



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2026,
Volumen 10, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3

**EVALUACIÓN TÉCNICO-FUNCIONAL DEL
REENCARPETAMIENTO ASFÁLTICO EN
VIALIDAD URBANA CON ALTO FLUJO
PEATONAL: ESTUDIO DE CASO,
TULANCINGO, HIDALGO, MÉXICO.**

**TECHNICAL-FUNCTIONAL EVALUATION OF ASPHALT
RESURFACING IN URBAN ROADS WITH HIGH PEDESTRIAN
TRAFFIC: CASE STUDY, TULANCINGO, HIDALGO, MEXICO.**

Antonia del Carmen Madrid George
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Carmen Madrid George
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Evaluación técnico-funcional del reencarpentamiento asfáltico en vialidad urbana con alto flujo peatonal: estudio de caso, Tulancingo, Hidalgo, México.

Carlos Brandon Silva Félix¹

si356148@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0002-4701-5878>

Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo
Mexico

Luis Daimir López León

luis_lopez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-5871-7707>

Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo
Mexico

RESUMEN

El presente estudio de caso tiene como objetivo evaluar las condiciones funcionales y estructurales de la vialidad ubicada en la calle Tulancingo, con la finalidad de justificar técnica y operativamente una propuesta de reencarpentamiento asfáltico orientada a mejorar la movilidad y la seguridad vial en una zona de alta afluencia vehicular y peatonal, particularmente por su proximidad a una institución educativa. La metodología implementada incluyó inspección visual de deterioros superficiales, levantamiento geométrico, análisis de tránsito vehicular mediante estimación del Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), identificación de mecanismos de falla y valoración del estado de servicio del pavimento. Asimismo, se analizaron las condiciones de operación de la vialidad y la influencia de las cargas repetitivas sobre la estructura existente. Los resultados obtenidos evidenciaron la presencia de deformaciones, fisuramientos y pérdida de capacidad funcional, atribuibles principalmente al envejecimiento de la carpeta asfáltica y al incremento progresivo del tránsito. Con base en el diagnóstico realizado, se determinó la viabilidad técnica del reencarpentamiento como estrategia de conservación, permitiendo restablecer las condiciones de servicio, incrementar la seguridad de los usuarios y prolongar la vida útil de la infraestructura vial.

Palabras clave: evaluar.- viabilidad.- deformacion.- pavimento

¹ Autor principal

Correspondencia: si356148@uaeh.edu.mx

Technical-functional evaluation of asphalt resurfacing in urban roads with high pedestrian traffic: case study, Tulancingo, Hidalgo, Mexico.

ABSTRACT

This case study aims to evaluate the functional and structural conditions of the roadway located on Tulancingo Street, in order to technically and operationally justify a proposed asphalt resurfacing project. The project seeks to improve mobility and road safety in an area with high vehicular and pedestrian traffic, particularly due to its proximity to an educational institution. The methodology implemented included visual inspection of surface deterioration, geometric surveying, traffic analysis through estimation of the Annual Average Daily Traffic (AADT), identification of failure mechanisms, and assessment of the pavement's service condition. Additionally, the roadway's operating conditions and the influence of repetitive loads on the existing structure were analyzed. The results obtained revealed the presence of deformations, cracking, and loss of functional capacity, primarily attributable to the aging of the asphalt pavement and the progressive increase in traffic. Based on the diagnosis carried out, the technical feasibility of resurfacing as a conservation strategy was determined, allowing the restoration of service conditions, increasing the safety of users and extending the useful life of the road infrastructure.

Keywords: evaluate.- feasibility.- deformation.- pavement

*Artículo recibido 25 abril 2026
Aceptado para publicación: 25 mayo 2026*



INTRODUCCIÓN

La introducción cumple la función de presentar al lector el tema de investigación. Con cada párrafo que se vaya elaborando se expresarán ideas fuerza que acercaran al lector a comprender mejor el problema de El deterioro progresivo de los pavimentos urbanos constituye una de las problemáticas más grandes en la gestión de infraestructura vial en ciudades de países en desarrollo, debido a su impacto directo en la movilidad, la seguridad vial y los costos de operación vehicular; donde las limitaciones presupuestales y el crecimiento acelerado intensifica las demandas de estos mismos, condicionando severamente la estructura del pavimento, dando origen a fallas estructurales que comprometen la funcionabilidad y desempeño del mismo. “Las vialidades urbanas están sometidas a condiciones complejas de carga, interacción peatón-vehículo y variabilidad climática, lo que acelera los procesos de degradación estructural y funcional del pavimento.” (Huang, 2004; Papagiannakis & Masad, 2008; Chen et al., 2021; Jiang et al., 2022).

Partiendo de este contexto, los mecanismos de deterioro más comunes en pavimentos flexibles incluyen el ahuellamiento, la fisuración por fatiga, el desgranamiento superficial y la formación de baches (Behnood & Olek (2017), los cuales son consecuencia de la repetición de cargas vehiculares, deficiencias en el diseño estructural y condiciones ambientales adversas (Yoder & Witczak, 1975; Roberts et al., 1996). Estos daños no solo reducen la capacidad estructural del pavimento, sino que también afectan su funcionalidad, incrementando la rugosidad superficial y disminuyendo la seguridad de los usuarios, lo que nos genera un incremento en los costos de operación vehicular (particular y de servicio público) y una reducción en la calidad del servicio, aumentando los tiempos de traslado y riesgos de accidentes para los usuarios (peatones-conductores).

Para poder evaluar el estado de servicio de una vialidad, se han desarrollado diversos indicadores técnicos, entre los que destacan el Índice de Condición del Pavimento (PCI) y el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), los cuales permiten cuantificar el nivel de deterioro que presenta el asfalto estudiado y así poder establecer estrategias de mantenimiento y rehabilitación adecuadas. (ASTM, 2020; Sayers et al., 1986). En particular, el PCI se basa en la identificación y cuantificación de fallas superficiales, mientras que el IRI evalúa la regularidad del perfil longitudinal de la vía, siendo ambos parámetros fundamentales en la toma de decisiones en ingeniería de pavimentos, definiendo el tipo de intervención



(Torres-Machi et al., 2014), ya sea un mantenimiento rutinario (sellado de grietas), conservación periódica (bacheo), rehabilitación (reencarpetamiento) o bien la reconstrucción total de la carpeta (Zhang et al., 2020).

En México, el diseño, construcción y rehabilitación de pavimentos se rige por criterios establecidos por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), los cuales consideran variables como el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), la vida de proyecto, las condiciones del terreno y las características de los materiales (SICT, 2020). En este sentido, el reencarpetamiento asfáltico se posiciona como una de las técnicas más utilizadas para la rehabilitación de pavimentos urbanos, debido a su alta eficiencia constructiva, menor costo inicial y rápida habilitación para la apertura al tránsito en un menor tiempo, en comparación con otras alternativas. (Haas et al., 1994; Garber & Hoel, 2015).

Diversos estudios han demostrado que el uso de mezclas asfálticas en caliente permite mejorar las condiciones funcionales del pavimento, incrementando la resistencia a la deformación permanente y prolongando su vida útil, siempre y cuando se aplican bajo criterios adecuados de diseño, control de calidad y ejecución (Roberts et al., 1996; Huang, 2004). No obstante, la efectividad de estas intervenciones depende en gran medida de un diagnóstico correcto del estado del pavimento existente, así como una correcta estimación de las cargas de tránsito proyectadas que actuarán durante la vida de servicio.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la factibilidad técnica y funcional de una propuesta de reencarpetamiento asfáltico en una vialidad urbana con alto flujo peatonal y vehicular en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México. La investigación se basa en un análisis integrado que considera las condiciones del sitio, los mecanismos de deterioro identificados y la estimación de cargas vehiculares, con el fin de proponer una solución de rehabilitación que garantice la seguridad, durabilidad y funcionalidad de la infraestructura vial.

METODOLOGÍA

2.1. Tipo y enfoque de la investigación

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque aplicado de carácter descriptivo y analítico, utilizando la metodología de estudio de caso, la cual permite evaluar de manera integral las condiciones reales de una infraestructura vial específica y proponer soluciones técnicas basadas en criterios de ingeniería de



pavimentos. Este enfoque es ampliamente utilizado en estudios de rehabilitación vial urbana, donde las condiciones locales, el tránsito y el entorno socioeconómico influyen directamente en la toma de decisiones (Haas et al., 1994; Garber & Hoel, 2015).

Este análisis se centró en la evaluación técnico-funcional de una vialidad urbana con deterioro avanzado, considerando variables estructurales, funcionales y operativas, con el objetivo de determinar la factibilidad de una intervención mediante reencarpentamiento asfáltico.

2.2. Descripción de la zona de estudio

FIGURA 1.- Foto de la zona de estudio



La zona de estudio corresponde a la Calle Francisco Mendoza Oriente, ubicada en la colonia Plan de Ayala, en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México. El tramo analizado comprende una longitud aproximada de 235 m, delimitado entre la calle Francisco Mendoza y la avenida Gilberto Gómez Carbajal, con coordenadas geográficas representativas de latitud 20.071872 y longitud -98.368012.

La vialidad presenta características típicas de una calle urbana de dos carriles, con un ancho promedio de 8.60 m, y se encuentra en una zona de alta interacción peatón-vehículo debido a su proximidad con una institución educativa de nivel medio superior. Esta condición genera un flujo mixto constante, con predominancia de tránsito ligero y presencia de transporte público y vehículos de carga ligera.

FIGURA 2.- Croquis representativo de la zona de estudio (1 de 3)

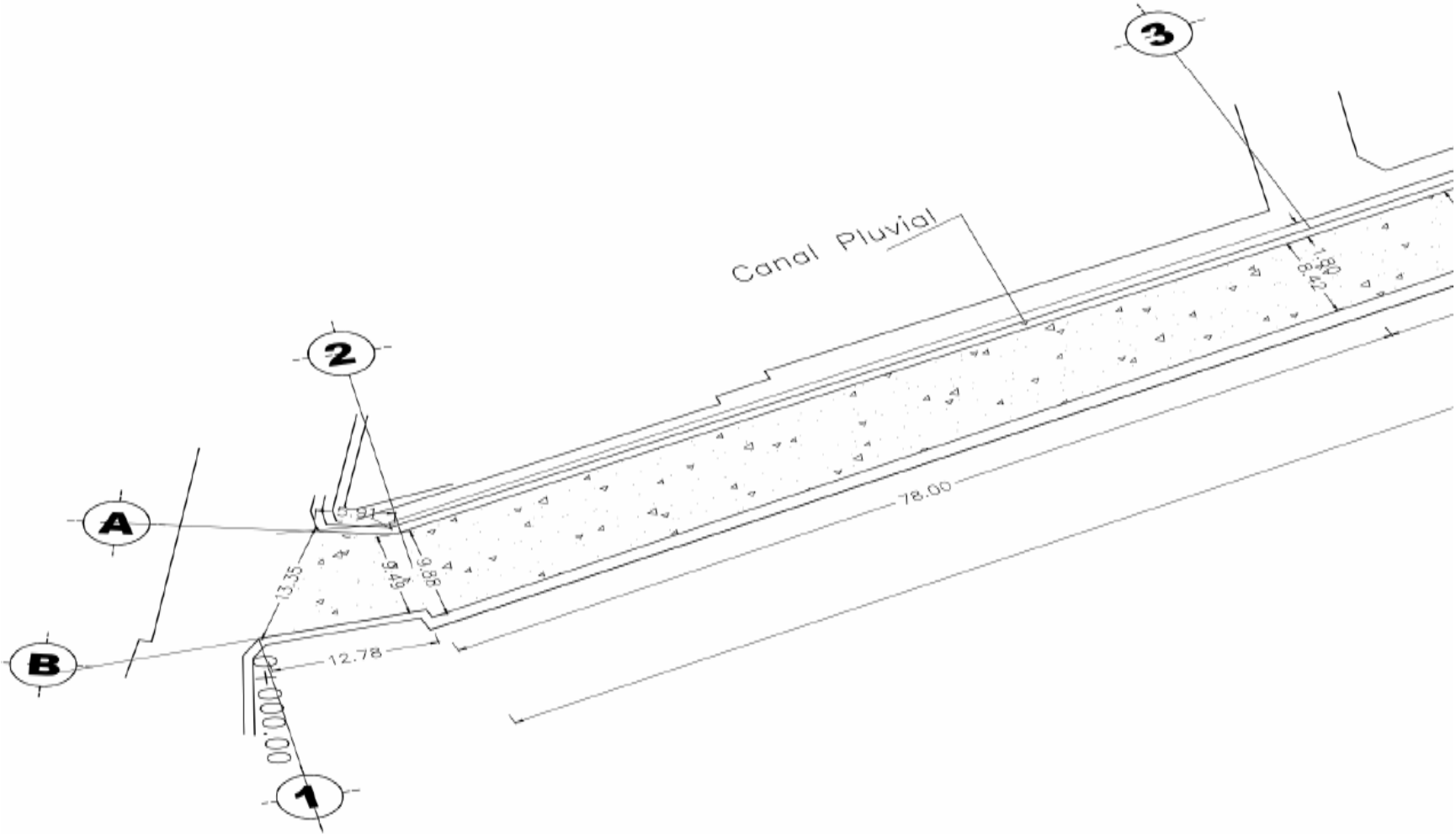


FIGURA 3.- Croquis representativo de la zona de estudio (3 de 3)

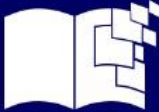
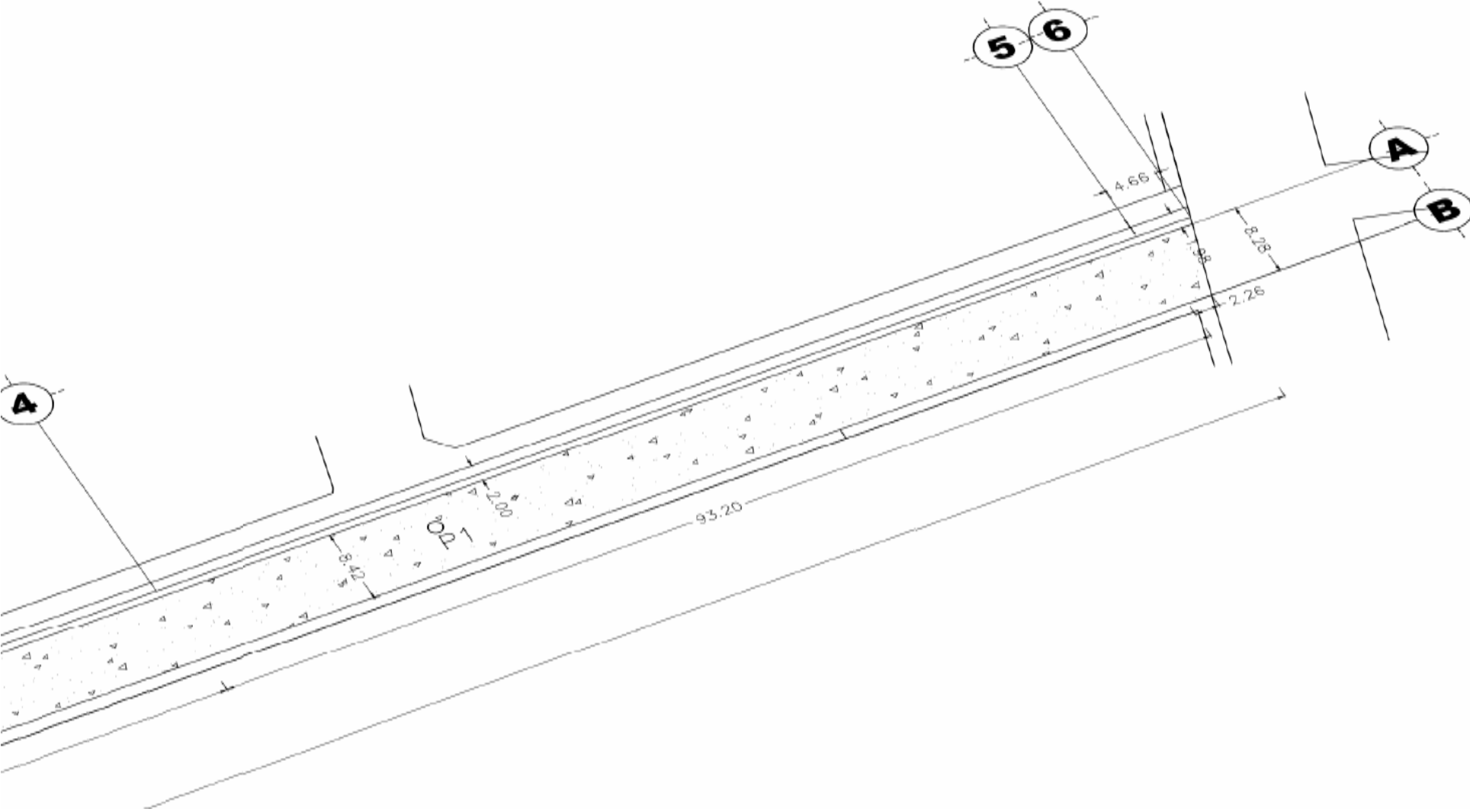


FIGURA 4.- Croquis representativo de la zona de estudio (3 de 3)

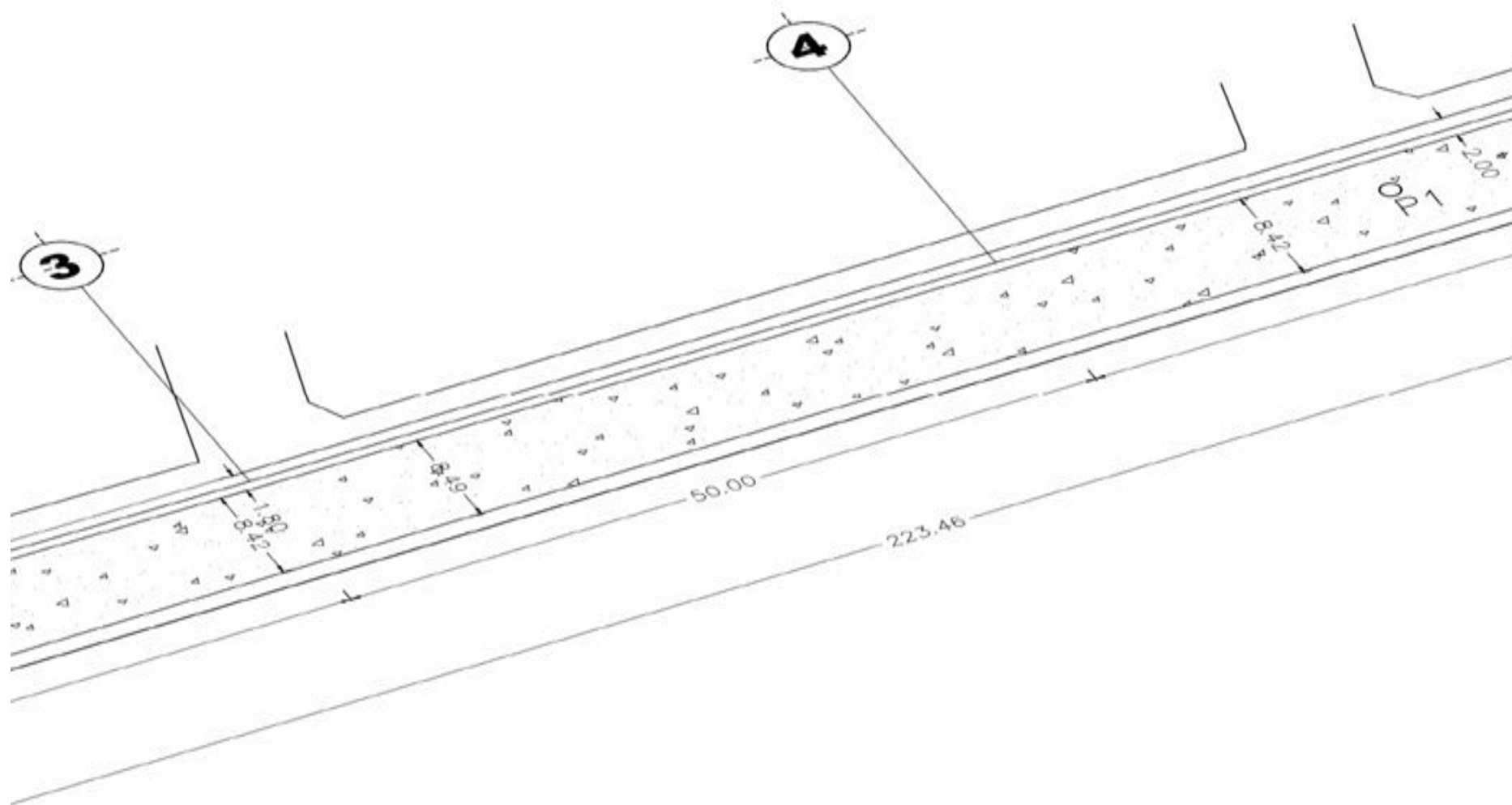
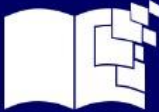
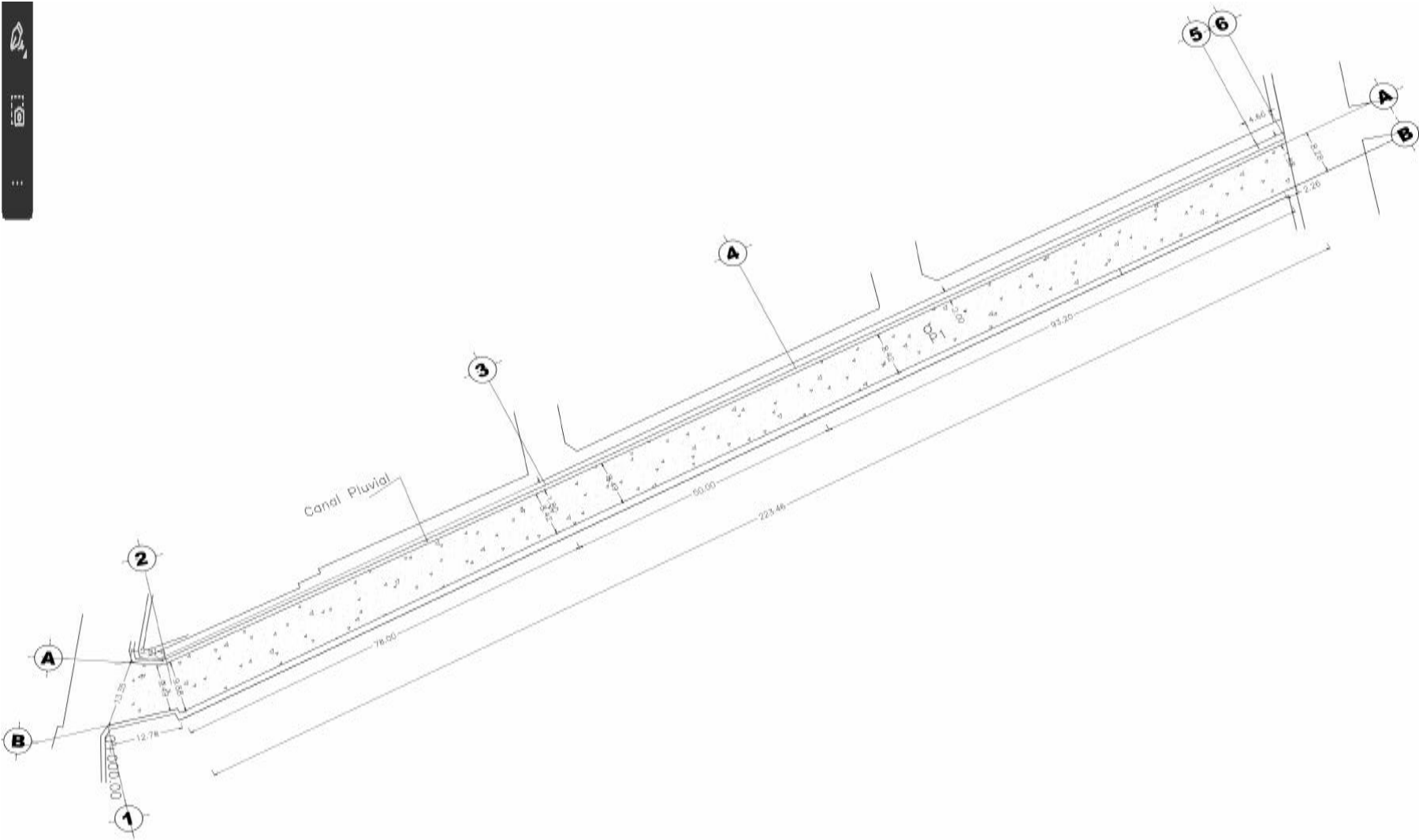


FIGURA 5.- Croquis representativo de la zona de estudio



Adicionalmente, el entorno presenta condiciones climáticas templadas, con una temperatura media anual de 14 °C y precipitación entre 500 y 553 mm, factores que influyen en el comportamiento mecánico de los materiales asfálticos (ASTM D6433-20) y en los procesos de deterioro del pavimento (Huang, 2004).

2.3 Evaluación del estado del pavimento

La evaluación del estado del pavimento se realizó mediante una inspección visual directa en campo, identificando los principales mecanismos de deterioro presentes en la superficie de rodamiento. Este tipo de evaluación constituye la base para la determinación del Índice de Condición del Pavimento (PCI), el cual permite clasificar el nivel de daño y definir estrategias de intervención (ASTM, 2020).

Durante la inspección se identificaron las siguientes fallas predominantes:

- Ahuellamiento (deformación permanente en la zona de rodamiento)
- Fisuración por fatiga (grietas interconectadas por repetición de cargas)
- Desgranamiento (pérdida de agregados superficiales)
- Baches (fallas localizadas con pérdida total de material)
- Deslizamiento y pérdida de adherencia
- Reflexión de grietas desde capas inferiores

FIGURAS 6 y 7.- Evidencias fotográficas de las afectaciones encontradas en la zona de estudio



FIGURAS 8 y 9.- Evidencias fotográficas de las afectaciones encontradas en la zona de estudio

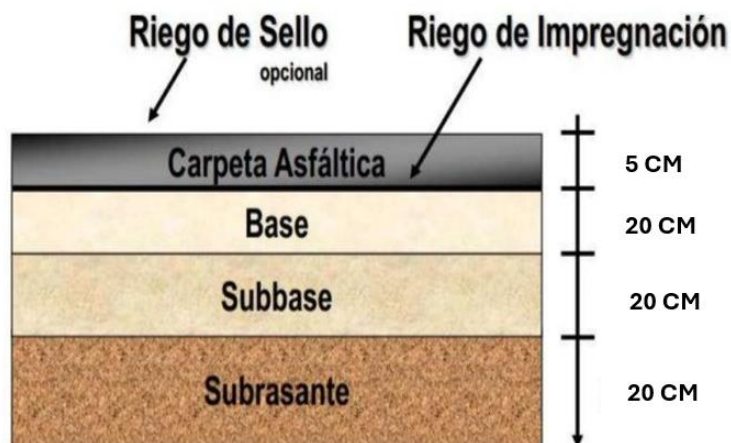


Estas patologías están asociadas principalmente a la acumulación de cargas vehiculares, deficiencias en el mantenimiento y el agotamiento de la vida útil del pavimento existente (Yoder & Witczak, 1975; Roberts et al., 1996).

La evaluación permitió establecer que el pavimento presenta un deterioro estructural severo e la parte de la carpeta asfáltica (figura5), comprometiendo tanto su capacidad portante como su funcionalidad.

FIGURA 10.- Esquema representativo de capas del pavimento analizado

Sección Transversal:



2.4 Análisis de tránsito vehicular

El análisis del tránsito se realizó con base en el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), el cual fue estimado en 275 vehículos por día, considerando una clasificación vehicular compuesta principalmente por automóviles ligeros (70%), vehículos de carga ligera (10%), vehículos pesados (15%) y vehículos de mayor tonelaje (5%).

Para la estimación del tránsito en el carril de diseño, se aplicó un factor de distribución del tránsito (FDT) de 0.5, considerando una vialidad de dos carriles, obteniendo un valor de 137.5 vehículos en el carril de proyecto (AASHTO, 1993).

Asimismo, se proyectó el crecimiento del tránsito a lo largo de una vida útil de 15 años, utilizando una tasa de crecimiento anual del 3.5%, mediante la siguiente expresión:

$$C_t = TDPA((1 + r)^n - 1)$$

FORMULA 1.- Crecimiento del tránsito

Donde:

TDPA = Tránsito Diario Promedio Anual

r = tasa de crecimiento anual

n = vida de proyecto

$$C_t = 275((1 + 0.035)^{15} - 1)$$

FORMULA 2.- Sustitución de la fórmula 1, en la zona de estudio.

Donde:

TDPA = 275 vehículos / día

r = 3.5 %

n = 15 años

CT ≈ 461 vehículos / día

Este procedimiento es consistente con metodologías de análisis de tránsito utilizadas en diseño de pavimentos, donde la estimación de cargas acumuladas es fundamental para la determinación de espesores estructurales (Garber & Hoel, 2015).

2.5 Determinación de cargas equivalentes

La estimación de las cargas actuantes sobre el pavimento se realizó mediante la conversión del tránsito vehicular a ejes equivalentes de 8.2 toneladas (eje sencillo) (ESAL's), utilizando coeficientes de daño específicos para cada tipo de vehículo y considerando porcentajes de vehículos cargados y vacíos.

Se evaluaron diferentes profundidades estructurales ($Z = 0, 15, 30$ y 60 cm), obteniendo valores acumulados de daño que permitieron estimar la sollicitación estructural en cada capa del pavimento.

$$N = TDPA \times 365 \times F_e \times F_d \times (((1 + r)^n - 1) / r)$$



FORMULA 3.- Determinación de cargas equivalentes

Donde:

N = Número acumulado de cargas equivalentes

TDPA = Transito Diario Promedio Anual

Fe = Factor de equivalencia de carga

Fd = Factor de distribución direccional por carril

r = tasa de crecimiento anual

n = vida de proyecto

$$N = 275 \times 365 \times 0.35 \times 0.5 \times (((1 + 0.035)^{15} - 1) / 0.035)$$

FORMULA 4.- Sustitución de la fórmula 3, en la zona de estudio

Donde:

TDPA = 275 vehiculos / día

Fe = 0.35 (factor de equivalencia de carga)

Fd = 0.5 (1 carril ambos sentidos)

r = 3.5 %

n = 15 años

$N \approx 338,041$ cargas equivalentes

Los resultados mostraron valores del orden de 10^5 ejes equivalentes acumulados durante la vida de diseño, lo cual es característico de vialidades urbanas de bajo a medio volumen de tránsito.

Este procedimiento se basa en enfoques empíricos de diseño de pavimentos, donde la equivalencia de cargas permite relacionar el tránsito real con la capacidad estructural requerida (Huang, 2004).

2.6 Diseño estructural del pavimento

El diseño estructural del pavimento se realizó considerando los valores de carga acumulada, las condiciones del terreno y criterios establecidos por la normativa mexicana para carreteras, particularmente las especificaciones de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT, 2020).

Se definieron las capas estructurales del sistema de pavimento, incluyendo:

- Carpeta asfáltica (representando un aproximado del 95 %de las afectaciones).



- Base
- Subbase
- Subrasante

Los espesores fueron determinados mediante un enfoque empírico basado en la relación entre la capacidad estructural de los materiales (VRS) y las cargas actuantes (calculadas), obteniendo valores adecuados para garantizar una vida útil de 15 años bajo condiciones de tránsito moderado conforme a lo establecido.

2.7 Propuesta de intervención

Con base en el diagnóstico realizado, se planteó una intervención mediante reencarpetamiento asfáltico, la cual consiste en la rehabilitación de la superficie de rodamiento mediante la colocación de una nueva capa de mezcla asfáltica en caliente.

El procedimiento constructivo propuesto incluye:

- 1) Fresado de la carpeta existente (5 cm)
- 2) Limpieza y preparación de la superficie
- 3) Aplicación de riego de liga con emulsión asfáltica
- 4) Colocación de mezcla asfáltica en caliente
- 5) Compactación al 95% de densidad

Esta técnica es ampliamente utilizada en rehabilitación vial urbana debido a su rapidez de ejecución, menor costo y efectividad en la mejora de las condiciones funcionales del pavimento (Roberts et al., 1996; Haas et al., 1994).

Esta propuesta de intervención se sustenta en la necesidad de restituir las condiciones funcionales y estructurales de la vialidad previamente mencionada, garantizando la restauración de su nivel de servicio adecuado, seguridad vial y una vida útil nueva (15 años propuestos); disminuyendo costos de operación, mejorando la movilidad urbana y lo más importante, reducir los riesgos asociados al usuario por el deterioro del pavimento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación técnico-funcional realizada en la Calle Francisco Mendoza Oriente permitió identificar un deterioro significativo en la estructura superficial del pavimento, asociado principalmente al

incremento progresivo de cargas vehiculares, la pérdida de capacidad estructural de la carpeta asfáltica y la ausencia de intervenciones de mantenimiento oportunas. Los resultados obtenidos mediante inspección visual, análisis de tránsito y estimación de cargas equivalentes permitieron establecer criterios técnicos para justificar la viabilidad del reencarpentamiento asfáltico como alternativa de rehabilitación vial.

Los hallazgos obtenidos muestran una relación directa entre el nivel de deterioro superficial observado y las condiciones operativas de la vialidad, particularmente debido a la interacción constante entre tránsito ligero, vehículos de carga y alta demanda peatonal derivada de la proximidad con una institución educativa. Este comportamiento coincide con lo reportado por Huang (2004) y Papagiannakis y Masad (2008), quienes establecen que las vialidades urbanas sometidas a cargas repetitivas y condiciones de operación intensiva presentan una aceleración en los mecanismos de fatiga y deformación permanente. Asimismo, el análisis realizado permitió determinar que las condiciones actuales del pavimento comprometen tanto la funcionalidad de la vialidad como la seguridad de los usuarios, generando irregularidades superficiales, pérdida de confort de rodamiento y riesgos asociados a la movilidad vehicular y peatonal. En este sentido, los resultados obtenidos evidencian la necesidad de implementar estrategias de rehabilitación que permitan restituir las condiciones estructurales y funcionales de la infraestructura vial analizada.

3.1. Condición superficial del pavimento

La inspección visual efectuada en la zona de estudio permitió identificar diversos mecanismos de deterioro superficial distribuidos a lo largo del tramo analizado, observándose principalmente fisuración por fatiga, ahuellamiento, pérdida de material pétreo superficial, baches y zonas con pérdida de adherencia entre capas. Las Figuras 6 a 9 muestran evidencias representativas de las afectaciones identificadas durante el levantamiento de campo.

El deterioro observado indica que la carpeta asfáltica existente presenta un nivel avanzado de degradación funcional y estructural, particularmente en las zonas de rodamiento sometidas a mayores concentraciones de carga vehicular. La presencia de fisuración interconectada y deformaciones permanentes sugiere un comportamiento asociado a procesos de fatiga estructural derivados de cargas

repetitivas y pérdida progresiva de rigidez en las capas superiores del pavimento (Yoder & Witczak, 1975).

Adicionalmente, se identificaron zonas con pérdida considerable de agregados superficiales y formación de baches (Al-Qadi et al., 2010), condiciones que favorecen la infiltración de agua hacia capas inferiores, acelerando el deterioro estructural del sistema de pavimento. Este comportamiento coincide con lo reportado por Roberts et al. (1996), quienes establecen que la combinación entre envejecimiento del ligante asfáltico, tránsito acumulado y deficiencias de mantenimiento constituye uno de los principales factores de degradación en pavimentos flexibles urbanos.

Desde el punto de vista funcional, las irregularidades superficiales observadas afectan directamente la calidad de rodaje, incrementando la rugosidad superficial y reduciendo las condiciones de seguridad vial para peatones y conductores. En vialidades urbanas con alta interacción peatón-vehículo, como la analizada en el presente estudio, este tipo de deterioro adquiere mayor relevancia debido al incremento del riesgo de accidentes, afectaciones en la movilidad y reducción del nivel de servicio de la infraestructura vial.

Con base en las evidencias observadas y el análisis realizado, se determinó que aproximadamente el 95 % de las afectaciones se concentran en la carpeta asfáltica superficial, mientras que las capas inferiores no presentan indicios visibles de falla estructural severa. Esta condición permitió establecer que una intervención mediante reencarpetamiento asfáltico representa una alternativa técnicamente viable para restituir las condiciones funcionales del pavimento sin requerir una reconstrucción total de la estructura vial.

Los resultados obtenidos demuestran que el deterioro existente no corresponde únicamente a daños superficiales aislados, sino a un proceso progresivo de degradación asociado a las condiciones operativas y de servicio de la vialidad, justificando la necesidad de implementar estrategias de rehabilitación estructural que permitan prolongar la vida útil del pavimento y mejorar las condiciones de movilidad urbana.

3.2. Análisis del tránsito proyectado

El análisis del tránsito vehicular permitió identificar las condiciones de carga y demanda operativa a las que se encuentra sometida la vialidad estudiada, constituyendo uno de los parámetros fundamentales

para la evaluación del comportamiento estructural del pavimento y la definición de estrategias de rehabilitación. A partir del Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) estimado en 275 vehículos por día, se determinó una composición vehicular dominada por automóviles ligeros, aunque con presencia significativa de vehículos de carga ligera y pesada, los cuales generan mayores esfuerzos sobre la estructura del pavimento.

La distribución vehicular identificada evidencia que, aun tratándose de una vialidad urbana de dimensiones moderadas, las cargas acumuladas derivadas del tránsito constante producen una degradación progresiva de la carpeta asfáltica, particularmente en zonas de rodamiento y maniobra. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Garber y Hoel (2015), quienes señalan que el efecto acumulativo de las cargas repetitivas constituye uno de los principales factores asociados al deterioro prematuro de pavimentos urbanos (Prozzi & Madanat, 2004).

Asimismo, la proyección del crecimiento vehicular realizada para una vida útil de diseño de 15 años mostró un incremento estimado del tránsito hasta aproximadamente 461 vehículos por día, considerando una tasa anual de crecimiento del 3.5 %. Este incremento representa una presión adicional sobre la estructura existente del pavimento, particularmente en una vialidad con antecedentes de deterioro funcional y estructural avanzado (tabla 1).

Desde el punto de vista ingenieril, el crecimiento proyectado del tránsito indica que las condiciones actuales de la carpeta asfáltica no son suficientes para garantizar un nivel de servicio adecuado a mediano plazo sin una intervención de rehabilitación. La acumulación progresiva de cargas incrementa los esfuerzos de compresión y tensión en las capas superiores del pavimento, favoreciendo la aparición de fenómenos de fatiga, deformación permanente y pérdida de capacidad estructural (Huang, 2004).

Adicionalmente, la presencia constante de transporte público y vehículos de carga ligera genera concentraciones localizadas de esfuerzo en zonas específicas de la vialidad, especialmente en áreas de frenado, aceleración y ascenso-descenso de pasajeros, lo que acelera los mecanismos de deterioro superficial observados durante la inspección visual.

Tabla 1. Proyección del tránsito vehicular

Parámetro	Valor
TDPA inicial	275 vehículos/día
Tasa de crecimiento anual	3.5 %
Vida de diseño	15 años
Tránsito proyectado	461 vehículos/día
Factor de distribución (FDT)	0.5

Los resultados obtenidos permiten establecer que el tránsito proyectado constituye un factor determinante en el deterioro progresivo de la infraestructura vial analizada, justificando técnicamente la necesidad de implementar una estrategia de rehabilitación mediante reencarpentamiento asfáltico capaz de restituir la capacidad funcional del pavimento y garantizar condiciones adecuadas de movilidad y seguridad vial durante el periodo de diseño considerado.

Asimismo, los valores proyectados de tránsito y crecimiento vehicular se encuentran dentro de rangos característicos de vialidades urbanas de bajo a medio volumen de tránsito, donde las soluciones de rehabilitación mediante mezcla asfáltica en caliente representan una alternativa técnicamente viable y económicamente eficiente para prolongar la vida útil de la infraestructura vial existente.

3.3. Evaluación de cargas equivalentes y comportamiento estructural del pavimento

La determinación de cargas equivalentes permitió evaluar el nivel de sollicitación estructural al que se encuentra sometida la vialidad analizada durante la vida útil de diseño propuesta. A partir de la conversión del tránsito vehicular a ejes equivalentes de 8.2 toneladas (ESALs), se obtuvieron valores acumulados representativos del daño estructural inducido sobre las diferentes capas del pavimento (Ullidtz, 1998). Los resultados obtenidos evidencian que la carpeta asfáltica existente ha sido sometida a una acumulación progresiva de esfuerzos que exceden la capacidad funcional observada durante la inspección visual.

La Tabla 2 presenta los valores acumulados de cargas equivalentes obtenidos para diferentes profundidades estructurales del pavimento.

Tabla 2. Cargas equivalentes acumuladas por profundidad estructural

Profundidad evaluada	Cargas equivalentes acumuladas $\sum L(z_i)$
Z = 0 cm	4.42×10^5
Z = 15 cm	2.03×10^5
Z = 30 cm	1.57×10^5
Z = 60 cm	1.54×10^5

Los resultados muestran que la mayor concentración de esfuerzos se presenta en la superficie de rodamiento (Z = 0 cm), donde se registró un valor aproximado de 4.42×10^5 cargas equivalentes acumuladas. Este comportamiento es consistente con la presencia de deterioro superficial severo observado durante el levantamiento de campo, particularmente en forma de ahuellamiento, fisuración por fatiga y pérdida de material pétreo.

A medida que aumenta la profundidad estructural del pavimento, se observa una disminución gradual en los valores de daño acumulado, indicando una disipación progresiva de esfuerzos hacia capas inferiores. Sin embargo, la magnitud de las cargas equivalentes obtenidas continúa representando una sollicitación considerable para una vialidad urbana de bajo a medio volumen de tránsito, especialmente considerando el deterioro funcional existente.

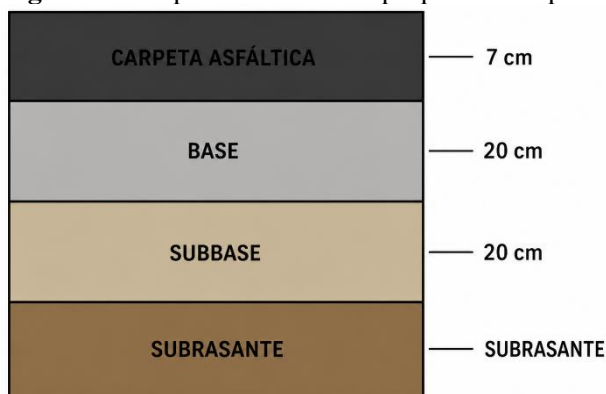
Desde el punto de vista estructural, los resultados indican que la carpeta asfáltica es la capa que concentra el mayor nivel de degradación y pérdida de capacidad funcional, mientras que las capas inferiores presentan una condición relativamente estable. Este comportamiento coincide con lo reportado por Huang (2004), quien establece que en pavimentos flexibles urbanos los mecanismos de daño suelen iniciar en las capas superiores debido a la repetición continua de cargas vehiculares y a la pérdida progresiva de rigidez del ligante asfáltico.

Asimismo, los coeficientes de daño obtenidos para vehículos pesados y de carga muestran que, aunque representan un porcentaje menor dentro de la composición vehicular total, generan un impacto significativamente mayor sobre la estructura del pavimento en comparación con vehículos ligeros. Este fenómeno ha sido ampliamente documentado en ingeniería de pavimentos, donde las cargas por eje constituyen el principal factor asociado al deterioro estructural acelerado (Yoder & Witczak, 1975).

Con base en los valores de cargas equivalentes obtenidos, se determinó que la estructura existente presenta condiciones compatibles con una estrategia de rehabilitación mediante reencarpamiento asfáltico, ya que el daño predominante se concentra principalmente en la carpeta superficial y no en fallas profundas asociadas a colapso total de la subrasante.

Adicionalmente, el análisis estructural permitió establecer espesores finales de diseño adecuados para garantizar una vida útil proyectada de 15 años bajo condiciones de tránsito moderado.

Figura 11. Esquema estructural propuesto del pavimento rehabilitado



La configuración estructural propuesta busca garantizar una distribución adecuada de esfuerzos hacia las capas inferiores del pavimento, reduciendo la probabilidad de deformaciones permanentes y prolongando la vida útil de la vialidad. De igual manera, la incorporación de una nueva carpeta asfáltica permitirá restituir las condiciones funcionales de rodamiento, mejorar la seguridad vial y disminuir los costos asociados al mantenimiento correctivo recurrente.

Los resultados obtenidos demuestran que el análisis de cargas equivalentes constituye una herramienta fundamental para la evaluación técnico-funcional de pavimentos urbanos, permitiendo establecer criterios objetivos para la toma de decisiones en proyectos de rehabilitación vial.

3.4 Evaluación técnico-funcional de la propuesta de reencarpamiento

Con base en el diagnóstico superficial, el análisis de tránsito y la evaluación de cargas equivalentes, se determinó que la alternativa de rehabilitación mediante reencarpamiento asfáltico representa una solución técnicamente viable para restituir las condiciones estructurales y funcionales de la vialidad analizada. La propuesta planteada permite intervenir específicamente la capa de rodamiento, que corresponde al elemento estructural con mayor nivel de deterioro identificado durante la inspección de campo.

Los resultados obtenidos evidenciaron que aproximadamente el 95 % de las afectaciones observadas se concentran en la carpeta asfáltica superficial, mientras que las capas inferiores conservan una capacidad estructural aceptable para continuar operando bajo condiciones de tránsito moderado. Esta condición resulta favorable para la implementación de técnicas de rehabilitación superficial, evitando la necesidad de una reconstrucción total del pavimento y reduciendo significativamente los costos de intervención. Desde el punto de vista funcional, la incorporación de una nueva carpeta asfáltica permitirá mejorar la regularidad superficial de la vialidad, disminuyendo irregularidades asociadas a baches, deformaciones y pérdida de material pétreo. Estas mejoras contribuyen directamente a incrementar la calidad de rodamiento, reducir vibraciones vehiculares y mejorar las condiciones de confort y seguridad para los usuarios.

La Tabla 3 resume las principales condiciones identificadas en la vialidad y la respuesta funcional esperada con la propuesta de rehabilitación.

Tabla 3. Relación entre deterioro identificado y beneficio esperado de la intervención

Condición observada	Efecto funcional actual	Beneficio esperado con el reencarpamiento
Fisuración por fatiga	Pérdida de continuidad superficial	Recuperación de uniformidad superficial
Ahuellamiento	Deformación en zonas de rodamiento	Mejora de estabilidad vehicular
Baches	Riesgo de accidentes y daños vehiculares	Incremento de seguridad vial
Desgranamiento	Pérdida de adherencia superficial	Mejor adherencia neumático-pavimento
Pérdida de nivel de servicio	Incremento de tiempos de traslado	Mejora de movilidad urbana

Desde el punto de vista económico y operativo, el reencarpamiento asfáltico presenta ventajas importantes respecto a otras alternativas de rehabilitación, particularmente en vialidades urbanas con flujo constante de usuarios. Entre las principales ventajas identificadas destacan:

- Menor tiempo de ejecución
- Rápida apertura a la circulación vehicular
- Menor costo inicial de intervención
- Facilidad de mantenimiento futuro

- Menor afectación a la movilidad urbana durante la ejecución de obra

Este comportamiento coincide con lo reportado por Haas et al. (1994) y Roberts et al. (1996), quienes establecen que los pavimentos flexibles representan una alternativa eficiente para procesos de rehabilitación urbana debido a su rapidez constructiva y facilidad de conservación.

Asimismo, la propuesta planteada presenta compatibilidad con las condiciones climáticas predominantes de la región de Tulancingo de Bravo, Hidalgo, donde las mezclas asfálticas en caliente ofrecen un comportamiento adecuado frente a ciclos térmicos y cargas repetitivas de tránsito moderado. La elasticidad inherente del sistema flexible permite absorber parcialmente deformaciones y esfuerzos inducidos por la circulación vehicular, disminuyendo la probabilidad de agrietamientos prematuros.

En términos urbanos y sociales, la rehabilitación propuesta adquiere una relevancia adicional debido a la ubicación estratégica de la vialidad, la cual presenta interacción constante entre peatones, transporte público y vehículos particulares por su proximidad con una institución educativa. La mejora de la superficie de rodamiento permitirá reducir riesgos asociados a accidentes, mejorar la accesibilidad y optimizar las condiciones de movilidad para estudiantes, docentes y usuarios de la zona.

Figura 12. Relación entre deterioro actual y beneficios funcionales esperados



CONCLUSIONES

El análisis técnico-funcional realizado en la Calle Francisco Mendoza Oriente permitió identificar un deterioro avanzado de la carpeta asfáltica, asociado principalmente a la acumulación progresiva de cargas vehiculares, el agotamiento de la vida útil del pavimento y la ausencia de intervenciones oportunas de mantenimiento. Las principales afectaciones observadas correspondieron a fisuración por fatiga, ahuellamiento, desgranamiento superficial y formación de baches, condiciones que comprometen tanto la capacidad estructural como la funcionalidad de la vialidad.

La evaluación del tránsito vehicular mostró que la vialidad presenta un Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) de 275 vehículos por día, con una proyección aproximada de 461 vehículos diarios para una vida útil de diseño de 15 años. Asimismo, la determinación de cargas equivalentes evidenció valores acumulados del orden de 10^5 ESALs, confirmando que la carpeta asfáltica existente ha sido sometida a esfuerzos repetitivos que favorecen la degradación progresiva de la superficie de rodamiento.

Los resultados obtenidos permitieron establecer que aproximadamente el 95 % de las afectaciones identificadas se concentran en la carpeta asfáltica superficial, mientras que las capas inferiores conservan condiciones estructurales relativamente estables. Esta condición permitió justificar técnicamente la implementación de una estrategia de rehabilitación mediante reencarpetamiento asfáltico, evitando procesos de reconstrucción total que representarían mayores costos y tiempos de ejecución.

La propuesta de intervención mediante fresado superficial y colocación de una nueva carpeta asfáltica en caliente representa una alternativa técnica y funcionalmente viable para restituir las condiciones de servicio de la vialidad. Entre los principales beneficios esperados destacan la mejora de la regularidad superficial, el incremento de la seguridad vial, la reducción de costos de operación vehicular y la optimización de la movilidad urbana en una zona con alta interacción peatón-vehículo.

Desde el punto de vista urbano y social, la rehabilitación de esta vialidad adquiere una relevancia significativa debido a su proximidad con una institución educativa y a la presencia constante de transporte público, comercio local y flujo peatonal intensivo. La intervención propuesta permitirá mejorar las condiciones de accesibilidad y disminuir riesgos asociados al deterioro del pavimento, contribuyendo al fortalecimiento de la conectividad urbana y al desarrollo socioeconómico de la zona.



Finalmente, el presente estudio demuestra que la integración de análisis de tránsito, evaluación superficial y determinación de cargas equivalentes constituye una herramienta fundamental para la toma de decisiones en proyectos de rehabilitación vial urbana, permitiendo establecer estrategias técnicamente sustentadas y compatibles con las condiciones reales de operación de la infraestructura existente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (1993). Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Al-Qadi, I. L., Elseifi, M. A., & Carpenter, S. H. (2010). Reclaimed asphalt pavement: A literature review (FHWA-ICT-10-001). Illinois Center for Transportation.
- ASTM International. (2020). ASTM D6433-20: Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys. ASTM International.
- Behnood, A., & Olek, J. (2017). Stress-dependent behavior and rutting potential of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 18(3), 687–701. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1182056>
- Chen, X., Wang, H., & Li, B. (2021). Evaluation of urban pavement deterioration considering traffic loading and environmental conditions. *Sustainability*, 13(9), 4872. <https://doi.org/10.3390/su13094872>
- Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2015). *Traffic and highway engineering* (5th ed.). Cengage Learning.
- Haas, R., Hudson, W. R., & Zaniewski, J. (1994). *Modern pavement management*. Krieger Publishing Company.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Jiang, W., Sha, A., Xiao, J., Li, Y., & Huang, Y. (2022). Pavement deterioration analysis under urban traffic conditions. *Applied Sciences*, 12(7), 3418. <https://doi.org/10.3390/app12073418>
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). *Pavement design and materials*. John Wiley & Sons.
- Prozzi, J. A., & Madanat, S. M. (2004). Development of pavement deterioration models by combining experimental and field data. *Journal of Infrastructure Systems*, 10(4), 187–194. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2004\)10:4\(187\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2004)10:4(187))



- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction (2nd ed.). National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.
- Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Queiroz, C. A. V. (1986). The international road roughness experiment: Establishing correlation and a calibration standard for measurements (World Bank Technical Paper No. 45). World Bank.
- Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). (2020). Normas de construcción e infraestructura carretera. Gobierno de México.
- Torres-Machi, C., Chamorro, A., Pellicer, E., Yepes, V., & Videla, C. (2014). Sustainable pavement management: Integrating economic, technical, and environmental aspects in pavement management systems. *Transportation Research Record*, 2455(1), 56–63. <https://doi.org/10.3141/2455-06>
- Ullidtz, P. (1998). Modelling flexible pavement response and performance. Polyteknisk Forlag.
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). Principles of pavement design (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Zhang, Y., Luo, X., Onifade, I., Huang, X., & Lytton, R. L. (2020). Mechanistic evaluation of asphalt pavement deterioration and rehabilitation strategies. *Construction and Building Materials*, 262, 120744. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120744>
- 33333333333333333333

