

Structural design of flexible pavement with rubber addition in the city of Trujillo

Abstract– The research aimed to determine the influence of recycled rubber on the structural design of the flexible pavement of Av. América Sur during the year 2025, contributing to safer and more sustainable urban mobility (SDG 11). The study was basic in type, with a quantitative approach and a non-experimental design. The population was composed of the entire avenue, and the sample corresponded to a 400-meter section selected for convenience. The observation technique was applied using a guide based on the PCI and Marshall methods, which made it possible to evaluate the pavement condition and the performance of the mixtures with recycled rubber. The results showed that the pavement was in very poor condition, with a PCI of 19.33 and severe failures such as alligator cracking. Using the AASHTO 93 method, a structural thickness of 61 cm was determined. In the laboratory, the mixtures with rubber exhibited better mechanical performance, with Mix 3 standing out with 36.37 kg/cm² of strength and 0.65% absorption, confirming the positive influence of rubber. In conclusion, the incorporation of recycled rubber proved to be viable and is projected as a sustainable alternative to improve the durability and performance of urban roads.

Keywords– Recycled rubber, Flexible pavement, Resistance, Asphalt mix, Design

Diseño estructural de pavimento flexible con adición de caucho en la ciudad de Trujillo

Resumen– La investigación tuvo como objetivo determinar la influencia del caucho reciclado en el diseño estructural del pavimento flexible de la Av. América Sur durante el año 2025, aportando a una movilidad urbana más segura y sostenible (ODS 11). El estudio fue de tipo básica, con enfoque cuantitativo y diseño no experimental. La población estuvo constituida por toda la avenida y la muestra correspondió a un tramo de 400 metros seleccionado por conveniencia. Se empleó la técnica de observación mediante una guía basada en los métodos PCI y Marshall, lo que permitió evaluar el estado del pavimento y el desempeño de las mezclas con caucho reciclado. Los resultados evidenciaron que el pavimento presentó un estado muy malo, con un-PCI de 19.33 y fallas severas como piel de cocodrilo, etc. Mediante el método AASHTO 93 se determinó un espesor estructural de 61 cm. En laboratorio, las mezclas con caucho mostraron un mejor comportamiento mecánico, destacando la mezcla 3 con 36.37 kg/cm² de resistencia y 0.65% de absorción, confirmando la influencia positiva del caucho. En conclusión, la incorporación de caucho reciclado resultó viable y se proyecta como una alternativa sostenible para mejorar la durabilidad y el desempeño de las vías urbanas.

Palabras clave– Caucho reciclado, Pavimento flexible, Resistencia, mezcla asfáltica, Diseño

I. INTRODUCCIÓN (HEADING1)

El estado de las vías urbanas afecta la movilidad, la seguridad y el bienestar de la población, además de aumentar los costos de mantenimiento. En Trujillo, el deterioro de los pavimentos frente al crecimiento vehicular requiere soluciones innovadoras. La incorporación de caucho reciclado en mezclas asfálticas mejora la resistencia y estabilidad del pavimento, reduce problemas como fluencia y ahuellamiento, y contribuye a la sostenibilidad ambiental (Salazar, 2019). Esta estrategia fortalece la resiliencia urbana y se alinea con la meta 11.2 del ODS 11, promoviendo un transporte más seguro y eficiente [30].

La conservación vial es un desafío global, ya que el deterioro de los pavimentos impacta la movilidad y los costos de transporte. Alternativas sostenibles, como el uso de caucho reciclado en mezclas asfálticas, han mostrado en países como Colombia mayor desempeño y durabilidad del pavimento (Cardoza Zambrano, 2019), evidenciando cómo la innovación en materiales responde a la demanda vehicular y reduce el impacto Ambiental [7].

En Perú, la red vial presenta serias limitaciones: solo el 13 % de las vías pavimentadas están en buen estado, mientras más de la mitad se encuentra en condiciones deficientes (MTC, 2022). En Trujillo, de 369,31 km de red vial, el 48,3 % está en mal estado, el 28,2 % en regular y solo el 23,5 % en buen estado (PMUS, 2018), lo que evidencia la necesidad de mejorar la gestión vial mediante enfoques sostenibles e innovadores [21].

Bajo este panorama, el problema se focalizó en la ciudad de Trujillo, sector vial estratégico del norte peruano. En la Avenida América Sur, particularmente en el tramo que conecta con la Avenida Gonzales Prada, se evidencia un deterioro progresivo del pavimento flexible. Las fallas prematuras, asociadas al intenso tránsito urbano, generan baches, fisuras y deformaciones que afectan la movilidad, aumentan los gastos asociados al mantenimiento y afectan la seguridad del tránsito, razón por la cual se desarrolla el presente estudio.

El deterioro de la Avenida América Sur se debe a múltiples factores: técnicos, como diseños tradicionales y materiales de baja calidad que provocan fallas prematuras; económicos, por los altos costos de reparación que limitan la planificación urbana; ambientales, por la falta de reciclaje de neumáticos que podrían incorporarse en mezclas asfálticas sostenibles; administrativos, debido a la corrupción en obras públicas que acelera el desgaste; y sociales, con el aumento del tránsito que afecta la movilidad y seguridad vial (Castillo, 2024) [9].

Si no se interviene oportunamente, la vía sufrirá un desgaste progresivo que reducirá su vida útil y aumentará los riesgos de tránsito. La falta de construcción y mantenimiento adecuados provoca fisuras, baches y deformaciones, incrementando costos, limitando la movilidad y afectando el bienestar social (Barboza Benites et al., 2023) [2]. En Perú, más del 50 % de las vías presenta deficiencias (MTC, 2022), situación que en Trujillo podría reflejarse en mayores accidentes, que ya alcanzan el 2,7 % por fallas en infraestructura (ONSV, 2022) [25]. Además, la acumulación de neumáticos en desuso desaprovecha la oportunidad de incorporarlos en mezclas asfálticas sostenibles, como se hace en países vecinos (Cardoza Zambrano, 2019) [7].

Frente a esta problemática, es necesario evaluar alternativas que prolonguen la durabilidad de los pavimentos urbanos. Este estudio analiza el uso de caucho reciclado en mezclas asfálticas y su efecto en el desempeño del pavimento flexible bajo tránsito intenso. Investigaciones previas respaldan esta estrategia: Arriola (2025) señala que el caucho pulverizado mejora las propiedades mecánicas del asfalto [13], y Martínez (2018) confirma beneficios en adherencia y comportamiento viscoelástico, justificando su aplicación como solución técnica y sostenible frente al deterioro prematuro de las vías [20].

Por lo antes mencionado, la pregunta central de investigación fue: ¿De qué manera influye el uso de caucho reciclado en el diseño estructural del pavimento flexible en la Av. América Sur, Trujillo – 2025?

El estudio se justificó según Hernández y Mendoza (2018) por su valor teórico, al aportar conocimiento sobre la influencia del caucho reciclado en pavimentos flexibles y

cubrir un vacío en la investigación local; por su conveniencia, al ofrecer información útil para optimizar mezclas y espesores y reducir costos de mantenimiento; y por su relevancia social, al mejorar la movilidad y seguridad vial en la Av. América Sur y proponer un modelo replicable en otras ciudades. Sus implicaciones prácticas incluyen el diseño de pavimentos más durables y procedimientos de ejecución y control adoptables en la gestión vial, mientras que su utilidad metodológica radica en precisar la relación entre el contenido de caucho y el desempeño estructural del pavimento, definiendo variables clave como resistencia y durabilidad para futuras investigaciones.

El objetivo general del estudio fue determinar la influencia del caucho reciclado en el diseño estructural del pavimento flexible de la Av. América Sur, Trujillo, en 2025. Los objetivos específicos fueron: evaluar el estado del pavimento mediante el método PCI; determinar el diseño estructural de referencia usando AASHTO 93; e identificar la dosificación óptima de caucho reciclado en la mezcla mediante el método Marshall.

En Colombia, Ochoa & Higuera (2023) incorporaron neumáticos en desuso como grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas. Usando la metodología Marshall, compararon mezclas convencionales con otras que contenían distintos tamaños de caucho molido, evaluando humedad, fatiga y deformación plástica [26]. Los resultados mostraron que el caucho prolonga la vida útil del pavimento, mejora su estabilidad y reduce la dependencia del ligante asfáltico, constituyéndose en una alternativa sostenible para pavimentos.

En Indonesia, Sunarjono et al. (2020) evaluaron mezclas asfálticas en caliente para capas delgadas incorporando caucho granulado, con contenido de asfalto entre 6 % y 8 %. Mediante ensayos Marshall, determinaron un contenido óptimo de 7 %, con densidad aparente de 2,240, VIM de 3,77 % y estabilidad de 1049 kg. El espesor de película de 16,08 μm cumplió las especificaciones mínimas, mostrando mayor resistencia a la humedad y a la oxidación. El estudio concluyó que las mezclas con caucho cumplían los requisitos viales y ofrecían buena durabilidad, respaldando su uso en capas delgadas [32].

En España, Apaza (2024) evaluó la incorporación de polvo de caucho en mezclas asfálticas para mejorar la funcionalidad de los pavimentos frente al ruido y la pérdida de seguridad por deslizamiento. Los resultados mostraron que el caucho aumenta la adherencia, reduce la contaminación acústica y permite desarrollar pavimentos con propiedades piezorresistivas, capaces de funcionar como sensores viales, ampliando las posibilidades tecnológicas en ingeniería de carreteras [1].

En Perú, Reyes (2020) evaluó el uso de polvo de caucho reciclado en el pavimento de la playa de estacionamiento de la Universidad César Vallejo, probando proporciones de 0,5 %, 1 % y 1,5 % con 5,64 % de asfalto. Los resultados mostraron que la adición del 0,5 % de caucho proporcionó la mayor estabilidad Marshall y mejoró la impermeabilización y las propiedades estructurales del pavimento, confirmando el potencial del caucho reciclado en diseños nacionales [29].

En Lima, Castillo y Huado (2023) evaluaron mezclas asfálticas con caucho reciclado en la Avenida 13 de enero, San Juan de Lurigancho, para reducir riesgos de inundación y mejorar el pavimento flexible. Con un enfoque cuantitativo y diseño experimental, encontraron que una dosificación de 2,5 % de caucho aumentaba la resistencia del cemento asfáltico y proporcionaba el mejor desempeño en estabilidad, respaldando su viabilidad en zonas urbanas de alto tránsito y condiciones climáticas adversas [8].

En Chilca, Tucto (2022) evaluó el uso de caucho reciclado como aditivo en pavimentos rígidos en la Avenida Lima. Diseñando concretos con resistencia f'_c de 280 kg/cm^2 e incorporando caucho en 3 %, 7 % y 13 %, los ensayos de compresión y flexión mostraron que la mezcla con 7 % alcanzó 53,61 kg/cm^2 a los 28 días, cumpliendo y superando los criterios de AASHTO 93. Estos resultados evidencian el potencial del caucho para mejorar la durabilidad y resistencia tanto de pavimentos flexibles como rígidos [33].

En Chiclayo, Cubas et al. (2025) evaluaron alternativas sostenibles para mejorar las mezclas asfálticas en caliente mediante el uso de caucho reciclado pulverizado (PRR) y pavimento asfáltico reciclado (RAP). El estudio probó diferentes porcentajes de PRR y determinó que el 3 % era el óptimo. Luego, este porcentaje se combinó con 10 %, 20 % y 30 % de RAP. Los resultados mostraron que la mezcla tipo MAC-1 presentó un mejor desempeño cuando se empleó la combinación 3 % PRR + 10 % RAP, mejorando sus propiedades físico-mecánicas. Además, se observó que el caucho reciclado se adhiere bien al agregado, mejorando la textura de la mezcla, aunque la degradación térmica inicia alrededor de los 350 °C [13].

En el ámbito local, Farfán y Leonardo (2018) evaluaron concreto de 210 kg/cm^2 incorporando 5 %, 10 % y 15 % de caucho reciclado junto con un aditivo plastificante. Trabajaron con tres grupos experimentales y dos de control. Aunque el caucho tiende a reducir las propiedades mecánicas, los autores encontraron que, combinado con el plastificante, permitió alcanzar 218.45 kg/cm^2 con 5 % de caucho y 212.33 kg/cm^2 con 10 %, superando la resistencia de diseño. En flexión, el mejor resultado se obtuvo con 10 %, alcanzando 81.86 kg/cm^2 . El análisis de varianza ($\alpha = 5\%$) mostró que el porcentaje de caucho influye significativamente en las resistencias, concluyendo que su incorporación es viable hasta un 10 % cuando se emplea con un plastificante [15].

En Trujillo, Castillo (2024) desarrolló un estudio para la rehabilitación de la Av. América Sur, cuyo pavimento flexible presentaba un deterioro severo con PCI de 27,65 ("malo"). Aplicando la metodología AASHTO 93, propuso una nueva estructura de pavimento con carpeta asfáltica de 0,07 m, base de 0,40 m y subbase de 0,50 m. Además, integró un plan de rehabilitación con actividades sectorizadas, presupuesto y cronograma, constituyéndose en una propuesta técnica y sostenible para mejorar esta vía principal [9].

Para analizar las variables de estudio, se revisó bibliografía reciente sobre caucho reciclado en mezclas asfálticas y el comportamiento del pavimento flexible. Bilema

et al. (2023) destacan que el tamaño de partícula y la forma de incorporación del caucho influyen directamente en la resistencia y durabilidad de las mezclas, mejorando estabilidad, deformación permanente y vida útil. Asimismo, se propone un diseño mecánico-empírico que considera gradación del agregado, propiedades del ligante y distribución de vacíos como variables clave para anticipar fallas como el ahuellamiento y proyectar el desempeño del pavimento bajo cargas dinámicas [3].

Respecto al pavimento flexible, diversos autores destacan su importancia estructural. Monsalve (2012) lo define como una carpeta bituminosa sobre capas no rígidas de base y subbase, cuya configuración varía según el proyecto. Complementariamente, el MTC (2014) lo describe como un sistema de capas granulares con carpeta asfáltica superficial que absorbe el tránsito y transfiere cargas a las capas inferiores, resaltando su adaptabilidad y resistencia, cualidades que pueden mejorarse incorporando materiales reciclados como el caucho [23].

Para sustentar la evaluación del pavimento, se incorporaron los fundamentos teóricos de los métodos utilizados. El PCI es un procedimiento técnico que determina la condición del pavimento mediante la identificación y cuantificación de fallas superficiales. Según Vásquez (2002), este índice permite valorar objetivamente el estado funcional de la vía y proporciona una base sólida para la planificación de mantenimiento y rehabilitación [34].

Para el diseño estructural del pavimento flexible, se empleó la metodología AASHTO 93, que establece los espesores de las capas según tránsito, características del suelo y desempeño esperado. Castro y Castro (2020) destacan que permite definir la capacidad estructural mediante parámetros como confiabilidad, módulo resiliente y pérdida admisible de servicio [6].

Moharekpour et al. (2022) señalan que el modelo se basa en ecuaciones derivadas de ensayos con cargas repetitivas, facilitando estimar el comportamiento del pavimento y proyectar soluciones estructurales acordes a condiciones reales de operación [22].

La hipótesis general de esta investigación planteó que la incorporación de caucho reciclado en mezclas asfálticas mejora el diseño estructural del pavimento flexible en la Av. América Sur, Trujillo, en el año 2025.

II. METODOLOGIA

La investigación fue de carácter básico, orientada a generar conocimiento sobre la influencia del caucho reciclado en el diseño estructural de pavimentos flexibles mediante ensayos y análisis de laboratorio. Según Frascati (2015), este tipo de estudios busca comprender los fundamentos de los fenómenos observables, aportando bases conceptuales y experimentales que pueden orientar soluciones prácticas en ingeniería vial [14].

Asimismo, se adoptó un enfoque cuantitativo, que permite evaluar con precisión la resistencia, estabilidad y

desempeño de las mezclas con caucho reciclado. Según Stockemer (2019), este enfoque utiliza herramientas estadísticas para describir fenómenos y establecer relaciones verificables entre variables, lo que facilita determinar la influencia del caucho en el diseño del pavimento flexible de la Av. América Sur [31].

El diseño de la investigación fue no experimental, dado que las variables se estudiaron tal como ocurren en la realidad (Hernández & Mendoza, 2018). Asimismo, fue transversal, al recolectarse la información en un único momento, y correlacional, ya que su objetivo principal fue identificar la relación entre el uso de caucho reciclado y el desempeño estructural del pavimento flexible en la Av. América Sur [18].

En la investigación se definieron conceptualmente las variables de estudio, estableciendo una base teórica para la medición y análisis de datos. La variable independiente fue la adición de caucho reciclado, que, aunque no se manipuló directamente, influyó en el comportamiento estructural del pavimento flexible.

Según Burgos y Rodríguez (2021), la incorporación de caucho reciclado consiste en añadir partículas de neumáticos en desuso a la mezcla asfáltica para mejorar su resistencia y prolongar su vida útil, promoviendo prácticas constructivas sostenibles [5]. Chamba y Benavides (2022) señalan que este procedimiento puede realizarse por vía húmeda o seca, aumentando la elasticidad y la capacidad del pavimento para soportar cargas repetitivas [10]. Purizaca y Tolentino (2022) destacan que el caucho granulado o molido modifica las propiedades del asfalto tradicional, reforzando su desempeño frente al tránsito y las condiciones ambientales [28]. Además, Nugroho et al. (2023) evidencian que el caucho triturado, como aditivo o sustituto parcial del agregado o asfalto, incrementa estabilidad, ductilidad, resistencia al deslizamiento y punto de ablandamiento, a la vez que reduce la necesidad de asfalto virgen [24].

Operacionalmente, la adición de caucho reciclado se evaluó mediante el método Marshall, incorporando caucho triturado en proporciones de 4 %, 8 % y 12 % del peso del asfalto, para analizar sus efectos en la estabilidad y fluencia de la mezcla asfáltica (Chávez y Zavala, 2022) [11].

Según Bocanegra y Rodríguez (2023), la variable se dimensionó en dos aspectos: la dosificación de caucho reciclado y las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla. La primera determinó la proporción de caucho óptima para mejorar el comportamiento estructural, mientras que la segunda consideró características como resistencia, elasticidad y durabilidad, evaluadas mediante el ensayo Marshall. Los indicadores fueron la proporción de caucho, el método Marshall y los valores de estabilidad y fluencia, utilizando una escala de razón que permitió cuantificar y comparar los resultados, estableciendo relaciones proporcionales entre las distintas dosificaciones [4].

La variable dependiente fue el desempeño del pavimento flexible, que permitió evaluar su resistencia, durabilidad y estabilidad al incorporar caucho reciclado.

Según Guzmán (2023), la evaluación del desempeño estructural de un pavimento flexible consiste en analizar su comportamiento e integridad a lo largo de su vida útil, así como su capacidad de soporte frente al tránsito, mediante métodos destructivos y no destructivos [17]. Chicoma y Sánchez (2024) señalan que este desempeño se refleja en la capacidad del pavimento para mantener la funcionalidad de su superficie y estructura bajo cargas repetitivas, resistiendo deformaciones y agrietamientos [12]. Además, Guillén y Diego (2024) lo definen como la respuesta funcional frente a sollicitaciones externas, considerando integridad, durabilidad y confort, evaluada mediante indicadores como estabilidad, fluencia y desgaste superficial [16].

Operacionalmente, el desempeño del pavimento flexible se midió mediante el Índice de Condición del Pavimento (PCI), la metodología AASHTO 93 y los cálculos del Índice Medio Diario Anual (IMDA) y ESAL, con el fin de determinar la condición estructural, el espesor del pavimento y su nivel de servicio (Chicoma y Sánchez, 2024) [12].

Según Castillo (2024), el desempeño del pavimento flexible se estructuró en tres dimensiones: condición estructural, capacidad estructural y nivel de servicio. La condición estructural se relacionó con el estado físico y funcional de la vía, evaluado mediante el PCI para identificar deterioro y conservación. La capacidad estructural se refirió a la resistencia del pavimento frente a cargas vehiculares, analizada mediante AASHTO 93 y el espesor estructural. Por último, el nivel de servicio se vinculó con el confort y funcionalidad de la vía, determinado mediante IMDA y ESAL, reflejando la intensidad del tránsito y desempeño general. La escala aplicada fue de razón, permitiendo cuantificar y comparar los resultados de manera proporcional [9].

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). sostiene que la muestra constituye un subgrupo representativo de la población total, del cual se obtienen los datos necesarios para reflejar sus principales características. En este estudio, la muestra se seleccionó a partir de la población conformada por la Avenida América Sur, eligiéndose un tramo específico de aproximadamente 400 metros, desde la calle Cristóbal Molina, atravesando la intersección con la Avenida González Prada, hasta la calle Fernando de Montesinos, esta muestra se eligió por su accesibilidad y adecuadas condiciones para el desarrollo del proyecto. Esta selección se realizó mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia [18], que, según Otzen y Manterola (2017), permite escoger los casos que resultan más próximos y viables para el investigador. Paralelamente, en laboratorio se elaboraron tres briquetas correspondientes a tres distintas dosificaciones de caucho reciclado, las cuales fueron ensayadas mediante el método Marshall con el propósito de obtener el diseño de la mezcla asfáltica modificada.

En la investigación se empleó la técnica de observación para ambas variables, lo que permitió analizar el comportamiento y las condiciones del pavimento flexible en su entorno natural sin alterar los factores del estudio. Según

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018), la observación consiste en examinar sistemáticamente un fenómeno para recopilar información relevante. Esta técnica facilitó la identificación de fallas superficiales y características estructurales del pavimento con caucho reciclado. Como instrumento se utilizó una guía de observación, un formato estructurado que orienta al investigador y garantiza un registro ordenado y objetivo. La guía se basó en el PCI (2002) para registrar las condiciones del pavimento y en el método Marshall (1993) para evaluar propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, como estabilidad y fluencia, determinando así el comportamiento estructural y la dosificación óptima frente a la mezcla convencional [18].

Para el análisis de datos, la información recolectada mediante las guías de observación basadas en PCI (2002) y el método Marshall (1993) se ingresó en Excel, donde se realizó su ordenamiento y tabulación. Se aplicó un análisis descriptivo sustentado en tablas de frecuencia y ordenadas, permitiendo identificar las principales condiciones superficiales del pavimento flexible. Asimismo, este procedimiento facilitó la estimación de los espesores de las capas estructurales y la evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, posibilitando un análisis preciso del comportamiento y la capacidad resistente del pavimento.

En cuanto a los aspectos éticos, la investigación cumplió los principios del Código de Ética en Investigación de la UCV, garantizando integridad científica en todas las etapas. Se aplicó honestidad intelectual mediante el uso de turnitin y las normas APA (7.^a edición) para prevenir plagio y respetar la propiedad intelectual. Asimismo, se aseguró rigurosidad en la formulación del problema y la metodología, manteniendo objetividad, imparcialidad y transparencia en la interpretación de resultados, resguardando la confidencialidad y evitando conflictos de interés. Se promovió el respeto hacia los autores citados y hacia el medio ambiente, fomentando el uso de caucho reciclado en las mezclas asfálticas, y se asumió responsabilidad en cada etapa, asegurando la veracidad y coherencia del proceso investigativo.

III. RESULTADOS

El pavimento presentó un estado general muy deficiente, con un-PCI promedio de 19.33 y tramos mayormente clasificados como “Fallado” y “Malo”, evidenciando un alto nivel de deterioro que requiere mantenimiento correctivo y rehabilitación estructural.

TABLA I

EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA AV. AMÉRICA SUR MEDIANTE EL MÉTODO PCI

Unidad de muestra	Abscisa inicial (m)	Abscisa final (m)	Longitud (m)	Fallas identificadas	PCI	Clasificación del pavimento	Simbología
S-01	0+000.00	0+066.67	66.67	Piel de cocodrilo Grietas longitudinales/transversales, Parche y Baches	10	Fallado	
S-02	0+066.67	0+133.34	66.67	Piel de cocodrilo Grietas longitudinales/transversales, Parche	32	Malo	
S-03	0+133.34	0+200.01	66.67	Piel de cocodrilo Grietas longitudinales/transversales, Baches y Desmoramiento	3	Fallado	
S-04	0+200.01	0+266.68	66.67	Piel de cocodrilo Grietas longitudinales/transversales, Parche	42	Regular	
S-05	0+266.68	0+333.35	66.67	Piel de cocodrilo Grietas longitudinales/transversales, Baches y Desmoramiento	3	Fallado	
S-06	0+333.35	0+400.00	66.65	Piel de cocodrilo Grietas longitudinales/transversales, Parche, Baches y Desmoramiento	26	Malo	
Promedio	—	—	400.00	—	19.33	Muy Malo	

Nota: Elaboración propia (2025), con datos obtenidos del trabajo de campo y procesados mediante software Excel.

El diseño estructural mediante el método AASHTO 93 determinó un espesor total de 61 cm para el pavimento flexible, distribuido en capas estructurales, garantizando una adecuada capacidad para soportar las cargas del tránsito en la Av. América Sur.

TABLA II

DETERMINACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA AV. AMÉRICA SUR SEGÚN EL MÉTODO AASHTO 93

Estrato	Descripción	Espesor (pulg.)	Espesor (cm)	Espesor Redondeado (cm)
Capa de Rodadura	Concreto Asfáltico	2.5	6.35	6
Base Granular	Material Granular Compactado	4.5	11.43	15
Sub Base Granular	Material Granular Compactado	4	10.16	10
Subrasante	Suelo de Fundación Natural	-	-	30
	Espesor Total Redondeado	-	-	61 cm

Nota: Elaboración propia (2025), con datos procesados según el método AASHTO 93 y resultados del trabajo de campo

La Tabla 3 presenta la dosificación de mezclas asfálticas elaboradas con el método Marshall, incorporando caucho reciclado en porcentajes de 4 %, 8 % y 12 %, manteniendo constante la masa total para evaluar su comportamiento mecánico.

TABLA III

DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON INCORPORACIÓN DE CAUCHO RECICLADO MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL

	MUESTRA (Convencional)		MUESTRA 1 (M1)		MUESTRA 2 (M2)		MUESTRA 3 (M3)	
AGREGADOS	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr
Grava	30	360	30	360	30	360	30	360
Arena	59	708	57	684	55	660	53	636
Caucho reciclado	—	—	4	48	8	96	12	144
Cemento Líquido asfáltico	5	60	5	60	5	60	5	60
	6	72	6	72	6	72	6	72
TOTAL	100%	1200	100%	1200	100%	1200	100%	1200

Nota: Elaboración propia (2025). Se presentan las dosificaciones utilizadas en la preparación de una mezcla convencional y de mezclas modificadas con distintos contenidos de caucho reciclado, determinadas según el método Marshall

La Tabla 4 evidencia que la adición de caucho reciclado mejoró el desempeño de las mezclas asfálticas, destacando la mezcla M3 por su mayor resistencia (36.37 kg/cm²) y una absorción adecuada (0.65 %), confirmando su efecto positivo en el diseño del pavimento flexible.

TABLA IV

DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL CAUCHO RECICLADO EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EN LA AV. AMÉRICA SUR

MUESTRAS	TIPO	% de Caucho	Absorción (%)	Promedio Abs. (%)	Resistencia a la Compresión (kg/cm²)	Promedio R. C (kg/cm²)
CONVENCIONAL	M0-A	0%	0.11		37.99	
	M0-B	0%	0.14	0.12	26.24	30.33
	M0-C	0%	0.11		26.76	
MODIFICADA 1	M1-A	4%	0.62		26.79	
	M1-B	4%	0.75	0.86	24.57	24.39
	M1-D	4%	1.21		21.83	
MODIFICADA 2	M2-A	8%	0.86		36.30	
	M2-B	8%	0.90	0.95	37.53	35.56
	M2-C	8%	1.58		32.84	
MODIFICADA 3	M3-A	12%	0.34		36.41	
	M3-B	12%	0.69	0.65	38.06	36.37
	M3-C	12%	0.93		34.61	

Nota: La tabla muestra cómo varían la absorción y la resistencia a la compresión conforme aumenta el porcentaje de caucho reciclado en la mezcla asfáltica

IV. DISCUSION DE RESULTADOS

El primer objetivo específico consistió en evaluar el estado del pavimento flexible de la Av. América Sur mediante el método PCI, el cual permite determinar la condición de la vía a partir de la identificación y cuantificación de fallas superficiales (Vásquez, 2002). Los resultados evidenciaron un deterioro severo, con un PCI promedio de 19.33, clasificado como “muy malo”. La mayoría de los tramos se ubicaron en las categorías “Fallado” y “Malo”, debido a fallas recurrentes como piel de cocodrilo, grietas longitudinales y transversales, baches y parches. Estos hallazgos coinciden con los reportados por Castillo (2024), quien obtuvo un PCI de 27.65 (“malo”), confirmando una tendencia sostenida de degradación atribuida al alto tránsito, la falta de mantenimiento oportuno y la exposición a sobrecargas y agentes ambientales. En consecuencia, se identifica la necesidad urgente de implementar estrategias de rehabilitación estructural que permitan recuperar la capacidad funcional y prolongar la vida útil del pavimento [34].

Respecto al segundo objetivo específico, se aplicó el método AASHTO 93 para determinar el diseño estructural del pavimento flexible en la Av. América Sur. Según Castro y Castro (2020), esta metodología permite definir los espesores de las capas en función del suelo y del tránsito [6], mientras que Moharekpour et al. (2022) destacan que sus ecuaciones modelan el comportamiento del pavimento ante cargas repetitivas, garantizando soluciones confiables. Con base en este método, se obtuvo un espesor total de 61 cm, distribuidos en 6 cm de rodadura, 15 cm de base, 10 cm de subbase y 30 cm de subrasante, configuración acorde con el deterioro y la demanda vehicular identificados [22]. Al contrastar estos resultados con el estudio de Castillo (2024), se observan semejanzas únicamente en la capa de rodadura; sus valores para base (40 cm) y subbase (50 cm) son significativamente mayores. Esto sugiere que el tramo evaluado por dicho autor presenta daños más severos o cargas más exigentes. Las diferencias evidencian que, aunque la avenida requiere un refuerzo estructural importante, no todas sus secciones demandan rehabilitaciones profundas. En conjunto, se confirma que el método AASHTO 93 permite ajustar el diseño a las condiciones reales del pavimento, optimizando la intervención sin incurrir en sobredimensionamientos [9].

Respecto al tercer objetivo específico, se identifica la dosificación óptima del pavimento flexible incorporando diferentes porcentajes de caucho reciclado mediante el método Marshall. Según Burgos y Rodríguez (2021), la incorporación de caucho reciclado consiste en añadir partículas trituradas provenientes de neumáticos a la mezcla asfáltica con el propósito de modificar sus propiedades mecánicas. El método Marshall, en este contexto, permite evaluar parámetros como la estabilidad, la fluencia y la resistencia, los cuales orientan la selección de la mezcla con mejor desempeño estructural [5]. De manera complementaria, Nugroho et al. (2023) sostienen que el caucho triturado, utilizado como aditivo o como sustituto parcial del agregado o del asfalto, contribuye a

incrementar la estabilidad, la ductilidad y la resistencia al deslizamiento. Asimismo, señalan que este material eleva el punto de ablandamiento y reduce la cantidad de asfalto requerida, lo cual favorece un comportamiento más eficiente frente a cargas repetitivas. En el presente estudio se elaboraron mezclas con proporciones de 4 %, 8 % y 12 % de caucho reciclado, definidas para analizar la variación gradual de las propiedades mecánicas en función del incremento del aditivo. Los resultados evidencian que las mezclas modificadas presentan mayores niveles de absorción debido a la porosidad del caucho; sin embargo, muestran también valores superiores de estabilidad y resistencia respecto a la mezcla convencional. Entre las tres formulaciones, la dosificación del 12 % (Muestra 3) alcanzó el mejor desempeño, por lo que se identifica como la mezcla óptima dentro del diseño [24].

Al contrastar estos hallazgos con lo expuesto por Tucto (2022), quien empleó proporciones de 3 %, 7 % y 13 %, se observan diferencias en las dosificaciones aplicadas; no obstante, ambos estudios coinciden en que el incremento del contenido de caucho tiende a mejorar el comportamiento mecánico de las mezclas, siempre que no se supere un límite que pueda comprometer la estabilidad del material. Esto permite concluir que la incorporación de caucho reciclado, especialmente en proporciones más elevadas, influye positivamente en el desempeño estructural del pavimento. La naturaleza elástica del caucho facilita la disipación de esfuerzos y reduce la propagación de fisuras, generando mezclas con mayor estabilidad y un comportamiento mecánico superior frente a la mezcla convencional [33].

A modo de cierre del objetivo general determinar la influencia del caucho reciclado en el diseño estructural del pavimento flexible en la Av. América Sur durante el año 2025 se considera lo planteado por Bilema et al. (2023), quienes sostienen que tanto el tamaño de partícula como el método de incorporación del caucho inciden directamente en la resistencia y durabilidad de las mezclas asfálticas. Estos autores destacan que el uso de caucho triturado logra incrementar la estabilidad, reducir la deformación permanente, disminuir el ruido y prolongar la vida útil de la vía [3].

Con base en esta teoría, los resultados obtenidos en el estudio confirman que la presencia del caucho reciclado mejora el desempeño estructural de las mezclas evaluadas. Aunque se evidencia un aumento en la absorción debido a la porosidad del material, también se registran valores superiores de resistencia en comparación con la mezcla convencional. Entre todas las formulaciones analizadas, la mezcla modificada 3 resulta la más favorable, al alcanzar una resistencia de 36.37 kg/cm² y una absorción adecuada de 0.65 %, lo cual reafirma que el caucho influye positivamente en el diseño del pavimento flexible.

Al contrastar estos resultados con los hallazgos de Farfán y Leonardo (2018), quienes evaluaron concretos con distintas proporciones de caucho reciclado y un aditivo plastificante, se aprecia una tendencia similar: si bien el caucho puede modificar algunas propiedades mecánicas, su incorporación controlada permite alcanzar o incluso superar parámetros de

diseño cuando se optimiza la dosificación. Dicho estudio reporta resistencias de 218.45 kg/cm² con 5 % de caucho y 212.33 kg/cm² con 10 %, demostrando que, bajo condiciones específicas y combinaciones adecuadas, el material reciclado puede integrarse sin comprometer el desempeño estructural [15].

Aunque los contextos experimentales difieren en el tipo de mezcla, el material base y el método de dosificación, ambas investigaciones coinciden en que la incorporación del caucho, cuando se maneja técnicamente de forma adecuada, no solo es viable, sino que puede aportar mejoras significativas en resistencia, estabilidad y comportamiento funcional del pavimento.

Finalmente, los resultados alcanzados en este estudio permiten concluir que el uso de caucho reciclado constituye una alternativa técnica y ambientalmente favorable para el diseño de pavimentos flexibles. Su inclusión no solo aporta beneficios estructurales, sino también ambientales, al contribuir a la reducción de residuos y al aprovechamiento sostenible de materiales reciclados. De este modo, el caucho reciclado se consolida como un insumo con potencial estratégico para futuros proyectos de infraestructura vial.

IV. CONCLUSIONES

En relación con el objetivo general, se concluyó que la incorporación de caucho reciclado influyó favorablemente en el diseño estructural del pavimento flexible, ya que las mezclas modificadas demostraron un mejor comportamiento mecánico respecto a la mezcla convencional. La dosificación del 12% mostró el mayor beneficio, alcanzando una resistencia aproximada de 36.37 kg/cm², lo cual evidenció que el caucho permitió incrementar la capacidad estructural sin comprometer la estabilidad del material, aun cuando presentó una absorción ligeramente mayor por la porosidad inherente del componente. Este hallazgo implicó que la incorporación de materiales reciclados representa una alternativa viable para mejorar la durabilidad de la vía y reducir la dependencia de mezclas tradicionales que, a largo plazo, tienden a fallar con mayor rapidez.

Respecto al objetivo específico 1, se determinó que el pavimento existente presentaba un estado muy malo, con un-PSI que reflejó un deterioro funcional avanzado y un nivel de daño que afectaba directamente la transitabilidad y la comodidad del usuario. Este resultado evidenció la necesidad urgente de una intervención estructural, pues de mantenerse este nivel de deterioro, la vía habría continuado degradándose hasta el punto de comprometer la circulación vehicular y aumentar la probabilidad de accidentes, especialmente por baches, grietas y deformaciones que ya estaban presentes.

En cuanto al objetivo específico 2, el diseño realizado mediante el método AASHTO 93 permitió establecer una estructura compuesta por 15 cm de base granular, 10 cm de subbase y 6 cm de capa de rodadura, espesores que respondieron al tránsito proyectado y al estado de la subrasante, demostró la necesidad de una intervención

estructural integral. La implicancia principal fue que un diseño insuficiente o una rehabilitación parcial ocasionaría nuevas fallas prematuras, reduciendo la vida útil del pavimento y generando gastos recurrentes en mantenimiento; mientras que un diseño ajustado a las demandas reales garantiza mayor durabilidad y seguridad para los usuarios.

Finalmente, respecto al objetivo específico 3, las mezclas diseñadas con 4%, 8% y 12% de caucho permitieron determinar que la dosificación del 12% fue la más eficiente, puesto que obtuvo la mayor resistencia y un comportamiento estructural más favorable. Aunque las mezclas modificadas mostraron mayor absorción que la convencional, la mezcla M3 correspondiente al 12% mantuvo niveles aceptables, evidenciando que el caucho actuó como un refuerzo que mejoró la cohesión y la respuesta mecánica frente a cargas. La implicancia principal de este resultado recayó en que la incorporación de caucho no solo incrementa la vida útil del pavimento, sino que también impulsa un enfoque más sostenible al reutilizar residuos sólidos y disminuir el impacto ambiental asociado a los neumáticos desechados.

IV. RECOMENDACION

La aplicación del diseño desarrollado en esta investigación puede servir como referencia para futuras intervenciones viales, especialmente en proyectos que busquen integrar materiales reciclados y alternativas sostenibles en la estructura del pavimento.

La ampliación de la muestra estudiada permitiría obtener una caracterización más precisa del estado real de la avenida y reforzar el nivel de confiabilidad en el análisis estructural y funcional.

El uso de métodos complementarios de recolección de datos, además de la observación directa, contribuiría a obtener una comprensión más completa del deterioro vial y de las condiciones de servicio.

La incorporación de ensayos adicionales en laboratorio permitiría analizar con mayor detalle el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas y contrastar su desempeño frente a otras alternativas tecnológicas.

La aplicación del método de diseño estructural utilizado en esta investigación en vías con condiciones similares permitiría evaluar su desempeño en diferentes contextos y valorar su pertinencia para la mejora del sistema vial urbano.

El empleo de instrumentos de medición más especializados fortalecería la precisión del diagnóstico del pavimento y reduciría la incertidumbre en la clasificación de su estado.

La exploración de otras tipologías de pavimento, tanto flexibles como rígidas, abriría la posibilidad de identificar soluciones que optimicen la vida útil de las vías y ofrezcan mejores ventajas técnicas y ambientales.

IV. REFERENCIA

- [1] Apaza, F. (2024). Influence of crumb rubber on the functional characteristics of asphalt pavements: Acoustic performance, skid resistance and self-sensing behavior [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.84449>
- [2] Barboza Benites, A. A., Oropeza Julcarima, J., Silva Mestanza, A. E., & Tinco Curi, E.L. (2023). Identificación del estado de las vías vecinales mediante analítica geoespacial [Trabajo de investigación de maestría, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Obtenido de: <http://hdl.handle.net/10757/668744>
- [3] Bilema, MMO., Yuen, C. W., Alharthai, M., Al-Saffar, Z. H., Al-Sabaei, A., & Yusoff, N. I. M. (2023). A review of rubberised asphalt for flexible pavement applications: Production, content, performance, motivations and future directions. *Sustainability*, 15(19), 14481. <https://doi.org/10.3390/su151914481>
- [4] Bocanegra, J., & Rodríguez, R. (2023). Optimización de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas en caliente con adición de caucho reciclado, Trujillo, 2022 [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/34062>
- [5] Burgos Alvarez, E. R., & Rodríguez Neyra, J. D. (2022). Influencia del caucho reciclado en las propiedades físicas-mecánicas en una mezcla asfáltica en caliente, Trujillo 2021 [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/30437>
- [6] Castro, M., Castro, L., & Castro, P. (2020). Aplicación práctica del método AASHTO-93 para el diseño de pavimento rígido. *Polo del Conocimiento*, 5(9). <https://doi.org/10.23857/pc.v5i9.1717>
- [7] Cardoza-Zambrano, M., Palomino-Cadena, K. V., & Angulo-Blanquisset, G. (2019). Pavimento flexible utilizando una mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado para su sostenibilidad en Colombia. *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 10(2), 17–27. <https://doi.org/10.25213/2216-1872.16>
- [8] Castillo, D., & Huado, B. (2023). Comportamiento de pavimento flexible drenante con aplicación de caucho reciclado a la carpeta asfáltica, avenida 13 de enero, SJL, Lima [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/141723>
- [9] Castillo, M. (2024). Plan de rehabilitación mediante la metodología AASHTO 93 para condición del pavimento flexible de la avenida América Sur Trujillo 2024 [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Trujillo. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/23941>
- [10] Chamba, F., & Benavides, J. (2019). Diseño de mezcla asfáltica en caliente incorporando caucho triturado de neumático reciclado [Tesis de licenciatura, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. Repositorio UPSE. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/5225>
- [11] Chávez Chávez, E. E., & Zavala Cardozo, B. I. (2022). Estudio del comportamiento de la mezcla asfáltica para pavimentos flexibles con adición de caucho reciclado y polietileno, Lima 2022 [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/97160>
- [12] Chicoma, L., & Sánchez, A. (2024). Evaluación del desempeño de pavimentos flexibles y rígidos: una revisión literaria [Tesis de grado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio USS. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/13468>
- [13] Cubas, M., Correa, E., Benavides, W., Suclupe, R., & Arriola, G. (2025). Mezclas asfálticas modificadas que incorporan caucho reciclado pulverizado y pavimento asfáltico reciclado. *Revista de Ingeniería Civil*, 11(2), 420–436. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-02-02>
- [14] De Frascati, M. (2015). Guía para la recopilación y presentación de información sobre la investigación y el desarrollo experimental. *Medición de las actividades científicas, tecnológicas y de innovación* (53). España: Fecyt.
- [15] Farfán, M., & Leonardo, E. (2018). Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y a la flexión del hormigón modificado con aditivo plastificante. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(3), 241–250. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732018000300241>
- [16] Guillen, J. & Diego, R. (2024). Evaluación del desempeño de un pavimento flexible con adición de polímeros en la ciudad de Cajamarca [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC. <https://hdl.handle.net/20.500.14597/8826>
- [17] Guzmán, E. (2023). Evaluación estructural de pavimentos flexibles. Editorial Fundación Universitaria Juan de Castellanos. <https://doi.org/10.38017/9789588966557>
- [18] Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativas, cualitativas y mixtas. McGraw-Hill Education. <https://doi.org/10.22201/fesc.20072236e.2019.10.18.6>
- [19] Li, L., Guo, E., Lin, Y., & He, Z. (2023). A design method on durable asphalt pavement of flexible base on anti-rutting performance and its application. *Materials*, 16(22), 7122. <https://doi.org/10.3390/ma16227122>
- [20] Martínez, G., Caicedo, B., González, D., Celis, L., & Fuentes, L. (2018). Desarrollo continuo en mezclas asfálticas modificadas con caucho molido en Bogotá: Logrando la sostenibilidad del pavimento. *Formación Universitaria*, 11(1), 41–50. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732018000100041>
- [21] Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. (2022). Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/mtc>
- [22] Moharekpour, M., Liu, P., Schmidt, J., Oeser, M., & Jing, R. (2022). Evaluation of design procedure and performance of continuously reinforced concrete pavement according to AASHTO design methods. *Materials*, 15(6), 2252. <https://doi.org/10.3390/ma15062252>
- [23] Monsalve. (2012). Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras. Ministerio de Economía y Finanzas.
- [24] Nugroho, S. K., Setyawan, A., & Budiarto, A. (2023). Análisis estructural y predicción de la vida útil de mezcla asfáltica en caliente de revestimiento delgado engomado. *Revista de Ingeniería y Ciencias Tecnológicas*, 55(5), 538–547. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2023.55.5.3>
- [25] Observatorio Nacional de Seguridad Vial. (2022). Observatorio Nacional de Seguridad Vial (CARDOZA). Gobierno del Perú. <https://www.onsv.gob.pe/>
- [26] Ochoa, R., & Higuera, C. (2023). Effect of the grain size of recycled rubber on the behaviour of an asphalt mix. *Revista Ingeniería de Construcción*, 38(1), 21–32. <https://doi.org/10.7764/RIC.00059.21>
- [27] Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *International Journal of Morphology*, 35(1), 227–232. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>
- [28] Purizaca, R. & Tolentino, N. E. (2022). Influencia de la adición de caucho reciclado en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente en la ciudad de Trujillo [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/96591>
- [29] Reyes, A. (2020). Diseño de pavimento flexible con adición de caucho para mejorar la resistencia del estacionamiento de UCV Piura 2020 [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/70114>
- [30] Salazar, S. (2019). Incorporación de caucho reciclado en las mezclas asfálticas para mejorar pavimentos flexibles en la ciudad de Lima, Perú [Tesis para optar el título profesional de Ingeniera Civil, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/46143>
- [31] Stockemer, D. (2019). Quantitative methods for the social sciences (Vol. 50, p. 185). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99118-4>
- [32] Sunarjono, S., Wijaya, P. A., & Hidayat, N. (2020). Design mixed formula of hot mix asphalt mixture very thin overlay using crumb rubber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 821(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/821/1/012016>
- [33] Tucto, D. (2022). Diseño de pavimento rígido con incorporación de caucho reciclado como mejora a la infraestructura vial, Avenida Lima, Chilca 2022 [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo].
- [34] Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/119255>
Vásquez, L. (2002). Pavement Condition Index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras.