la mezcla asfáltica es producida y colocada en la planta, se transporta hasta el tramo de prueba en la autopista México-Tuxpan, específicamente entre los cadenamientos 137+900 y 138+900. La distancia total entre la planta de producción y el tramo de prueba es de aproximadamente 20 km.

El transporte de la mezcla se realiza en camiones tipo Torton, con una capacidad de carga similar a la utilizada para los agregados. El tiempo de traslado y el consumo de combustible asociados fueron calculados a partir de datos operativos de campo y de los rendimientos de los camiones. Durante la rehabilitación del tramo, se llevó a cabo un acopio de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), que consiste en el material asfáltico retirado de la capa existente para ser reciclado y reutilizado. El RAP se localizó aproximadamente a 5 km del tramo de prueba y su transporte hasta la planta o el lugar de disposición final también fue considerado dentro del inventario. La distancia del acopio de RAP hasta la planta es de aproximadamente 5 km. Este material fue transportado en camiones tipo Torton, cuyo consumo de combustible se calculó con los factores de emisión de combustible del transporte, basándose en la distancia y la carga promedio por viaje.

El consumo de combustible asociado al transporte de los agregados y de la mezcla asfáltica se calculó a partir de los rendimientos estándar de los camiones utilizados, obtenidos de las fuentes como FHWA y USLCI, los cuales tienen en cuenta la capacidad de carga, el tipo de combustible (diésel), la distancia recorrida y el consumo promedio de los vehículos de carga. Los factores de emisión para diésel y transporte de carga fueron adoptados de bases de datos establecidas, como las de USLCI, con el fin de garantizar la consistencia y trazabilidad de los resultados. A partir de estos cálculos, se determinaron las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> eq) asociadas a los traslados de los agregados, la mezcla asfáltica y el RAP, lo cual constituye una parte relevante del impacto ambiental total de la producción y colocación de la mezcla.

#### 6.1.2.4 Etapa de construcción

La etapa de construcción es un proceso complejo que involucra el uso de maquinaria pesada y equipos específicos para cada actividad, desde la preparación de la superficie hasta la compactación final de la mezcla asfáltica. Esta etapa es crítica dentro del análisis de ciclo de vida debido a que se genera un consumo considerable de energía y emisiones de gases contaminantes asociados al uso de maquinaria pesada, consumos de combustible y rendimientos operativos.

Durante la etapa de construcción en el tramo del caso estudio se recolectaron datos durante la observación directa de los procesos constructivos y los rendimientos de cada equipo, estos se calcularon con base en el tiempo total de operación y la cantidad de material movido. En la tabla 6-2 se muestra un resumen de los equipos utilizados y una descripción ordenada de manera cronológica con relación a las actividades y etapa del proceso constructivo que pertenecen, rendimientos, consumo de combustible y tiempo estimado de operación.

*Tabla 6-2 Resumen de los equipos utilizados en el proceso constructivo y sus características para caso estudio 1.*

Proceso o etapa	Equipo	Marca / Modelo	Rend. (m <sup>2</sup> /h)	Consumo (L/h)	Área (m <sup>2</sup> )	Tiempo (h)	Consumo Total (L)	Observación
Preparación y limpieza	Barredora	Broce Broom BC-COV-03	6000	15	10000	1.67	25.0	Limpieza de superficie vial
Fresado	Fresadora	CAT PF-01 PM-56	2500	20	10000	4.00	80.0	Remoción capa superficial
Transporte de material	Camión Torton	Ford convencional*	3.15	N/A	N/A	381	2880	120 viajes,
Colocación de mezcla	Pavimentadora	VOGELE ALTCON EQUIPMENT SPRAYJET	4000	25	10000	2.50	62.5	Aplicación uniforme mezcla asfáltica
Transporte de mezcla	Camión Torton	Ford convencional*	3.15	N/A	N/A	381	2880	Igual que transporte material
Compactación primaria	Rodillo liso	HAMM CRL-COV-03 HAMMTRONIC HD	5000	15	10000	2.00	30.0	Compactación inicial del asfalto
Compactación secundaria	Rodillo de neumáticos	BOMAG VRM BW 24 FAYAT GROUP	4000	18	10000	2.50	45.0	Compactación final
Movilidad personal	Camioneta	Toyota Hilux**	40	9	N/A	4.00	14.4	Transporte personal, 2 días

\*El rendimiento es en t/h  
\*\* El rendimiento es en km/hr y el consumo es en L/100 km

Fuente: Elaboración propia.

La barredora utilizada en la preparación y limpieza de la superficie vial tiene como principal función la remoción de suciedad y escombros en la vía para permitir una correcta adherencia de la mezcla asfáltica. Este equipo tiene un rendimiento de 6000 m<sup>2</sup>/h aproximadamente, lo que permitió cubrir rápidamente el área total de la superficie del tramo analizado, aunque el consumo de combustible fue significativo (15 L/h), dado que esta maquinaria opera rápidamente durante la fase de limpieza inicial, su consumo energético es limitado en comparación con otras máquinas utilizadas en el proceso de colocación y compactación de la mezcla.

La fresadora es un equipo clave para la remoción de la capa superficial de asfalto deteriorado antes de aplicar la nueva mezcla, esta maquinaria se emplea específicamente en zonas con fallas por deformación permanente o fatiga en la capa anterior. El rendimiento de la fresadora es de 2500 m<sup>2</sup>/h, lo que permitió cubrir un área considerable en un tiempo estimado de 4 horas. El consumo de combustible fue elevado debido a la alta demanda energética del proceso de fresado ya que involucra el uso de discos de corte de alta resistencia para remover el material dañado. Para este caso se estimaron 80 L de diésel para completar la operación en el área de referencia.

El camión Torton fue utilizado en el transporte de los agregados desde los bancos de materiales hacia la planta de producción y posteriormente para el transporte de la mezcla asfáltica desde la planta hasta el sitio de colocación. Para este caso, se estimó un rendimiento de 3.15 toneladas por hora y 381 horas de operación para realizar los viajes necesarios en este tramo. Aunque el consumo específico de combustible no fue proporcionado por el fabricante, se calculó a partir de factores estándar del USLCl y el rango de carga del camión, resultando en un consumo total de 2880 L de diésel para completar los traslados.



*Figura 6-10 Equipo utilizado para proceso de fresado y barrido.*

Fuente: Elaboración propia.

La pavimentadora es la maquinaria encargada de colocar la mezcla asfáltica de manera uniforme sobre el tramo, su rendimiento estimado fue de 4000 m<sup>2</sup>/h lo que permitió cubrir el total de la superficie en poco tiempo, también se cuantificó el consumo de diésel que fue de 25 L/h con un tiempo estimado de operación de 2.5 horas para cubrir el área de los 10,000 m<sup>2</sup>.



*Figura 6-11 Equipo utilizado en la etapa de colocación.*

Fuente: Elaboración propia.

Para la compactación inicial se utilizó el rodillo liso una vez colocada la mezcla, con un rendimiento de 5000 m<sup>2</sup>/h, este equipo logró compactar rápidamente la carpeta asfáltica donde se estimó el consumo de combustible de 15 L/h, lo que resultó en un consumo total de 30.0 L diésel en total de la etapa de compactación primaria, lo que es crucial para garantizar la estabilidad estructural de la carpeta asfáltica. La compactación secundaria se realizó con el rodillo de neumáticos, este equipo fue fundamental para obtener la densidad final esperada de la mezcla, con un rendimiento de 4000 m<sup>2</sup>/h y un tiempo total de operación de 2.5 horas para lograr cubrir el total de la superficie, consumiendo 45 L de diésel durante el proceso.



*Figura 6-12 Equipo utilizado en la etapa de compactación.*

Fuente: Elaboración propia.

Otro tema importante en la consideración de los equipos utilizados es para el transporte del personal, para este caso se llevó a cabo con una camioneta Toyota Hilux y camionetas tipo pick up para el desplazamiento del personal técnico y operativo a lo largo del tramo de obra, con un rendimiento promedio de 40 km/h y un consumo de 9L/100 km, teniendo un consumo total estimado de 14.4 L de combustible.

#### 6.1.2.5 Etapa de uso y conservación

El plan de mantenimiento y conservación fue desarrollado utilizando el modelo HDM-4 (*Highway Development and Management Model*), ampliamente reconocido por su capacidad para simular el desempeño estructural y prever las necesidades de intervención durante la vida útil de los pavimentos asfálticos. Este modelo fue empleado para simular las condiciones de tráfico, el desgaste de la superficie y las necesidades de mantenimiento de las alternativas de mezcla asfáltica evaluadas en el tramo de la autopista México – Tuxpan.

La justificación técnica para la aplicación de este modelo se basó en los resultados de laboratorio obtenidos durante la etapa de diseño de las mezclas, donde se evaluaron parámetros clave como la resistencia, deformación, y durabilidad de las mezclas. Además, se incorporaron experiencias en campo y estudios previos relacionados con los ciclos de vida de pavimentos asfálticos en condiciones similares y se consideraron referencias del Manual de Conservación de Pavimentos y la literatura técnica nacional, particularmente el protocolo AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto A.C.) los cuales proporcionaron directrices claras para la gestión de pavimentos asfálticos y sus intervenciones de mantenimiento.

Para la simulación de las intervenciones del mantenimiento preventivo y rehabilitación estructural, se utilizaron parámetros mecánicos específicos de cada alternativa de mezcla, derivados de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio (como el TSR, módulo dinámico, deformación permanente y fatiga), junto con datos operativos en campo. Estas propiedades mecánicas fueron fundamentales para ajustar las frecuencias de intervención y predecir la vida útil de cada alternativa.

El uso del modelo HDM-4 (ver figura 6-13) permitió calcular la frecuencia de las intervenciones preventivas basadas en la falla de fatiga o deformación estructural de cada alternativa. También, la efectividad de cada intervención, tomando en cuenta las características de durabilidad de las mezclas y los efectos de tráfico durante el periodo de vida útil.

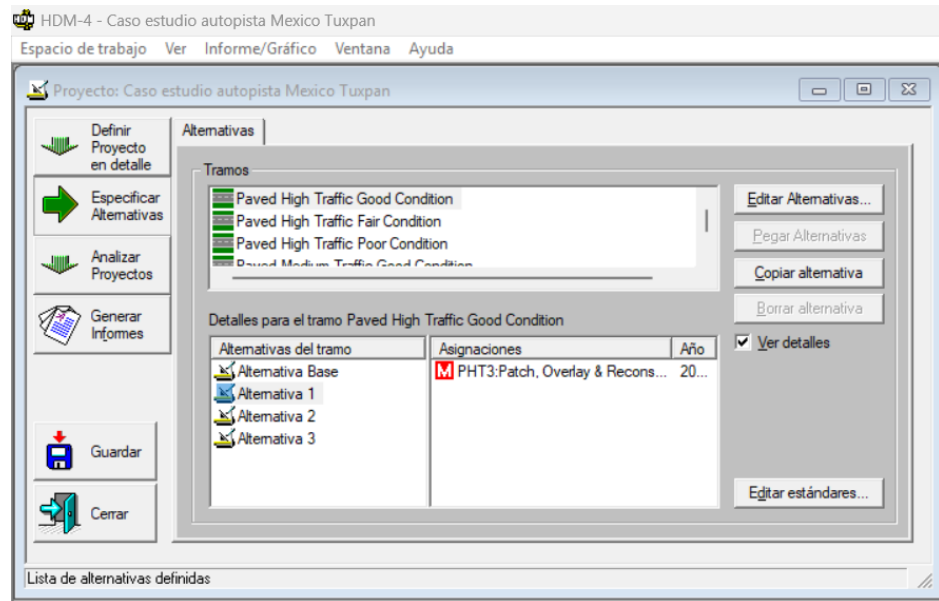
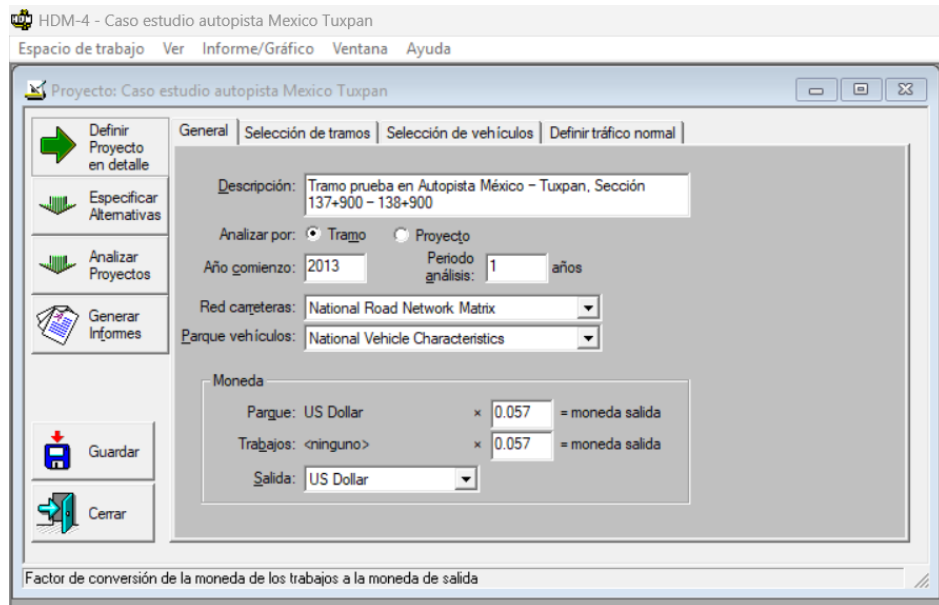


Figura 6-13 Modelo en software HDM-4 del caso estudio 1.

Fuente: Elaboración propia.

Este enfoque fue crítico para simular los escenarios de mantenimiento preventivo (sellado superficial y tratamiento de fisuras) y rehabilitación estructural (fresado completo y reposición de la capa asfáltica), los cuales se ajustaron a las características específicas de cada alternativa evaluada. A partir de esta simulación,

los resultados obtenidos para las tres alternativas de mezclas asfálticas se justifican de la siguiente manera:

Tabla 6-3 Plan de mantenimiento y conservación para caso estudio 1.

Alternativa	Años					
	7	10	15	20	22	30
<p>1) Mezcla Densa Convencional</p> <p>Espesor inicial 8 cm</p>	<p><b>Mantenimiento Preventivo</b>  <b>Intervención:</b> Fresado superficial y capa de repavimentación para restaurar el pavimento.  <b>Espesor:</b> 4 cm.  <b>Motivo:</b> El pavimento muestra signos de desgaste superficial, fisuración leve y deformación ligera.</p>		<p><b>Rehabilitación</b>  <b>Intervención:</b> Rehabilitación estructural, fresado completo de la capa superficial y nueva capa de asfalto.  <b>Espesor:</b> 6 cm.  <b>Motivo:</b> La mezcla empieza a presentar fisuración profunda y deformación estructural, lo que requiere una rehabilitación completa.</p>		<p><b>Mantenimiento Preventivo</b>  <b>Intervención:</b> Aplicación de capa de sellado o repavimentación ligera.  <b>Espesor:</b> 4 cm.  <b>Motivo:</b> El pavimento aún tiene buena integridad estructural, pero necesita protección adicional de la superficie.</p>	<p><b>Disposición final</b>  <b>Intervención:</b> Rehabilitación estructural con fresado completo y nueva capa de mezcla asfáltica.  <b>Espesor:</b> 8 cm.  <b>Motivo:</b> El pavimento ha alcanzado el fin de su vida útil, con fisuración y desgaste significativos.</p>
<p>2) Mezcla discontinua con polvo de neumático predigerido</p> <p>Espesor inicial 7 cm</p>		<p><b>Mantenimiento Preventivo</b>  <b>Intervención:</b> Capa delgada de repavimentación o sellado para restaurar la superficie.  <b>Espesor:</b> 4 cm.  <b>Motivo:</b> El pavimento ha mostrado buen desempeño, pero es necesario intervenir superficialmente.</p>		<p><b>Rehabilitación</b>  <b>Intervención:</b> Rehabilitación superficial con fresado completo y nueva capa de mezclas asfáltica.  <b>Espesor:</b> 6 cm.  <b>Motivo:</b> El pavimento presenta fisuración mayor y deformación estructural que requieren una rehabilitación completa.</p>		<p><b>Disposición final</b>  <b>Intervención:</b> Rehabilitación estructural con fresado completo y nueva capa de mezcla asfáltica.  <b>Espesor:</b> 8 cm.  <b>Motivo:</b> El pavimento ha alcanzado el fin de su vida útil, con fisuración y desgaste significativos.</p>
<p>3) Mezcla densa modificada con polímero y escoria de alto horno.</p> <p>Espesor inicial 8 cm</p>		<p><b>Mantenimiento Preventivo</b>  <b>Intervención:</b> Capa delgada de repavimentación o sellado para restaurar la superficie.  <b>Espesor:</b> 4 cm.  <b>Motivo:</b> Aunque la mezcla tiene alta resistencia, requiere protección adicional después de 10 años.</p>		<p><b>Rehabilitación</b>  <b>Intervención:</b> Rehabilitación superficial con fresado completo y nueva capa de mezclas asfáltica.  <b>Espesor:</b> 5 cm.  <b>Motivo:</b> El pavimento ha llegado al punto donde las fisuras profundas y deformaciones por tráfico pesado requieren rehabilitación.</p>		<p><b>Disposición final</b>  <b>Intervención:</b> Rehabilitación estructural con fresado completo y nueva capa de mezcla asfáltica.  <b>Espesor:</b> 8 cm.  <b>Motivo:</b> El pavimento ha alcanzado el fin de su vida útil, con fisuración y desgaste significativos.</p>

Fuente: Elaboración propia.

El modelo HDM-4 fue clave en la evaluación de la frecuencia de intervención para cada una de las alternativas, ya que el modelo está basado en métodos predictivos

y datos empíricos de desempeño estructural, lo que permite estimar como la composición de la mezcla influye en las necesidades de mantenimiento preventivo y rehabilitación estructural durante la vida útil del pavimento. A continuación, se profundiza en los resultados obtenidos para cada alternativa, considerando tanto la frecuencia como el tipo de intervención.

Alternativa 1: Mezcla asfáltica densa convencional.

En el caso de la mezcla asfáltica densa convencional (espesor inicial 8 cm), el modelo HDM-4 mostró que esta alternativa presenta un desempeño más limitado en comparación con las otras dos opciones, especialmente en términos de resistencia a la fatiga y deformación estructural. Esto se debe a que las mezclas convencionales, a pesar de ser eficientes en el corto plazo, sufren un desgaste más rápido bajo condiciones de tráfico pesado y altas temperaturas, lo que reduce su vida útil y aumenta la frecuencia de intervenciones.

Con relación al mantenimiento preventivo el modelo calculó que se requiere un mantenimiento preventivo con una carpeta de espesor de 4 cm en dos ocasiones para mantener la funcionalidad del pavimento, estas intervenciones preventivas incluyen principalmente la aplicación de capa de sellado para restaurar la superficie y evitar la fisuración superficial, sin embargo, debido a la limitada durabilidad de la mezcla convencional, el modelo la proyectó en dos ocasiones durante todo el periodo de vida útil.

Para la rehabilitación estructural después de 10 años de servicio, el modelo predice que la mezcla convencional requerirá una rehabilitación estructural completa. Esta rehabilitación incluiría fresado completo de la capa deteriorada y la aplicación de una nueva capa de asfalto, debido a la fatiga estructural y deformaciones significativas, esta intervención más costosa y demandante en términos de energía y recursos, aumenta significativamente el impacto ambiental en la fase de rehabilitación.

Alternativa 2: Mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado.

En este caso el modelo mostró que esta alternativa tiene una mayor resistencia a la deformación y a la fatiga en comparación con la mezcla convencional, debido a las propiedades del hule reciclado, que mejora las características elastoméricas de la mezcla. Esto permite que el pavimento resista mejor las cargas repetidas y las condiciones térmicas extremas, alargando su vida útil y reduciendo la necesidad de intervenciones frecuentes.

El mantenimiento preventivo para esta alternativa se calculó con capas de 4 cm de espesor, lo que resulta en una frecuencia de intervención menor en comparación con la alternativa convencional. Con respecto a la rehabilitación estructural, el modelo estimó que no sería necesaria hasta los 12-15 años de vida útil, esto es un indicio de la mayor durabilidad de esta mezcla, que permite extender el periodo entre intervenciones mayores, lo que reduce significativamente el impacto ambiental asociado con la rehabilitación.

Alternativa 3: Mezcla densa modificada con polímero y escoria de alto horno.

La mezcla densa modificada con polímero y escoria de alto horno muestra el mejor desempeño en términos de resistencia estructural y durabilidad. Gracias a la alta rigidez proporcionada por el polímero y la escoria de alto horno en la composición de la mezcla, esta alternativa ofrece una gran resistencia a la fatiga y a la deformación permanente, lo que permite que el pavimento resista cargas repetidas por más tiempo.

El mantenimiento preventivo que resultó en esta alternativa fue de una restauración en capas con espesores de 5 cm, lo que es más favorable que las alternativas anteriores debido a su mayor durabilidad, las intervenciones preventivas se centran en la protección de la superficie, como la aplicación de sellos, para evitar el desgaste prematuro y mantener la integridad estructural. Con respecto a la rehabilitación estructural, esta sería necesaria solo después de 30 años, debido a la alta

durabilidad de la mezcla, lo que implica una menor frecuencia de intervenciones a lo largo del ciclo de vida del pavimento. Esta alternativa demuestra el mejor rendimiento a largo plazo, por lo que no solo se traduce en menor impacto ambiental durante su vida útil, sino también en ahorros en recursos y energía asociados a las rehabilitaciones frecuentes requeridas.

El mantenimiento preventivo y la rehabilitación estructural son actividades que generan consumos de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> ya que requieren el uso de maquinaria pesada, transporte de materiales y procesos de fabricación de nuevos materiales. Las alternativas con mayor durabilidad, como la mezcla con polímero y escoria requieren menos intervenciones a lo largo de su vida útil, lo que reducirá los impactos ambientales derivados de las actividades de mantenimiento y rehabilitación.

La frecuencia de mantenimiento es una variable crucial para determinar el impacto ambiental acumulado ya que cada intervención consume energía, combustibles y materiales. Por lo tanto, las alternativas que requieren menos intervenciones son más sostenibles a largo plazo. En términos de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, las intervenciones de rehabilitación representan una proporción significativa del impacto ambiental de cada alternativa. Las mezclas con mayor resistencia estructural, como la mezcla con polvo de neumático pretratado y la mezcla con polímero y escoria de alto horno presentaron un menor número de intervenciones, por lo tanto, emiten menos CO<sub>2</sub> a lo largo de su vida útil.

#### 6.1.2.6 Etapa de fin de vida útil.

La etapa de fin de vida útil del pavimento asfáltico es una fase clave en el análisis de ciclo de vida de las mezclas asfálticas, ya que, aunque representa una porción más pequeña del impacto ambiental total en comparación con las etapas de producción y construcción, las decisiones de disposición final y reciclaje pueden contribuir significativamente a la sostenibilidad del sistema vial. En este estudio, se consideró el acopio de RAP o también conocido como fresado como una estrategia

de reciclaje y reutilización de materiales, lo cual permite reducir la cantidad de residuos generados y minimizar el impacto ambiental asociado a la disposición final de los pavimentos deteriorados.

En el caso específico de este estudio, se asumió que al final de la vida útil de la carpeta asfáltica (después de 30 años de servicio), el RAP retirado del tramo de prueba se recolectaría en un banco de acopio ubicado a 5 km de distancia del lugar de intervención, en un espacio autorizado para el reciclaje de pavimentos. Este material reciclado podría ser utilizado nuevamente en la producción de mezcla asfáltica para futuros proyectos o en la rehabilitación de tramos adyacentes, contribuyendo de esta forma a cerrar el ciclo de vida de los materiales y a minimizar la demanda de recursos vírgenes.

El RAP retirado del pavimento se transportará desde el tramo de prueba hasta el sitio de acopio en camiones de carga tipo Torton, cuya capacidad de carga promedio es de 20 toneladas aproximadamente, para los efectos del ACV, se modeló el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente asociadas a este transporte, utilizando factores de emisión de diésel obtenidos de bases de datos internacionales como USLCI y FHWA. La distancia de 5 km fue incorporada directamente al inventario de transporte, calculando el consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes en función de la distancia recorrida y el tipo de vehículo.

Una vez acopiado el RAP, se contempla su reciclaje para la producción de nueva mezcla asfáltica o su reutilización en otras actividades viales, como la rehabilitación de pavimentos adyacentes. El reciclaje de RAP implica un proceso de triturado y mezcla con ligantes nuevos y/o rejuvenecedores, lo que permite reducir la demanda de materiales vírgenes y ahorrar energía en la producción del nuevo asfalto. En el inventario de ciclo de vida, se asumió que el RAP recolectado se reutiliza en una proporción del 30.0 % para la fabricación de nuevas mezclas, lo que contribuye a una reducción de impactos ambientales en comparación con la producción de asfalto nuevo. El porcentaje restante de RAP se destina a vertederos o a otras formas de disposición final que no impliquen reciclaje. El impacto ambiental

asociado a la disposición final del RAP no reciclado se modeló como una emisión de metano generada por el material que podría quedar en vertederos, aunque en este caso el volumen es mínimo debido a la estrategia de reciclaje implementada. Las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente asociadas al transporte del RAP se calcularon utilizando los mismos factores de emisión de diésel mencionados en el análisis de transporte de agregados y mezcla. En términos generales, el impacto ambiental por transporte fue calculado considerando el número de viajes necesarios para trasladar el RAP al sitio de acopio, el tipo de vehículo utilizado, la distancia recorrida y el consumo promedio de combustible. Por otro lado, el impacto ambiental asociado al reciclaje del RAP incluye tanto el consumo energético asociado al proceso de triturado y mezcla, como las emisiones indirectas asociadas al uso de energía eléctrica en la planta de reciclaje. El ahorro de materiales y la reducción de emisiones por el uso de RAP reciclado se calcularon de acuerdo con la proporción de RAP reutilizado en la mezcla asfáltica.

### *6.1.3 Fase de evaluación*

Una vez recopilados los datos del inventario, la tercera fase del ACV consistió en evaluar los impactos ambientales derivados de los flujos de entrada y salida identificados. Este paso fue crucial, ya que permitió cuantificar los efectos ambientales de cada alternativa de mezcla asfáltica a lo largo de su ciclo de vida, desde la producción de materiales hasta el fin de vida útil.

Para ello, se requirió el uso de un software especializado que permitió modelar las distintas etapas del ciclo de vida, integrando bases de datos de emisiones, realizando los cálculos automáticos y presentando los resultados conforme a metodologías reconocidas y establecidas a nivel internacional. El software seleccionado fue capaz de realizar estos cálculos de manera precisa y eficiente, garantizando la calidad y la fiabilidad del análisis.

### 6.1.3.1 Modelado en software de ACV

Una vez recopilada toda la información correspondiente a cada fase del ciclo de vida de las mezclas asfálticas, desde el diseño de cada una, la etapa de producción en planta, construcción en el tramo, conservación y disposición final, se procedió a la etapa de modelación. Esta fase fue importante ya que los datos del inventario una vez ingresados en un software especializado permiten evaluar y cuantificar los impactos ambientales asociados a cada una de las alternativas evaluadas. Los resultados de esta fase proporcionaron información clave sobre el comportamiento ambiental de las tres alternativas durante un periodo inicial y durante un periodo proyectado de 30 años de vida útil considerados en la proyección propuesta. El proceso de modelado comenzó con la definición de las alternativas de mezcla y la asignación de datos específicos para cada una de las etapas del ciclo de vida, LCA Pave permitió estructurar el modelo en bloques detallados que abarcaran todas las fases del ciclo de vida de las mezclas asfálticas, proporcionando una simulación precisa del comportamiento ambiental de cada alternativa (ver Figura 6-14).

The screenshot displays the LCA Pave software interface, divided into two main sections: **Design Alternative Definition** and **Activity Definition**.

**Design Alternative Definition:** This section allows users to define up to five different design alternatives. The selected alternative is **Alternative 2, Mezcla discontinua con polvo de neumático**. The **Selection Details** for this alternative are as follows:

Material	Percentage
Grava	35%
Sello	39%
Arena	26%
Ligante asfáltico (con respecto al peso de la mezcla)	9.34%
Aditivo de bota de llanta	1%

The **Activity Definition** section shows the breakdown of the **Etapa de Producción (1,664 short-tons)** into materials and equipment. The materials list includes:

- Mezcla discontinua modificada con neumatico (1,664 short-tons)
- Aditivo con neumatico (36 short-tons)
- Fine Aggregate (for asphalt) (392 short-tons)
- Crushed Stone, granite (Coarse Aggregate for Aspha (99,324 short-tons)
- Liquid Asphalt Binder, in refinery (119 short-tons)

The equipment list includes:

- Planta Pitula (16.62 hours)
- Tractors/Loaders/Backhoes, Nonroad Diesel Fuel, 100 < hp <

Green callout boxes with arrows point to specific parts of the interface:

- Plan de mantenimiento y conservación:** Points to the 'Rehabilitation' and 'Reconstruction' activities in the 'Alternative Definition' tree.
- Diseño y características de la mezcla:** Points to the 'Selection Details' section.
- Materiales y distancias:** Points to the 'Materials' list in the 'Activity Definition' section.
- Planta de producción:** Points to the 'Equipment' list in the 'Activity Definition' section.
- Equipos y traslados:** Points to the 'Equipment' list in the 'Activity Definition' section.

Figura 6-14 Modelado de primer caso estudio 1 en LCA Pave.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describe cómo se construyeron los modelos para cada una de las fases:

La primera fase del modelado fue la definición de las características de la mezcla. Se ingresaron los datos relativos a la composición de las mezclas, basados en los resultados obtenidos en el laboratorio. Estos incluyen:

- a) Tipo de mezcla: Se definieron las tres alternativas de mezcla a evaluar (mezcla densa convencional, mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado y mezcla densa modificada con polímero y escoria de alto horno.
- b) Proporciones de agregados: Se especificaron las cantidades de grava, arena y filler para cada mezcla, con base en los resultados de laboratorio obtenidos en las pruebas de composición volumétrica.
- c) Asfalto: Para cada alternativa se especificó el tipo de ligante asfáltico utilizado, como asfalto convencional PG 64-22 y asfalto modificado con polímero.
- d) Aditivos: En el caso de la mezcla con polvo de neumático y escoria de alto horno, se ingresaron los porcentajes y su respectiva dosificación.

Los resultados obtenidos de los ensayos de modulo dinámico, resistencia a la fatiga y deformación permanente también fueron integrados al modelo para reflejar la durabilidad estructural de cada alternativa. En la fase de producción, se ingresaron datos sobre los materiales utilizados en la producción de la mezcla, tales como:

- a) Origen y tipo de materiales: Se definieron las distancias de transporte de los materiales, incluyendo bancos de agregados, refinería de asfalto y plantas de los aditivos. Las distancias de transporte desde los bancos de material (como La Providencia, Tlahuico, El Cerrito y El Cuadro) hasta la planta de producción fueron detalladas, así como las distancias de transporte de mezcla hacia el sitio de colocación.
- b) Consumo energético: Se incorporaron los consumos de energía térmica y eléctrica de la planta Pitula, incluyendo el consumo de diésel en el proceso de mezcla y energía eléctrica consumida por los equipos de la planta.

- c) Tiempo de operación: Se especificaron las horas de funcionamiento de la planta y el número de toneladas producidas durante la operación, lo que permitió calcular de manera precisa el consumo total de energía por tonelada de mezcla.

La fase de construcción involucró el modelado de las actividades de tendido de la mezcla y compactación. Para ello se definieron las siguientes variables:

- a) Equipos utilizados: Se ingresaron los tipos de maquinaria y los rendimientos de cada equipo, como fresadoras, pavimentadoras, rodillos lisos y rodillos neumáticos. Se especificaron las marcas y modelos.
- b) Consumo de combustible: Para cada máquina, se detalló el consumo de combustible por hora, calculando el total de litros de diésel consumidos durante las horas estimadas de operación.
- c) Tiempo estimado de operación: Los tiempos de operación de cada equipo fueron determinados con base en el rendimiento y área cubierta, lo que permitió calcular el consumo total de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes asociadas a cada actividad.

Para la etapa de mantenimiento y conservación, se ingresaron las actividades previstas para cada alternativa a lo largo de 30 años. Este modelado incluyó las siguientes intervenciones:

- a) Frecuencia de mantenimiento preventivo: Se modelaron las actividades de mantenimiento preventivo y la frecuencia de rehabilitación para cada alternativa, con base en los resultados obtenidos del modelo HDM-4 y los datos específicos de fatiga y deformación de las mezclas.
- b) Consumo energético: Se consideraron los consumos de energía y combustible de los equipos utilizados en las intervenciones de rehabilitación, como fresadoras y pavimentadoras y las emisiones asociadas.

La disposición final del pavimento fue modelada considerando el proceso de retiro de material, su transportación al sitio de acopio de RAP y el reciclaje de los materiales. Para cada alternativa, se definieron las siguientes actividades:

- a) Fresado y reciclaje del pavimento: Se modelaron las emisiones asociadas al fresado y el reciclaje del material retirado, utilizando máquinas de fresado y plantas de reciclaje de RAP, calculando los consumos energéticos y las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas.
- b) Transporte y disposición final: Se modeló el transporte de RAP a un sitio de reciclaje y el impacto de la disposición final de cualquier material no reutilizado.

El modelado con LCA Pave permitió simular el comportamiento ambiental de las tres alternativas evaluadas, considerando todas las etapas del ciclo de vida. Los resultados obtenidos se presentaron en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, consumos energéticos y uso de recursos materiales, lo que permitió comparara el desempeño ambiental de cada alternativa a lo largo de los 30 años de vida útil. Además, el software LCA Pave proporcionó una visualización clara de las contribuciones ambientales por cada etapa del ciclo de vida, lo que facilita la identificación de puntos críticos donde es posible implementar mejoras tecnológicas o estratégicas de optimización.

#### *6.1.4 Interpretación y resultados del caso de estudio de la autopista México – Tuxpan.*

En este estudio, el indicador clave para evaluar el impacto ambiental de las tres alternativas de mezcla asfáltica fue el Potencial de Calentamiento Global (GWP), expresado en kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente (kg CO<sub>2</sub> eq). Este indicador se utiliza para medir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), siendo el CO<sub>2</sub> el principal gas relacionado con el cambio climático. Las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente incluyen todos los gases de efecto invernadero convertidos a su equivalente en CO<sub>2</sub> y representa de manera precisa el impacto climático de cada alternativa a lo largo de su ciclo de vida.

Para el caso de estudio en la autopista México – Tuxpan, se modelaron las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente para tres alternativas de mezcla asfáltica, los resultados obtenidos son presentados en las siguientes figuras:



Figura 6-15 Emisiones totales para unidad de 1 km por 10 m de ancho en la etapa inicial. (producción al tendido).

Fuente: Elaboración propia.



Figura 6-16 Emisiones totales de CO2 equivalente para cada alternativa de mezcla en la etapa total, incluyendo el programa de mantenimiento y conservación a lo largo de 30 años.

Fuente: Elaboración propia.

- 1) Resultados del análisis de la mezcla densa modificada con polímero y escoria de alto horno:

En la etapa inicial, esta alternativa presentó las mayores emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (170,593 kg CO<sub>2</sub> eq). Y con respecto a la etapa total incluyendo mantenimiento y conservación se observó una reducción de - 15.4 %, con un total de 365,836 kg CO<sub>2</sub> eq, lo que reflejó el impacto de la menor frecuencia de intervenciones de mantenimiento y su mayor durabilidad.

- 2) Resultados del análisis de la mezcla discontinua con neumático pretratado:

En la etapa inicial, las emisiones son más bajas que las de la mezcla modificada (129,521 kg CO<sub>2</sub> eq). En la etapa total, se observó una reducción de emisiones de -20.4 % alcanzando 309,365 kg CO<sub>2</sub> eq, debido a la mejor resistencia de la mezcla con polvo de neumático pretratado frente a las cargas repetidas y su menor necesidad de rehabilitación.

- 3) Resultados del análisis de la mezcla densa convencional:

En la etapa inicial, las emisiones fueron de 137,168 kg CO<sub>2</sub> eq lo que reflejó el impacto de su proceso de producción y colocación. En la etapa total, incluyendo el mantenimiento más frecuente, las emisiones aumentaron a 388,700 kg CO<sub>2</sub> eq, lo que demostró el alto impacto ambiental acumulado de la mezcla convencional, que requiere más intervenciones de rehabilitación estructural a lo largo de su vida útil.

Por otro lado, otra manera de resaltar los resultados puede apreciarse en la figura 6-17, que representa una visualización grafica de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> equivalente por tipo de actividad para cada una de las tres alternativas. En estas graficas se observa cómo se distribuyen las emisiones a lo largo de las diferentes fases del ciclo de vida: materiales, equipo, desperdicio y transporte.

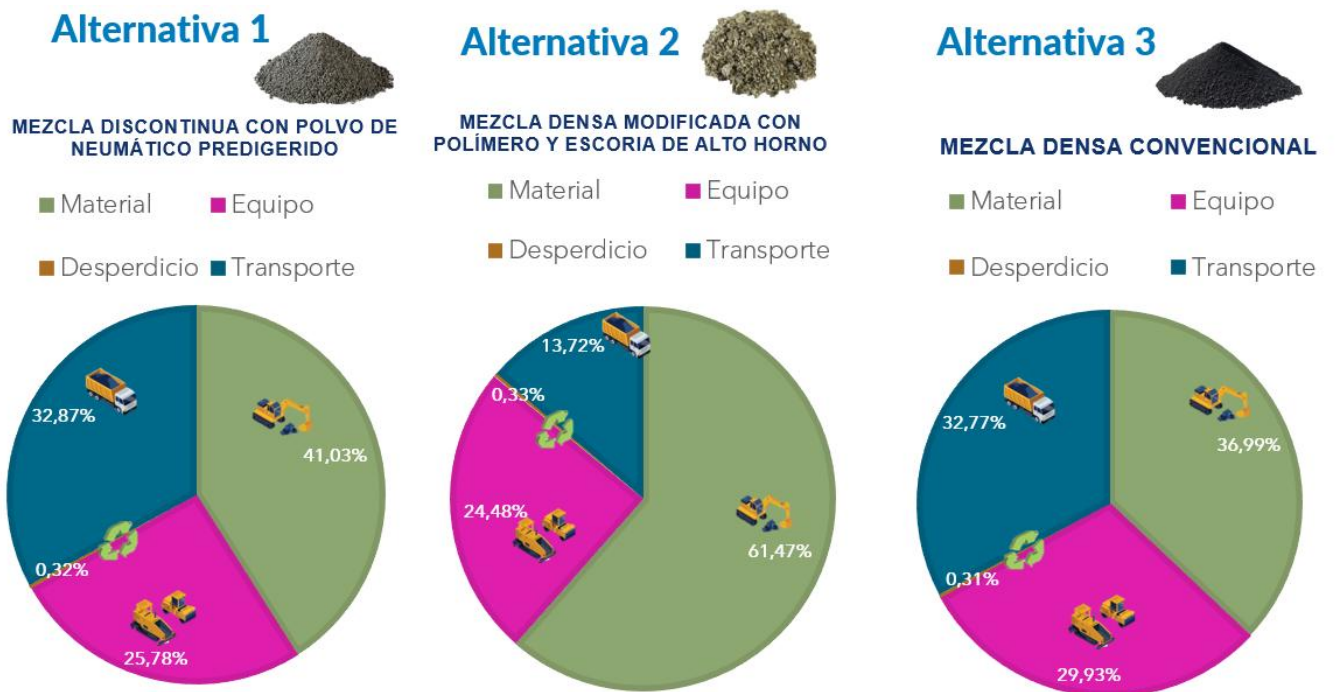


Figura 6-17 Distribución de emisiones por tipo de actividad en caso estudio 1.

Fuente: Elaboración propia

1) Resultados del análisis de la mezcla discontinua con neumático pretratado:

La mayor parte de las emisiones provienen de la fase de materiales, representando el 41.03 % del total de las emisiones. Esto reflejó la incorporación del polvo de neumático como aditivo, lo que implicó el uso de materiales reciclados con procesos adicionales de modificación. El consumo de equipo (como maquinaria de producción) y el transporte contribuyen significativamente con 32.87 % y 25.78 % respectivamente.

2) Resultados del análisis de la mezcla densa modificada con polímero y escoria de alto horno:

Similar a la alternativa anterior, las emisiones por materiales fueron las más relevantes, representando el 61.47 % del total. Esto se debió a la cantidad de polímero y escoria de alto horno utilizados, los cuales, aunque

son materiales reciclados requieren un proceso de producción más intensivo. El consumo de equipo representó el 24.48 % mientras que el desperdicio y el transporte tienen una baja contribución, con 13.72 % y 0.33 % respectivamente.

3) Resultados del análisis de la mezcla densa convencional:

En la mezcla convencional, las emisiones por materiales fueron también predominantes, representando el 36.99 % del total. Sin embargo, en este caso el desperdicio y el transporte tuvieron un mayor peso, con 29.93 % y 32.77 % respectivamente. El consumo de equipo estuvo relacionado principalmente con el proceso de compactación y colocación de la mezcla, contribuyendo con un 32.77 %.

A partir de los resultados obtenidos para las tres alternativas, se puede observar que la mezcla modificada con polímero y escoria de alto horno es la que presenta el mayor impacto ambiental en la fase inicial, pero mejora mucho en el menor impacto acumulado al incluir el mantenimiento y conservación a lo largo de 30 años. Esta disminución de impactos reflejó la menor frecuencia de intervenciones de mantenimiento, lo que redujo las emisiones a lo largo de su vida útil.

En cambio, la mezcla densa convencional tuvo el mayor impacto total debido a la frecuencia más alta de mantenimiento y rehabilitación, lo que incrementa las emisiones acumuladas en el ciclo de vida del pavimento. Esto resaltó la importancia de la durabilidad en las mezclas asfálticas y su relación con el impacto ambiental total, mostrando que las alternativas con mayor vida útil pueden ser más sostenibles a largo plazo.

## 6.2 Caso estudio Autopista México – Pachuca.

El segundo caso de estudio se desarrolló en un tramo de la autopista México – Pachuca, específicamente entre los kilómetros 49+300 y 49+800, este segmento presentaba fallas estructurales, tales como deformación permanente, agrietamiento por fatiga y desprendimiento de agregado, las cuales requirieron intervención (ver Figura 6-18). Además, el Trafico Diario Promedio Anual (TDPA) ha mostrado un crecimiento promedio de 8.1 % anual en los últimos años, lo que ha incrementado significativamente el volumen de vehículos pesados que circulan por este tramo, generando una mayor presión sobre el pavimento existente.



*Figura 6-18 Reflexión de grietas en el tramo de interés previas a la intervención.*

Fuente: COVIMEXI, abril 2024.

La autopista México – Pachuca es una de las vías más importantes del sistema de carreteras federales de México, conectando la Ciudad de México con el estado de Hidalgo. Este tramo de 35 km es una arteria vital para el transporte de personas y mercancías, particularmente por su alta demanda de tráfico pesado y vehículos comerciales que circulan en ambas direcciones. En las últimas décadas, el crecimiento del tránsito y el aumento del volumen de carga han generado una presión considerable sobre el pavimento, especialmente en los tramos de mayor pendiente. Este tráfico pesado ha ocasionado daños estructurales en los pavimentos, como deformaciones permanentes, fisuración y desprendimiento de agregado, lo que ha comprometido la seguridad vial y la durabilidad de la carretera. Por lo tanto, se hace necesario implementar un programa adecuado de rehabilitación y conservación para mejorar el desempeño estructural del pavimento y reducir los costos asociados a intervenciones constantes.

En particular, el tramo que fue seleccionado para el estudio de caso abarca los kilómetros 49+300 a 49+800, donde se han presentado fallas críticas en el pavimento, sobre todo por la fatiga estructural y las deformaciones generadas por las cargas repetidas. Este tramo es representativo de los desafíos técnicos y ambientales que enfrenta la infraestructura vial en México, debido a la combinación de tráfico intenso, clima extremo y condiciones de carga repetida que afectan la durabilidad del pavimento. En los años recientes, la autopista México – Pachuca ha mostrado señales claras de desgaste en su pavimento debido al aumento del tráfico pesado. Las principales fallas estructurales identificadas en el tramo de estudio incluyen:

- Deformación permanente: las cargas repetidas de vehículos pesados, especialmente camiones de carga han provocado deformaciones plásticas en la superficie de rodadura, lo que ha afectado la rugosidad y el desempeño funcional del pavimento.
- Fisuración: La fatiga del material debido a las variaciones térmicas y las cargas repetidas ha generado fisuras longitudinales y transversales que afectan la integridad estructural del pavimento estas fisuras permiten la

infiltración de agua, lo que acelera el proceso de deterioro del pavimento.

#### *6.2.1 Primer etapa de la metodología: Definición del objetivo y alcance.*

El objetivo del ACV en este caso fue evaluar y comparar el impacto ambiental de dos alternativas de mezcla asfáltica utilizadas en el tramo de la autopista México – Pachuca, específicamente en los kilómetros 49+300 a 49+800, bajo condiciones reales de operación. Este análisis se enfocó principalmente en la cuantificación de las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> eq) generadas a lo largo de todo el ciclo de vida de cada alternativa, con el fin de identificar diferencias atribuibles al tipo de mezcla, al consumo de materiales y a los procesos constructivos involucrados. Específicamente, el ACV buscó determinar si el uso de una mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado con asfalto puede ser más ambientalmente favorable en comparación con una mezcla densa convencional con refuerzo de geomalla.

El análisis tuvo en cuenta todas las etapas relevantes del ciclo de vida de la carpeta asfáltica, desde la producción de los materiales hasta el fin de vida útil, permitiendo una evaluación precisa del desempeño ambiental de cada alternativa, ya que se buscó determinar cuál de las dos alternativas presentó menor huella de carbono y es, por lo tanto, más sostenible a largo plazo, tanto desde el punto de vista ambiental como económico.

El alcance del ACV se definió conforme a los lineamientos establecidos en las normas ISO 14040 e ISO 14044, adoptando un enfoque *Cradle to Grave* (de la cuna a la tumba), excluyendo únicamente la etapa de uso. El sistema analizado se limitó exclusivamente a la carpeta asfáltica de las dos alternativas, sin considerar capas estructurales inferiores como base o subbase, con el objetivo de asegurar la coherencia entre las alternativas evaluadas y centrar el análisis en la solución superficial aplicada en el tramo de prueba. El ciclo de vida considerado para este caso estudio incluyó las siguientes etapas:

- Producción de materiales: Esta fase abarcó la extracción y el procesamiento

de los agregados, la producción del ligante asfáltico y los modificadores utilizados en cada alternativa de mezcla, como el polvo de neumático pretratado para la alternativa 1 y la geomalla de fibra de vidrio para la alternativa 2. También se incluyeron los consumos de energía y las emisiones asociadas con estos procesos.

- Fabricación de la mezcla asfáltica: En esta fase se incluyó el proceso de mezclado de los materiales en la planta de asfalto, que implica consumos energéticos y emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del uso de diésel y electricidad en la planta de producción.
- Transporte: En esta etapa se consideró el traslado de los materiales desde los bancos de agregados y la planta de producción hasta el tramo de colocación. Se calcularon las distancias recorridas y las emisiones generadas durante estos traslados, tanto para los materiales como para la mezcla asfáltica.
- Construcción: En esta etapa se incluyeron las actividades de colocación y compactación de la mezcla asfáltica, así como el uso de maquinaria pesada, como pavimentadoras, rodillos y fresadoras. Durante esta etapa, se evaluó el consumo de combustible de la maquinaria y las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente asociadas.
- Mantenimiento y conservación: A lo largo del periodo de vida útil (30 años), se programaron actividades de mantenimiento preventivo y rehabilitación estructural, de acuerdo con el modelo HDM-4, lo que influyó en el consumo de materiales y energía asociados a estas intervenciones.
- Fin de vida útil: Esta etapa contempló el retiro del material asfáltico del pavimento, su transporte a sitios de acopio y la disposición final o reciclaje del pavimento. Se evaluó también el impacto ambiental asociado con la recuperación de materiales (como RAP) y su reutilización en la producción de nuevas mezclas.



El indicador ambiental seleccionado para la evaluación fue el Potencial de Calentamiento Global (GWP), expresado en kilogramos de dióxido de carbono equivalente (kg CO<sub>2</sub>). La elección de este indicador se fundamenta en su relevancia para la evaluación de impactos climáticos asociados a la infraestructura vial, así como en su amplia aceptación en estudios de ACV aplicados al sector del transporte y la construcción de pavimentos. Además, el GWP es el indicador que mejor refleja el impacto global de las emisiones de gases de efecto invernadero en términos de cambio climático.

### *6.2.2 Análisis del inventario*

El análisis del inventario del ciclo de vida o también conocido LCI por sus siglas en inglés, se centró en la recopilación y cuantificación de todos los flujos de entrada y salida asociados a las diferentes etapas del ciclo de vida de las alternativas de mezcla asfáltica. En este caso de estudio, el inventario se desarrolló considerando las etapas de producción, fabricación de mezcla, construcción, mantenimiento, conservación y fin de vida útil. Este enfoque permitió calcular los consumos energéticos, emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (kg CO<sub>2</sub> eq) y materiales utilizados a lo largo del ciclo de vida del pavimento.

Para ello, se utilizó una metodología de recopilación de datos, que incluyó la georreferenciación de bancos de materiales, el uso de registros operativos de la planta de producción, la observación en campo de los equipos de construcción y la integración de bases de datos especializadas. Además, se utilizó el formato de recopilación de datos adaptado del el Departamento Californiano de Transporte o California Department of Transportation (CALTRANS) como fue en el caso estudio 1, esto para asegurar que todos los cálculos fueran consistentes con las metodologías estándar de ACV para infraestructura vial.

### 6.2.2.1 Diseño de las mezclas asfálticas

Para la Alternativa 1: Mezcla densa convencional con refuerzo con geomalla de fibra de vidrio.

Esta primera alternativa fue diseñada con un espesor de 6 cm. Los materiales utilizados fueron grava, arena y asfalto PG 70H-16 como se puede ver en la figura 6-21 junto con los resultados volumétricos obtenidos durante los ensayos de laboratorio, adicionada con un refuerzo adicional de geomalla de fibra de vidrio R-120 para mejorar la cohesión estructural y resistencia a fisuración. Esta mezcla fue diseñada para mejorar el comportamiento estructural del pavimento bajo tráfico pesado y condiciones climáticas adversas. La inclusión de la geomalla se orienta a reforzar la cohesión interna de la mezcla y a prevenir la fisuración que comúnmente ocurre en pavimentos sometidos a altas tensiones repetidas. La geomalla de fibra de vidrio se incorpora en el diseño de esta alternativa con el propósito de mejorar la resistencia y la estabilidad estructural del pavimento, esta geomalla actúa como una red de refuerzo que ayuda a distribuir las tensiones de carga de manera más uniforme, reduciendo el riesgo de agrietamiento y fisuración, lo que se traduce en un mejor comportamiento ante el paso de vehículos pesados a lo largo de su vida útil.

El diseño de esta alternativa tuvo como objetivo principal aumentar la durabilidad del pavimento mediante el uso de una tecnología sencilla pero efectiva, la elección de asfalto PG 70H-16 garantizó una buena elasticidad para soportar fluctuaciones térmicas y cargas pesadas sin perder la cohesión estructural, el gran porcentaje de grava en la mezcla ayuda a proporcionar rigidez y resistencia al pavimento, mientras que la arena y el filler actúan como componentes esenciales para lograr la cohesión y el trabajo en conjunto de la mezcla.

La fibra de vidrio es tejida en una malla cuadrada con tamaño de 25.4 x 25.4 mm, tiene una resistencia a la tracción de 123.4 kN/m en la dirección máquina (MD) y 123.6 kN/m en la dirección transversal (CD), lo que asegura una gran capacidad de

refuerzo estructural. La geomalla se utilizó en un porcentaje de 0.1 % (en peso de la mezcla asfáltica), y su función principal es proporcionar una mayor cohesión en la mezcla asfáltica, especialmente en tramos con tráfico pesado y cargas repetidas. Al mejorar la estabilidad estructural, la geomalla contribuye a una mayor durabilidad del pavimento, reduciendo la frecuencia de intervenciones de mantenimiento a lo largo de su vida útil. Algunas especificaciones técnicas principales de la geomalla de fibra de vidrio R-120 se muestran a continuación, para conocer más a detalle revisar el Anexo II.

Resistencia a la tracción (MD): 123.4 kN/m

Resistencia a la tracción (CD): 123.6 kN/m

Alargamiento a carga máxima (MD): 2.8 %

Alargamiento a carga máxima (CD): 2.7 %

Tamaño de malla: 25.4 x 25.4 mm

Peso de la masa: 521.3 g/m<sup>2</sup>

Ancho: 3.95 m

Longitud: 100.2 m

Cantidad: 132 rollo (52,140 m<sup>2</sup>)

Para la alternativa 2: Mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado.

La segunda alternativa fue una mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado, con un espesor de 6 cm y utilizando polvo de neumático pretratado, esta alternativa buscó aprovechar el material reciclado para reducir la huella de carbono de la mezcla y mejorar su resistencia a la deformación, la incorporación de este aditivo mejoró las propiedades viscoelásticas de la mezcla pero presentó un leve aumento en la deformación permanente en comparación con la alternativa 1, sin embargo se ha analizado que el uso del neumático reciclado mejora las propiedades elastómericas de la mezcla, lo que proporciona una mejor respuesta frente a deformaciones y al desgaste, esta mezcla caracterizada por el buen

comportamiento a fatiga y menor tendencia al ahuellamiento, lo que la hace adecuada para condiciones de tráfico pesado.

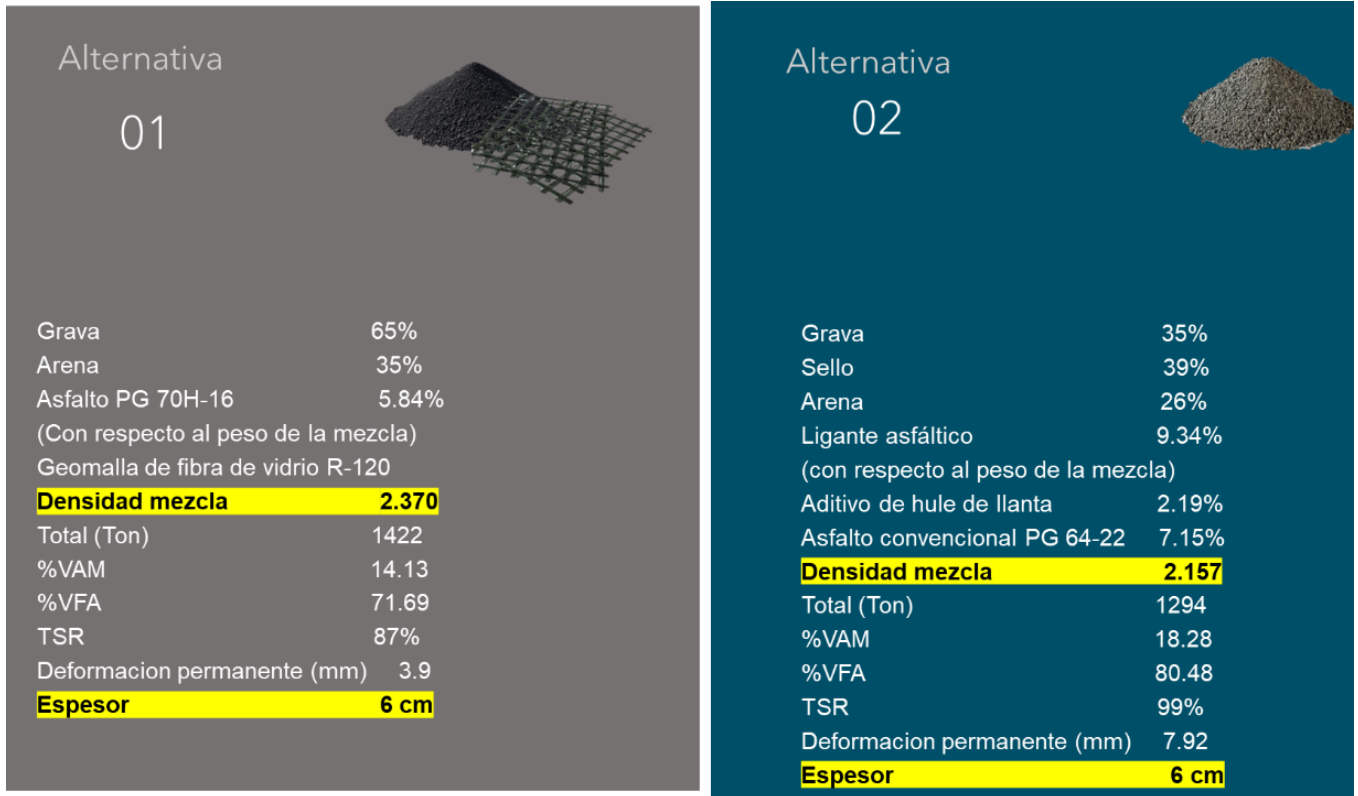


Figura 6-21 Diseños de la alternativa 1 y 2 para el caso estudio 2.

Fuente: Elaboración propia

#### 6.2.2.2 Producción de materiales y fabricación de la mezcla

La etapa de producción de materiales y fabricación de la mezcla asfáltica fue una de las fuentes más significativas de consumo energético dentro del ciclo de vida de la carpeta asfáltica. En este caso de estudio, la planta de producción de mezcla asfáltica AMMANN Prime Drum-Mix denominada “La providencia” se encargó de la producción continua de la mezcla asfáltica, con una capacidad operativa de 100 a 140 toneladas por hora. Esta planta está equipada con un quemador a contraflujo y tolvas dosificadoras múltiples, lo que permitió controlar con precisión la dosificación de los materiales y la mezcla final. A continuación, se describen los detalles

operativos, el consumo de energía y los parámetros involucrados en la producción de las dos alternativas de mezclas evaluadas en este caso estudio.

La planta utilizada en este caso estudio es de tipo Drum-Mix lo que implica que el mismo tambor realiza tanto el secado de los agregados como la mezcla de estos con el asfalto y cuenta con las siguientes características clave:

- Tipo de planta y modelo: AMMANN Prime Drum-Mix, planta de producción continua.
- Capacidad operativa: Entre 100 y 140 toneladas por hora.
- Características y componentes principales: Tambor único para el secado y mezclado de los materiales, tolvas dosificadoras múltiples que permiten controlar la cantidad de agregados, asfalto y aditivos y un control automatizado para el ajuste preciso de las temperaturas de mezclado y la homogeneización de la mezcla.



*Figura 6-22 Planta de producción de mezcla asfáltica “La Providencia”.*

Fuente: COVIMEXI, 2024

El proceso de producción de la mezcla asfáltica para ambas alternativas fue realizado en esta planta y siguiendo un protocolo estricto de calidad que incluye las siguientes fases:

- 1) Preparación de los materiales: Los agregados (grava, arena y fillers) fueron cargados en las tolvas dosificadoras de la planta. Para la alternativa 1 (mezcla convencional) se usaron agregados y asfalto sin aditivos, mientras que en la alternativa 2 (mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado) se incorporó el polvo de neumático reciclado como un aditivo en la composición de la mezcla, para lo cual se ajustó la dosificación del material en planta y se hicieron las respectivas calibraciones.
- 2) Secado de los agregados: Los agregados fueron calentados en un tambor rotatorio a temperaturas de entre 150°C y 160°C para la mezcla convencional y entre 178°C y 182°C para la mezcla con polvo de neumático pretratado, Las temperaturas más altas para la mezcla con este aditivo se deben a la necesidad de activar el hule reciclado y asegurara su homogeneización con el asfalto.
- 3) Mezcla de los materiales: El asfalto PG 64-22 en la alternativa 2 y PG 70H-16 en la alternativa 1, fue dosificado con respecto a los diseños de cada alternativa e incorporado en el tambor mezclador de la planta.
- 4) Almacenaje y transporte: Una vez que ambas mezclas fueron producidas, estas fueron transportadas al tramo de prueba mediante camiones tipo Torton con capacidad de carga de 20 toneladas aproximadamente, lo que facilitó la logística y el manejo de la mezcla en el lugar de intervención. La distancia de transporte desde la planta de producción hasta el sitio de colocación fue de 20 km, lo que también fue considerado en los cálculos de emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al transporte, sin embargo, esto se abundara más adelante en el apartado relacionado al transporte.

Con respecto al consumo energético durante la etapa de producción, al igual que en el caso de estudio anterior se realizaron cálculos detallados del consumo de energía térmica y energía eléctrica para cada alternativa de mezcla, considerando tanto el diésel como la electricidad utilizada en la planta, teniendo como resumen lo siguiente:

Tabla 6-4 Consumos energéticos del caso estudio 2.

Tipo de mezcla	Diesel (L/ton)	Energía térmica MJ/ton	Energía eléctrica kWh/ton	Temp. mezclado (°C)	Temp. comp. (°C)	Tiempo mezclado por ciclo (s)	Energía térmica total (MJ)	Energía eléctrica total (kWh)
Alternativa 01	7	270.2	75.96	150 – 160	135 – 145	35 – 45	546,360.37	153,595.61
Alternativa 02	9	347.4	96.55	178 – 182	168 – 172	50 – 60	578,199.63	160,694.23

Fuente: Elaboración propia.

El consumo de energía térmica fue mayor para la alternativa 2 ya que el proceso de producción requiere temperaturas de mezclado más altas debido a las propiedades del polvo de neumático pretratado. Esta diferencia en los consumos de energía es relevante para la comparación de impacto ambiental de ambas alternativas, la mezcla con polvo de neumático pretratado requiere mayores temperaturas para garantizar la activación del neumático reciclado en el asfalto, lo que implica un mayor consumo de energía térmica en la producción.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente asociadas al consumo de diésel y energía eléctrica se calcularon utilizando factores de emisión obtenidos de bases de datos reconocidas como USLCI (U.S. Life Cycle Inventory) y FHWA (Federal Highway Administration). Para diésel, el factor de emisión es de 2.68 kg CO<sub>2</sub>/L, mientras que, para la energía eléctrica, el factor varía según la fuente de electricidad utilizada en la planta de producción. En resumen, la etapa de producción de materiales y fabricación de la mezcla asfáltica fueron componentes clave del impacto ambiental de las alternativas de mezcla asfáltica.

#### 6.2.2.3 Etapa de construcción.

La etapa de construcción fue un proceso importante en la implementación de proyectos de pavimentación, ya que involucra diversas actividades que requieren el uso de maquinaria pesada y equipos especializados para la colocación de la mezcla

asfáltica y su compactación final. En el ACV fue especialmente relevante, ya que generó un consumo considerable de energía y emisiones de gases contaminantes asociados tanto al uso de maquinaria como al consumo de combustible en los diferentes procesos constructivos. Para este estudio, se recopiló información sobre los rendimientos operativos de cada equipo, así como el consumo de combustible y los tiempos de operación observados durante el proceso de construcción en campo. Los datos fueron obtenidos a través de observación directa en el sitio de construcción y se estructuraron en tablas técnicas para evaluar el impacto ambiental de cada actividad en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (kg CO<sub>2</sub> eq) y consumo de energía durante la fase de construcción.

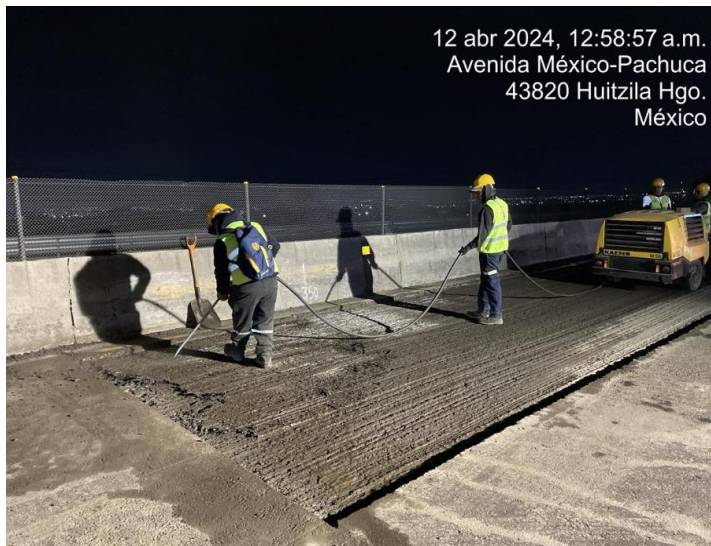
En este caso estudio, la construcción del pavimento en el tramo de la autopista México – Pachuca (entre los kilómetros 49+347 y 49+817) fue ejecutada con la aplicación de dos alternativas de mezcla asfáltica mencionadas anteriormente, en esta etapa también se incluyeron actividades complejas como la colocación de la mezcla, la compactación y el uso de equipos especializados, además, en la alternativa 1, se utilizó una geomalla lo cual se describirá con más detalle en el proceso de colocación.

a) Preparación y limpieza de la superficie.

El primer paso fue la preparación de la superficie, que incluyó la limpieza de la vía para eliminar escombros y suciedad, garantizando que la mezcla asfáltica tuviera una buena adherencia. En este caso, se utilizó la barredora de la marca Broce Broom modelo BC-COV-03, que es ideal para limpiar grandes áreas de forma eficiente.

b) Fresado

Antes de la colocación de la nueva mezcla, fue necesario realizar el fresado de la capa de asfalto existente. Para ello, se utilizó la fresadora Wirtgen RX-800, que permitió remover el material dañado o deteriorado de la capa superficial para crear una base sólida para la nueva mezcla, esta etapa de fresado fue un proceso que demandó gran cantidad de energía debido al uso de discos de corte de alta resistencia, especialmente al trabajar con materiales endurecidos y deteriorados.



*Figura 6-23 Fresado y barrido en caso estudio 2.*

Fuente: Elaboración propia.

#### c) Transporte de material

El transporte de materiales fue un paso crucial para llevar tanto los agregados desde los bancos de materiales hasta la planta de producción, como la mezcla asfáltica desde la planta hasta el sitio de colocación, para estos movimientos se utilizaron camiones tipo Torton, con una capacidad de 20 toneladas para los agregados y la mezcla.

#### d) Colocación de la mezcla

En esta etapa se utilizó la pavimentadora de la marca Caterpillar AP555F, que tiene la capacidad de colocar la mezcla de forma uniforme sobre el tramo de carretera, este equipo es fundamental para garantizar que la mezcla se extienda de manera homogénea y se eviten fisuras o deficiencias en el pavimento, este equipo permitió cubrir rápidamente grandes áreas de superficie mientras se aplica la mezcla con alta precisión. El consumo estimado de combustible fue de 62.5 L, contribuyendo a la emisión de gases contaminantes debido al uso de diésel en la operación.

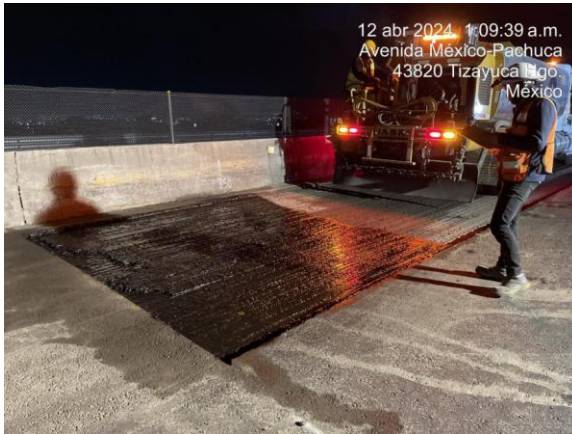


Figura 6-24 Colocación de la mezcla en caso estudio 2.

Fuente: Elaboración propia.

e) Colocación de la geomalla.

En la alternativa 1, la geomalla de fibra de vidrio R-120 se colocó como refuerzo estructural para aumentar la resistencia y estabilidad del pavimento, este proceso fue realizado con la maquinaria adecuada que garantizó la correcta integración de la geomalla con la mezcla asfáltica, asegurando una buena adhesión entre ambos materiales, esta geomalla fue colocada sobre la superficie previamente preparada y compactada, antes de la aplicación de la mezcla asfáltica.

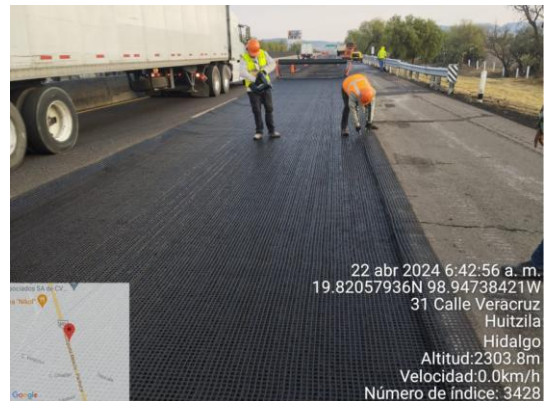


Figura 6-25 Colocación de geomalla de fibra de vidrio.

Fuente: Elaboración propia.

f) Compactación inicial

La compactación inicial fue realizada utilizando el rodillo liso Caterpillar CS56, el

cual es un equipo especial para garantizar la estabilidad estructural del pavimento, este punto fue clave para asegurar que la mezcla asfáltica se adhiriera adecuadamente al suelo y se logre la estabilidad necesaria para soportar el tráfico pesado, en este proceso, el rodillo liso operó durante 2 horas, consumiendo 30 L de diésel.



Figura 6-26 Etapa de compactación en caso estudio 2.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra un resumen de toda la maquinaria empleada, con los rendimientos y tiempos efectivos analizados de acuerdo con el proceso constructivo que se utilizó para este caso.

Tabla 6-5 Resumen de los equipos utilizados en el proceso constructivo para caso estudio 2.

Proceso Constructivo	Maquinaria	Marca / Modelo	Rend. (m <sup>2</sup> /h)	Consum. (L/h)	Área (m <sup>2</sup> )	Tiemp. Estim (h)	Consum. Total (L)	Observaciones
Preparación y limpieza	Barredora	Broce Broom BC-COV-03	6000	15	10000	1.67	25	Limpieza de superficie vial
Fresado	Fresadora	Wirtgen RX-800	2500	20	10000	4	80	Remoción capa superficial
Transporte de material	Camión Torton	Ford convencional*	3.15	N/A	N/A	381	2880	120 viajes, rendimiento en toneladas/h
Colocación de mezcla	Pavimentadora	Caterpillar AP555F	4000	N/A	10000	2.5	62.5	Aplicación uniforme mezcla asfáltica
Transporte de mezcla	Camión Torton	Ford convencional*	3.15	N/A	N/A	381	2880	Igual que transporte material
Colocación de geomalla	Geomalla	N/A	N/A	N/A	10000	0.5	N/A	Aplicación de geomalla como refuerzo de base
Compactación primaria	Rodillo liso	Caterpillar CS56	5000	15	10000	2	45	Compactación inicial del asfalto
Compactación secundaria	Rodillo vibratorio	Bomag BW 24	5000	15	10000	2	45	Compactación final del asfalto
Movilidad personal	Camioneta	Toyota Hilux**	40	N/A	N/A	4	14.4	Transporte personal, 2 días
*El rendimiento es en t/h								
**El rendimiento es en km/h								

Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.2.4 Etapa de uso y conservación

La etapa de uso y conservación involucró las intervenciones periódicas necesarias para mantener las condiciones óptimas de la carpeta asfáltica a lo largo de su vida útil. Durante esta etapa, se consideran actividades de mantenimiento preventivo y rehabilitación estructural que son esenciales para prolongar la vida útil del pavimento y garantizar su desempeño en condiciones de tráfico pesado y condiciones climáticas adversas. De igual manera que el caso anterior, para este caso estudio se desarrolló un modelo de mantenimiento y conservación basado en el desempeño mecánico de las mezclas y los resultados obtenidos en los laboratorios de asfalto (Ver Tabla 6-6) Este modelo también fue implementado utilizando el software HDM-4 que permitió proyectar las intervenciones necesarias a lo largo de un periodo de 30 años en función de los resultados de desempeño observados en las pruebas realizadas.

Tabla 6-6 Plan de mantenimiento y conservación para caso estudio 2.

Alternativa	Mezcla asfáltica	Vida útil (años)	Espesor inicial (cm)	Años																										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	Mezcla discontinua con polvo de neumático predigerido	30	6	<b>Mantenimiento Preventivo</b> <b>Intervención:</b> Sello superficial / microcarpeta o capa delgada de repavimentación. <b>Espesor:</b> 3 cm. <b>Motivo:</b> Aparecen desgaste superficial y fisuración leve; se busca proteger la mezcla y retrasar daños estructurales.														<b>Rehabilitación Intervención:</b> Fresado parcial de la carpeta (=4 cm) y nueva capa de mezcla asfáltica. <b>Espesor:</b> 4 cm. <b>Motivo:</b> El pavimento comienza a mostrar ahuellamiento y fisuración más marcada por tráfico repetido.											<b>Rehabilitación Final Intervención:</b> Rehabilitación estructural con fresado completo y nueva capa de mezcla asfáltica. <b>Espesor:</b> 6-8 cm. <b>Motivo:</b> El pavimento ha alcanzado el fin de su vida útil, con fisuración y desgaste significativos.	
2	Mezcla densa convencional 6 cm + geomalla de fibra de vidrio interlaminar	30	6	<b>Mantenimiento Preventivo</b> <b>Intervención:</b> Sello superficial / microcarpeta para restaurar textura y sellar microfisuras. <b>Espesor:</b> 3 cm. <b>Motivo:</b> Aparecen primeros signos de desgaste; se protege la capa superior antes de que la fisuración alcance la geomalla.														<b>Rehabilitación Intervención:</b> Fresado de la capa superior sin afectar la geomalla (=4 cm) y colocación de nueva capa de mezcla asfáltica. <b>Espesor:</b> 4 cm. <b>Motivo:</b> La carpeta superior presenta fisuración y ahuellamiento, pero la geomalla mantiene la integridad interlaminar y permite una rehabilitación menos profunda..											<b>Rehabilitación Final Intervención:</b> Rehabilitación estructural con fresado completo y nueva capa de mezcla asfáltica. <b>Espesor:</b> 6-8 cm. <b>Motivo:</b> El pavimento ha alcanzado el fin de su vida útil, con fisuración y desgaste significativos.	

Fuente: Elaboración propia.

Este modelo tiene la capacidad de calcular y estimar las intervenciones necesarias en función del desempeño estructural de cada alternativa de mezcla asfáltica, proyectando las acciones de mantenimiento a lo largo del tiempo. Para este caso, el modelo fue configurado para evaluar dos alternativas de mezcla como ya se vio en los diseños con base en los resultados obtenidos en el laboratorio y en los datos de tráfico específicos y estimados con base a un análisis de tránsito del tramo México – Pachuca

El mantenimiento preventivo en ambas alternativas consistió en la aplicación de sellos superficiales o micro carpeta para restaurar la textura del pavimento y evitar la aparición de fisuras superficiales, estas intervenciones se programaron con una frecuencia de 5 a 6 años, aunque en el caso de la mezcla con polvo de neumático pretratado se ajustaron a un ciclo de 4 años debido a los desgastes más rápidos observados.

Con respecto a la rehabilitación estructural se propuso un remplazo de la capa superficial del pavimento, con un fresado completo y la colocación de una nueva capa de mezcla asfáltica, esta intervención se realiza en función del desempeño estructural y se programó cada 10 a 12 años para cada una de las alternativas de mezcla, dependiendo de los signos de fisuración profunda y deformación estructural observados en el pavimento.

Para realizar las proyecciones de tráfico en HDM-4 (ver figura 6-27), se utilizó el Tráfico Diario Promedio Anual (TDPA), con datos proporcionados por la SICT sobre la demanda vehicular en el tramo del caso estudio entre 2013 y 2023, este análisis incluyó la clasificación de los vehículos según su peso y tipo (camiones unitarios, camiones articulados, entre otros), lo cual es crucial, ya que el tráfico pesado afecta significativamente el desgaste estructural del pavimento. Los datos mostraron que el tráfico de carga en el tramo ha tenido un crecimiento continuo, especialmente en los últimos años, con un aumento del 21.9 % entre 2022 y 2023. Este incremento en el tráfico se incorporó al modelo de mantenimiento para estimar los impactos sobre las alternativas de mezcla y las frecuencias de intervención. Las mejoras en el desempeño de las mezclas fueron modeladas para reflejar los efectos del tráfico

pesado sobre la durabilidad y resistencia de cada mezcla, lo que permitió ajustar las proyecciones de mantenimiento y determinar cuándo y cómo las intervenciones de rehabilitación serían necesarias.

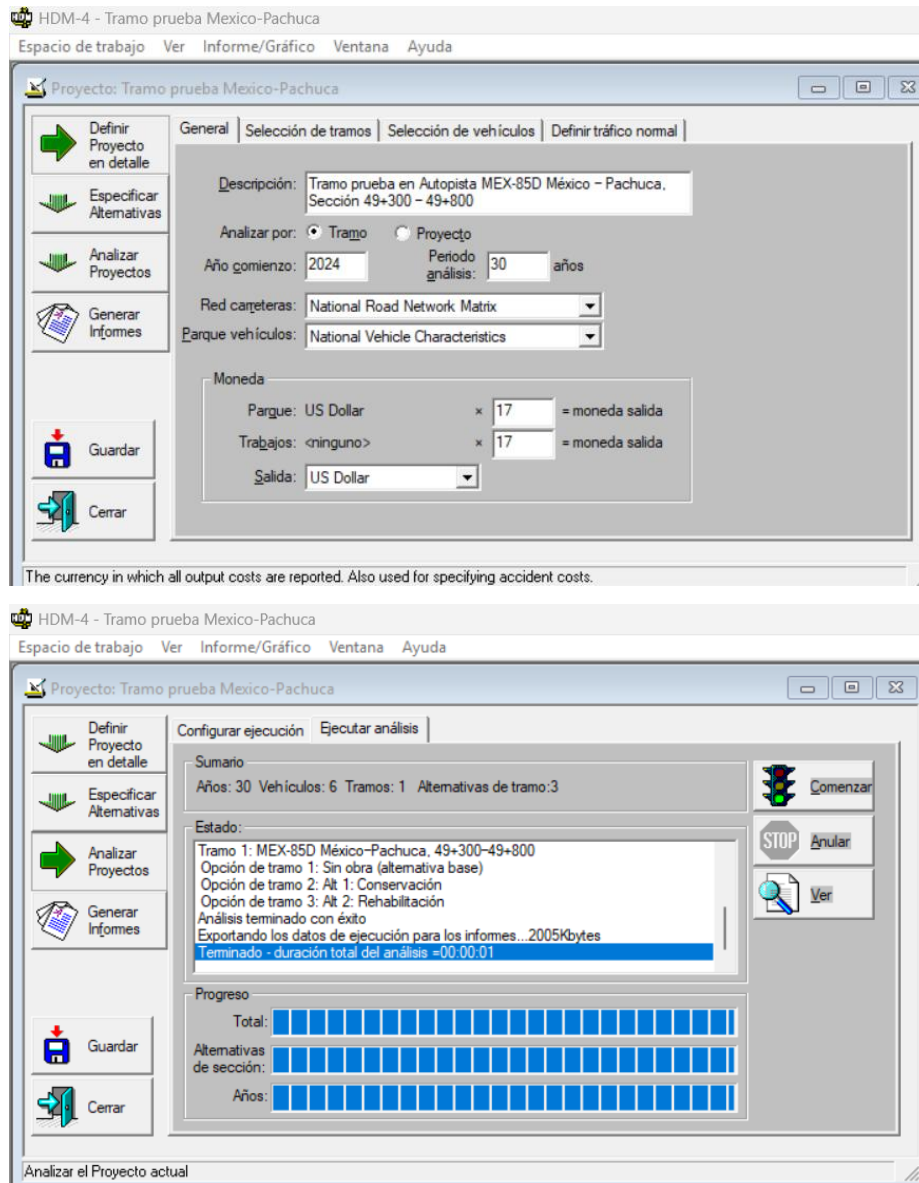
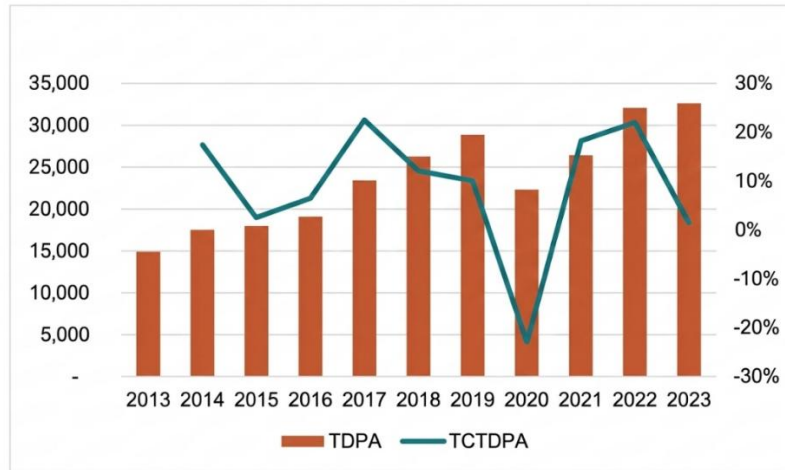


Figura 6-27 Modelo en software HDM-4 del caso estudio 2.

Fuente: Elaboración propia.

El tramo de prueba se realizó entre los cadenamientos 49+300 y 49+800, esto comprendido en la sección de la autopista federal 85D México – Pachuca. En tal tramo existe un punto cercano de monitoreo de datos viales por parte de la SICT

(X.C. Otumba – Tizayuca), los cuales fueron recopilados desde el año 2013 al 2023 (SICT- Dirección general de servicios técnicos).



\*TCTDPA: Tasa de crecimiento del TDPA.

Figura 6-28 Histograma TDPA General, datos viales sobre el tramo de prueba.

Fuente: Elaboración propia con información de datos viales, SICT 2024.

Tabla 6-7 Volumen de la clasificación vehicular en el tramo de prueba.

Año	M: Motocicletas	AU: Automóviles + pick ups	B: Autobuses	CU: Camiones C2 + C3 + C4	CA1: T3S2 + T3S3	CA2: T3S2R4 + Otros	TDPA
2013	134	12434	537	1239	418	164	14927
2014	123	14945	508	1314	473	158	17520
2015	126	15322	521	1347	485	162	17963
2016	134	16296	554	1433	516	172	19104
2017	304	19953	492	1967	562	141	23419
2018	367	22566	604	1942	604	157	26240
2019	549	24910	838	1849	607	144	28898
2020	379	18803	624	1782	490	201	22279
2021	474	23576	580	975	632	105	26342
2022	578	28925	674	1059	738	128	32103
2023	587	28888	783	1304	880	163	32605
<b>*TCMA 2021-2023</b>	11,30%	10,70%	16,20%	15,70%	18,00%	24,40%	11,30%
<b>*TCMA 2013- 2023</b>	15,90%	8,80%	3,80%	0,50%	7,70%	-0,10%	8,10%

\*TCMA: Tasa de crecimiento media anual

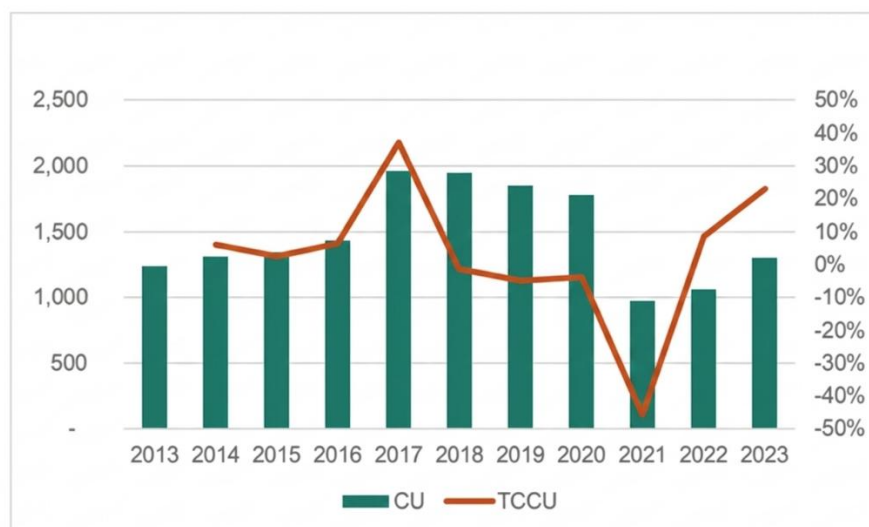
Fuente: Elaboración propia con información de datos viales, SICT 2024.

La figura y la tabla anterior permitieron identificar la magnitud del Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) que ha circulado por el tramo de interés, en donde se visualiza dicha información año con año entre el período 2013 y 2023. En 10 años el TDPA ha pasado de 14,927 vehículos a 32,605 unidades; creciendo en promedio por año un 8.1 % su aforo. Además, se visualizó una caída de la demanda en el año 2020, esto debido a las restricciones de movilidad que se impusieron durante la pandemia provocada por la Covid-19; impactando en la demanda de viajes para la población en general. Si bien el efecto de la pandemia en la demanda del transporte fue evidente, para este tramo carretero se identificó una recuperación hasta el año 2022, superando los volúmenes observados durante el año 2019 antes de las restricciones de movilidad; con un crecimiento promedio anual del 11.3 % entre el año 2021 y 2023.

Con el fin de evaluar con mayor profundidad la demanda de viajes en la autopista del caso estudio, se analizaron los volúmenes reportados por los datos viales de la SICT por categoría vehicular, particularmente en los vehículos de carga: CU (C2 + C3 + C4), CA1 (T3S2 +T3S3) y CA2 (T3S2R4 + Otros). Esto únicamente en el sentido 1 (México - Pachuca), y en el punto de monitoreo más cercano al tramo de prueba (X.C. Otumba - Tizayuca).

Con respecto a la evolución del TDPA de los camiones unitarios (CU) se pudo analizar que estos suelen satisfacer viajes de mediano a largo itinerario, abarcando un mercado logístico que permita el transporte de bienes dentro de una superficie urbana. Por ello, los camiones unitarios suelen tener un comportamiento estable en cuanto a sus aforos, que, en el caso del tramo de interés, se identificó un decrecimiento del 45.3 % para el año 2021 respecto a su volumen del 2020, y posteriormente crecer con un 23.1 % del 2022 al 2023.

Es importante recalcar también que para el año 2023, aun no se alcanzan los volúmenes observados hasta el año 2020, esto debido a las nuevas alternativas de circulación que se habilitaron en conjunto con el Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles.



\*TCCU: Tasa de crecimiento de Camiones Unitarios.

Figura 6-29 Histograma TDPA Camiones unitarios y su evolución sobre el tramo de prueba.

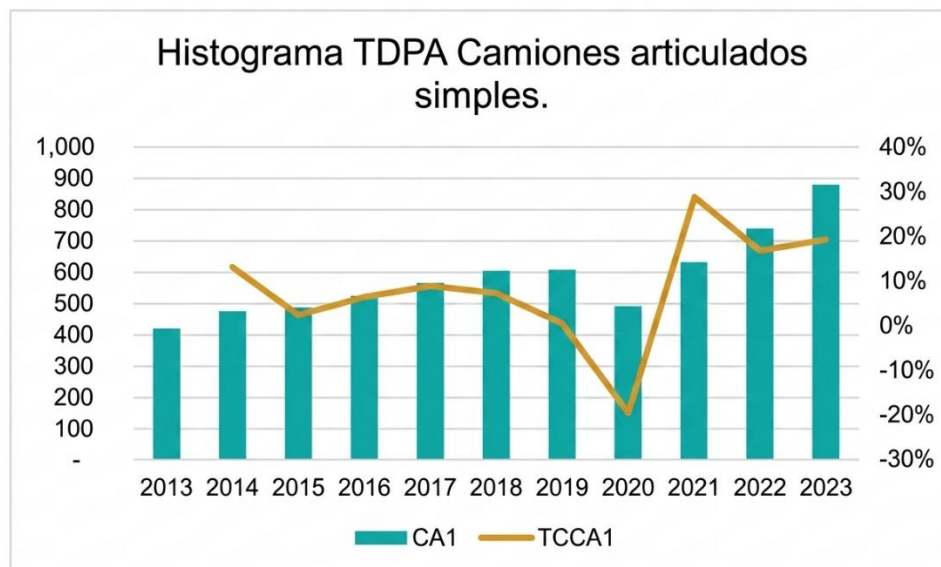
Fuente: Elaboración propia con información de datos viales, SICT 2024.

Con respecto a los camiones articulados atienden mercados que requieren de viajes de largo itinerario, interactuando con zonas industriales que suelen estar en la zona circundante de una superficie urbana. Esta categoría al tener mayor capacidad de carga, pero aún con una distribución estructural de no más de 6 ejes y la presión sobre el pavimento que ejercen estas unidades suele ser mayor al resto del tránsito; por lo que su monitoreo es de suma importancia.

En el caso del tramo de prueba de interés, el TDPA de los camiones articulados simples ha pasado de las 418 unidades en 2013 a los 880 camiones en 2023, esto con un crecimiento medio anual del 7.7 % en estos 10 años observados. Sin embargo, al igual que el resto de la categoría vehicular, durante el 2020 se presentó una caída del -19.2 % respecto al año 2019; recuperándose inmediatamente con un crecimiento del 29.0 % en el año 2021, con una tendencia de crecimiento que continuaría hasta el 2023 y con un crecimiento medio anual del 18.0 % entre 2021 y 2023.

Es importante señalar que, para esta categoría vehicular, se identifican crecimientos anuales del 29.0 %, 16.8 % y 19.2 % para los años 2021, 2022 y 2023

respectivamente; pasando de volúmenes de 607 camiones en 2020 antes de pandemia a 880 unidades en el año 2023. Este crecimiento del 45.0 % entre el periodo previo a los efectos de la pandemia por COVID-19 y posterior a los mismos pueden ser un indicativo de un deterioro prematuro del pavimento en la autopista federal 85D, ya que entre el año 2013 y 2019 las tasas de crecimiento anuales rondaban del 2.5 % al 9.0 %, lo que pudo alterar los programas de conservación que se tenían contemplados con tal evolución del aforo.



\*TCCA1: Tasa de crecimiento de Camiones articulados simples.

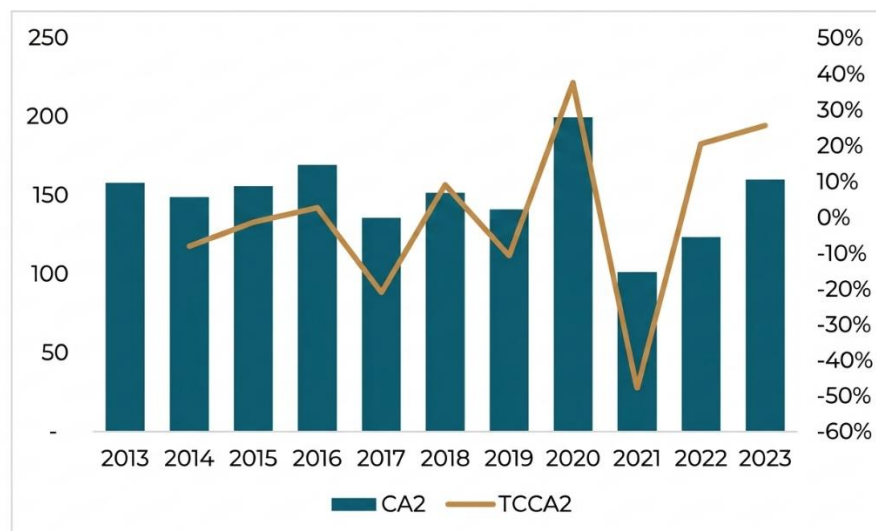
Figura 6-30 Evolución del TDPA de camiones articulados simples sobre el tramo de prueba.

Fuente: Elaboración propia con información de datos viales, SICT 2024.

Al igual que los camiones articulados simples, los dobles articulados abarcan la demanda de viajes de largo itinerario, siendo la categoría vehicular que transporta la carga máxima permitida en la red de caminos. Por ello, el crecimiento o decrecimiento de esta categoría vehicular, impactará directamente en la vida remanente del pavimento del activo carretero en cuestión. Para este tramo prueba de la autopista los camiones articulados dobles presentaron una tasa de crecimiento media anual del 8.1 % esto en el periodo 2013 – 2023; siendo la categoría con la tasa de crecimiento mayor en este punto monitoreado. Si bien en el año 2020 no se

presentó una caída del aforo, para el año 2021 se redujo un 47.0 % respecto al 2020.

En la Figura 6-31 se puede observar el crecimiento de los viajes de camiones articulados dobles en 2022 y 2023, aun así, son volúmenes menores a lo observado antes del año 2022, pasando de volúmenes de 201 camiones en 2020 a 163 unidades en 2023. Si bien en términos de cantidad de camiones la diferencia es de 38 unidades, esto significó un 19.0 % de demanda menor que hay actualmente a diferencia de los volúmenes en el 2020.



\*TCCA1: Tasa de crecimiento de Camiones articulados dobles.

Figura 6-31 Histograma TDPA camiones articulados dobles y su evolución sobre el tramo de prueba.

Fuente: Elaboración propia con información de datos viales, SICT 2024.

Con los resultados obtenidos en este análisis del TDPA y los diseños de las mezclas se pudo trabajar en el plan de mantenimiento y conservación, en el cual se permitió ajustar las frecuencias de intervención según el desempeño observado de las mezclas y las proyecciones de tráfico, la demanda de tráfico y el comportamiento de los vehículos pesados fueron factores clave que justificaron la frecuencia de las intervenciones y el tipo de mantenimiento necesario para garantizar la funcionalidad del pavimento a lo largo de su vida útil. El impacto ambiental de las intervenciones de mantenimiento y rehabilitación fue evaluado tomando en cuenta los consumos

energéticos y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a cada tipo de intervención. Como se mencionó en los capítulos anteriores, el uso de maquinaria pesada en la rehabilitación estructural y mantenimiento preventivo contribuye significativamente a las emisiones de gases contaminantes, siendo la rehabilitación estructural la intervención que genera las mayores emisiones debido al uso intensivo de fresadoras y otros equipos pesados. Las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente generadas por las intervenciones de mantenimiento fueron modeladas dentro del software HDM-4, proporcionando una visión integral de cómo las intervenciones programadas afectan el impacto ambiental total de cada alternativa.

#### 6.2.2.5 Etapa fin de vida útil.

La etapa de fin de vida útil del pavimento asfáltico es la última fase como en el caso anterior y representa una porción más pequeña del impacto ambiental total en comparación con las etapas de producción y construcción, las decisiones relacionadas con la disposición final y el reciclaje de los materiales pueden contribuir significativamente a la sostenibilidad del sistema vial. En este estudio de igual manera que el anterior, se consideró la gestión del RAP como una estrategia clave de reciclaje y reutilización de materiales, lo cual no solo ayudó a reducir los residuos generados, sino que también minimiza el impacto ambiental asociado a la disposición final de los pavimentos deteriorados. Al finalizar la vida útil de la carpeta se contempló la remoción y el reciclaje del RAP, donde este fue llevado a una copio a 5 km de distancia del sitio de intervención en un espacio autorizado para el reciclaje de pavimentos, esta estrategia de reciclaje tiene como objetivo cerrar el ciclo de vida de los materiales, contribuyendo a la sostenibilidad del sistema vial a reutilizar los materiales ya utilizados en la producción de nuevas mezclas asfálticas o en rehabilitaciones de tramos adyacentes.

Se tiene proyectado que, una vez acopiado el RAP, se procederá a su reciclaje para la producción de nueva mezcla asfáltica o para su rehabilitación en tramos adyacentes. El proceso de reciclaje implica varias fases, iniciando con el triturado

del RAP en una planta de reciclaje para obtener un material que pueda mezclarse y reutilizarse en una nueva mezcla, una vez triturado, el RAP se mezcla con ligantes nuevos o rejuvenecedores para garantizar que la mezcla asfáltica tenga las propiedades necesarias para soportar el tráfico y las condiciones ambientales. Seguido de esto, el RAP reciclado se integra en la fabricación de mezcla para formar una nueva mezcla asfáltica, que luego puede ser utilizada en proyectos viales futuros o para la rehabilitación de tramos adyacentes.

En este estudio, se asumió que el 20.0 % del RAP recolectado se reutilizará para fabricar nuevas mezclas asfálticas. Esta proporción es una estrategia estándar en proyectos de reciclaje de pavimentos, ya que permite reducir significativamente la demanda de materiales vírgenes y el consumo de energía asociado con la producción de nuevo asfalto, el porcentaje restante del RAP (aproximadamente 80.0 %) se destinará a vertederos o se podrá utilizar para otras formas de disposición final, como el uso en carreteras secundarias o espacios de acopio temporal. El reciclaje del RAP tiene importantes beneficios ambientales, ya que reduce la demanda de recursos vírgenes (como grava y asfalto nuevo) y disminuye las emisiones asociadas a la producción de nuevas mezclas asfálticas, sin embargo, el proceso de reciclaje también genera emisiones y consumo energético asociados a las fases de trituración y mezcla del material reciclado, aunque estas emisiones son considerablemente menores que las asociadas con la producción de asfalto nuevo.

### *6.2.3 Fase de evaluación*

Una vez recopilados los datos del inventario, la tercera fase del ACV al igual que en el caso anterior consistió en evaluar los impactos ambientales derivados de los flujos de entrada y salida identificados. Este paso fue crucial, ya que permitió cuantificar los efectos ambientales de cada alternativa de mezcla asfáltica a lo largo de su ciclo de vida, desde la producción de materiales hasta el fin de vida útil.

Para ello, se requirió el uso del mismo programa LCA Pave ya que es un software especializado que permitió modelar las distintas etapas del ciclo de vida, integrando

bases de datos de emisiones, realizando los cálculos automáticos y presentando los resultados conforme a metodologías reconocidas y establecidas a nivel internacional.

### 6.2.3.1 Modelado en software de ACV

De igual manera que en el caso anterior, una vez recopilada toda la información correspondiente a cada fase del ciclo de vida de las dos alternativas de mezclas asfálticas se procedió a la etapa de modelación. Los resultados de esta fase proporcionaron información clave sobre el comportamiento ambiental durante un periodo inicial y durante un periodo proyectado de 30 años de vida útil considerados en la proyección propuesta en el programa de mantenimiento y conservación obtenido de la modelación de las alternativas en HDM-4.

El proceso de modelado para la cuantificación de emisiones comenzó con la definición de las dos alternativas de mezcla y la asignación de datos específicos para cada una de las etapas del ciclo de vida, desde las características de los agregados, la maquinaria empleada y el plan de mantenimiento, LCA Pave permitió estructurar el modelo en bloques detallados proporcionando una simulación para analizar del comportamiento ambiental de cada alternativa (ver Figura 6-32).

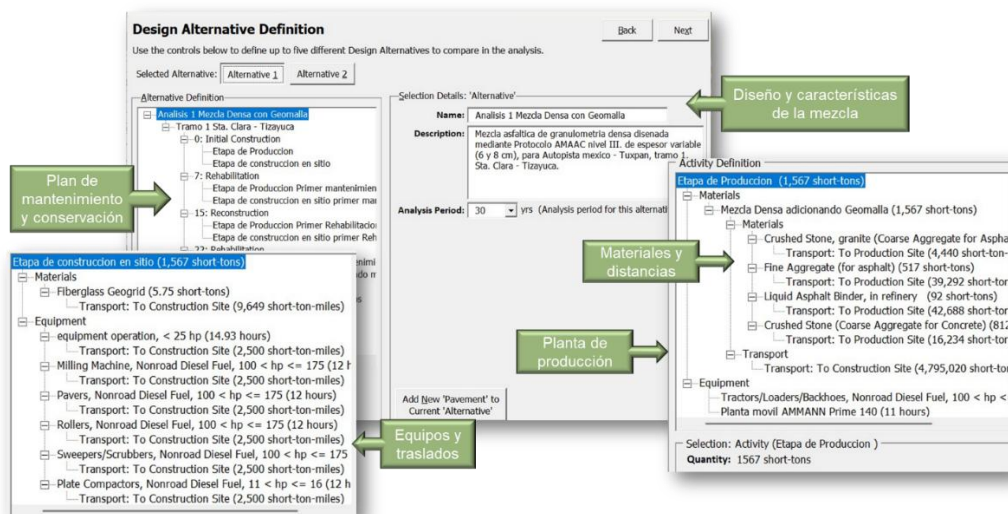


Figura 6-32 Modelado de primer caso estudio 2 en LCA Pave.

Fuente: Elaboración propia.

La primera fase del modelado fue la definición de las características de la mezcla. Se ingresaron los datos relativos a la composición de las mezclas, basados en los resultados obtenidos en el laboratorio. Estos incluyen:

- e) Tipo de mezcla: Se definieron las dos alternativas de mezcla a evaluar (mezcla densa convencional con la incorporación de geomalla de fibra de vidrio y mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado).
- f) Proporciones de agregados: Se especificaron las cantidades de grava, arena y aditivos para cada mezcla, con base en los resultados de laboratorio obtenidos en las pruebas de composición volumétrica.
- g) Asfalto: Para cada alternativa se especificó el tipo de ligante asfáltico utilizado, como asfalto convencional.
- h) Aditivos: En el caso de la mezcla con polvo de neumático y la geomalla de fibra de vidrio, se ingresaron los porcentajes y su respectiva colocación en el proceso constructivo.

Los resultados obtenidos de los ensayos de modulo dinámico, resistencia a la fatiga y deformación permanente también fueron integrados al modelo para reflejar la durabilidad estructural de cada alternativa. En la fase de producción, se ingresaron datos sobre los materiales utilizados en la producción de la mezcla, tales como:

- d) Origen y tipo de materiales: Se definieron las distancias de transporte de los materiales, incluyendo bancos de agregados, refinería de asfalto y plantas de los aditivos.
- e) Consumo energético: Se incorporaron los consumos de energía térmica y eléctrica de la planta AMMANN, incluyendo el consumo de diésel en el proceso de mezcla y energía eléctrica consumida por los equipos de la planta.
- f) Tiempo de operación: Se especificaron las horas de funcionamiento de la planta y el número de toneladas producidas durante la operación, lo que permitió calcular de manera precisa el consumo total de energía por tonelada

de mezcla.

La fase de construcción involucró el modelado de las actividades de tendido de la mezcla y compactación. Para ello se definieron las siguientes variables:

- d) Equipos utilizados: Se ingresaron los tipos de maquinaria y los rendimientos de cada equipo, como fresadoras, pavimentadoras, rodillos lisos y rodillos neumáticos y lo necesario para tender la geomalla de fibra de vidrio. Se especificaron las marcas y modelos.
- e) Consumo de combustible: Para cada máquina, se detalló el consumo de combustible por hora, calculando el total de litros de diésel consumidos durante las horas estimadas de operación.
- f) Tiempo estimado de operación: Los tiempos de operación de cada equipo fueron determinados con base en el rendimiento y área cubierta, lo que permitió calcular el consumo total de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes asociadas a cada actividad.

Para la etapa de mantenimiento y conservación, se ingresaron las actividades previstas para cada alternativa a lo largo de 30 años. Este modelado incluyó las siguientes intervenciones:

- c) Frecuencia de mantenimiento preventivo: Se modelaron las actividades de mantenimiento preventivo y la frecuencia de rehabilitación para cada alternativa, con base en los resultados obtenidos del modelo HDM-4, el programa de mantenimiento y conservación y los datos específicos de fatiga y deformación de las mezclas.
- d) Consumo energético: Se consideraron los consumos de energía y combustible de los equipos utilizados en las intervenciones de rehabilitación, como fresadoras y pavimentadoras y las emisiones asociadas.

La disposición final del pavimento fue modelada considerando el proceso de retiro de material, su transportación al sitio de acopio de RAP y el reciclaje de los materiales. Para cada alternativa, se definieron las siguientes actividades:

- c) Fresado y reciclaje del pavimento: Se modelaron las emisiones asociadas al

fresado y el reciclaje del material retirado, utilizando máquinas de fresado y plantas de reciclaje de RAP, calculando los consumos energéticos y las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas.

- d) Transporte y disposición final: Se modeló el transporte de RAP a un sitio de reciclaje y el impacto de la disposición final de cualquier material no reutilizado.

El modelado con LCA Pave permitió simular el comportamiento ambiental de las tres alternativas evaluadas, considerando todas las etapas del ciclo de vida. Los resultados obtenidos se presentaron en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, consumos energéticos y uso de recursos materiales, lo que permitió comparara el desempeño ambiental de cada alternativa a lo largo de los 30 años de vida útil. Además, el software LCA Pave proporcionó una visualización clara de las contribuciones ambientales por cada etapa del ciclo de vida, lo que facilita la identificación de puntos críticos donde es posible implementar mejoras tecnológicas o estratégicas de optimización.

#### *6.2.4 Interpretación y resultados del caso de estudio de la autopista México – Pachuca.*

En el caso de estudio de la autopista México – Pachuca, se evaluaron dos alternativas de mezcla asfáltica: la mezcla densa convencional con geomalla y la mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado. A través de un análisis detallado con el programa LCA Pave, se cuantificaron los impactos ambientales asociados a los inventarios de cada una de estas alternativas, particularmente en lo que respecta a las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, que fue el indicador principal utilizado para evaluar el impacto climático del ciclo de vida de estas mezclas.

Para el caso de estudio en la autopista México – Tuxpan, se modelaron las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente para las dos alternativas de mezcla asfáltica, los resultados obtenidos son presentados en las siguientes figuras:



Figura 6-33 Emisiones totales para unidad de 1 km por 10 m de ancho en la etapa inicial (producción al tendido).

Fuente: Elaboración propia.

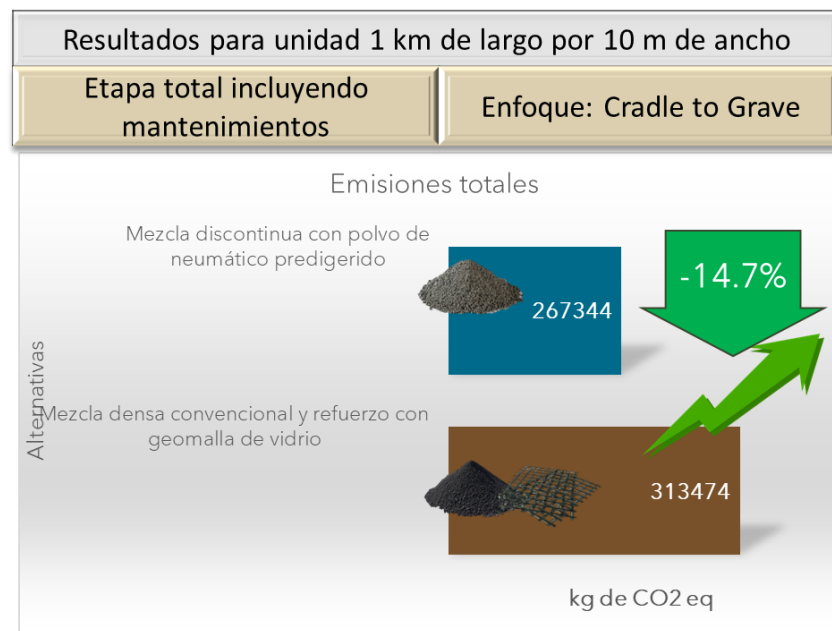


Figura 6-34 Emisiones totales de CO<sub>2</sub> equivalente para cada alternativa de mezcla en la etapa total, incluyendo el programa de mantenimiento y conservación a lo largo de 30 años.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de este caso de estudio indican que la mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado presenta menores impactos ambientales en comparación con la mezcla convencional con geomalla. Esto resaltó la importancia de incorporar materiales reciclados y tecnologías innovadoras en la infraestructura vial, no solo por su impacto ambiental, sino también por su potencial para mejorar la durabilidad y el rendimiento del pavimento a lo largo del tiempo. La implementación de estos materiales en la construcción de podría contribuir significativamente a la sostenibilidad de la infraestructura vial, especialmente en tramos con alta demanda de tráfico pesado.

Con los resultados obtenidos que pudo observar que la alternativa con polvo de neumático pretratado con asfalto mostró una reducción del 30.0 % en comparación con la mezcla densa convencional con geomalla en lo que fue la etapa inicial (producción al tendido) y una reducción de aproximadamente 14.7 % analizando el total de las etapas, en un enfoque *Cradle to Grave*. Esto se debe a la menor necesidad de procesamiento de los materiales en la mezcla modificada, ya que el polvo de neumático pretratado actúa como un modificador que mejora el desempeño sin necesidad de aditivos adicionales, además, la reducción de emisiones en la etapa inicial refleja la optimización de los procesos de producción, donde se minimizan los impactos ambientales derivados de la energía utilizada para fabricar la mezcla. Otro aspecto se debe a la menor cantidad de intervenciones de mantenimiento y rehabilitación necesarias, lo cual representa una mayor resistencia estructural, lo que reduce la frecuencia y la intensidad de las reparaciones a lo largo del ciclo de vida de las mezclas.

Por otro lado, y para comprender mejor el origen de las emisiones, otra manera de resaltar los resultados puede apreciarse en la figura 6-35, que representa una visualización gráfica de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> equivalente por categoría para cada una de las tres alternativas (material, equipo, desperdicio y transporte), estas distribuciones de las emisiones para cada alternativa resultaron de la siguiente manera.

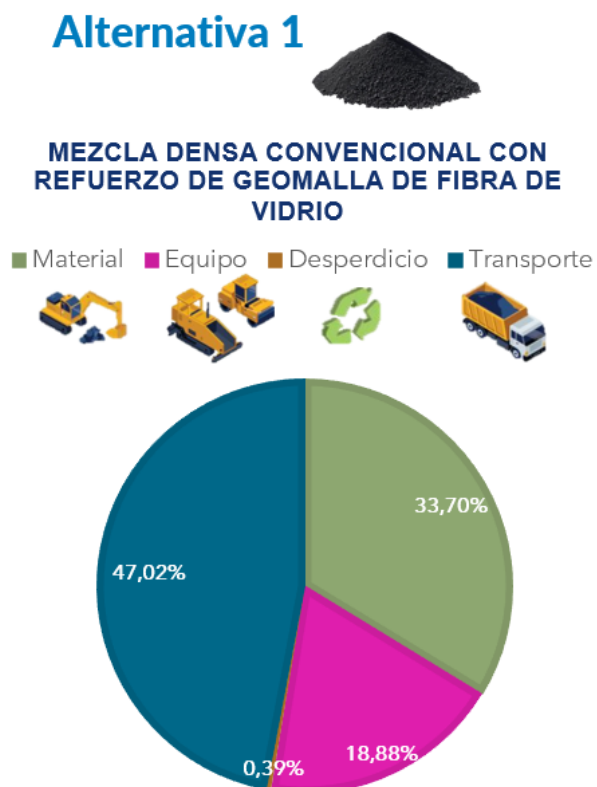
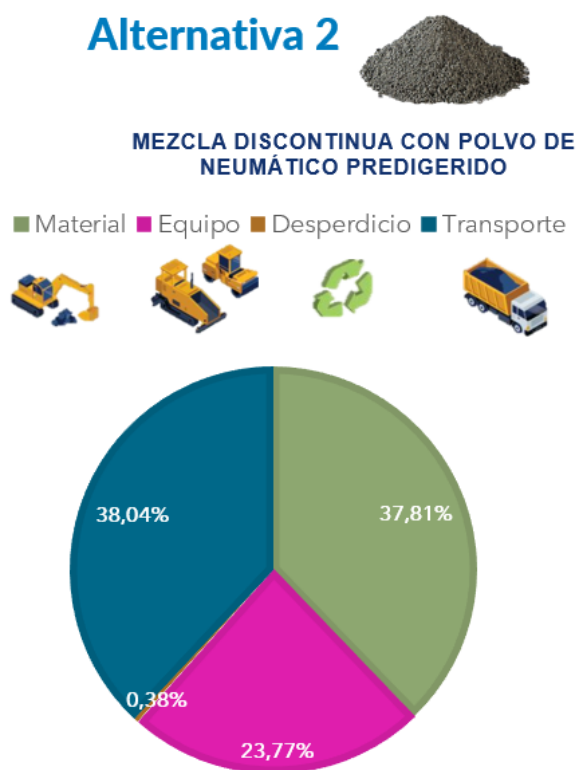


Figura 6-35 Distribución de emisiones por tipo de actividad en el caso estudio 2.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis muestra que la mayor parte de las emisiones en ambas alternativas provienen del uso del material, con la diferencia significativa en la mezcla convencional con geomalla, donde el material constituye un 47.02 % de las emisiones totales debido a la mayor cantidad de insumos utilizados, como la geomalla de fibra de vidrio. En cambio, en la mezcla con polvo de neumático pretratado, la reducción en el consumo de materiales y la menor complejidad en la mezcla contribuyen a una distribución más equilibrada entre las diferentes categorías de impacto ambiental.

## 7. Análisis de resultados

La evaluación desarrollada en esta investigación confirma que el análisis ambiental de alternativas de pavimentación no debe limitarse a comparaciones basadas únicamente en costo o desempeño mecánico. Los resultados muestran que, para sustentar decisiones con criterio técnico ambiental, es necesario cuantificar de manera sistemática, transparente y comparable la huella de carbono asociada a cada alternativa, considerando no solo la fabricación y colocación de la mezcla, sino también su comportamiento a lo largo del tiempo.

Un aspecto metodológico central del estudio fue la modelación de dos fronteras del sistema: el enfoque *Cradle to Laid* y el enfoque *Cradle to Grave*. Esta distinción permitió observar que las emisiones iniciales no siempre predicen el impacto acumulado de las mezclas asfálticas, ya que la etapa de conservación modifica de manera importante el balance total de CO<sub>2</sub> equivalente. En este sentido, el análisis evidenció que una alternativa puede presentar ventajas o desventajas distintas según el alcance temporal y operativo considerado.

Asimismo, los resultados ponen de manifiesto que la robustez de un análisis de ciclo de vida depende en gran medida de la calidad y consistencia del inventario. En este trabajo fue necesario integrar variables técnicas y logísticas como el diseño de las mezclas, consumos energéticos, rendimientos de maquinaria y planta, distancias de acarreo, combustibles y estrategias de conservación a 30 años. Esto permitió construir una base comparable entre escenarios y reducir sesgos de modelación que podrían favorecer de forma incorrecta alguna alternativa.

Bajo este marco, el resultado más consistente en ambos casos de estudio fue que la mezcla con polvo de neumático pretratado presentó el menor impacto ambiental entre las alternativas evaluadas. Esta ventaja se mantuvo tanto en la etapa inicial como en el ciclo de vida completo. En la autopista México- Tuxpan se observaron reducciones frente a la mezcla modificada con polímero y escoria de alto horno, así como frente a la mezcla densa convencional, aunque con magnitudes variables según el escenario modelado. En la autopista México – Pachuca, la mezcla con

polvo de neumático pretratado también mostró un mejor desempeño ambiental que la alternativa con geomalla interlaminar, tanto en etapa inicial como en el horizonte completo de análisis.

Al ampliar hacia el enfoque *Cradle to Grave*, se observó que las reducciones porcentuales tendieron a disminuir respecto a las reportadas en la etapa inicial. Sin embargo, ello no implicó una pérdida de ventaja ambiental de la mezcla con polvo de neumático pretratado, sino que reflejó la incorporación de nuevas cargas asociadas a mantenimiento, rehabilitaciones, transporte y uso de maquinaria a lo largo de 30 años. Este hallazgo confirma que el impacto ambiental del pavimento no depende únicamente de sus emisiones de producción, sino también de la frecuencia, magnitud y logística de sus intervenciones de conservación.

Las razones que explican el mejor comportamiento ambiental de la mezcla con polvo de neumático pretratado pueden analizarse desde varios factores. En primer lugar, la sustitución parcial del ligante virgen reduce la demanda de materiales primarios y, por tanto, las cargas asociadas a su producción. En segundo lugar, la valorización del hule reciclado introduce un componente de economía circular al reincorporar neumáticos fuera de uso (NFU) en la infraestructura vial. En tercer lugar, el comportamiento volumétrico favorable identificado en los escenarios modelados sugiere menos volúmenes de fresado y reposición en ciertas intervenciones, lo que disminuye impactos asociados a fabricación, transporte y consumo de diésel en maquinaria.

Por otra parte, el estudio también mostró que algunas alternativas deben interpretarse con cautela. La mezcla modificada con polímero y escoria presentó una carga ambiental inicial elevada, asociada principalmente a la obtención y tratamiento de materiales, así como a su mayor densidad y contenido de aditivos. No obstante, el análisis sugiere que una carga inicial mayor podría compensarse parcialmente si la alternativa logra efectivamente mejorar la durabilidad y reducir las intervenciones futuras. De manera similar, la alternativa con geomalla interlaminar cumple una función estructural importante, pero en comparación ambiental no superó a la mezcla con polvo de neumático pretratado. Esto indica que la mejora

estructural no necesariamente se traduce, por sí sola, en una menor huella ambiental global.

Un hallazgo transversal en ambos casos fue la alta concentración del impacto ambiental en materiales, transporte y uso de equipos. El análisis mostró que más del 70.0 % del impacto total se asocia a estas etapas, lo que resalta que la sostenibilidad de las carpetas asfálticas no depende exclusivamente del tipo de mezcla utilizada, sino también de decisiones operativas y logísticas. Variables como la distancia de acarreo, la localización de la planta, la eficiencia de la maquinaria y los tiempos de operación pueden modificar de forma significativa la huella de carbono del proyecto. Esto abre una línea clara de mejora para la práctica vial, incluso sin cambiar completamente el diseño de la mezcla y los materiales.

Finalmente, respecto a la hipótesis de la investigación, los resultados de ciclo de vida completo mostraron que el uso de polvo de neumático pretratado permitió alcanzar reducciones del orden previsto frente a mezclas convencionales, e incluso superiores en algunos escenarios iniciales. Por tanto, el análisis respalda la hipótesis planteada, no solo por el cumplimiento del umbral esperado, sino también porque la tendencia fue consistente en los dos casos reales de estudio y bajo un horizonte de evaluación de 30 años.

## 8. Conclusiones

La presente investigación permitió demostrar que el análisis de ciclo de vida constituye una herramienta indispensable para evaluar alternativas de pavimentación desde una perspectiva ambiental integral. Su aplicación a dos casos reales de autopistas mexicanas mostró que las decisiones técnicamente justificadas no deben basarse únicamente en emisiones iniciales, sino en el desempeño ambiental acumulado a lo largo de toda la vida útil del pavimento.

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que las mezclas asfálticas elaboradas con polvo de neumático pretratado presentan una ventaja ambiental frente a las mezclas convencionales evaluadas, tanto en la etapa *Cradle to Laid* como en el enfoque *Cradle to Grave*. Aunque la magnitud de la reducción varió entre los casos de estudio y según el escenario modelado, la tendencia general fue consistente: la alternativa con polvo de neumático pretratado registró menores emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente a lo largo del ciclo de vida.

También se concluye que el mantenimiento y las rehabilitaciones son variables decisivas en la evaluación ambiental de pavimentos. Considerar únicamente la fase inicial puede conducir a decisiones incompletas o parciales, mientras que incorporar la conservación programada permite una valoración más realista del impacto total. En este sentido, una de las principales aportaciones del estudio fue evidenciar que la historia completa de la carpeta asfáltica condiciona su balance ambiental final.

La hipótesis de la investigación se considera validada, ya que el uso de polvo de neumático pretratado permitió alcanzar e incluso superar en algunos escenarios la reducción estimada de emisiones frente a las mezclas convencionales. Esta validación se fortaleció al comprobarse la misma tendencia en los dos tramos reales y bajo un enfoque metodológico consistente.

Adicionalmente, se concluye que los materiales, el transporte y el uso de equipos constituyen los principales focos de impacto ambiental dentro del sistema analizado. Por ello, la reducción de la huella de carbono en pavimentos no depende

exclusivamente de la selección del tipo de mezcla asfáltica, sino también de la optimización logística, energética y operativa del proceso constructivo y de conservación.

Como aporte científico, esta tesis contribuye a cerrar la brecha entre el uso internacional del análisis de ciclo de vida y su aplicación limitada en el contexto vial mexicano. Su principal contribución radica en haber desarrollado una evaluación con datos representativos de condiciones reales de obra, incorporando distancias, rendimientos, maquinaria, estrategias de mantenimiento y diferentes fronteras del sistema en dos tramos reales de autopistas en México. Esto proporciona evidencia técnica útil para la planeación y evaluación ambiental de proyectos carreteros en el país. En síntesis, se concluye que el análisis de ciclo de vida debe incorporarse como criterio operativo en la toma de decisiones de la ingeniería vial y que el uso de polvo de neumático pretratado constituye una alternativa ambientalmente favorable para reducir emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en proyectos carreteros, siempre que su evaluación se realice bajo un enfoque integral de ciclo de vida.

## 9. Recomendaciones y trabajo futuro

A partir de los resultados obtenidos, se proponen las siguientes recomendaciones:

- a) Implementar evaluaciones ACV completas en proyectos reales. Las dependencias responsables de infraestructura deben incorporar evaluaciones con enfoque Cradle to Grave como parte de los proyectos ejecutivos, ya que la etapa inicial no refleja por si sola el impacto ambiental total.
- b) Fomentar el uso de mezclas con polvo de neumático pretratado. Dado su desempeño ambiental y estructural favorable, se recomienda priorizar esta tecnología en programas de conservación y rehabilitación, especialmente en tramos con tránsito pesado.
- c) Optimizar logística y operación de maquinaria. Reducir distancias entre planta y sitio de tendido, mejorar el rendimiento energético de equipos y planificar adecuadamente los volúmenes de acarreo puede disminuir hasta 70.0 % del impacto total asociado a materiales y transporte.
- d) Considerar el desempeño estructural en la evaluación ambiental. El impacto inicial puede compensarse con una mayor durabilidad, por ello, la selección de mezclas debe equilibrar comportamiento estructural y huella ambiental.

Con respecto al trabajo futuro, el presente estudio abre líneas de investigación que no pudieron abordarse completamente dentro del alcance original, por lo que se proponen las siguientes direcciones de trabajo futuro:

- a) Incluir la etapa de uso para ambos casos estudio. Aunque el ACV realizado cubre producción, construcción, mantenimiento y fin de vida, se recomienda incluir explícitamente la etapa de uso, considerando: consumo energético por fricción y resistencia al rodamiento, efecto de la textura superficial en eficiencia vehicular y emisiones indirectas relacionadas con la calidad de servicio. Esto permitirá comprender si el tipo de mezcla influye en emisiones vehiculares durante su operación.

- b) Evaluar otros indicadores ambientales además del CO<sub>2</sub> equivalente. Para una visión más integral, se sugiere incorporar: acidificación, eutrofización, toxicidad humana, consumo de agua, demanda de energía acumulada y huella de recursos no renovables. La inclusión de múltiples indicadores permitirá comparar no solo el impacto climático, sino también las repercusiones ambientales globales asociadas a cada mezcla.
- c) Realizar análisis de sensibilidad y escenarios alternativos. Para esto se propone evaluar: variación en distancias de transporte, cambios en el tránsito y crecimiento de TDPA, diferentes espesores y combinaciones de mezclas y diversos criterios de conservación y rehabilitación. Estos escenarios ayudaran a identificar soluciones más robustas y eficientes ante condiciones de campo cambiantes.
- d) Incorporar análisis económico y de costo del ciclo de vida (LCCA). La integración de impactos ambientales y costos económicos permitirá comparaciones costo-beneficio que respalden decisiones de gestión vial a largo plazo.

## 10. Referencias

Abdelrahman, M. (2006). Controlling performance of crumb rubber-modified binders through addition of polymer modifiers. *Transportation Research Record*, 1962(1), 64–70.

Afshin, A., et al. (2025). Sustainability of asphalt pavements: The role of life cycle assessment. *Results in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025>.

Ahlstrom, G. (2023). The U.S. perspective. Special Project Session 2: Carbon Neutrality, XXVII World Road Congress, Prague.

Alfaro Velásquez, M. J., Flores Alvarado, J. M., & Martínez Hernández, C. A. (2016). Estudio comparativo de las leyes de fatiga en mezclas asfálticas convencionales haciendo uso de la viga de fatiga (Tesis doctoral). Universidad de El Salvador.

AMAAC – Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (2013). Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño (Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013).

Aurangzeb, Q., & Al-Qadi, I. L. (2014). Asphalt pavements with high reclaimed asphalt pavement content: Economic and environmental perspectives. *Transportation Research Record*, 2456, 161–169. <https://doi.org/10.3141/2456-16>

Bahia, H. U., & Davies, R. (1995). Factors controlling the effect of crumb rubber on critical properties of asphalt binders (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 64.

Bahia, H., Golalipour, A., & Coenen, A. (2012, October). Comparing effects of crumb rubber and synthetic polymers on hot mix asphalt performance. *Asphalt Rubber Conference*.

Bhat, C. G., Mukherjee, A., & Meijer, J. (2021). Life cycle information models: Parameterized linked data structures to facilitate the consistent use of life-cycle assessment in decision making. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147(4).

Butt, A. A. (2014). *Life cycle assessment of asphalt roads*. KTH Royal Institute of Technology.

Buzo, R., Villa, E., & Cremades, I. (2024). *Uso de la herramienta LCA-Pave en el análisis de ciclo de vida para pavimentos en México*. Seminario AMAAC 2024.

Cacho, M. S., Ferreira, B., Sousa, J. B., & Way, G. (2018). A three-solution pavement rehabilitation case study, demonstrating rubber-modified bitumen cost and CO<sub>2</sub> effective solution for a circular sustainable economy. In *Proceedings of the Rubberized Asphalt/Asphalt Rubber (RAR2018) Conference* (pp. 581–596). Kruger Park Protea Hotel, South Africa.

Carreteras. (2013). *Mezclas asfálticas con polvo de caucho NFU: Evaluación acústica en servicio*. Carreteras, Extraordinario CILA 2013, 96–125.

Cao, R., et al. (2025). Comparative life cycle assessment of three types of crumb rubber recycling technologies in asphalt rubber mixtures. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024>.

Chávez, F. (2018). *Comparación en laboratorio de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con caucho producidas mediante el proceso húmedo, seco y semihúmedo* (Tesis de investigación). Universidad Politécnica de Madrid, España.

Chiu, C.-T., Hsu, T.-H., & Yang, W.-F. (2008). Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(3), 545–556. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.07.001>

CIBER. (s. f.). Serie iNOVA: Plantas móviles continuas de asfalto [Folleto técnico].

Delgado Alamilla, H. (2020). Diseño de mezclas asfálticas densas en caliente en función del nivel de tránsito (Publicación Técnica No. 602). Instituto Mexicano del Transporte.

Ecologistas en Acción. (2015). 99 preguntas y 99 experiencias para aprender a vivir en un mundo justo y sostenible.

Edelen, A., & Ingwersen, W. (2016). Guidance on data quality assessment for life cycle inventory data (EPA/600/R-16/096). U.S. Environmental Protection Agency.

EAPA – European Asphalt Pavement Association. (s. f.). Environmental sustainability of asphalt mixtures.

Fan, G., & Tram, N. (2019). Best practices for determining life cycle costs of asphalt pavements (NCAT Report 19-03).

Farina, A., Zanetti, M. C., Santagata, E., & Blengini, G. A. (2017). Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 204–212.

Federal Highway Administration. (2014a). TechBrief: Life cycle assessment of pavements (FHWA-HIF-15-001).

Federal Highway Administration. (2014b). TechBrief: Pavement sustainability (FHWA-HIF-14-012).

Federal Highway Administration. (2014c). TechBrief: The use of recycled tire rubber to modify asphalt binder and mixtures (FHWA-HIF-14-015).

Federal Highway Administration. (2015). Towards sustainable pavement systems: A reference document (FHWA-HIF-15-002).

Federal Highway Administration. (2016a). Pavement life-cycle assessment framework (FHWA-HIF-16-014).

Federal Highway Administration. (2016b). TechBrief: Strategies for improving the sustainability of asphalt pavements (FHWA-HIF-16-012).

Fonseca, C. H. (2023). Aplicación de un modelo para evaluar la emisión de gases de efecto invernadero GEI en mezclas asfálticas. *Revista ASFALTICA*, 71.

GreenDelta GmbH. (2017). openLCA 1.7 user manual.

Gschösser, F., & Wallbaum, H. (2013). Life cycle assessment of representative Swiss road pavements for national roads with an accompanying life cycle cost analysis. *Environmental Science & Technology*, 47(15), 8453–8461.

Harvey, J., Kendall, A., Lee, I.-S., Santero, N., Van Dam, T., & Wang, T. (2010). Pavement life cycle assessment workshop: Discussion summary and guidelines (UCPRC-TM-2010-03). University of California Pavement Research Center.

Harvey, J., Meijer, J., Ram, P., & Smith, K. (2020). Environmental product declarations: Communicating environmental impact for transportation products (FHWA-HIF-19-087). Federal Highway Administration.

Heidari, M. R., Heravi, G., & Esmaeeli, A. N. (2020). Integrating life-cycle assessment and life-cycle cost analysis to select sustainable pavement: A probabilistic model using managerial flexibilities. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120046>

Heitzman, M. (1992). Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. *Transportation Research Record*, 1339, 1–8.

Huang, Y., Bird, R. N., & Heidrich, O. (2009). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(1), 58–73.

Huang, Y., Bird, R., & Heidrich, O. (2007). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 283–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.005>

IPoint-systems. (s. f.). Umberto: Life cycle assessment (LCA) software for experts.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*.

International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044: Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*.

Kristjánisdóttir, Ó., Muench, S. T., Michael, L., & Burke, G. (2007). Assessing potential for warm-mix asphalt technology adoption. *Transportation Research Record*, 2040, 91–99. <https://doi.org/10.3141/2040-10>

Kroger, C. (2016). Futuro del asfalto caucho en Uruguay. XVII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Rosario, Argentina.

Krutak, R. (2023). Austria's climate action framework for the road sector. Special Project Session 2: Carbon Neutrality, XXVII World Road Congress, Prague.

Lamb, M. (2023). PIARC report on carbon neutrality in the road sector. Special session on carbon neutrality, XXVII World Road Congress, Prague.

Lo Presti, D. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863–881.

López Domínguez, M. G., García de Santiago, D., & Garrido Vega, J. J. (2025a). Cálculo de carbono en mezclas asfálticas con aditivo de polvo de neumáticos usados (Publicación Técnica No. 907). Instituto Mexicano del Transporte.

López Domínguez, M. G., García de Santiago, D., & Garrido Vega, J. J. (2025b). Cálculo de carbono en mezclas asfálticas con asfalto reciclado RAP (Publicación Técnica No. 877). Instituto Mexicano del Transporte.

López Domínguez, M. G., & Téllez Gutiérrez, R. (2023). Algunas acciones implementadas en México por el cambio climático y su perspectiva futura (Publicación Técnica No. 373). Instituto Mexicano del Transporte.

Lyu, L., Fini, E. H., Pei, J., & Poulidakos, L. D. (2024). Aging evolution and sustainability implications of crumb rubberized asphalt binder: A state-of-the-art. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140202.

Mantalovas, K., et al. (2025). Life cycle assessment of asphalt mixtures incorporating secondary raw materials under a circular economy perspective. *Sustainability*, 17(23), 10869. <https://doi.org/10.3390/su172310869>.

McDonald, C. H. (1966). A new patching material for pavement failures. *Highway Research Record*, 146, 1–16.

Meijer, J., Harvey, J. T., Butt, A. A., Kim, C., Ram, P. V., & Smith, K. D. (2021). LCA Pave: A tool to assess environmental impacts of pavement material and design decisions—Underlying methodology and assumptions. Federal Highway Administration.

Miliutenko, S. (2012). Life cycle impacts of road infrastructure: Assessment of energy use and greenhouse gas emissions. KTH Royal Institute of Technology.

Moral, A. (2018). El análisis del ciclo de vida en la evaluación ambiental de secciones de firme. *Carreteras*, julio-agosto, 35–45.

Mukherjee, A., Bhat, C., & Harvey, J. (2020). Challenges in meeting data needs for use of environmental product declarations in pavement design and construction: State of practice and future scope (FHWA-HRT-20-022). Federal Highway Administration.

Nguyen, M. L. (2009). Étude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux (Tesis doctoral). INSA de Lyon.

Piao, Z., Bueno, M., Poulidakos, L. D., & Hellweg, S. (2022). Life cycle assessment of rubberized semi-dense asphalt pavements: A hybrid comparative approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 176, 105950.

Piao, Z., Mikhailenko, P., Kakar, M. R., Bueno, M., Hellweg, S., & Poulidakos, L. D. (2021). Urban mining for asphalt pavements: A review. *Journal of Cleaner Production*, 280(Part 2), 124916.

Picado-Santos, L. G., Capitão, S. D., & Neves, J. M. C. (2020). Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 247, 118577.

Perez Martinez, G. A., et al. (2024). Analisis de ciclo de vida (ACV) de pavimentos urbanos en la zona de planificación 3 del Ecuador. *Revista MQRInvestigar*, 8(3), 2902-2924. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.8.3.2024.2902-2924>.

Poulidakos, L. D., dos Santos, S., Bueno, M., Kuentzel, S., Hugener, M., & Partl, M. N. (2014). Influence of short- and long-term aging on chemical, microstructural and macro-mechanical properties of recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 51, 414–423.

Poulidakos, L. D., Falchetto, A. C., Wang, D., Porot, L., & Hofko, B. (2019). Impact of asphalt aging temperature on chemo-mechanics. *RSC Advances*, 9(21), 11602–11613.

PRé Sustainability. (2023). SimaPro tutorial.

Rahman, M. (2004). Characterisation of dry process crumb rubber modified asphalt mixtures (Doctoral dissertation). University of Nottingham.

Ram, P. V., Hoerner, T. E., Meijer, J., Smith, K. D., Harvey, J. T., & Butt, A. A. (2021). Sustainable pavements LCA tool user manual. Federal Highway Administration.

Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011a). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), 801–809. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>

Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011b). Life-cycle assessment of pavements. Part II: Filling the research gaps. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), 810–818. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.009>

Santos, J., Bressi, S., Cerezo, V., Lo Presti, D., & Dauvergne, M. (2018). Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.012>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2021). M·MMP·4·05·046/21. Método de diseño por desempeño para mezclas asfálticas de granulometría densa. Instituto Mexicano del Transporte.

SEVE. (2022). Methodologie & sources.

Siverio Lima, M. S., Ferreira, J., Veludo, J., Silva, H. M. R. D., & Oliveira, J. R. M. (2022). Life cycle assessment of innovative asphalt mixtures with crumb rubber and reclaimed asphalt pavement for a sustainable pavement construction. *Sustainability*, 14(22), 14798.

Skotnicki, L., Koba, H., & Szydło, A. (2012). Rubber modified stone matrix asphalts. *Asphalt Rubber Conference*.

Shatnawi, I., et al. (2025). Life cycle analysis of decarbonization strategies for asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025>

Solarte Vanegas, N.C., Bayola Prado, J.A. (2024). Analisis del uso de mezcla asfáltica modificada con cerámica desde la perspectiva del ciclo de vida. Universidad Pontifica Boliviana.

Sousa, J., Vorobiev, A., Geoffrey, M., & Ishai, I. (2013). Reacted and activated rubber, elastomeric asphalt extender. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2371(1).

Stripple, H. (2001). Life cycle assessment of road: A pilot study for inventory analysis (2nd rev. ed., IVL Report B 1210 E). IVL Swedish Environmental Research Institute.

U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. (2002). Life-cycle cost analysis primer.

U.S. Environmental Protection Agency. (2006). Life cycle assessment: Principles and practice (EPA/600/R-06/060).

Wang, H., & Gangaram, R. (2014). Life cycle assessment of asphalt pavement maintenance. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware.

Wang, H., Liu, X., Apostolidis, P., & Scarpas, T. (2018). Review of warm mix rubberized asphalt concrete: Towards a sustainable paving technology. *Journal of Cleaner Production*, 177, 302–314.

Way, G. B. (2012). Asphalt-rubber: 45 years of progress. Asphalt Rubber Conference.

Yoshigi, T. (2023). Carbon neutrality strategy for roads in Japan. Special Project Session 2: Carbon Neutrality, XXVII World Road Congress, Prague.

## 11. Anexos

### 10.1 Caracterización de materiales y pruebas de desempeño para las mezclas asfálticas analizadas.

#### 10.1.1 Mezcla discontinua con polvo de neumático pretratado.

#### 1. Análisis de agregados pétreos

##### 1.1 Agregado: Grava ½" a No. 4.

##### Análisis de agregado grueso de Tlahuico

BANCO: TLAHUILCO				
Ensayo	Resultado	Especificación	Observaciones	Métodos de prueba
Desgaste de Los Ángeles, (%)	15,6	25% máx.	Dentro de especificación	ASTM C 131-06
Desgaste Microdeval (%)	8,3	15% máx.	Dentro de especificación	ASTM D 6928
Intemperismo acelerado (%)	3,2	15% máx. (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Dentro de especificación	ASTM C 88
Partículas trituradas 2 O más caras (%)	100	90 % mín.	Dentro de especificación	ASTM D 5821
Partículas trituradas 1 O más caras (%)	100	100 % mín.	Dentro de especificación	ASTM D 5821
Partículas alargadas y lajeadas (%) relación 5:1	3,2	15% máx.	Dentro de especificación	ASTM D 4791
Densidad (T/m <sup>3</sup> )	2,772	N.A.	N.A.	ASTM C 127
Absorción (%)	1,5	N.A.	N.A.	ASTM C 127
Adherencia asfalto/pétreo, (%)	94,5	90% mín.	Dentro de especificación	AMAAC RA 08

##### 1.2 Agregado: Sello

##### Análisis de agregado grueso ¼" banco El Cerrito.

BANCO: EL CERRITO				
Ensayo	Resultado	Especificación	Observaciones	Métodos de prueba
Desgaste de Los Ángeles, (%)	26,9	25% máx.	Fuera de especificación	ASTM C 131-06
Desgaste Microdeval (%)	12,9	15% máx.	Dentro de especificación	ASTM D 6928
Intemperismo acelerado (%)	18,5	15% máx. (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Fuera de especificación	ASTM C 88
Partículas trituradas 2 O más caras (%)	100	90 % mín.	Dentro de especificación	ASTM D 5821
Partículas trituradas 1 O más caras (%)	100	100 % mín.	Dentro de especificación	ASTM D 5821
Partículas alargadas y lajeadas (%)	0	15% máx.	Dentro de especificación	ASTM D 4791
Densidad (T/m <sup>3</sup> )	2,254	N.A.	N.A.	ASTM C 127
Absorción (%)	5,2	N.A.	N.A.	ASTM C 127
Adherencia asfalto/pétreo, (%)	86,1	90% mín.	Fuera de especificación	AMAAC RA 08

### 1.3 Agregado: Arena

Análisis de agregado arena ¼" a finos, banco El Cerrito, muestra 2

BANCO: EL CERRITO 2				
Ensayo	Resultado	Especificación	Observaciones	Métodos de prueba
Equivalente de arena (%)	62,3	55% mín.	Dentro de especificación	ASTM D 2419
Azul de metileno (mg/g)	8	12% máx.	Dentro de especificación	RA05/10
Angularidad (%)	47,8	40% mín.	Dentro de especificación	AASHTO T 304
Densidad (T/m <sup>3</sup> )	2,395	N.A.	N.A.	ASTM C 128
Absorción (%)	2,6	N.A.	N.A.	ASTM C 128

### 1.4 Agregado: Arena

Análisis de agregado arena ¼" a finos, banco El Cuadro.

BANCO: EL CUADRO				
Ensayo	Resultado	Especificación	Observaciones	Métodos de prueba
Equivalente de arena (%)	56,7	55% mín.	Dentro de especificación	ASTM D 2419
Azul de metileno (mg/g)	8	12% máx.	Dentro de especificación	RA05/10
Angularidad (%)	44,5	40% mín.	Dentro de especificación	AASHTO T 304
Densidad (T/m <sup>3</sup> )	2,544	N.A.	N.A.	ASTM C 128
Absorción (%)	2,6	N.A.	N.A.	ASTM C 128

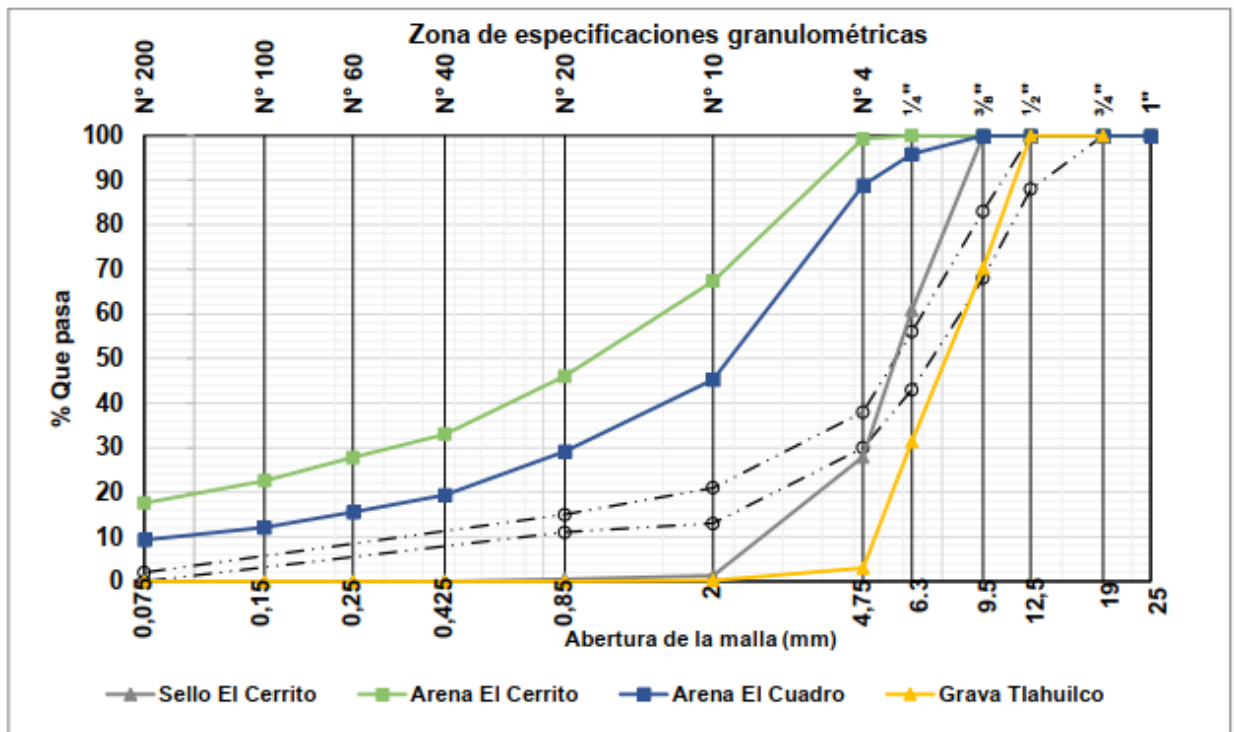
1.5 Agregado: Combinación 35.0 % grava Tlahuico, 39.0 % Sello El Cerrito, 20.0 % Arena El Cerrito y 6.0 % Arena El Cuadro.

Características de la combinación de agregados de la mezcla.

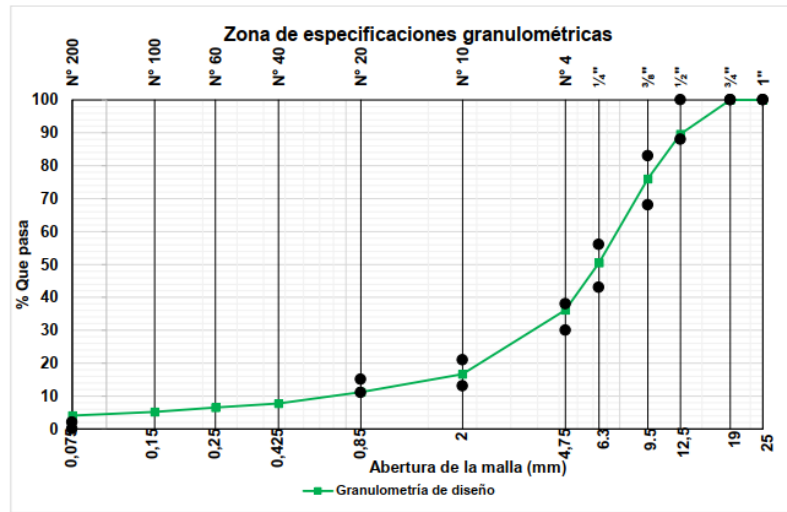
Ensayo	Resultado	Especificación	Observaciones	Métodos de prueba
M.V Varillada del material retenido en el tamiz de corte, kg/ m <sup>3</sup>	1 481,5	N/A	N/A	ASTM C29/C29M-19
VCADRC, %	40,38	N/A	N/A	AASHTO M 325
Gravedad específica bruta (Gsb)	2,481	N/A	N/A	ASTM C 127 ASTM C 128
Gravedad específica aparente (Gsa)	2,683	N/A	N/A	ASTM C 127 ASTM C 128
Gravedad específica efectiva (Gse)	2,497	N/A	N/A	AI MS-2
Absorción, %	3,2	N/A	N/A	ASTM C 127 ASTM C 128
Desgaste de Los Ángeles, (%)	21,6	25% máx.	Dentro de Especificación	ASTM C 131-06
Desgaste Microdeval (%)	10,7	15% máx.	Dentro de Especificación	ASTM D 6928
Intemperismo acelerado (%)	11,3	15% máx. (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Dentro de Especificación	ASTM C 88
Partículas trituradas 2 o más caras (%)	100,0	90 % mín.	Dentro de Especificación	ASTM D 5821
Partículas trituradas 1 o más caras (%)	100,0	100 % mín.	Dentro de Especificación	ASTM D 5821
Partículas alargadas y lajeadas (%) relación 5:1	1,5	15% máx.	Dentro de Especificación	ASTM D 4791
Adherencia asfalto/pétreo, (%)	90	90%	Dentro de Especificación	RA - 08/2010
Equivalente de arena (%)	61	55% mín.	Dentro de Especificación	ASTM D 2419
Azul de metileno (mg/g)	8	12% máx.	Dentro de Especificación	RA05/10
Angularidad (%)	47	40% mín.	Dentro de Especificación	AASHTO T 304

## 2. Granulometrias de los agregados

Malla	Grava ½" a N° 4 Banco Tlahuilco % que pasa	Sello ¼" banco El Cerrito % que pasa	Arena, banco El Cerrito % que pasa	Arena banco El Cuadro % que pasa
¾"	100	100	100	100
½"	100	100	100	100
⅜"	70	100	100	100
¼"	31	60,9	100,0	95,8
N° 4	3	28,0	99,3	88,8
N° 10	0	1,2	67,4	45,3
N° 20	0	0,5	46,0	29,2
N° 40	0	0,0	33,0	19,4
N° 60	0	0,0	27,8	15,6
N° 100	0	0	22,6	12,1
N° 200	0	0	17,6	9,3



La propuesta granulométrica de diseño que se realizó fue: 35.0 % de grava “Tlahuilco”, 39.0 % de sello “El Cerrito”, 20.0 % de arena “El Cerrito” y 6.0 % arena de río “El Cuadro”.



### 3. Diseño volumétrico

#### 3.1 Asfalto

<b>Material:</b>	Asfalto Convencional	<b>No. de muestra:</b>	716-L	<b>Fecha de recibido:</b>	07/07/2023
<b>Procedencia:</b>	Salamanca, Gto.	<b>Tipo de modificador:</b>	No Aplica	<b>Fecha de inicio:</b>	03/08/2023
<b>Asfalto base:</b>	Asfalto PG 64-22	<b>Dosificación:</b>	No Aplica	<b>Fecha de fin:</b>	07/08/2023
<b>Fecha de muestreo:</b>	07/07/2023	<b>Tipo de catalizador:</b>	No Aplica	<b>Fecha de informe:</b>	07/08/2023
<b>Lote:</b>	L-070723	<b>Dosificación:</b>	No Aplica	<b>Clave de Informe:</b>	716A070823
<b>Procesado en:</b>	Planta	<b>Tempo de proceso:</b>	No Aplica	<b>Cliente:</b>	SURFAX
		<b>Temperatura proceso:</b>	No Aplica	<b>Contacto:</b>	Juan. Tetas@surfax.com.mx
<b>ANÁLISIS AL ASFALTO ORIGINAL</b>					
<b>TIPO DE PRUEBA</b>		<b>RESULTADO</b>	N-CMT-4-05-004/18	<b>MÉTODO DE PRUEBA</b>	
PUNTO DE REBLANDECIMIENTO, 5 °C/min, H <sub>2</sub> O destilada, ASTM 15C, (°C)	50	45 min.		ASTM D36/D36M-14 (2020)	
PUNTO DE INFLAMACIÓN CLEVELAND, (°C)	>300	230 min.		ASTM D8254-19	
VISCOSIDAD BROOKFIELD A 135 °C, SC4-27 12 r/min, 21.4%, (Pa·s)	0,418	3 máx.		ASTM D4402/D4402M-15 (2022)	
TEMPERATURA DE FALLA [G'/senδ=1.0 kPa], (°C)	66,5	---		ASTM D7175-15	
MODULO REOLÓGICO DE CORTE DINÁMICO A 64 °C, [G'/senδ], (kPa)	1,37	1 min.		ASTM D7175-15	
ÁNGULO DE FASE A 64 °C, [δ], (°)	83,4	---		ASTM D7175-15	
<b>ANÁLISIS AL RESIDUO DE PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO DE PELÍCULA DELGADA (RTFO) ASTM D2872-22</b>					
<b>TIPO DE PRUEBA</b>		<b>RESULTADO</b>	N-CMT-4-05-004/18	<b>MÉTODO DE PRUEBA</b>	
CAMBIO DE MASA POR CALENTAMIENTO A 163 °C, (%)	-0,36	-1 máx.		ASTM D2872-22	
TEMPERATURA DE FALLA [G'/senδ=2.2 kPa], (°C)	72,4	---		ASTM D7175-15	
MODULO REOLÓGICO DE CORTE DINÁMICO A 64 °C, [G'/senδ], (kPa)	6,60	2.2 min.		ASTM D7175-15	
ÁNGULO DE FASE A 64 °C, [δ], (°)	73,5	---		ASTM D7175-15	
<b>ANÁLISIS AL RESIDUO DE PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN (PAV) ASTM D6521-22</b>					
<b>TIPO DE PRUEBA</b>		<b>RESULTADO</b>	N-CMT-4-05-004/18	<b>MÉTODO DE PRUEBA</b>	
MODULO REOLÓGICO DE CORTE DINÁMICO A 25 °C, [G'/senδ], (kPa)	2 740	5 000 máx.		ASTM D7175-15	
RIGIDEZ EN CREEP A -12 °C, 60 s, S(t), (MPa)	124,21	300 máx.		ASTM D6648-08 (2016)	
VALOR m(t) A -12 °C, 60 s, S(t), (adimensional)	0,337	0.300 min.		ASTM D6648-08 (2016)	
<b>DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE TRÁFICO Jnr (RTFO) ASTM D7405-20</b>					
<b>TIPO DE PRUEBA</b>		<b>RESULTADO</b>	N-CMT-4-05-004/18	<b>MÉTODO DE PRUEBA</b>	
RESPUESTA ELÁSTICA A 100 Pa A 64 °C, (%)	22,76	---		ASTM D7405-20	
RESPUESTA ELÁSTICA A 3 200 Pa A 64 °C, (%)	8,59	---		ASTM D7405-20	
DIFERENCIA EN RESPUESTA ELÁSTICA A 64 °C, (%)	62,25	---		ASTM D7405-20	
CREEP COMPLIANCE Jnr 100 A 64 °C, (kPa <sup>-1</sup> )	0,939	---		ASTM D7405-20	
CREEP COMPLIANCE Jnr 3 200 A 64 °C, (kPa <sup>-1</sup> )	1,220	---		ASTM D7405-20	
DIFERENCIA CREEP COMPLIANCE Jnr A 64 °C, (%)	30,06	---		ASTM D7405-20	
<b>OBSERVACIONES:</b>					
NO. DE RECEPCIÓN: 092.					
<b>VERIFICACIÓN PARA UN ASFALTO "PG 64-22"</b>					

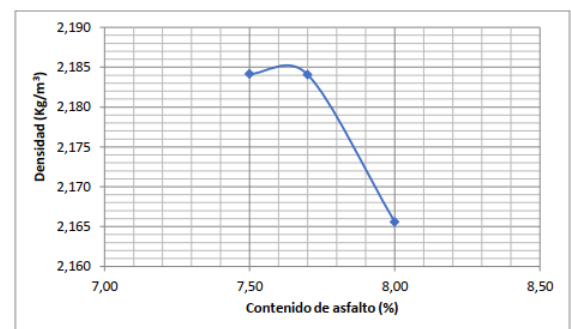
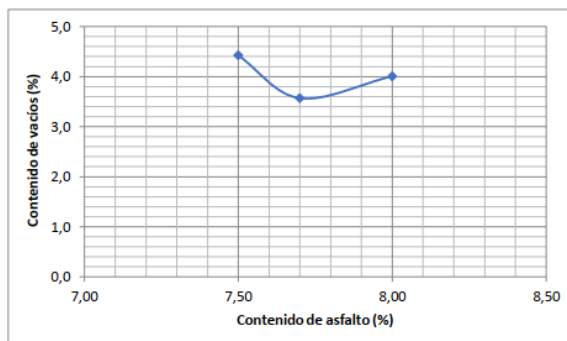
### 3.2 Cálculo de asfalto de partida

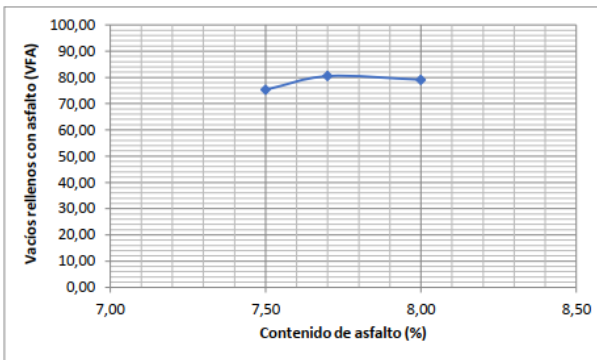
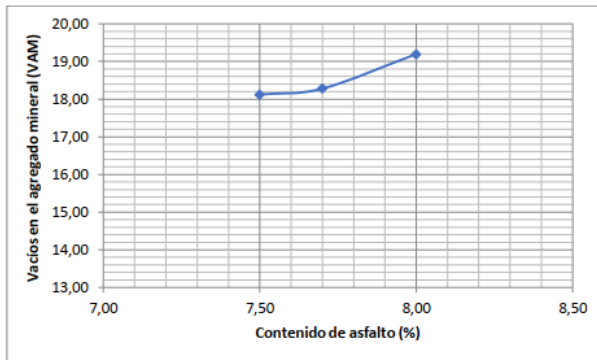
Material	Gsb	Gsa	Proporción	Gsb	Gsa
<b>Material grueso Tlahuilco 1/2"</b>	2,774	2,894	35%	0,971	1,013
<b>Sello El Cerrito</b>	2,254	2,554	39%	0,879	0,996
<b>Arena El Cerrito</b>	2,395	2,553	20%	0,479	0,511
<b>Arena El Cuadro</b>	2,544	2,726	6%	0,153	0,164
<b>Total:</b>				<b>2,481</b>	<b>2,683</b>
<b>TN (mm)=</b>	12,5		obtenido		
<b>Gse (ini)=</b>	2,6426413				
<b>Vbe (ini)=</b>	0,10195857				
<b>Vba (ini)=</b>	0,05489585				
<b>Ws(ini)=</b>	2,23381965				
<b>Pb (ini)=</b>	6,71411059	Respecto de la mezcla			
<b>Pb (ini)=</b>	7,19734853	Respecto del agregado			

Propiedades volumétricas de la mezcla.

% C.A.M.	% C.A.P.	% RARX® (respecto al pétreo)	% ligante asfáltico	Relación de peso del RARX® en el ligante asfáltico, %	Gmm (T/m <sup>3</sup> )	Gmb (T/m <sup>3</sup> )	Vacíos (%)	VAM	VFA	VCAMIX	VCADRC
6,98	7,5	2,5%	10	25	2,287	2,121	4,4	18,12	75,29	32,27	40,38
7,15	7,7	2,6%	10,3	25	2,265	2,184	3,6	18,28	80,48	32,39	40,38
7,41	8,0	2,7%	10,7	25	2,256	2,166	4,0	19,19	79,12	33,15	40,38
<b>Especificación</b>			<b>8,0 mín.</b>	<b>25-30</b>	<b>N. A</b>	<b>N. A</b>	<b>2-5</b>	<b>16 mín.</b>	<b>75-82</b>	<b>menor a VCADRC</b>	

### 3.3 Gráficos de propiedades volumétricas.





#### 4. Ensayo TSR

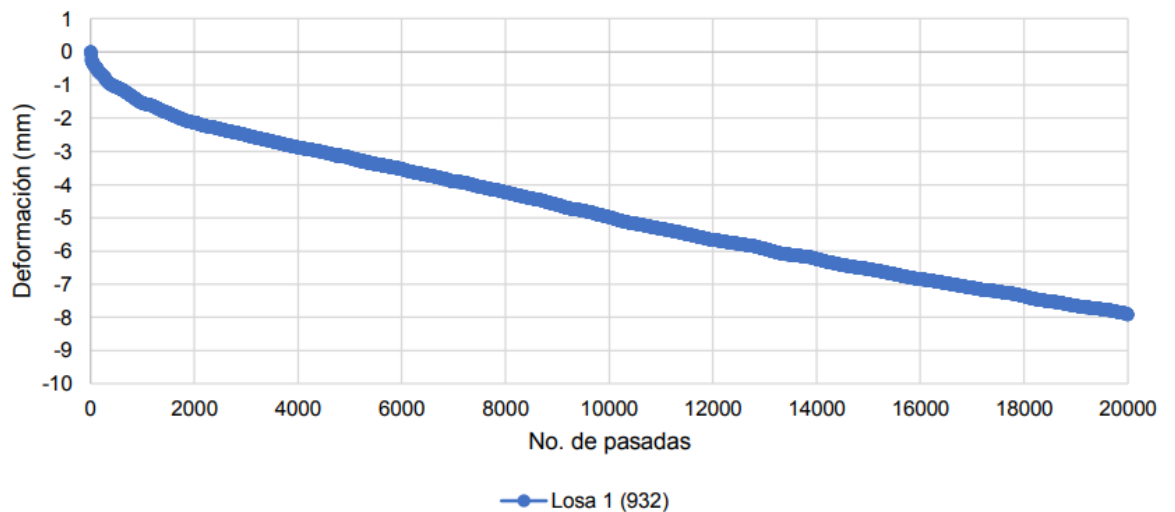
Asfalto aditivado con 0,5% de AS 500 (muestra # 932-L)		
Promedio de esfuerzo seco (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio de esfuerzo húmedo (kg/cm <sup>2</sup> )	%TSR
6,10	6,00	99%

#### 5. Rueda de Hamburgo

Mezcla evaluada	No. Pasadas	Deformación (mm) Asfalto 932-L
Mezcla GAP -X	20 000	7,92
<b>Especificación</b>	<b>20 000</b>	<b>10,00</b>



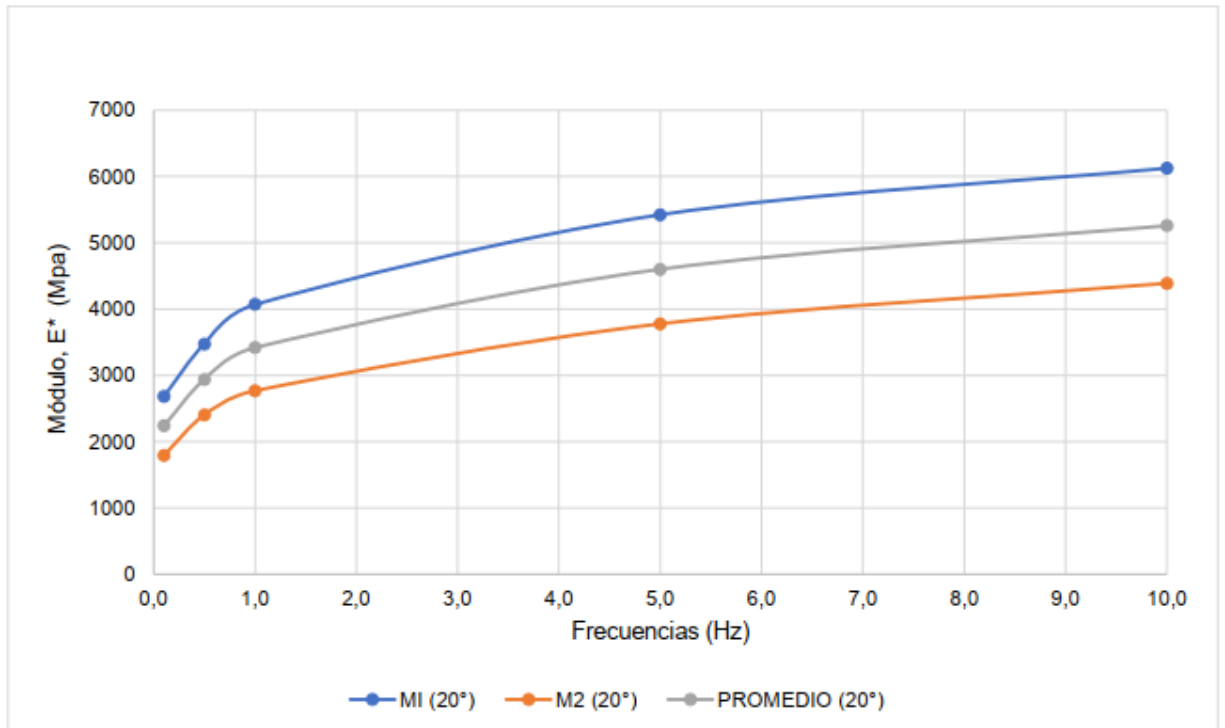
Pasadas vs Deformación



6. Desprendimiento por fricción – AMAAC RA-08

Asfalto convencional 716-S		Asfalto con 0,5 AS 500 # de muestra 932-L	
Material	Material de Sello "El Cerrito"	Grava de banco Tlahuilco	Material de Sello "El Cerrito"
<b>Desprendimiento %</b>	13,90	5,50	0,14

## 7. Modulo dinamico



Temperatura de acondicionamiento	Carga (MPa)	Frecuencia	Módulo Dinámico M1 (MPa)	Módulo Dinámico M2 (MPa)	Módulo promedio (MPa)
20°C	0,25	0,1 Hz	2 682	1 793	2 238
20°C	0,25	0,5 Hz	3 475	2 405	2 940
20°C	0,35	1,0 Hz	4 069	2 769	3 419
20°C	0,40	5,0 Hz	5 424	3 778	4 601
20°C	<b>0,45</b>	10,0 Hz	<b>6 126</b>	<b>4 389</b>	<b>5 258</b>

### RESUMEN

Granulometría propuesta: 35.0 % de grava "Tlahuico, 39.0 % de sello "El Cerrito", 20.0 % de arena "El Cerrito" y 6.0 % arena de rio "El Cuadro".

Asfalto: Convencional PG 64-22

Temperaturas de mezclado: 178°C - 182°C

Temperaturas de compactación: 168°C - 172°C

% ligante asfáltico: 10.3 % respecto al peso del agregado (7.7 % cemento asfáltico, 2,6 polvo de neumático pretratado).

%ligante asfáltico: 9,34 respecto al peso de la mezcla (7.15 % cemento asfáltico, 2.19 % polvo de neumático pretratado).

%VAM: 18.28

%VFA: 80.48

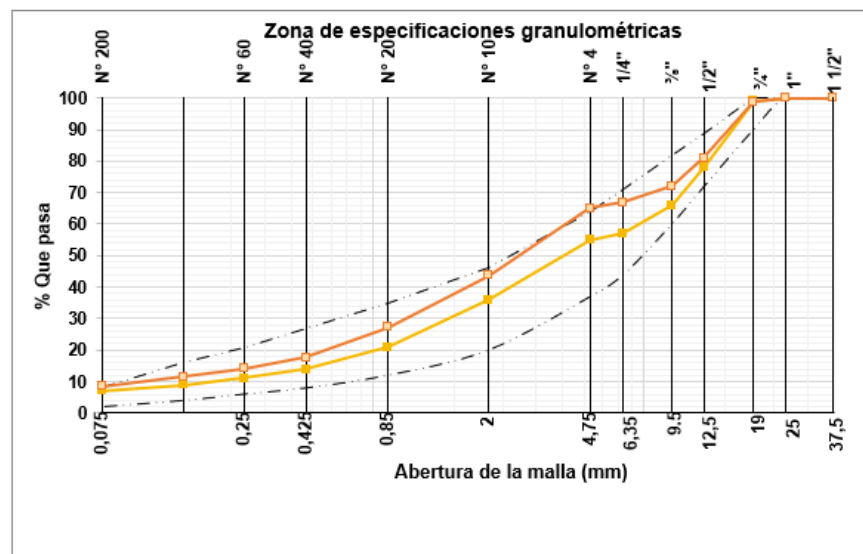
TSR:99.0 %

Deformación permanente: 7.92 mm

### 10.1.2 Mezcla densa convencional

#### 1. Granulometrias de los agregados

Malla	Diseño de mezcla densa	Mezcla de producción	Límite Inferior	Límite Superior
1"	100	100	100	100
3/4"	99,0	98,8	90	100
1/2"	78,0	81,0	72	89
3/8"	66,0	72,1	60	82
1/4"	57,0	67,0	44	71
N 4	55,0	65,0	37	64
N 10	36,0	43,6	20	46
N 20	21,0	27,3	12	35
N 40	14,0	17,6	8	27
N 60	11,0	14,2	6	21
N100	9,0	11,7	4	16
N 200	7,0	8,5	2	8



## 2. Contenido de cemento asfáltico

### 2.1 Contenido asfáltico en horno de Ignición a 500 °C

Muestra	Mezcla asfáltica Densa TN ¾"	
	% AC respecto a la mezcla	% AC respecto al agregado
% asfalto en horno de ignición	5,5%	5,8%

## 3. Propiedades volumétricas

% C.A.M.	% C.A.P.	Gravedad máxima de la mezcla, Gmm (t/m <sup>3</sup> )	Gmb (t/m <sup>3</sup> )	Vacios (%)	VAM	VFA
5,7	6,1	2,397	2,287	4,6	14,38	68,08
5,7	6,1	2,397	2,289	4,5	14,31	68,47
5,7	6,1	2,397	2,290	4,5	14,26	68,75
				<b>3-5</b>	<b>13 mín.</b>	<b>65-75</b>

### 3.2 Estabilidad y flujo de la mezcla

% C.A.M.	% C.A.P.	Estabilidad promedio corregida (kgf)	Flujo (mm)
5,7	6,1	1 505	4,0
5,7	6,1	1 610	4,0
5,7	6,1	1 648	3,9
<b>Especificación</b>		900 kgf mín.	2-4

Propiedades volumétricas de la mezcla, compactado con compactador giratorio.

% C.A.M.	% C.A.P.	Gravedad máxima de la mezcla (t/m <sup>3</sup> )	Gmb (t/m <sup>3</sup> )	Vacios (%)	VAM (%)	VFA (%)
5,7	6,1	2,397	2,343	2,3	12,28	81,64
<b>Especificación</b>				<b>3-5</b>	<b>13 mín.</b>	<b>65-75</b>

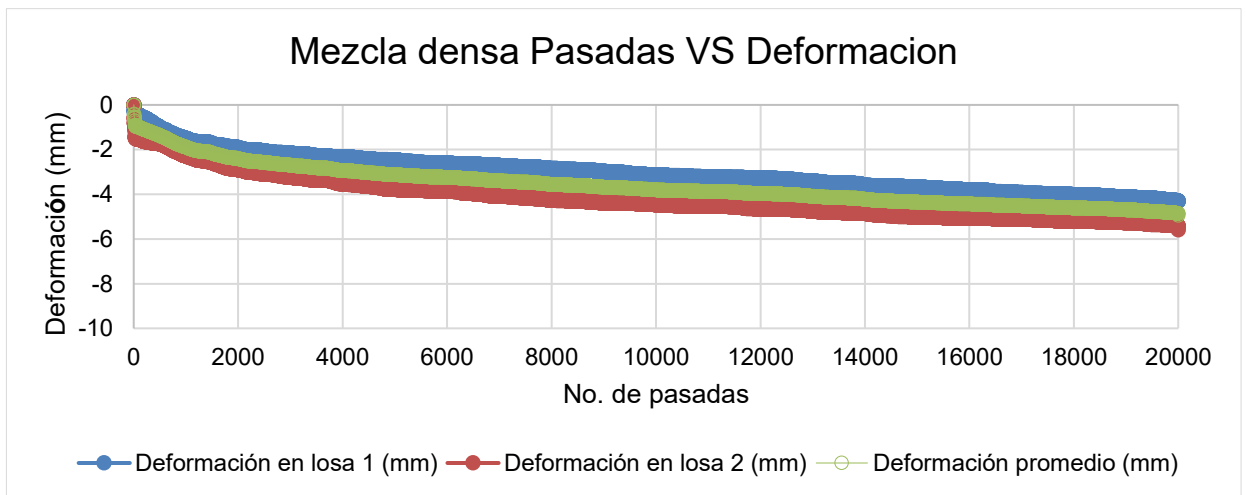
## 4. EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD (TSR)

Resultados de ensayo TSR de la mezcla asfáltica densa

Especímenes	Esfuerzo seco, (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo húmedo, (kg/cm <sup>2</sup> )	
1	7,38	/	
2	8,78		
3	8,07		
4			7,91
5			7,50
6			9,85
<b>Promedio esfuerzo seco, (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	8,08		
<b>Promedio esfuerzo húmedo, (kg/cm<sup>2</sup>)</b>		8,42	
<b>TSR, (80% mín.)</b>	<b>100</b>		

5. Rueda de Hamburgo

No. pasadas	Deformación losa_1 (mm)	Deformación losa_2 (mm)	Deformación promedio (mm)	Especificación
20 000	4,30	5,59	4,95	10,00 mm máx.





10.1.3 Mezcla densa modificada con polímero y escoria de alto horno.

Agregado petreo:

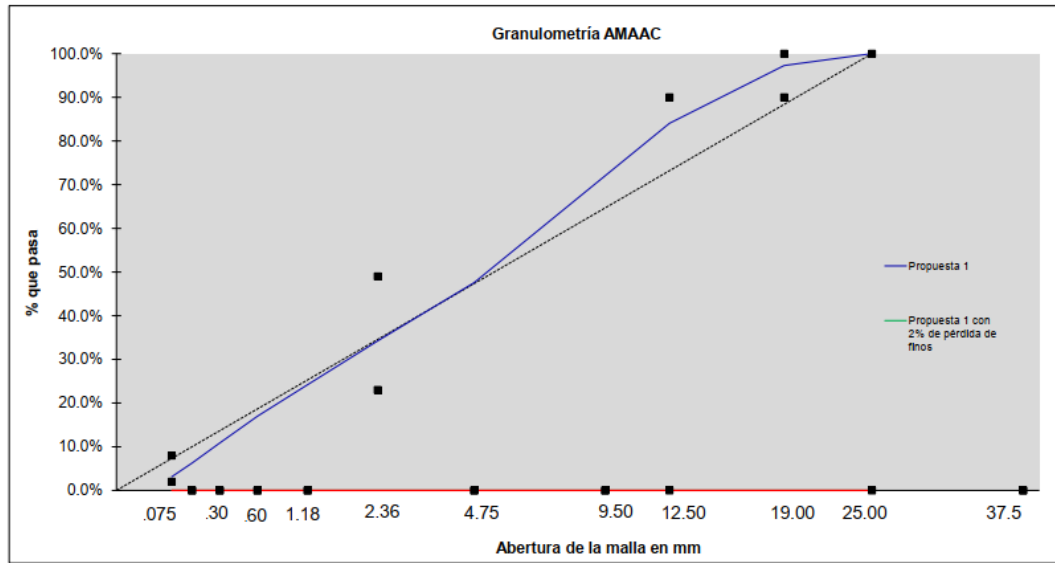
Fracción mineral	Banco	Proporción de la mezcla, %
Grava 3/4"	La Providencia	40
Grava escoria 1/2"	Gerdau Corsa	20
Arena	La Providencia	40

1. Análisis granulométrico

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM C 136 - ASTM C117)						
Banco		LA PROVIDENCIA	ESCORIA GERDAU CORSA	LA PROVIDENCIA	ESCORIA GERDAU CORSA	-
Fracción del Agregado Pétreo		Grava 3/4"	Grava 1/2"	Arena 1/4" a finos	Arena 1/4" a finos	-
Malla		% Que pasa.				
Designación	Abertura en mm.					
1 1/2"	37.50	100%	100%	100%	100%	-
1"	25.00	100%	100%	100%	100%	-
3/4"	19.00	93%	100%	100%	100%	-
1/2"	12.60	63%	94%	100%	100%	-
3/8"	9.60	39%	82%	100%	100%	-
No. 4	4.75	1%	45%	96%	91%	-
No. 8	2.36	0%	22%	74%	65%	-
No. 16	1.18	0%	11%	55%	36%	-
No. 30	0.60	0%	7%	39%	17%	-
No. 50	0.30	0%	4%	25%	8%	-
No. 100	0.15	0%	3%	14%	4%	-
No. 200	0.075	0%	1%	7%	2%	-

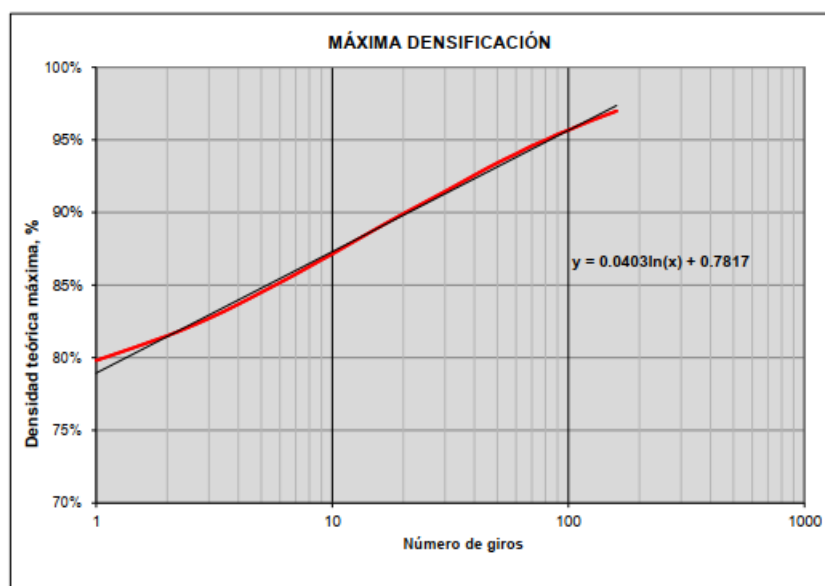
PROPIEDAD FÍSICA	NORMA	FRACCIÓN DEL AGREGADO				
		Grava 3/4"	Grava 1/2"	Arena 1/4" a finos	Arena 1/4" a finos	-
Peso Volumétrico Seco Suelto, kg/m <sup>3</sup>	ASTM C 29	1303	1865	1518	1987	-
Peso Volumétrico Seco Compacto, kg/m <sup>3</sup>		1438	1839	1732	2155	-
Peso Volumétrico Seco Suelto combinado, kg/m <sup>3</sup>						
Gravedad Específica Bruta, Gsb	ASTM C 127	2.565	3.206	2.493	3.394	-
Gravedad Específica Aparente, Gsa	ASTM C128	2.645	3.554	2.664	3.807	-
Absorción, %		1.2%	3.1%	2.6%	3.2%	-
		<b>PRUEBAS EN EL AGREGADO FINO</b>				
Angularidad, % (método A)	AASHTO T 304	-	-	49%	47%	-
Equivalente de Arena, %	ASTM D 2419	-	-	60%	90%	-
Azul de Metileno, mg/g	AMAAC RA 05/2011	-	-	17%	3%	-
		<b>PRUEBAS EN EL AGREGADO GRUESO</b>				
Desgaste de Los Ángeles, %	ASTM C 131	14%	23%	-	-	-
Micro-Deval, %	AASHTO T 327	7%	7%	-	-	-
Intemperismo Acelerado (Sulfato Sodio), %	ASTM C88			-	-	-
Partículas con 1 Cara Fracturada, %	ASTM D 5821	100%	93%	-	-	-
Partículas con 2 ó más Caras Fracturadas, %		100%	82%	-	-	-
Partículas Planas y Alargadas, % (5:1)	ASTM D 4791	3%	1%	-	-	-
Adherencia (Ebullición), %	ASTM D 3625	-		-	-	-
Adherencia (Australiano), %	AMAAC RA 07	-		-	-	-
Adherencia (AMAAC), %	AMAAC RA 08/2011	80%	90%	-	-	-
Adherencia (SCT), %	MMP 4-04-009/03	-		-	-	-
		<b>OTROS (Especifique)</b>				

PROPUESTA GRANULOMÉTRICA					TMN Mezcla, mm
Banco	LA PROVIDENCIA	ESCORIA GERDAU CORSA	LA PROVIDENCIA		19
Fracción del Agregado	Grava 3/4"	Grava 1/2"	Arena 1/4" a finos		<b>TOTAL</b>
Propuesta 1	40%	20%	40%		100%
Propuesta 2					0%
Propuesta 3					0%



### Máxima densificación de la mezcla

Giros No.	Especimen 1				Especimen 2				% Gmm Promedio
	Ht	Gmb	Gmb	% Gmm	Ht	Gmb	Gmb	% Gmm	
	mm	(estimado)	(corregido)		mm	(estimado)	(corregido)		
1	141.6	1.933	1.974	79.6%	141.3	1.935	1.985	80.0%	79.8%
2	138.6	1.975	2.016	81.3%	138.4	1.975	2.027	81.7%	81.5%
3	136.6	2.003	2.046	82.5%	136.4	2.004	2.056	82.9%	82.7%
4	135.0	2.027	2.070	83.5%	134.8	2.028	2.081	83.9%	83.7%
5	133.7	2.047	2.090	84.3%	133.5	2.048	2.101	84.7%	84.5%
6	132.6	2.064	2.108	85.0%	132.5	2.063	2.117	85.4%	85.2%
7	131.7	2.078	2.122	85.6%	131.6	2.077	2.131	85.9%	85.8%
8	130.9	2.091	2.135	86.1%	130.8	2.090	2.144	86.5%	86.3%
9	130.2	2.102	2.146	86.5%	130.1	2.101	2.156	86.9%	86.7%
10	129.6	2.112	2.156	86.9%	129.5	2.111	2.166	87.3%	87.1%
15	127.2	2.152	2.197	88.8%	127.1	2.151	2.207	89.0%	88.8%
20	125.6	2.179	2.225	89.7%	125.5	2.178	2.235	90.1%	89.9%
30	123.5	2.216	2.263	91.2%	123.4	2.215	2.273	91.7%	91.4%
40	122.0	2.243	2.291	92.4%	121.9	2.243	2.301	92.8%	92.6%
50	120.9	2.264	2.311	93.2%	120.8	2.263	2.322	93.6%	93.4%
60	120.1	2.279	2.327	93.8%	120.0	2.278	2.337	94.2%	94.0%
70	119.4	2.292	2.341	94.4%	119.3	2.292	2.351	94.8%	94.6%
80	118.9	2.302	2.350	94.8%	118.8	2.301	2.361	95.2%	95.0%
90	118.4	2.311	2.360	95.2%	118.3	2.311	2.371	95.6%	95.4%
100	118.1	2.317	2.366	95.4%	117.9	2.319	2.379	95.9%	95.7%
125	117.3	2.333	2.382	96.1%	117.1	2.335	2.395	96.6%	96.3%
160	116.5	2.349	2.399	96.7%	116.3	2.351	2.412	97.2%	97.0%
	Nmax (medido)	2.399	C=	1.0211	Gmb Nmax (medido)	2.412	C=	1.0260	



GRANULOMETRÍA DE DISEÑO				
Banco	LA PROVIDENCIA	ESCORIA GERDAU CORSA	LA PROVIDENCIA	
Fración del Agregado	Grava 3/4"	Grava 1/2"	Arena 1/4" a finos	TOTAL
Propuesta	40%	20%	40%	100%

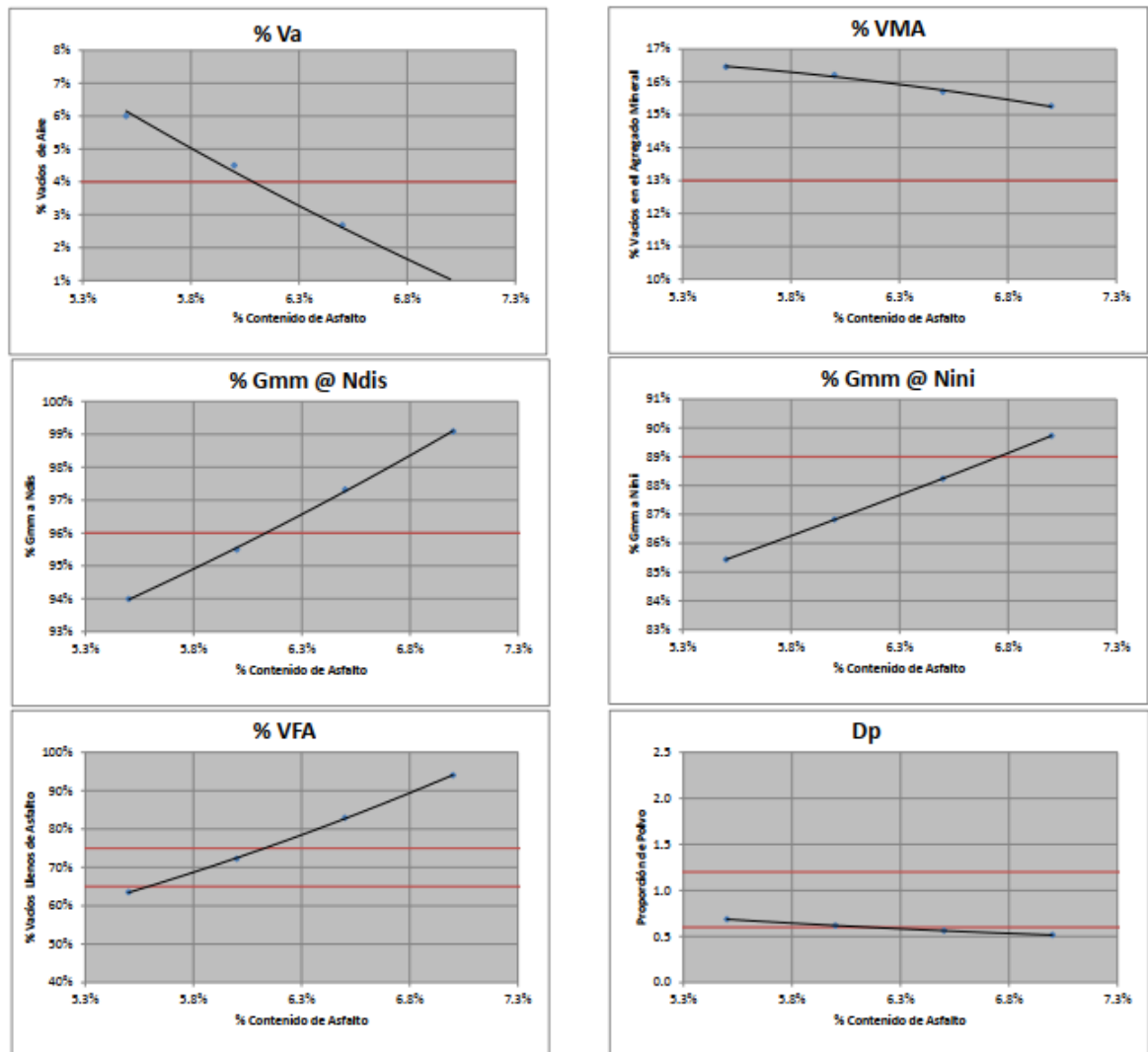
Abertura de Malla	Granulometría Individual					Mezcla	ESPECIFICACIÓN
1"	25.00	100%	100%	100%		100.0%	100
3/4"	19.00	93%	100%	100%		97.3%	90-100
1/2"	12.60	63%	94%	100%		84.1%	-90
3/8"	9.60	39%	82%	100%		72.0%	-
No. 4	4.75	1%	45%	96%		47.6%	-
No. 8	2.36	0%	22%	74%		34.2%	23-49
No. 16	1.18	0%	11%	55%		24.2%	-
No. 30	0.60	0%	7%	39%		17.0%	-
No. 50	0.30	0%	4%	25%		10.9%	-
No. 100	0.15	0%	3%	14%		6.3%	-
No. 200	0.075	0%	1%	7%		3.1%	2-8
Gsb		2.565	3.206	2.493		2.664	
Gsa		2.645	3.554	2.664		2.922	
% Absorción		1.2%	3.1%	2.6%		2.2%	

DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO	
Tipo	Modificado con Polímero
Gravedad específica, Gb	1.029
Asfalto utilizado	STY76V-22
ID Asfalto	1.028
Aditivo Antristriping, %	-

DATOS DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO	
No. Giros Inicial (N ini)	8
No. Giros de Diseño (N dis)	100
No. Giros Máximo (Nmáx)	160
Temperatura de Mezclado, °C	175-190
Temperatura de Compactación, °C	163-175

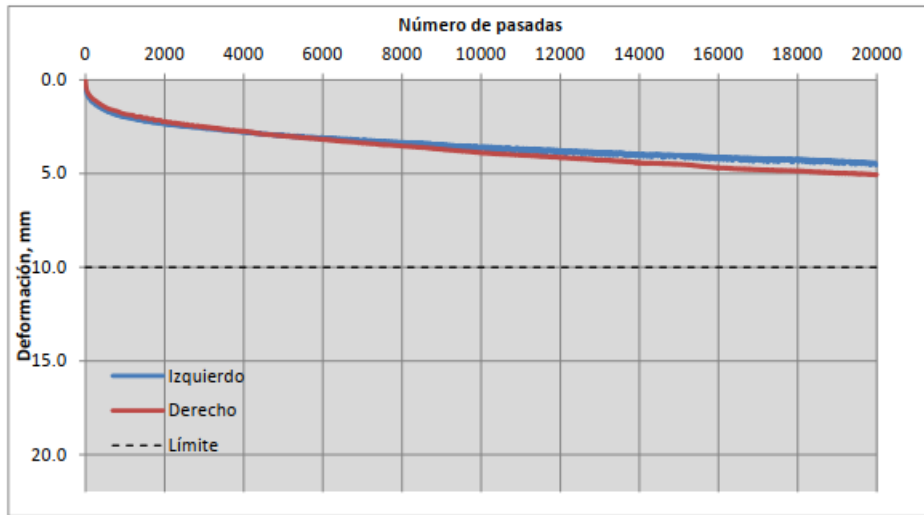
PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS DE LA MEZCLA	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN
Contenido de Asfalto, con respecto a la mezcla, Pb	6.2%	-
Contenido de Asfalto, con respecto al agregado	6.6%	-
Contenido de Asfalto Efectivo, Pbe	5.3%	-
Contenido de Asfalto Absorbido, Pba	1.0%	-
Gravedad Efectiva Agregado, Gse	2.735	
Vacios de Aire en la mezcla compactada, %	4.0%	4%
Gravedad específica neta, Gmb (ASTM D1188 /D2726)	2.381	-
Gravedad Teórica Máxima, Gmm (ASTM D2041)	2.480	-
% Vacíos en el Agregado Mineral, VAM	16%	13% mínimo
% Vacíos Llenos de Asfalto, VFA	75%	65-75
Proporción de Polvo, Dp	0.6	0.6 - 1.2
Espesor de Película efectiva, Micrones	14	-
% Gmm a Nini	86%	89% máx.
% Gmm a Nmáx	97%	98% máx.

ENSAYES DE DESEMPEÑO	Normatividad	Resultado	ESPECIFICACIÓN
Susceptibilidad a la Humedad, %TSR	AASHTO T283	82%	80% mín.
Susceptibilidad a la Humedad y Deformación permanente mediante Rueda Cargada de Hamburgo, mm de deformación	RA01/2011	4.8	10 mm máx.



Susceptibilidad a la humedad y deformación permanente  
Rueda cargada de Hamburgo

Especímen	Gravedad Específica neta, Gmb	Densidad Máxima, Gmm	% Vacíos de Aire	RESULTADO		ESPECIFICACIÓN	
				Deformación	No. pasadas	Deformación Máxima	No. de pasadas
Izquierdo	2.306	2.480	7.0%	4.6	20000	10 mm	20,000
Derecho	2.311		6.8%	5.0	20000		
Promedio	2.308		6.9%	4.8	20000		



Modulo dinámico

<b>NOMBRE DE PROYECTO:</b>	Autopista México - Tuxpan
<b>LOCALIZACIÓN</b>	---
<b>TIPO/ID DE ASFALTO:</b>	Sty 76V-22
<b>TIPO DE MEZCLA:</b>	Diseño de Mezcla Densa de Alto Desempeño Nivel IV Agregados banco "La providencia" + 20% Escoria "Gerdau Corsa"
<b>TIPO DE EVALUACIÓN:</b>	Módulo Dinámico

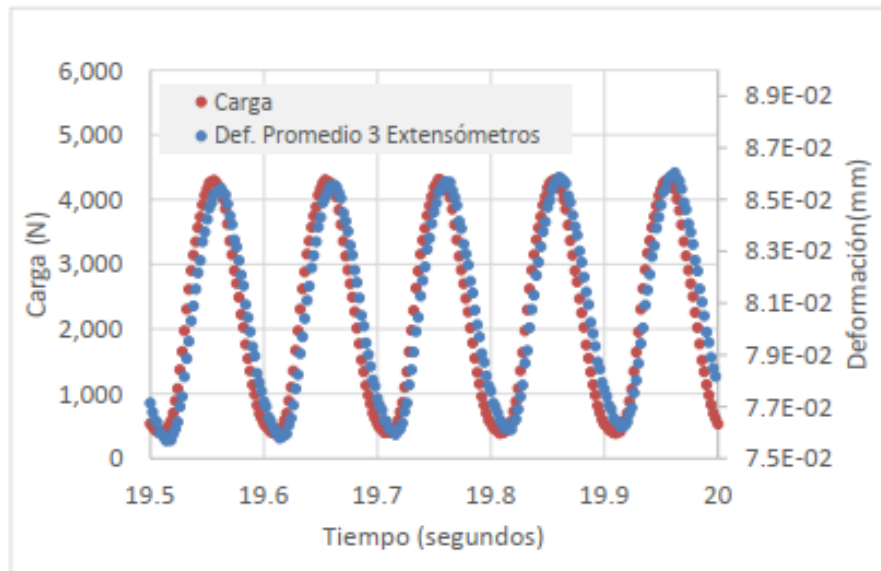
Características de los especímenes después del corte

Identificación del espécimen	150MD_1	150MD_2	150MD_3
Diametro (mm)	100.0	100.0	100.0
Altura (mm)	149.80	149.45	150.28
Longitud de Galga (mm)	101.6	101.6	101.6
Contenido de Asfalto, Pb (%)	6.2%	6.2%	6.2%
Gmb	2.328	2.320	2.327
Gmm	2.480	2.480	2.480
Va (%)	6.13	6.45	6.17

## Resultados del ensayo @ 20 °C y 10 Hz

ID ESPÉCIMEN	Módulo Dinámico			Ángulo de Fase			Deformación recuperable promedio (50<math>\mu\text{E}</math><math><150)</math>	Deformación no recuperable promedio (μE<math><1,500)</math>
	E*  (MPa)	Promedio  E*	C.V.	φ (Grados)	Promedio φ	Desv. Est.		
		MPa	%		(Grados)	(Grados)		
150MD_1	5,408	5,284	2.5	19.69	20.1	0.5	94.6	692
150MD_2	5,141			20.00			97.7	710
150MD_3	5,303			20.59			97.2	746

## Últimos 5 ciclos de ensayo



10.1.4 Mezcla densa convencional con refuerzo de geomalla de fibra de vidrio

1. Análisis de agregados pétreos

Agregado: Grava ¾" a No. 4 banco Providencia

<b>BANCO: PROVIDENCIA</b>				
<b>Ensayo</b>	<b>Resultado</b>	<b>Especificación</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Métodos de prueba</b>
<b>Desgaste de Los Ángeles, (%)</b>	<b>11,81</b>	<b>30% máx.</b>	Dentro de especificación	ASTM C 131-06
<b>Desgaste Microdeval (%)</b>	<b>5,5</b>	<b>18% máx.</b>	Dentro de especificación	ASTM D 6928
<b>Intemperismo acelerado (%)</b>	<b>0,22</b>	<b>15% máx.</b> <b>(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</b>	Dentro de especificación	ASTM C 88
<b>Partículas trituradas 2 o más caras (%)</b>	<b>100</b>	<b>90 % mín.</b>	Dentro de especificación	ASTM D 5821
<b>Partículas trituradas 1 o más caras (%)</b>	<b>100</b>	<b>100 % mín.</b>	Dentro de especificación	ASTM D 5821
<b>Partículas alargadas y lajeadas (%) relación 5:1</b>	<b>2,62</b>	<b>10% máx.</b>	Dentro de especificación	ASTM D 4791
<b>Densidad (T/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2,571</b>	<b>2,4 mín.</b>	Dentro de especificación	ASTM C 127
<b>Absorción (%)</b>	<b>1,22</b>	<b>Reportar</b>	N.A.	ASTM C 127
<b>Adherencia asfalto/pétreo, (%)</b>	<b>93,6</b>	<b>90% mín.</b>	Dentro de especificación	AMAAC RA 08

Análisis de agregado grueso ½" a No. 4 banco Tlahuico

<b>BANCO: TLAHUILCO</b>				
<b>Ensayo</b>	<b>Resultado</b>	<b>Especificación</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Métodos de prueba</b>
<b>Desgaste de Los Ángeles, (%)</b>	<b>11,7</b>	<b>30% máx.</b>	Dentro de especificación	ASTM C 131-06
<b>Desgaste Microdeval (%)</b>	<b>4,9</b>	<b>18% máx.</b>	Dentro de especificación	ASTM D 6928
<b>Intemperismo acelerado (%)</b>	<b>0,76</b>	<b>15% máx.</b> <b>(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</b>	Dentro de especificación	Dentro de especificación
<b>Partículas trituradas 2 o más caras (%)</b>	<b>100</b>	<b>90 % mín.</b>	Dentro de especificación	ASTM D 5821
<b>Partículas trituradas 1 o más caras (%)</b>	<b>100</b>	<b>100 % mín.</b>	Dentro de especificación	ASTM D 5821
<b>Partículas alargadas y lajeadas (%) relación 5:1</b>	<b>2,52</b>	<b>10% máx.</b>	Dentro de especificación	ASTM D 4791
<b>Densidad (T/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2,774</b>	<b>2,4 mín.</b>	Dentro de especificación	ASTM C 127
<b>Absorción (%)</b>	<b>1,5</b>	<b>Reportar</b>	N.A.	ASTM C 127
<b>Adherencia asfalto/pétreo, (%)</b>	<b>96,14</b>	<b>90% mín.</b>	Dentro de especificación	AMAAC RA 08

Análisis de agregado arena ¼ a finos, banco El Cerito

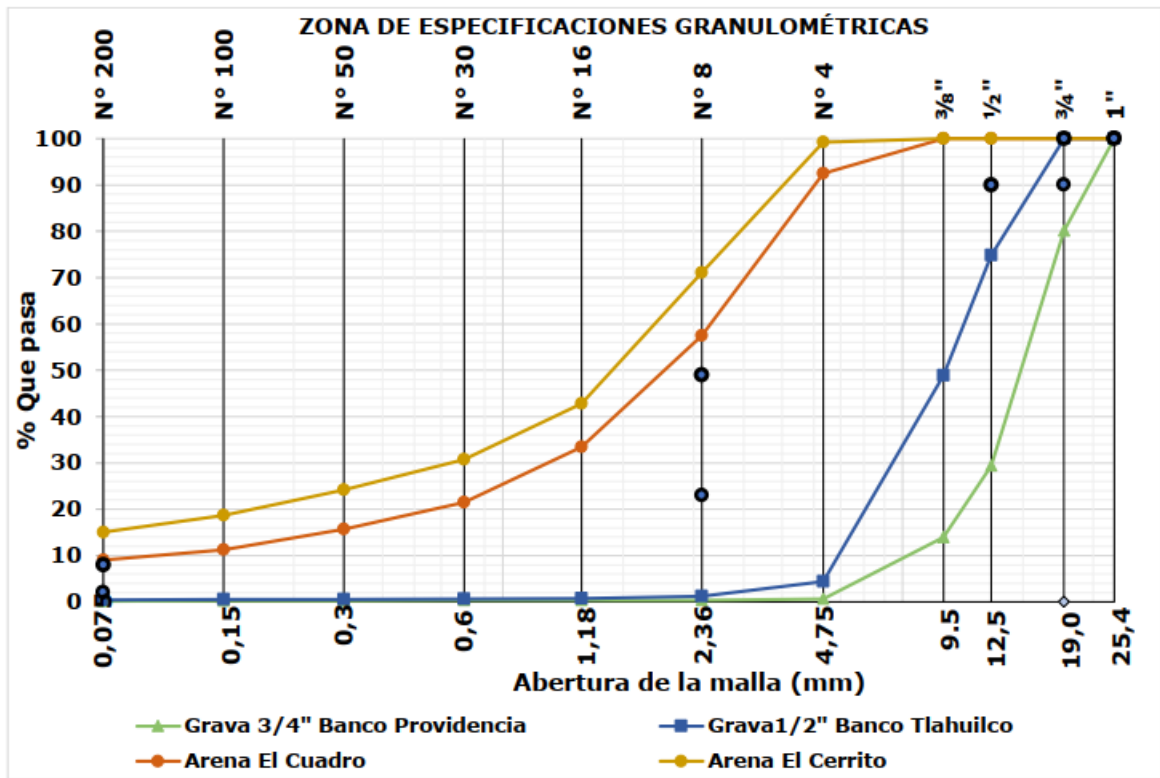
<b>BANCO: EL CERRITO</b>				
<b>Ensayo</b>	<b>Resultado</b>	<b>Especificación</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Métodos de prueba</b>
<b>Equivalente de arena (%)</b>	<b>62</b>	<b>50% mín.</b>	Dentro de especificación	ASTM D 2419
<b>Azul de metileno (mg/g)</b>	<b>7</b>	<b>15% máx.</b>	Dentro de especificación	RA05/10
<b>Angularidad (%)</b>	<b>44,6</b>	<b>40% mín.</b>	Dentro de especificación	AASHTO T 304
<b>Densidad (T/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2,332</b>	<b>2,4 mín.</b>	<b>Fuera de especificación</b>	ASTM C 128
<b>Absorción (%)</b>	<b>4,10</b>	<b>Reportar</b>	<b>N.A.</b>	ASTM C 128

Análisis de agregado arena ¼" a finos, banco El Cuadro

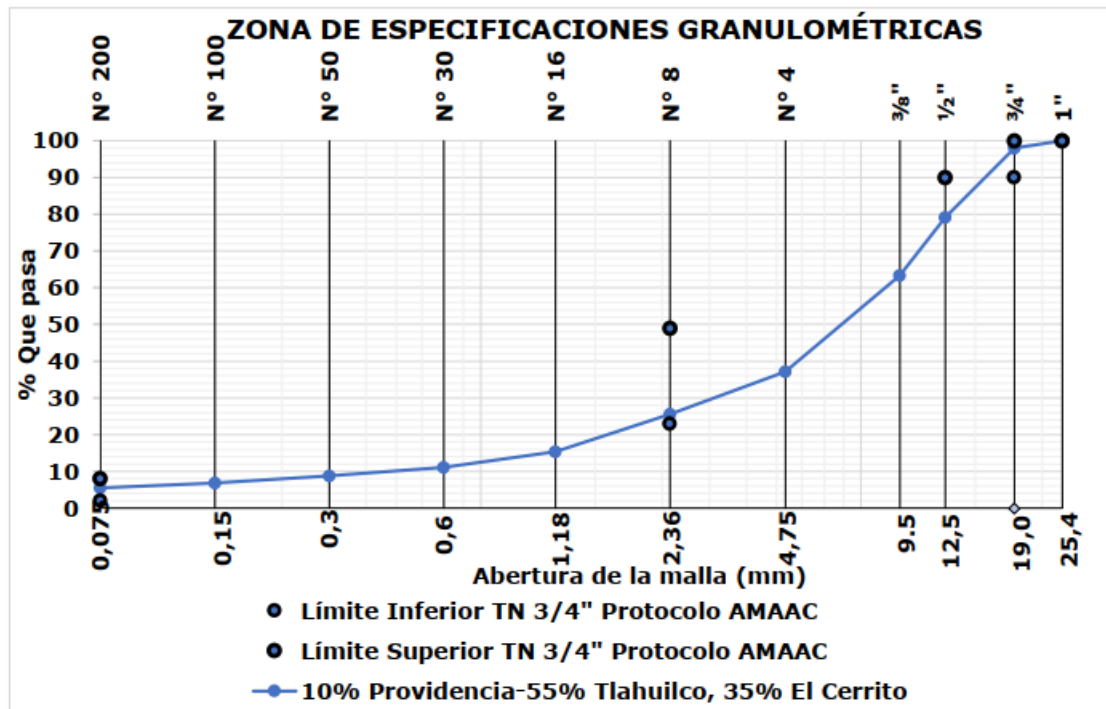
<b>BANCO: EL CUADRO</b>				
<b>Ensayo</b>	<b>Resultado</b>	<b>Especificación</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Métodos de prueba</b>
<b>Equivalente de arena (%)</b>	<b>62</b>	<b>50% mín.</b>	Dentro de especificación	ASTM D 2419
<b>Azul de metileno (mg/g)</b>	<b>8</b>	<b>15% máx.</b>	Dentro de especificación	RA05/10
<b>Angularidad (%)</b>	<b>44,2</b>	<b>40% mín.</b>	Dentro de especificación	AASHTO T 304
<b>Densidad (T/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2,536</b>	<b>2,4 mín.</b>	Dentro de especificación	ASTM C 128
<b>Absorción (%)</b>	<b>2,6</b>	<b>Reportar</b>	<b>N.A.</b>	ASTM C 128

Granulometría de los agregados.

<b>Malla</b>	<b>% que pasa Grava 3/4" Banco Providencia</b>	<b>% que pasa Grava 1/2" Banco Tlahuilco</b>	<b>% que pasa Arena El Cerrito</b>	<b>% que pasa Arena El Cuadro</b>
1"	100	100	100	100
3/4"	80,2	100	100	100
1/2"	29,3	74,8	100	100
3/8"	14,0	48,9	100	100
N° 4	0,6	4,4	99,2	92,5
N° 8	0,4	1,2	71,1	57,4
N° 16	0,3	0,7	42,8	33,4
N° 30	0,3	0,6	30,7	21,5
N° 50	0,3	0,6	24,2	15,7
N° 100	0,2	0,5	18,7	11,2
N° 200	0,1	0,4	15,0	9,0



Combinaciones granulométricas propuestas



Características de los agregados.

Ensayo	Resultado	Especificación	Observaciones	Métodos de prueba
Gravedad específica bruta (Gsb)	2,599	N/A	N/A	ASTM C 127 ASTM C 128
Gravedad específica aparente (Gsa)	2,760	N/A	N/A	ASTM C 127 ASTM C 128
Gravedad específica efectiva (Gse)	2,705	N/A	N/A	AI MS-2
Absorción, %	2,4	N/A	N/A	ASTM C 127 ASTM C 128
Desgaste de Los Ángeles, (%)	11,7	25% máx.	Dentro de Especificación	ASTM C 131-06
Desgaste Microdeval (%)	5,0	15% máx.	Dentro de Especificación	ASTM D 6928
Intemperismo acelerado (%)	0,73	15% máx.	Dentro de Especificación	ASTM C 88
		(Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Dentro de Especificación	
Partículas trituradas 2 o más caras (%)	100	90 % mín.	Dentro de Especificación	ASTM D 5821
Partículas trituradas 1 o más caras (%)	100	100 % mín.	Dentro de Especificación	ASTM D 5821
Partículas alargadas y lajeadas 1:5 (%)	2,54	10% máx.	Dentro de Especificación	ASTM D 4791
Adherencia asfalto/pétreo, (%)	95,7	90% mín.	Dentro de Especificación	RA - 08/2010
Equivalente de arena (%)	62	55% mín.	Dentro de Especificación	ASTM D 2419
Azul de metileno (mg/g)	7	12 máx.	Dentro de Especificación	RA05/10
Angularidad (%)	44,6	40% mín.	Dentro de Especificación	AASHTO T 304

Verificación del asfalto PG 70H-16

ANÁLISIS AL ASFALTO ORIGINAL				
TIPO DE PRUEBA	RESULTADO	N-CMT-4-05-004/18	MÉTODO DE PRUEBA	
PUNTO DE REBLANDECIMIENTO, 5 °C/min, H <sub>2</sub> O destilada, ASTM 15C, (°C)	66,9	55 mín.	ASTM D36/D36M-14 (2020)	
SEPARACION DE ASFALTO MODIFICADO, 5 °C/min, (°C)	0	2 máx.	M-MMP-4-05-022/02 SCT	
PUNTO DE INFLAMACIÓN CLEVELAND, (°C)	292	230 mín.	ASTM D8254-19	
RECUPERACIÓN ELÁSTICA POR TORSIÓN A 25 °C, (%)	68	35 mín.	M-MMP-4-05-024/02 SCT	
VISCOSIDAD BROOKFIELD A 135 °C, SC4-27 6 r/min, 44,9%, (Pa·s)	1,753	3 máx.	ASTM D4402/D4402M-15 (2022)	
TEMPERATURA DE FALLA [G*/senδ=1.0 kPa], (°C)	84,30	---	ASTM D7175-15	
MÓDULO REOLÓGICO DE CORTE DINÁMICO A 70 °C, [G*/senδ], (kPa)	3,78	1 mín.	ASTM D7175-15	
ÁNGULO DE FASE A 70 °C, [δ], (°)	60,90	---	ASTM D7175-15	
ANÁLISIS AL RESIDUO DE PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO DE PELÍCULA DELGADA (RTFO) ASTM D2872-22				
TIPO DE PRUEBA	RESULTADO	N-CMT-4-05-004/18	MÉTODO DE PRUEBA	
CAMBIO DE MASA POR CALENTAMIENTO A 163 °C, (%)	-0,30	-1 máx.	ASTM D2872-22	
RECUPERACIÓN ELÁSTICA POR DUCTILÓMETRO A 25 °C, 10 cm, (%)	90,0	75 mín.	ASTM D6084/D6084M-21 Método A	
TEMPERATURA DE FALLA [G*/senδ=2.2 kPa], (°C)	87,30	---	ASTM D7175-15	
MÓDULO REOLÓGICO DE CORTE DINÁMICO A 70 °C, [G*/senδ], (kPa)	9,42	2,2 mín.	ASTM D7175-15	
ÁNGULO DE FASE A 70 °C, [δ], (°)	53,10	---	ASTM D7175-15	
ANÁLISIS AL RESIDUO DE PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN (PAV) ASTM D6521-22				
TIPO DE PRUEBA	RESULTADO	N-CMT-4-05-004/18	MÉTODO DE PRUEBA	
MÓDULO REOLÓGICO DE CORTE DINÁMICO A 31 °C, [G*/senδ], (kPa)	1260	5 000 máx.	ASTM D7175-15	
RIGIDEZ EN CREEP A -6 °C, 60 s, S(t), (MPa)	38,24	300 máx.	ASTM D6648-08 (2016)	
VALOR m(t) A -6 °C, 60 s, S(t), (adimensional)	0,415	0,300 mín.	ASTM D6648-08 (2016)	

## Diseño volumétrico

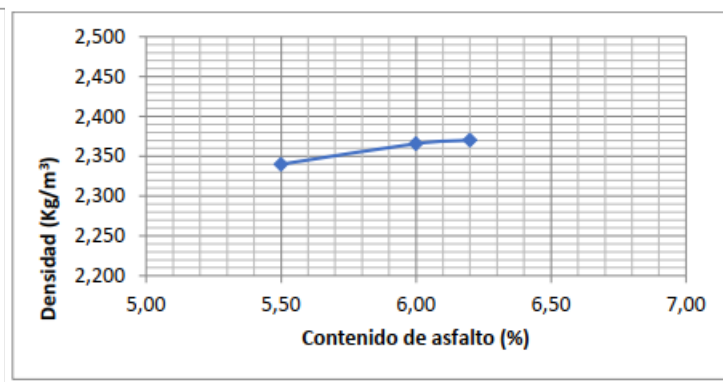
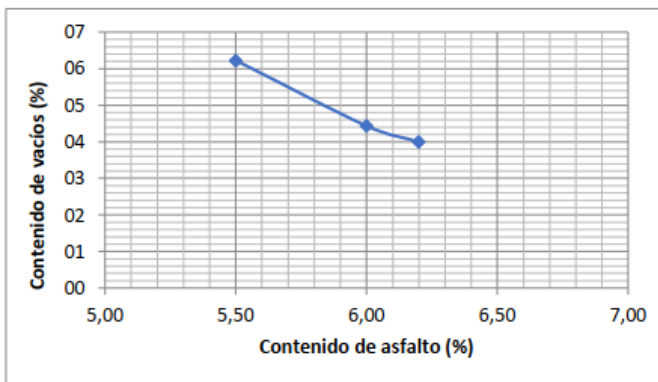
### Cálculo de asfalto inicial

pb=5%	ps=95%	Gb=1.025	Va=4%		
0,05	0,95	1,025	0,04		
<b>Fracciones granulométricas</b>					
<b>Material</b>	<b>Gsb</b>	<b>Gsa</b>	<b>Proporción</b>	<b>Gsb</b>	<b>Gsa</b>
<b>Material grueso</b>					
<b>Providencia 3/4"</b>	2,571	2,655	10%	0,257	0,265
<b>Material grueso</b>					
<b>Tlahuilco 1/2"</b>	2,774	2,894	55%	1,525	1,591
<b>Arena El Cerrito</b>	2,333	2,579	35%	0,816	0,903
<b>Arena El Cuadro</b>	2,539	2,719	0%	0,000	0,000
Total:				<b>2,599</b>	<b>2,760</b>
TN (mm)=	19		obtenido		
Gse (ini)=	2,72759077				
Vbe (ini)=	0,08968413				
Vba (ini)=	0,04165964				
Ws(lni)=	2,2968057				
Pb (ini)=	5,53695554	Respecto de la mezcla			
Pb (ini)=	5,86150444	Respecto del agregado			

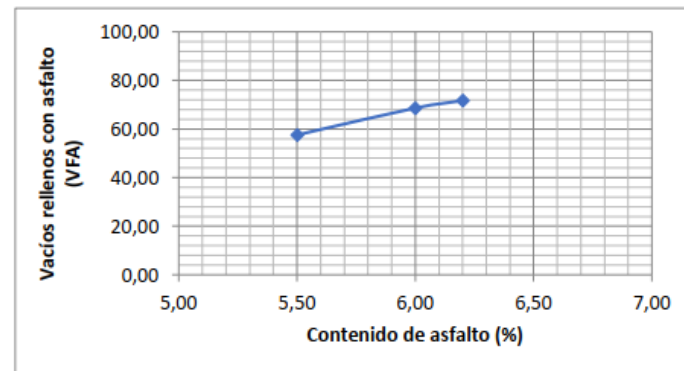
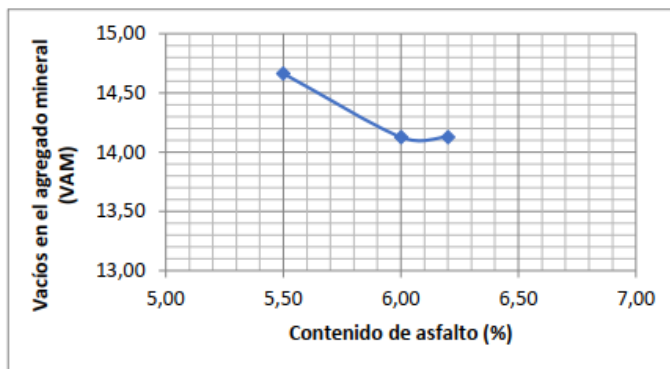
### Propiedades volumétricas de la mezcla

Contenido de asfalto R/agregado (%)	Contenido de asfalto R/mezcla (%)	Densidad máxima teórica (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad Mezcla compactada (Ton/m <sup>3</sup> )	Vacios (%)	VAM (%)	VFA (%)	Dp
5,21	5,50	2,495	2,340	6,2	14,66	57,54	1,47
5,66	6,00	2,476	2,366	4,4	14,13	68,61	1,30
5,84	6,20	2,469	2,370	4,0	14,13	71,69	1,2
<b>Especificación</b>		N/A	N/A	4	13mín.	65-75	0,6-1,2

### Contenido de vacíos y grafica de densidad



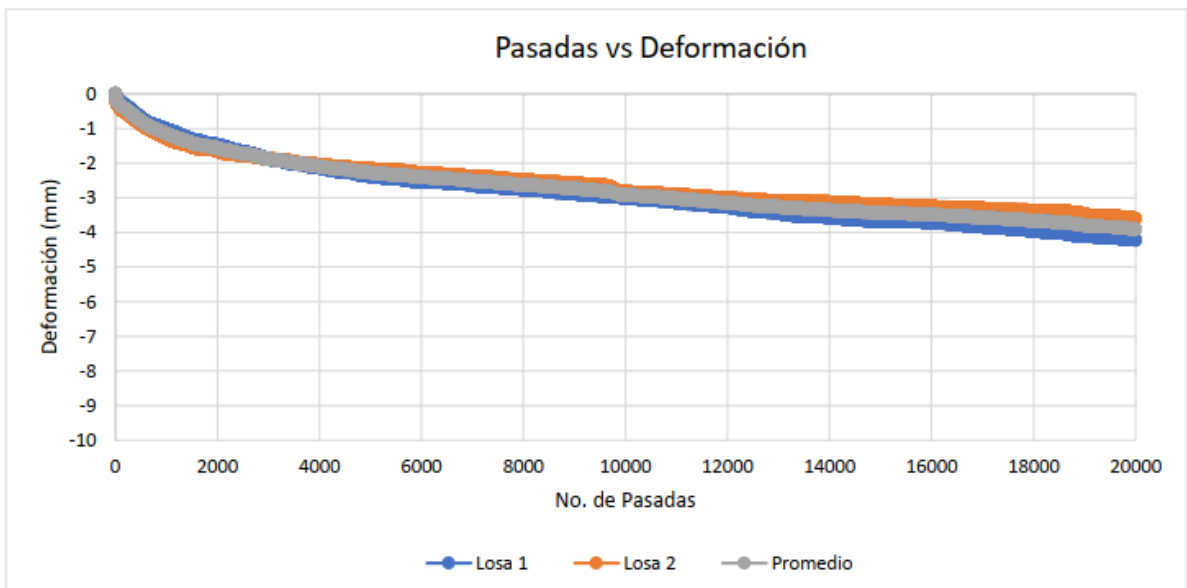
### Grafica de vacíos de agregado mineral y de vacíos llenos de asfalto



### Ensayo TSR

Especímenes	Esfuerzo seco	Esfuerzo húmedo
1	10,2	
2	9,7	
3	10,2	
4		8,3
5		9,3
6		8,7
<b>Promedio esfuerzo seco</b>	10,0	
<b>Promedio esfuerzo húmedo</b>		8,8
<b>TSR</b>	87%	
<b>Especificación</b>	80% mín.	

### Rueda de Hamburgo



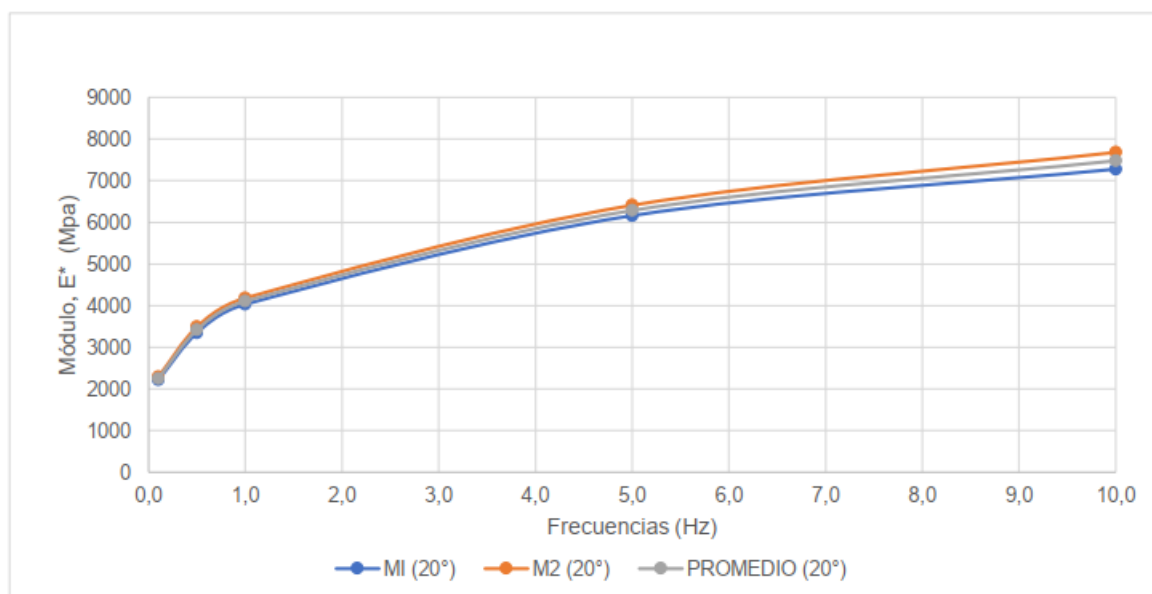
MEZCLA EVALUADA	No. PASADAS	DEFORMACIÓN (MM)
Losa_1	20 000	4,2
Losa_2	20 000	3,6
<b>Deformación promedio</b>	20 000	<b>3,9</b>
<b>Especificación</b>	<b>20 000</b>	<b>10,00 máx.</b>



### Modulo dinámico

FRECUENCIA DE CARGA (Hz)	CARGA (MPa)	TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	MÓDULO DINÁMICO	MÓDULO DINÁMICO	MÓDULO DINÁMICO
			MI (MPa)	M2 (MPa)	PROMEDIO (MPa)
0,1	0,1	20	2212	2288	2250
0,5	0,2	20	3344	3488	3416
1	0,3	20	4032	4181	4107
5	0,4	20	6160	6409	6285
10	0,45	20	7277	7680	7479

Modulo dinámico a diferentes frecuencias con una temperatura de acondicionamiento de 20 °C



## RESUMEN

Granulometría propuesta: 10.0 % grava de trituración del banco Providencia, 55% grava del banco Tlahuico y 35.0 % arena de banco El Cerrito.

% Cemento asfáltico óptimo: 6.2 % (con respecto al peso del agregado).

% Cemento asfáltico óptimo: 5.8 % (con respecto al peso de la mezcla).

Densidad máxima teórica (ton/m<sup>3</sup>): 2,469

Densidad de mezcla compactada (ton/m<sup>3</sup>): 2,370

% Vacíos: 4

%VAM: 14.13

%VFA: 71.69

Temperaturas de mezclado: 176°C - 178°C

Temperaturas de compactación: 169°C - 170°C

TSR:87.0 %

Deformación permanente: 3,9 mm

Modulo dinámico (Frecuencia 10 Hz) 7479 MPa

10.1.5 Reporte de calidad de la geomalla de fibra de vidrio

**TAIAN ROAD ENGINEERING MATERIALS CO., LTD**

Add : Middle of Taiwen Road, Taian City, Shandong Province, China.

TEL:86-538-8931611 FAX: 86-538-6610886

**TEST REPORT**

Product Name	Fiberglass Geogrid	PO No.	4185
Spec.:	SAFG120 3.95X100m	Testing Date	May 6, 2023
Batch No.	RD230505L41		
<b>Test Results</b>			
Test Items	Unit	Result	Conclusion
Material	Fiberglass with bitumen coating and self-adhesive glue		
Tensile Strength(MD)	kN/m	123.3	eligible
Tensile Strength(CD)	kN/m	123.1	eligible
Elongation at maximum Load (MD)	%	2.9	eligible
Elongation at maximum Load (CD)	%	2.8	eligible
Mesh size	mm	25.4x25.4	eligible
Mass weight	g/m2	521.1	eligible
Width	m	3.95	eligible
Length	m	100.2	eligible
Quantity	132 Rolls/52,140m2		
Conclusion: Test standard ASTM D 6637, It is eligible.			


 刘茂明  
 Q.C. Department Manager

TAIAN ROAD ENGINEERING MATERIALS CO., LTD

Add : Middle of Taiwen Road, Taian City, Shandong Province, China.

TEL:86-538-8931611 FAX: 86-538-6610886

TEST REPORT

Product Name	Fiberglass Geogrid	PO No.	4378
Spec.:	SAFG120 3.95X100m	Testing Date	January 8, 2024
Batch No.	RD240107L41		
Test Results			
Test Items	Unit	Result	Conclusion
Material	Fiberglass with bitumen coating and self-adhesive glue		
Tensile Strength(MD)	kN/m	123.4	eligible
Tensile Strength(CD)	kN/m	123.6	eligible
Elongation at maximum Load (MD)	%	2.8	eligible
Elongation at maximum Load (CD)	%	2.7	eligible
Mesh size	mm	25.4x25.4	eligible
Mass weight	g/m2	521.3	eligible
Width	m	3.95	eligible
Length	m	100.2	eligible
Quantity	132 Rolls/52,140m <sup>2</sup>		
Conclusion: Test standard ASTM D 6637, It is eligible.			



刘茂明