

# Design of Asphalt Mixtures Modified with Recycled Materials and Their Influence on the Performance of Flexible Pavements

Richard Deivy Honorio Carrera <sup>1</sup>; Kevin Omar Bacón Muñoz <sup>2</sup>; Felix Alejandra Velásquez Huayta <sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Perú. N00320710@upn.pe, felix.velasquez@upn.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Perú. N00343460@upn.pe

**Abstract**—This research evaluated the incorporation of recycled materials such as end-of-life tire rubber, shoe soles, and PET plastic into asphalt mixtures, with the aim of analyzing their influence on the mechanical and volumetric performance of flexible pavements in the Cajamarca region. An experimental program was developed using the Marshall method, considering a conventional mixture and three modified mixtures with a 20% partial substitution of mineral aggregates, defined according to the granulometric characteristics of each recycled material. Forty-eight Marshall briquettes were prepared, evaluating four asphalt binder contents (4.5%, 5.0%, 5.5%, and 6.0%) with three specimens per experimental condition. The mixtures were analyzed for stability, flow, density, and volumetric parameters. The results showed that the incorporation of recycled materials reduces density and stability and increases the ductility of the mixture. Among the alternatives evaluated, the mixture modified with recycled rubber exhibited the most balanced behavior in terms of stability, deformation, and volumetric properties. It is concluded that recycled materials can be technically incorporated into asphalt mixtures, provided that the binder dosage and mixture proportions are properly controlled, thus contributing to more sustainable paving.

**Keywords**— Flexible pavements, modified asphalt mixtures, recycled materials, waste tire rubber.

# Diseño de mezclas asfálticas modificadas con materiales reciclados y su influencia en el desempeño de pavimentos flexibles

Richard Deivy Honorio Carrera <sup>1</sup>; Kevin Omar Bacón Muñoz <sup>2</sup>; Felix Alejandra Velásquez Huayta <sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Perú. N00320710@upn.pe, felix.velasquez@upn.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Perú. N00343460@upn.pe

**Resumen—** La presente investigación evaluó la incorporación de materiales reciclados como caucho de llantas fuera de uso, suelas de zapatillas y plástico PET en el diseño de mezclas asfálticas, con el objetivo de analizar su influencia en el desempeño mecánico y volumétrico de pavimentos flexibles en la región Cajamarca. Se desarrolló un programa experimental mediante el método Marshall, considerando una mezcla convencional y tres mezclas modificadas con una sustitución parcial del 20% de agregados minerales, definidas según las características granulométricas de cada material reciclado. Se elaboraron 48 briquetas Marshall, evaluando cuatro contenidos de ligante asfáltico (4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%) con tres especímenes por condición experimental. Las mezclas fueron analizadas mediante estabilidad, flujo, densidad y parámetros volumétricos. Los resultados evidenciaron que la incorporación de materiales reciclados reduce la densidad y la estabilidad, e incrementa la ductilidad de la mezcla. Entre las alternativas evaluadas, la mezcla modificada con caucho reciclado presentó el comportamiento más equilibrado en términos de estabilidad, deformación y propiedades volumétricas. Se concluye que los materiales reciclados pueden incorporarse técnicamente en mezclas asfálticas, siempre que se controle adecuadamente la dosificación del ligante y las proporciones de la mezcla, contribuyendo a una pavimentación más sostenible.

**Palabras clave—** Pavimentos flexibles, mezclas asfálticas modificadas, materiales reciclados, caucho de llantas.

## I. INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial de la región Cajamarca ha experimentado un crecimiento sostenido en los últimos años, lo que ha incrementado el consumo de materiales convencionales como agregados pétreos y ligantes asfálticos, generando una mayor presión sobre los recursos naturales y los sistemas de producción. Esta situación se desarrolla en paralelo a una problemática creciente en la gestión de residuos sólidos urbanos, donde materiales como los neumáticos fuera de uso, los plásticos tipo PET y los residuos de la industria del calzado presentan bajos niveles de aprovechamiento y una acumulación progresiva. Asimismo, el deterioro de los

pavimentos flexibles, asociado al incremento del tránsito vehicular y a las condiciones ambientales, demanda intervenciones continuas de mantenimiento y rehabilitación, lo que incrementa el consumo de materiales y los costos asociados a la infraestructura vial. En este contexto, la incorporación de materiales reciclados en mezclas asfálticas surge no solo como una alternativa ambientalmente favorable, sino también como una estrategia técnica orientada a optimizar el uso de recursos y mejorar la sostenibilidad de los pavimentos flexibles.

Diversas investigaciones han demostrado que el uso de residuos reciclados en mezclas asfálticas no solo contribuye a reducir el impacto ambiental, sino que también puede mejorar determinadas propiedades mecánicas del pavimento, tales como la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la durabilidad frente a cargas repetitivas. Entre los materiales más estudiados se encuentran el caucho proveniente de neumáticos fuera de uso, los residuos textiles de calzado y los plásticos reciclados, particularmente aquellos derivados de bolsas de basura.

En el contexto local de Cajamarca, estudios previos han evaluado la incorporación de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso en mezclas asfálticas, reportando incrementos de hasta 25% en la flexibilidad de la mezcla y reducciones cercanas al 15% en la aparición de fisuras respecto a mezclas tradicionales, evidenciando una mejora en la capacidad de absorción de esfuerzos dinámicos y en la vida útil del pavimento [1]. De manera similar, investigaciones realizadas con residuos textiles de calzado, como la lona de zapatilla triturada, mostraron incrementos del orden del 18% en la cohesión interna de la mezcla y mejoras de hasta 12% en la durabilidad frente a cargas repetitivas, destacando su potencial como refuerzo alternativo en pavimentos flexibles [2].

Asimismo, estudios desarrollados con plásticos reciclados tipo LDPE provenientes de bolsas de basura evidenciaron un aumento aproximado del 20% en la rigidez del ligante asfáltico y una reducción cercana al 10% en la deformación permanente del pavimento, contribuyendo tanto a la mejora del desempeño mecánico como a la gestión sostenible de residuos plásticos [3].

A nivel nacional, investigaciones realizadas en Lima han reportado resultados consistentes con los estudios locales. La incorporación de caucho molido de neumáticos reciclados

permitió incrementos de hasta 22% en la estabilidad Marshall y mejoras significativas en la resistencia al envejecimiento térmico del asfalto [4]. De igual forma, el uso de plásticos reciclados tipo LDPE mostró reducciones de hasta 15% en la deformación permanente y mejoras en la adherencia del ligante, prolongando la vida útil del pavimento en zonas urbanas de alto tránsito [5]. En paralelo, el empleo de fibras provenientes de residuos de calzado incrementó la resistencia a la fisuración y la durabilidad del pavimento en aproximadamente 25% y 17%, respectivamente [6].

En el ámbito internacional, experiencias desarrolladas en países como India, Brasil y Turquía han confirmado el potencial de los materiales reciclados en mezclas asfálticas. En India, el uso de bolsas plásticas trituradas redujo la deformación plástica del pavimento hasta en 35% y disminuyó los costos de mantenimiento en vías de alto tránsito [7]. En Brasil, los residuos textiles de calzado mejoraron la resistencia a la fatiga por flexión en aproximadamente 28% bajo condiciones climáticas severas [8]. Por su parte, estudios realizados en Turquía demostraron que el caucho reciclado incrementa la elasticidad y durabilidad del pavimento en hasta 30%, especialmente en zonas con bajas temperaturas [9].

A pesar de los resultados favorables reportados, aún existe la necesidad de evaluar de manera comparativa el comportamiento de distintos materiales reciclados disponibles localmente bajo un mismo marco experimental, considerando tanto su desempeño mecánico como su viabilidad técnica para aplicaciones reales en pavimentos flexibles.

En este sentido, la presente investigación tiene como objetivo general evaluar la influencia de la incorporación de materiales reciclados de alta disponibilidad local —caucho de llantas, lona de zapatillas y plástico PET— en el desempeño mecánico de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles.

Como objetivos específicos, se busca analizar el efecto de cada material reciclado sobre la estabilidad, rigidez y deformabilidad de la mezcla asfáltica, así como comparar su comportamiento frente a una mezcla convencional, con el fin de determinar su viabilidad técnica como alternativa sostenible para la pavimentación vial en la región Cajamarca.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Tipo y enfoque de la investigación

La presente investigación es de tipo experimental, con un enfoque cuantitativo y comparativo, orientada a evaluar la influencia de materiales reciclados en el desempeño mecánico de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles.

El diseño experimental consistió en la elaboración de una mezcla asfáltica convencional (mezcla control) y tres mezclas modificadas con materiales reciclados (caucho de llantas, lona de zapatillas y plástico PET), manteniendo constante la gradación de agregados y variando el tipo de modificador, con el fin de comparar su comportamiento mecánico mediante el método Marshall.

### A.1. Programa experimental y número de especímenes

El programa experimental contempló la elaboración de briquetas Marshall cilíndricas para cada tipo de mezcla asfáltica, empleando diferentes contenidos de ligante asfáltico (4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%), con la finalidad de determinar el contenido óptimo de asfalto y evaluar los parámetros de estabilidad Marshall, flujo y propiedades volumétricas de las mezclas.

Para cada contenido de ligante asfáltico se elaboraron tres (3) especímenes, de acuerdo con las recomendaciones del método Marshall. En consecuencia, se fabricaron:

- M1: Mezcla control con asfalto convencional. (12 especímenes)
- M2: Mezcla modificada con 20% de caucho reciclado de llantas. (12 especímenes)
- M3: Mezcla modificada con 20% de suelas de zapatillas recicladas. (12 especímenes)
- M4: Mezcla modificada con 20% de plástico PET reciclado. (12 especímenes)

El porcentaje de sustitución del 20% se adoptó como un valor uniforme para todas las mezclas modificadas, con el propósito de evaluar comparativamente el efecto de cada material reciclado bajo una misma condición experimental. Este nivel de reemplazo permitió analizar la influencia del material incorporado sin alterar de manera significativa la estructura general de la mezcla asfáltica.

En total, el programa experimental comprendió la elaboración y ensayo de 48 briquetas Marshall.

Para cada condición experimental se ensayaron tres especímenes, y los resultados presentados en las tablas corresponden al valor promedio obtenido para cada contenido de ligante y tipo de mezcla, con el fin de representar de manera más consistente el comportamiento de las mezclas evaluadas.

El material reciclado fue incorporado mediante sustitución parcial de los agregados minerales, manteniendo constante la gradación global de la mezcla. En el caso del caucho y la suela de zapatilla, el reemplazo se realizó sobre el agregado fino, debido a su tamaño de partícula y comportamiento mecánico similar. Para el plástico PET, el reemplazo se aplicó al agregado grueso, considerando su mayor rigidez y tamaño, con el fin de evaluar su influencia sobre la estructura portante de la mezcla asfáltica.

### B. Materiales utilizados

Para la elaboración de las mezclas asfálticas modificadas se emplearon los siguientes materiales:

- **Ligante asfáltico:** Asfalto convencional de penetración 60/70, utilizado como ligante base en la mezcla control y en las mezclas modificadas.
- **Agregados pétreos:** Agregado fino y agregado grueso provenientes de la cantera Bazán, ubicada en la vía de evitamiento norte de la ciudad de Cajamarca, frente a la SUNAT.
- **Caucho reciclado de llantas:** Material obtenido a partir de neumáticos fuera de uso (NFU), triturado y utilizado como material modificador en la mezcla M2.
- **Suela de zapatillas recicladas:** Residuo de suelas trituradas, proveniente de zapatillas en desuso, empleado como material modificador en la mezcla M3.
- **Plástico PET reciclado:** Material polimérico obtenido de botellas plásticas recicladas, triturado y utilizado como modificador en la mezcla M4.
- **Briquetas Marshall:** Especímenes cilíndricos con dimensiones estándar de 101.6 mm de diámetro y 63.5 mm de altura.
- **Equipo Marshall:** Martillo de compactación de 4.536 kg con caída libre de 457.2 mm, moldes metálicos, prensa Marshall y baño María, disponibles en el laboratorio de materiales de la Universidad Privada del Norte.
- **Equipos auxiliares:** Cocina eléctrica, olla metálica para calentamiento de materiales, balanza con precisión de 0.1 gr, extractor de briquetas, espátulas, cucharones y papel filtro.

### C. Preparación de las mezclas

#### C.1. Determinación del contenido óptimo de asfalto

Se elaboraron mezclas preliminares con contenidos de ligante asfáltico de 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0% respecto al peso total de la mezcla, con el objetivo de determinar el contenido óptimo de asfalto mediante el método Marshall. Para cada condición se ensayaron tres especímenes y los resultados se evaluaron considerando los parámetros de estabilidad, flujo, densidad y vacíos de la mezcla. El contenido óptimo se seleccionó en función del equilibrio entre la resistencia y la deformabilidad de la mezcla, así como el cumplimiento de valores adecuados de vacíos.

#### C.2. Calentamiento de materiales

Los agregados se calentaron en horno a temperaturas comprendidas entre 150 °C y 170 °C.

El ligante asfáltico se calentó a temperaturas entre 140 °C y 160 °C, de acuerdo con las recomendaciones normativas para mezclas en caliente.

#### C.3. Mezclado

Los agregados calientes se mezclaron en seco, posteriormente se incorporó el ligante asfáltico caliente y,

finalmente, el material reciclado correspondiente a cada dosificación. El mezclado se realizó hasta obtener una mezcla homogénea, asegurando el recubrimiento completo de los agregados.

### D. Compactación de especímenes

- **Temperatura de compactación:** Entre 130 °C y 150 °C.
- **Preparación del molde:** Limpieza del molde Marshall y colocación de papel filtro en la base.
- **Llenado del molde:** Introducción uniforme de la mezcla caliente.
- **Compactación:** Aplicación de 75 golpes por cara mediante el martillo Marshall, representativo de tránsito pesado.
- **Enfriamiento:** Los especímenes se dejaron enfriar a temperatura ambiente antes de su extracción.

### E. Determinación de densidad y vacíos

Los especímenes compactados fueron pesados en aire y sumergidos en agua para determinar:

- Densidad aparente (Gmb)
- Vacíos totales de la mezcla (VTM)
- Vacíos en el agregado mineral (VMA)
- Vacíos llenos de asfalto (VFA)

La gravedad específica máxima teórica (Gmm) se determinó mediante el ensayo Rice.

### F. Ensayo de estabilidad y flujo Marshall

Los especímenes fueron acondicionados en baño María a 60 °C durante 30 a 40 minutos. Posteriormente, se ensayaron en la prensa Marshall aplicando una carga a una velocidad constante de 50.8 mm/min, registrando:

- **Estabilidad Marshall:** carga máxima soportada (kN).
- **Flujo:** deformación correspondiente a la carga máxima (mm).

### G. Métodos de ensayo y normativas

Con el fin de caracterizar los materiales empleados y evaluar el comportamiento mecánico y volumétrico de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas, se realizaron diversos ensayos de laboratorio. En la Tabla I se presentan los ensayos efectuados y las normas técnicas ASTM empleadas en el desarrollo experimental de la investigación.

TABLA I  
ENSAYOS DE LABORATORIO Y NORMAS ASTM APLICADAS EN EL ESTUDIO

| Ensayo                                                                       | Norma      |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Contenido de humedad de agregados [10].                                      | ASTM D2216 |
| Análisis granulométrico [11].                                                | ASTM C136  |
| Densidad aparente de briquetas [12].                                         | ASTM D2726 |
| Gravedad específica máxima (Rice) [13].                                      | ASTM D2041 |
| Estabilidad y flujo Marshall [14].                                           | ASTM D6927 |
| Porcentaje de vacíos con aire en mezclas bituminosas densas y abiertas [15]. | ASTM D3203 |

*Nota:* Las normas indicadas fueron aplicadas considerando las condiciones de laboratorio y los rangos de aceptación establecidos para mezclas asfálticas densas destinadas a pavimentos flexibles.

#### H. Consideraciones éticas

La presente investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica y tecnológica. Los materiales reciclados utilizados (caucho de llantas, suelas de zapatillas y plástico PET) fueron obtenidos de residuos sólidos urbanos, sin afectar derechos de terceros ni generar impactos negativos adicionales al ambiente. Asimismo, los ensayos de laboratorio se realizaron cumpliendo las normas técnicas vigentes, garantizando la integridad de los datos y la reproducibilidad de los resultados.

Los autores declaran que los datos presentados son originales, obtenidos de manera experimental y reportados de forma objetiva, sin manipulación o alteración de los resultados. Finalmente, se reconoce y cita adecuadamente las fuentes bibliográficas utilizadas, evitando cualquier forma de plagio o mala práctica académica.

### III. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la investigación donde los resultados corresponden a la caracterización de los materiales, al diseño de las mezclas y a la evaluación del comportamiento mecánico mediante el método Marshall, considerando una mezcla convencional y tres mezclas modificadas con materiales reciclados.

#### A. Caracterización de los agregados

El contenido de humedad, peso específico y grado de absorción de los agregados fino y grueso fue determinado previamente al diseño de las mezclas, debido a su influencia directa en la dosificación del ligante asfáltico. Los resultados se muestran en la Tabla II.

TABLA II  
CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

| Descripción                                           | Agregado Fino | Agregado Grueso |
|-------------------------------------------------------|---------------|-----------------|
| Porcentaje de humedad (%)                             | 1.67          | 1.94            |
| Peso específico aparente seco (gr/cm <sup>3</sup> )   | 2.27          | 2.26            |
| Peso específico aparente S.S.S. (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2.35          | 2.30            |
| Peso específico nominal seco (gr/cm <sup>3</sup> )    | 2.42          | 2.36            |
| Absorción (%)                                         | 2.64          | 1.77            |
| Porcentaje de vacíos (%)                              |               | 55.81           |

Los valores obtenidos se encuentran dentro de rangos aceptables para el diseño de mezclas asfálticas, permitiendo un control adecuado del contenido efectivo de ligante.

#### B. Análisis granulométrico y dosificación de materiales

La gradación de los agregados fue definida para cumplir con una mezcla densa convencional. En la Tabla III se presenta la dosificación base correspondiente a la mezcla convencional, mientras que las Tablas IV, V y VI muestran las modificaciones realizadas mediante el reemplazo parcial de agregados por materiales reciclados.

TABLA III  
DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL

| Abertura (mm)     | % Que pasa | Materiales      | Cantidad (gr) |
|-------------------|------------|-----------------|---------------|
| 19.00             | 100.00     | Agregado grueso | 684.00        |
| 12.50             | 95.00      |                 |               |
| 9.50              | 85.00      |                 |               |
| 4.75              | 60.00      | Agregado fino   | 456.00        |
| 2.00              | 40.00      |                 |               |
| 0.426             | 20.00      |                 |               |
| 0.25              | 12.00      |                 |               |
| 0.15              | 8.00       |                 |               |
| 0.075             | 4.50       | Filler          | 51.30         |
| Asfalto 5% = 60gr |            |                 | 1191.30       |

TABLA IV  
MEZCLA CON 20% DE CAUCHO (REEMPLAZO DE AGREGADO FINO)

| Materiales                  | Cantidad (gr) |
|-----------------------------|---------------|
| Peso agregado grueso        | 684.00        |
| Peso agregado fino          | 364.80        |
| Filler                      | 51.30         |
| Peso de asfalto 5%          | 60.00         |
| Peso de Suela de zapatillas | 91.20         |

TABLA V  
MEZCLA CON 20% DE SUELA DE ZAPATILLA (REEMPLAZO DE AGREGADO FINO)

| Materiales           | Cantidad (gr) |
|----------------------|---------------|
| Peso agregado grueso | 684.00        |
| Peso agregado fino   | 364.80        |
| Filler               | 51.30         |
| Peso de asfalto 5%   | 60.00         |
| Peso de Caucho       | 91.20         |

TABLA VI  
MEZCLA CON 20% DE PET (REEMPLAZO DE AGREGADO GRUESO)

| Materiales           | Cantidad (gr) |
|----------------------|---------------|
| Peso agregado grueso | 547.20        |
| Peso agregado fino   | 456.00        |
| Filler               | 51.30         |
| Peso de asfalto 5%   | 60.00         |
| Peso de PET          | 136.80        |

#### C. Resultados método Marshall

Los resultados de densidad, vacíos, estabilidad y flujo obtenidos mediante el método Marshall se presentan para cada tipo de mezcla en las Tablas VI a IX.

TABLA VII  
RESULTADOS MARSHALL MEZCLA CONVENCIONAL ASFALTO

| Muestra | Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) | Huecos en el árido (Ha) % | Vacios en mezcla (Hm) % | Estabilidad (KN) | Deformación (mm) | % Ligante |
|---------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|------------------|-----------|
| 1.0     | 2.36                           | 14.30                     | 4.10                    | 12.80            | 3.10             | 4.50      |
| 2.0     | 2.45                           | 14.70                     | 4.30                    | 13.30            | 3.30             | 5.00      |
| 3.0     | 2.37                           | 14.20                     | 4.00                    | 12.90            | 3.00             | 5.50      |
| 4.0     | 2.33                           | 14.80                     | 4.40                    | 12.00            | 3.40             | 6.00      |

TABLA VIII  
RESULTADOS MARSHALL MEZCLA CON 20% DE CAUCHO

| Muestra | Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) | Huecos en el árido (Ha) % | Vacios en mezcla (Hm) % | Estabilidad (KN) | Deformación (mm) | % Ligante |
|---------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|------------------|-----------|
| 1.0     | 2.31                           | 15.80                     | 4.70                    | 11.20            | 3.70             | 4.50      |
| 2.0     | 2.29                           | 16.20                     | 4.90                    | 10.80            | 3.90             | 5.00      |
| 3.0     | 2.32                           | 15.50                     | 4.60                    | 11.50            | 3.60             | 5.50      |
| 4.0     | 2.28                           | 16.50                     | 5.00                    | 10.50            | 4.00             | 6.00      |

TABLA IX  
RESULTADOS MARSHALL MEZCLA CON 20% DE SUELA DE ZAPATILLA

| Muestra | Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) | Huecos en el árido (Ha) % | Vacios en mezcla (Hm) % | Estabilidad (KN) | Deformación (mm) | % Ligante |
|---------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|------------------|-----------|
| 1.0     | 2.19                           | 16.30                     | 4.90                    | 10.70            | 3.90             | 4.50      |
| 2.0     | 2.21                           | 16.80                     | 5.10                    | 10.30            | 4.10             | 5.00      |
| 3.0     | 2.28                           | 16.50                     | 5.00                    | 11.00            | 4.00             | 5.50      |
| 4.0     | 2.15                           | 17.00                     | 5.20                    | 10.00            | 4.20             | 6.00      |

TABLA X  
RESULTADOS MARSHALL MEZCLA CON 20% DE PET

| Muestra | Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) | Huecos en el árido (Ha) % | Vacios en mezcla (Hm) % | Estabilidad (KN) | Deformación (mm) | % Ligante |
|---------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|------------------|-----------|
| 1.0     | 2.22                           | 16.8                      | 5.3                     | 9.4              | 4.3              | 4.5       |
| 2.0     | 2.24                           | 17.2                      | 5.6                     | 9.6              | 4.5              | 5.0       |
| 3.0     | 2.25                           | 17.0                      | 5.4                     | 9.9              | 4.4              | 5.5       |
| 4.0     | 2.31                           | 17.5                      | 5.7                     | 10.2             | 4.6              | 6.0       |

De manera general, los resultados muestran que la incorporación de materiales reciclados modifica los parámetros volumétricos y mecánicos de la mezcla asfáltica. Las mezclas modificadas presentaron una disminución de la densidad aparente y de la estabilidad Marshall respecto a la mezcla convencional, acompañada de un incremento del flujo, lo que evidencia un comportamiento más dúctil del pavimento flexible.

La Figura 1 muestra la relación entre el contenido de ligante asfáltico y el porcentaje de vacíos en la mezcla (Hm) para la mezcla convencional y las mezclas modificadas con 20% de caucho, suela de zapatilla y PET. Se observa que, para todas las mezclas, el porcentaje de vacíos presenta una tendencia creciente conforme aumenta el contenido de ligante. La mezcla convencional mantiene valores de Hm dentro del rango óptimo (aprox. 4.0–4.5%), mientras que las mezclas con materiales reciclados exhiben valores superiores. La mezcla con 20% de PET presenta los mayores porcentajes de vacíos (≈5.3–5.8%), superando el límite recomendado del 5%, lo que evidencia una mayor dificultad de compactación asociada a la naturaleza del material reciclado. Las mezclas con caucho y

suela muestran valores intermedios, cercanos al límite superior admisible.

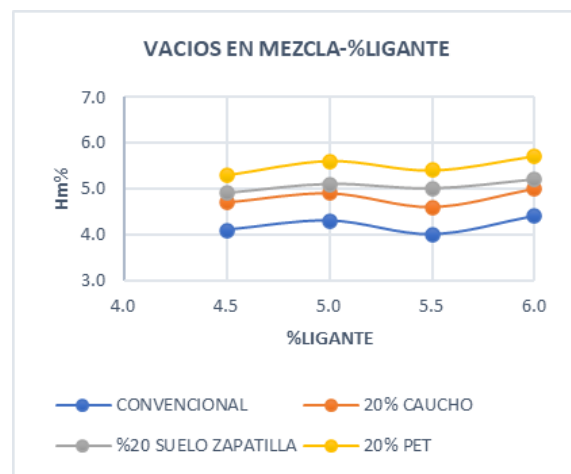


Fig. 1 Variación de los vacíos en la mezcla (Hm) en función del contenido de ligante para mezclas convencionales y modificadas con materiales reciclados.

En la Figura 2 se observa el comportamiento de los huecos en el árido (Ha) para las diferentes mezclas evaluadas. La mezcla convencional presenta los valores más bajos de Ha (≈14–15%), manteniéndose dentro del rango recomendado para mezclas densas. Las mezclas modificadas muestran un incremento progresivo de los huecos en el árido, siendo más pronunciado en la mezcla con 20% de PET, seguida por la mezcla con suela de zapatilla y caucho. Este incremento indica una menor eficiencia en el empaquetamiento de los agregados cuando se incorporan materiales reciclados, especialmente aquellos de menor densidad y mayor irregularidad geométrica.

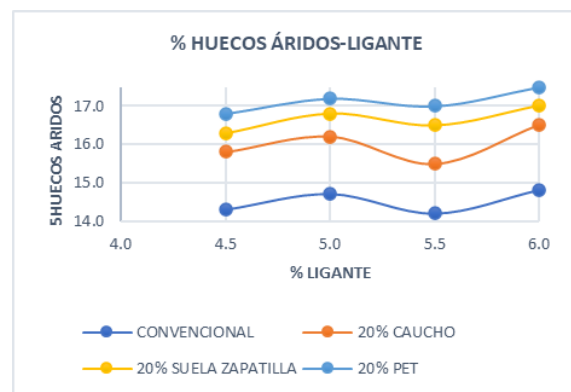


Fig. 2 Variación del porcentaje de huecos en el árido (Ha) en función del contenido de ligante para las diferentes mezclas asfálticas.

La Figura 3 presenta la variación de la densidad aparente de las mezclas en función del contenido de ligante asfáltico. La mezcla convencional alcanza las mayores densidades (≈2.33–2.45 g/cm<sup>3</sup>), con un máximo alrededor del 5.0% de ligante. Las mezclas modificadas evidencian densidades inferiores, siendo la mezcla con suela de zapatilla la que

presenta los valores más bajos ( $\approx 2.15\text{--}2.28\text{ g/cm}^3$ ), seguida por las mezclas con PET y caucho. Esta reducción de densidad se asocia a la menor densidad específica de los materiales reciclados y a la presencia de mayores vacíos internos. A pesar de ello, todas las mezclas muestran una tendencia coherente de aumento de densidad hasta un contenido óptimo de ligante, seguido de una ligera disminución.

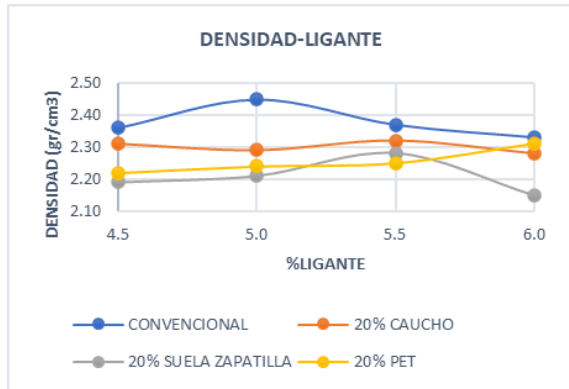


Fig. 3 Relación entre la densidad aparente de la mezcla asfáltica y el contenido de ligante para mezclas convencionales y modificadas.

La Figura 4 muestra la variación de la estabilidad Marshall en función del contenido de ligante para la mezcla convencional y las mezclas modificadas. La mezcla convencional presenta los mayores valores de estabilidad, con un máximo cercano al 5.0% de ligante. Las mezclas con materiales reciclados exhiben una reducción de la estabilidad, siendo la mezcla con caucho la que presenta el mejor desempeño entre las modificadas, mientras que la mezcla con PET registra los valores más bajos.

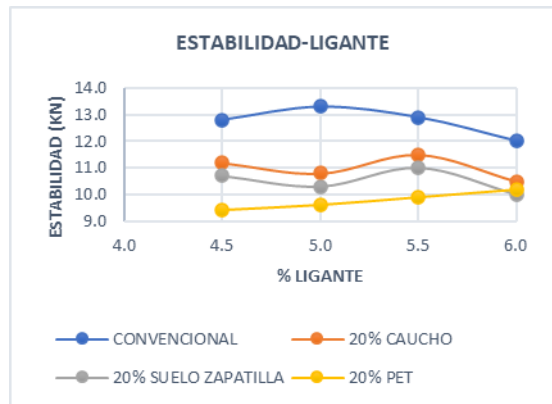


Fig. 4 Variación de la estabilidad Marshall con el contenido de ligante en mezclas convencionales y modificadas.

La Figura 5 muestra la relación entre el contenido de ligante y la deformación Marshall. Se observa que las mezclas modificadas presentan mayores valores de flujo en comparación con la mezcla convencional, evidenciando un aumento de la ductilidad. La mezcla con PET registra las

mayores deformaciones, seguida por las mezclas con suela y caucho.

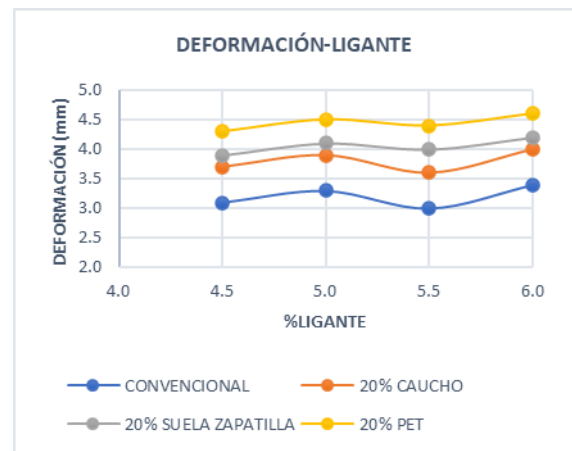


Fig. 5 Relación entre la deformación Marshall (flujo) y el contenido de ligante para las diferentes mezclas asfálticas.

En conjunto, los resultados volumétricos y mecánicos muestran que el contenido de ligante con mejor comportamiento global se encuentra alrededor del 5.0%–5.5%, dependiendo del tipo de material reciclado incorporado. La mezcla con 20% de caucho presenta valores más equilibrados de estabilidad, deformación y parámetros volumétricos, mientras que las mezclas con suela de zapatilla y PET evidencian mayores niveles de ductilidad y vacíos.

#### IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos confirman que la incorporación de materiales reciclados en mezclas asfálticas modifica su comportamiento mecánico y volumétrico, evidenciando respuestas diferenciadas según el tipo de residuo incorporado. Este comportamiento concuerda con lo reportado en estudios previos a nivel local, nacional e internacional, donde se destaca que los materiales reciclados pueden mejorar ciertos atributos del pavimento flexible, aunque con compromisos en otros parámetros estructurales.

En términos de estabilidad Marshall, la mezcla convencional presentó los valores más elevados (12.8–13.3 kN). Los resultados fueron obtenidos mediante el método ASTM D6927 y se interpretaron considerando rangos típicos empleados para mezclas asfálticas densas. Las mezclas modificadas mostraron reducciones de estabilidad entre 10% y 25%, siendo más moderadas en la mezcla con caucho reciclado (10.5–11.5 kN). Este comportamiento es consistente con investigaciones realizadas en Cajamarca y Lima [1], [4], donde se reporta que el caucho disminuye la rigidez inicial de la mezcla, pero incrementa su capacidad de deformación y resistencia a la fatiga, favoreciendo un desempeño más flexible bajo cargas repetitivas.

Respecto a la densidad aparente y los vacíos, las mezclas modificadas presentaron densidades inferiores a la

convencional, particularmente aquellas con suela de zapatilla y PET, lo cual se atribuye a la menor densidad específica y geometría irregular de estos materiales reciclados. A pesar de ello, los vacíos en la mezcla (Hm) se mantuvieron dentro del rango admisible (3–5%) para la mayoría de las combinaciones. La mezcla con PET superó el límite superior (5.3–5.7%), mientras que la mezcla con suela de zapatilla presentó valores cercanos al límite, alcanzando hasta 5.2% en algunas condiciones. Este resultado, particularmente en el caso del PET, coincide con estudios desarrollados en India [7], donde se señala que la incorporación de plástico reciclado requiere ajustes en el contenido de ligante o el uso de modificadores para evitar incrementos excesivos de vacíos y problemas de permeabilidad.

En cuanto a la deformación Marshall (flujo), las mezclas con materiales reciclados mostraron valores superiores a la mezcla convencional, evidenciando un incremento de la ductilidad. Este comportamiento es especialmente favorable para pavimentos sometidos a cargas dinámicas y deformaciones térmicas, como se ha reportado en investigaciones realizadas en Brasil [8] con textiles reciclados, donde el aumento del flujo se asocia a una mayor capacidad de disipación de energía y resistencia al fisuramiento.

Finalmente, la relación entre densidad y contenido de ligante indicó que el contenido óptimo de asfalto se desplaza hacia valores ligeramente superiores en las mezclas modificadas (5.5–6.0%), en comparación con la mezcla convencional ( $\approx 5.0\%$ ). Este comportamiento ha sido documentado en estudios previos [5], donde se atribuye a la mayor absorción y demanda de ligante por parte de los materiales reciclados para lograr una adecuada adherencia y compactación.

En conjunto, los resultados confirman que el uso de materiales reciclados en mezclas asfálticas es técnicamente viable, siempre que se controle adecuadamente el tipo de residuo, su proporción y el contenido de ligante, permitiendo optimizar el equilibrio entre estabilidad, ductilidad y propiedades volumétricas.

## V. CONCLUSIONES

A partir del análisis experimental realizado, se concluye lo siguiente:

- La incorporación de materiales reciclados (caucho de llanta, suela de zapatilla y plástico PET) influye de manera significativa en el comportamiento mecánico y volumétrico de las mezclas asfálticas, evidenciando respuestas diferenciadas según el tipo de material utilizado.
- La mezcla modificada con 20% de caucho reciclado presentó el mejor equilibrio entre estabilidad Marshall (10.5–11.5 kN), deformación (3.6–4.0 mm) y parámetros volumétricos, manteniéndose dentro de los rangos normativos establecidos por ASTM D6927, lo que la

posiciona como la alternativa más viable desde el punto de vista técnico.

- Las mezclas con suela de zapatilla reciclada mostraron un comportamiento intermedio, con incrementos de ductilidad y valores de estabilidad aceptables, lo que sugiere su potencial aplicación en pavimentos de bajo y mediano tránsito donde la resistencia al fisuramiento es prioritaria.
- La mezcla con plástico PET, reciclado presentó mayores porcentajes de vacíos ( $>5.3\%$ ), lo que podría comprometer su durabilidad a largo plazo si no se realizan ajustes en el contenido de ligante o en las condiciones de compactación.

## VI. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados y conclusiones del estudio, se recomienda:

- Priorizar el uso de caucho reciclado de llantas en pavimentos flexibles urbanos y vías de tránsito ligero a medio, debido a su adecuado equilibrio entre estabilidad, ductilidad y comportamiento volumétrico.
- Evaluar el uso de suelas de zapatilla recicladas en caminos rurales o vías secundarias, donde la mejora en la flexibilidad y resistencia al fisuramiento resulte más relevante que la máxima estabilidad estructural.
- Para mezclas con plástico PET, se recomienda realizar estudios complementarios que incluyan ajustes en el contenido de ligante, el uso de aditivos o modificadores, y ensayos de permeabilidad y durabilidad antes de su aplicación a escala real.
- Ampliar futuras investigaciones incorporando ensayos de desempeño mecánico avanzado, como resistencia a la fatiga y deformación permanente, así como evaluaciones de envejecimiento del ligante, con el fin de validar el comportamiento a largo plazo de las mezclas modificadas.
- Desarrollar análisis de costo–beneficio y estudios piloto en campo que permitan comparar el desempeño real de las mezclas modificadas frente a mezclas convencionales, fortaleciendo la toma de decisiones para su implementación en proyectos viales regionales.

## AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Privada del Norte por el respaldo institucional brindado para el desarrollo de la presente investigación, así como por las facilidades otorgadas para el uso de los laboratorios de materiales y pavimentos, equipos y recursos necesarios para la ejecución de los ensayos experimentales.

De manera especial, se reconoce el valioso acompañamiento académico y técnico de la Mg. Ing. Felix Alejandra Velásquez Huayta, cuyo asesoreamiento y

orientación fueron fundamentales para la adecuada planificación, desarrollo y análisis de los resultados del estudio.

Asimismo, se agradece al personal técnico de laboratorio por su apoyo durante las etapas de preparación de materiales, elaboración de briquetas y realización de los ensayos Marshall. Finalmente, se reconoce a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización de este trabajo de investigación.

#### REFERENCES

- [1] Paredes Gamboa, J. L., & Villanueva Rojas, C. J. (2022). *Uso de caucho reciclado de neumáticos en mezclas asfálticas en Cajamarca*. Universidad Nacional de Cajamarca.
- [2] Ramos Pérez, L. M. (2023). Evaluación de residuos textiles de calzado como refuerzo en mezclas asfálticas. Universidad Privada del Norte.
- [3] Díaz Rodríguez, F. J. (2021). Uso de plásticos tipo LDPE reciclado en mezclas bituminosas modificadas. Tesis de pregrado, UTP.
- [4] García Morales, M., & Vargas Díaz, J. (2021). Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado en Lima Metropolitana. *Revista Ingeniería Civil Perú*.
- [5] Fernández Huamán, M., & Ramírez Soto, A. (2020). Evaluación de mezclas asfálticas con adición de plástico LDPE reciclado. *Revista de la Facultad de Ingeniería Civil, UNI*.
- [6] Soto Villalobos, E. (2022). Estudio del uso de fibras de calzado como refuerzo en capas asfálticas. Universidad Nacional de San Agustín.
- [7] Sharma, A., & Jain, P. (2019). Performance of modified bitumen using waste plastic bags in flexible pavements. *Journal of Civil Engineering Research*.
- [8] Oliveira, L. A., & Mendes, J. C. (2020). Incorporation of recycled shoe fabric waste in bituminous mixtures: a mechanical performance study. *Construction and Building Materials*, 245, 118447.
- [9] Yildirim, Y., & Sengoz, B. (2017). Investigation of rubberized asphalt mixtures for improved performance in extreme temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29.
- [10] American Society for Testing and Materials. (2019). Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass (ASTM D2216-19).
- [11] American Society for Testing and Materials. (2020). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates (ASTM C136/C136M-20).
- [12] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). Standard method of test for bulk specific gravity of compacted asphalt mixtures using saturated surface-dry specimens (AASHTO T 166-17).
- [13] ASTM International, "Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Paving Mixtures," ASTM D2041/D2041M-23, West Conshohocken, PA, 2023.
- [14] ASTM International. (2020). ASTM D6927 – Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures.
- [15] American Society for Testing and Materials. (2019). Standard test method for percent air voids in compacted dense and open asphalt mixtures (ASTM D3203/D3203M-19).