

# Evaluación Del Comportamiento De Las Mezclas Asfálticas Modificadas Con Polvo De Neumáticos Fuera De Uso

## Evaluation Of The Behavior Of Asphalt Mixtures Modified With Waste Tire Dust

### Autores

**Diego Fernando Cevallos Rojas<sup>1</sup>, Eduardo Tejada Piusseaut<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ingeniero Civil. Universidad Técnica de Manabí (UTM). Estudiante de la Maestría en Ingeniería Civil, Mención Vialidad e-mail: [1989difer@gmail.com](mailto:1989difer@gmail.com)

<sup>2</sup>PhD. Profesor de la Universidad Técnica de Manabí. email: [eduardo.tejada@utm.edu.ec](mailto:eduardo.tejada@utm.edu.ec)

### RESUMEN

La adición de polvo de neumático fuera de uso (PNFU) en mezclas asfálticas, es una solución para disminuir la contaminación ambiental y aumentar la durabilidad frente a mezclas asfálticas convencionales. Las principales características que presentan las mezclas modificadas, es la prevención del agrietamiento de la capa asfáltica; aumentando el tiempo de mantenimiento. En ese sentido, el objetivo de esta investigación es diseñar una mezcla asfáltica modificada con PNFU para evaluar su comportamiento frente a mezclas convencionales. Se analizaron muestras de laboratorio correspondientes a mezclas convencionales y modificadas con adición del 2% de polvo de PNFU aplicando el método Marshall por vía seca. Los resultados correspondientes a los valores de la Prueba de masa específica máxima medida (RICE), estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos totales (VM), vacíos de agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VFA), arrojaron valores distintos entre ambas mezclas. La estabilidad en ambas mezclas cumple con las especificaciones de diseño de 10 kN, sin embargo, presenta un patrón de disminución conforme aumenta el contenido de asfalto en la mezcla modificada.

**Palabras claves:** método Marshall, mezcla asfáltica, neumático fuera de uso.

### ABSTRACT

The addition of dust from out-of-use tires (PNFU) in asphalt mixtures is a solution to reduce environmental pollution and increase durability compared to conventional asphalt mixtures. The main characteristics of modified mixtures are the prevention of cracking of the asphalt mixture, reducing maintenance time, in that sense the objective of this research is to design an asphalt mixture modified with PNFU to evaluate its behavior compared to conventional mixtures. Laboratory samples corresponding to conventional mixtures and modified mixtures with the addition of 2% of PNFU powder were analyzed applying the Marshall method by dry method, the results corresponding to the measured maximum specific mass test values (RICE), density, stability, flow, percentage of total voids (VM), voids of mineral aggregate (VAM) and voids filled with asphalt (VFA), gave different values between both mixtures. The stability in both mixtures meets the design specifications of 10 kN, however, it presents a pattern of decrease as the asphalt content increases in the modified mixture

**Keywords:** Marshall method, asphalt mixture, tire out of use.

Nota Editorial: Recibido: Mayo 2024 Aceptado: Julio 2024

# 1. INTRODUCCIÓN

Los neumáticos desechados dañan el medio ambiente. En las zonas rurales de Manabí, estos neumáticos se almacenan en terrenos, se incineran o se abandonan en ríos y esteros, con solo una pequeña cantidad reutilizada [1]. En Ecuador se recogen alrededor de 30,000 toneladas de neumáticos usados al año, mostrando el esfuerzo por gestionarlos adecuadamente y fomentar su reciclaje. Sin embargo, el país carece de un marco legal para el almacenamiento controlado de neumáticos. El estudio de mezclas asfálticas modificadas con PNFU podría ser una opción óptima para reducir la contaminación y mejorar las propiedades del asfalto.

Las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho de neumático fuera de uso (PNFU) adquieren mayor durabilidad con respecto a las mezclas habituales, presentan beneficios económicos a largo plazo aumentando el tiempo de mantenimiento [2], [3]; previenen el agrietamiento de la capa asfáltica, mejoran la adherencia entre el neumático y la superficie mojada, la estabilidad del vehículo, la resistencia a la permeabilidad y disminuye el ruido [4].

Para diseñar mezclas asfálticas modificadas con PNFU se utilizan dos métodos. El proceso por la vía seca, sucede cuando el polvo de caucho extraído del PNFU se mezcla con el agregado grueso como una porción del agregado fino, previo a la mezcla con el asfalto; este método requiere un aumento del ligante mediante un proceso especial en planta, mayor tiempo de compactación en obra y mayor energía para calentar la mezcla a altas temperaturas con tiempos más prolongados. En el proceso por vía húmeda, el polvo de caucho es mezclado con el ligante en proporciones que varían entre el 14% y 20%, por el peso total de la mezcla cuando su viscosidad es relativamente baja y permita mezclarse.

La metodología Marshall analiza el desempeño de las mezclas asfálticas determinando el contenido óptimo de asfalto en la mezcla mediante los ensayos de gravedad específica máxima teórica, densidad de mezcla asfáltica (método RICE) y densidad bulk, así como el porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos [2].

El estudio realizado por Vasquez et. al [5], presenta el diseño de una mezcla asfáltica modificada combinando caucho y tereftalato de polietileno reciclado (PET) mediante ensayos de estabilidad y flujo de briquetas aplicando el método Marshall, en los que el porcentaje óptimo obtenido es de 50% caucho y 50% PET.

Por otra parte, las mezclas asfálticas modificadas con otro tipo de polímero como residuos de PVC tipo blíster realizadas por el método de la vía seca, demostró que con un asfalto AC-30 y con incorporación de porcentajes de blíster al 0,5%, 1,0% y 1,5% es ideal utilizarlo en proyectos de estructuras viales, destacando que los resultados son de uso exclusivo para el diseño especificado [6].

Sin embargo, otros estudios aplicados a mezclas asfálticas modificadas con caucho granulado buscan optimizar sus propiedades fundamentales aplicando entre el 1,0% a 20% del elastómero mediante la vía seca y vía húmeda. Cuando se agrega directamente al asfalto se recomienda un 20% del caucho y cuando se adiciona al agregado, se incorpora entre el 1,0% y 3,0% [7].

Finalmente, la investigación propuesta por Calahorra et. al [8], comparó el ciclo de vida de la mezcla asfáltica con un agregado de PNFU como reemplazo del 10% del betún de la carpeta asfáltica frente a una mezcla asfáltica habitual; empleando una metodología de análisis de ciclo de vida desde la extracción de la materia prima hasta la etapa de operación y mantenimiento dando como resultado la reducción de emisión de CO<sub>2</sub>, reduciendo el impacto ambiental sonoro de 3 a 4 decibeles y una disminución del 41,69% en costos de mantenimiento. Sin embargo, no han sido encontradas investigaciones publicadas sobre mezclas asfálticas con PNFU para vías en la provincia de Manabí.

Las mezclas asfálticas modificadas con neumáticos fuera de uso (PNFU) presentan aumento en la resistencia a la tracción, disminución del ruido, del envejecimiento, de la fatiga, son resistentes a la formación de surcos, a la humedad, así como también disminuyen la transmisión de agua y aire a la estructura del asfalto; lo que deriva al aumento de su vida útil [9].

La modificación de mezclas bituminosas, resulta una alternativa para la eliminación segura de neumáticos fuera de uso [10]. Para la aplicación de PNFU en mezclas asfálticas es necesario que el caucho tenga un tamaño de partículas finas inferiores a 2 mm hasta 0,50 mm según el tipo de aplicación [11].

Con respecto al contenido óptimo de asfalto en el proceso seco, empleando el método Marshall; se identifican varios parámetros que deben cumplir las especificaciones de diseño como son: la densidad máxima teórica RICE, la estabilidad, el flujo, los vacíos totales (VM), los vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VFA) [12].

Las experiencias consultadas entre mezclas convencionales y modificadas con PNFU muestra: el incremento de la temperatura de fabricación, usualmente valores entre 175°C y 180°C; medidas a la salida del mezclador y en mezclas semidensas o discontinuas. Mientras que para mezclas drenantes o discontinuas la temperatura puede ser de 160°C, de modo que en mezclas densas pudieran necesitar valores superiores [12].

En la etapa de amasado se agrega en primer lugar el polvo de PNFU y después de unos segundos el betún. Se debe tomar en cuenta que las mezclas modificadas suelen ser más pesadas que las convencionales en un orden del 1% al 5%, según la dosificación del PNFU. Por otra parte, en las técnicas de vía seca, debe considerarse un periodo de almacenamiento en silo o en camión para que el material termine de madurar [12]. Estos aspectos deben ser tenidos en cuenta en el laboratorio para poder alcanzar los valores exigidos en el diseño.

En consecuencia, el objetivo de esta investigación es analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente modificadas con polvo de neumático fuera de uso (PNFU) utilizando el método de la vía seca. Se comparan las propiedades de estas mezclas con la de una mezcla asfáltica convencional.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir con el propósito de la investigación, se prepararon dos diseños de mezclas: una convencional y otra modificada con PNFU. Debido a la falta de normativas específicas para el diseño de mezclas modificadas con PNFU en Ecuador, se utilizó como referencia el Manual de Empleo de Caucho de Neumáticos Fuera de Uso en Mezclas Bituminosas de España. Este manual recomienda utilizar una dotación del 2% de polvo de caucho en relación al peso total de la mezcla.

El contenido óptimo de asfalto (COA) en una mezcla asfáltica es la cantidad de asfalto (betún), que proporciona un equilibrio adecuado entre varias propiedades de la mezcla. El COA se determina a través de un proceso de diseño de mezcla, como el Método Marshall, procedimiento utilizado en Ecuador. Este método, ampliamente reconocido y utilizado en la ingeniería de pavimentos, permite evaluar la resistencia, la deformabilidad y la calidad general de la mezcla. El método implica la preparación de varias muestras de la mezcla con diferentes contenidos de asfalto y la evaluación de sus propiedades para identificar el contenido de asfalto que cumple con los criterios de diseño especificados, como son: la estabilidad (resistencia), Flujo (deformación) y los porcentajes de vacíos en los agregados y vacíos en la mezcla.

Primero, se diseñó una mezcla convencional sin el uso de PNFU, la cual se utilizó como referencia. Luego, se confeccionó una mezcla con polvo de neumáticos utilizando los mismos agregados y asfalto que la mezcla convencional. El diseño de ambas mezclas se llevó a cabo conforme al Método Marshall, siguiendo la norma ASTM D-1559.

El equipamiento utilizado es la Máquinas de ensayo Marshall para pruebas de resistencia y deformación, compactando las muestras mediante el compactador Marshall; utilizando 75 golpes por cara. Las muestras se ensayaron a 60°C, antes del ensayo.

El diseño de la investigación se estructuró en varios pasos:

1. Caracterización de los agregados: Se emplearon agregados pétreos provenientes de la cantera Uruzca en la ciudad de Portoviejo, los cuales fueron evaluados y calificados como adecuados para la elaboración de las mezclas asfálticas. La granulometría se seleccionó para obtener una mezcla densa.
  2. Determinación de la gravedad específica de los agregados: Se aplicó la norma NTE INEN 0857. Esta norma proporciona el método estándar para medir esta propiedad fundamental de los materiales pétreos, como elemento importante para los cálculos de porcentajes de vacíos.
  3. El polvo de neumáticos fuera de uso (PNFU) fue adquirido a través de la empresa RUBBERACTION CIA. LTDA, especializada en la comercialización de materiales reciclables en la ciudad de Quito.
  4. Formulación de las Mezclas: Se consideraron dos diseños para la formulación de las mezclas, una mezcla convencional, tomada como referencia, y otra modificada con la incorporación de polvo de neumáticos. Ambas mezclas se desarrollaron siguiendo la norma ASTM D3515 para mezclas densas, que permite establecer los porcentajes de agregados a considerar en los diseños. Para determinar el contenido óptimo de asfalto, se prepararon y compactaron una serie de muestras de prueba (briquetas) con distintos porcentajes de asfalto, manteniendo un rango de variación no mayor a 0,5% (según AASHTO T-245 y ASTM D-1559). Tras calcular el contenido teórico de asfalto, se incluyeron al menos dos porcentajes por encima y dos por debajo del óptimo estimado. Las mezclas se describen a continuación.
- Mezcla convencional: Diseñada utilizando los materiales estándar sin adición de PNFU. Se emplearon agregados pétreos provenientes de la cantera Uruzca en la ciudad de Portoviejo, con granulometría adecuada para una mezcla densa. Los tamaños de los agregados gruesos utilizados fueron 19 mm (3/4") y 9,5 mm (3/8"), además de cisco y arena. Los porcentajes de asfalto añadidos a las mezclas fueron desde 5% al 7,5%. con un incremento de 0,5%.

- fuera de uso (PNFU) suministrado por la empresa RUBBERACTION CIA. LTDA, especializada en la comercialización de materiales reciclables en Quito. Los porcentajes de asfalto añadidos a las mezclas fueron desde 6,5% al 8,5%, con un incremento de 0,5%, mientras que el polvo fue añadido en un 2% respecto al total del peso de agregados.

Ambos tipos de mezclas se diseñaron conforme a normativas y estándares para garantizar la calidad y adecuación de las mezclas asfálticas en pavimentación. El porcentaje de asfalto utilizado en cada diseño es la variable independiente, mientras que las variables dependientes son los parámetros que evalúan el comportamiento: estabilidad (kN), flujo (mm) y los porcentajes de vacíos en mezcla, vacíos en áridos y vacíos rellenos de asfalto. El procedimiento de formulación se basa en los siguientes pasos:

- Fabricación de Muestras:** Se fabricaron especímenes con las mezclas formuladas siguiendo el protocolo estándar del Método Marshall, para una mezcla convencional y para una mezcla añadiendo polvo de neumáticos.
- Ensayos a las mezclas:**
  - Evaluación de la estabilidad y el flujo de las mezclas.
  - Determinación de la gravedad específica Bulk en ambas mezclas.
  - Cálculo de los porcentajes de vacíos en la mezcla, vacíos en los áridos y vacíos rellenos de asfalto.
- Determinación del contenido óptimo de asfalto (COA) en las mezclas.** Se elaboraron gráficos en cada diseño para identificar el porcentaje de asfalto que cumple con todas las especificaciones de una mezcla densa. Las especificaciones para la mezcla densa, establecidas en el Manual de Especificaciones Generales MOP.001-F-2002, son: estabilidad  $\geq 10$  kN; flujo entre 2 y 5 mm; vacíos en agregado mineral (VAM)  $\geq 14\%$ ; vacíos de aire (VM) entre 3 y 5%. En cada diseño se determinó el COA fijando primeramente el porcentaje de asfalto que garantiza un 4% de vacíos de aire (VM), y luego se verificando en los gráficos, si con ese porcentaje se satisfacen las exigencias de estabilidad, flujo y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM).
- Comprobación de los diseños con los contenidos óptimos de asfalto obtenidos en cada mezcla.** Se fabricaron nuevas briquetas con los contenidos óptimos de asfalto obtenidos en ambos diseños, para verificar que las propiedades obtenidas para estos porcentajes cumplen con las especificaciones establecidas en el Manual de Especificaciones Generales MOP.001-F-2002, en términos de estabilidad, flujo y volumen de vacíos de aire aceptables.

## 2.1. Caracterización De Los Materiales Para Las Mezclas Convencional Y Modificada

Los agregados pétreos empleados en el diseño de la mezcla asfáltica provienen de la cantera Uruzca en la ciudad de Portoviejo, los cuales han sido precalificados como aceptables para la elaboración de la mezcla asfáltica. En la determinación de la gravedad específica de los agregados se aplicó la norma NTE INEN 0857, para las propiedades Marshall y para la gravedad específica Bulk se utilizó la norma ASTM D1188-07.

En la tabla 1 se presentan los valores de gravedad específica, porcentaje de absorción y gravedad Bulk para cada uno de los agregados que conforman las mezclas asfálticas, convencional y modificada. Apoyadas en las especificaciones del Instituto del Asfalto Manual MS-22, en concordancia con el Manual de Especificaciones Generales MOP-001-F-2002. Los áridos gruesos empleados en la mezcla corresponden al ripio de 19 mm (3/4") y ripio de 9,5 mm (3/8"), mientras que para los áridos finos se utilizaron cisco y arena.

**Tabla 1:** Tabla gravimétrica de los áridos

Propiedad	Ripio 19 mm (3/4")	Ripio 9.5 mm (3/8")	Cisco	Arena
Gravedad específica Bulk (g/cm <sup>3</sup> )	2,568	2,494	2,352	2,522
Gravedad específica efectiva (g/cm <sup>3</sup> )	2,659	2,600	2,491	2,600
Gravedad específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,824	2,789	2,733	2,735
Absorción (%)	3,530	4,230	5,930	3,090

Para el diseño de la mezcla modificada con polvo de PNFU se adquirió el material por medio de la empresa RUBBERACTION CIA. LTDA, encargada de comercializar materiales reciclables en la ciudad de Quito.

Las mezclas asfálticas empleadas en capas de rodadura para vías de tráfico pesado y muy pesado deben cumplir con la relación entre el porcentaje en peso del agregado pasante del tamiz N° 200 y el contenido de asfalto en peso del total de la mezcla (filler/betún), asegurándose de que sea mayor o igual a 0,80 y no superior a 1,20, de acuerdo a las especificaciones del Manual de Especificaciones Generales MOP.001-F-2002.

El rango recomendado por la norma para la relación filler/betún se establece para asegurar que las mezclas asfálticas mantengan un equilibrio óptimo entre durabilidad, estabilidad y trabajabilidad. Si la relación es demasiado baja (<0,80), puede haber un exceso de betún, lo que puede causar problemas de exudación del asfalto hacia la superficie, disminución de la resistencia al corte y menor estabilidad de la mezcla. Por otro lado, si la relación es demasiado alta (>1,20), equivale a un exceso de material fino que puede hacer que la mezcla sea demasiado rígida, reduciendo su flexibilidad y aumentando la susceptibilidad a grietas por fatiga. Además, una alta proporción de filler puede llevar a una compactación deficiente y a la formación de vacíos que faciliten la entrada de agua, lo que a su vez puede reducir la durabilidad de la mezcla.

La tabla 2 muestra las proporciones de agregados para ambos diseños de mezclas, a partir de las consideraciones establecidas en el manual de empleo de caucho de PNFU en mezclas bituminosas de España; la proporción filler/betún es 1,06 con el 2% de PNFU para la mezcla modificada. La dosificación de los agregados se selecciona de acuerdo al tamaño de los mismos, basándose en la norma NTE INEN 0696 y tomando en cuenta la tabla 405-5.1 del Manual de Especificaciones GENERALES MOP.001-F-2002.

**Tabla 2:** Proporciones de material de agregados

Agregados	Proporciones (%)	Filler/betún
Ripio 3/4"	16	1,06
Ripio 3/8"	25	
Cisco	41	
Arena	16	
PNFU	2	
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	

La tabla 3, muestra el análisis granulométrico para los agregados que conforman las mezclas asfálticas y del polvo de PNFU, así como también las especificaciones y tolerancias en los diseños. En la figura 1 se puede observar que la curva granulométrica para los agregados mezclados con PNFU cumple las especificaciones máximas y mínimas establecidas por el MOP. El material pasante por el tamiz No. 200 será el valor del filler o relleno para la mezcla asfáltica y se compone por el que aportan los agregados más el polvo de caucho añadido.

**Tabla 3:** Análisis granulométrico de agregados para mezcla asfáltica

Tamices (pulgadas)	Tamaño (mm)	19 mm (3/4")	9.5 mm (3/8")	Cisco	Arena	PNFU	Mezcla	Media	Especificación		Tolerancias
3/4"	19,00	100,00					100,00	100	100	100	± 8 %
1/2"	12,5	48,06	100,0		100,0		91,69		90	100	± 8%
3/8"	9,50	22,0	98,9	100,0	99,60		87,19				
No. 4	4,75	0,50	6,13	95,38	97,75		58,36	59	44	74	± 7%
No. 8	2,36	0,30	2,17	73,50	95,75		48,05	43	28	58	± 6%
No. 16	1,18	0,26	1,52	56,50	90,37	100,0	40,05				
No. 30	0,60	0,24	1,14	43,00	60,25	45,0	28,49				
No. 50	0,30	0,20	0,81	28,63	18,38	8,0	15,07	13	5	21	± 5%
No. 100	0,15	0,17	0,49	20,00	3,75	0,0	8,95				
No. 200	0,075	0,09	0,19	16,13	1,50	0,0	6,91	6	2	10	± 3%

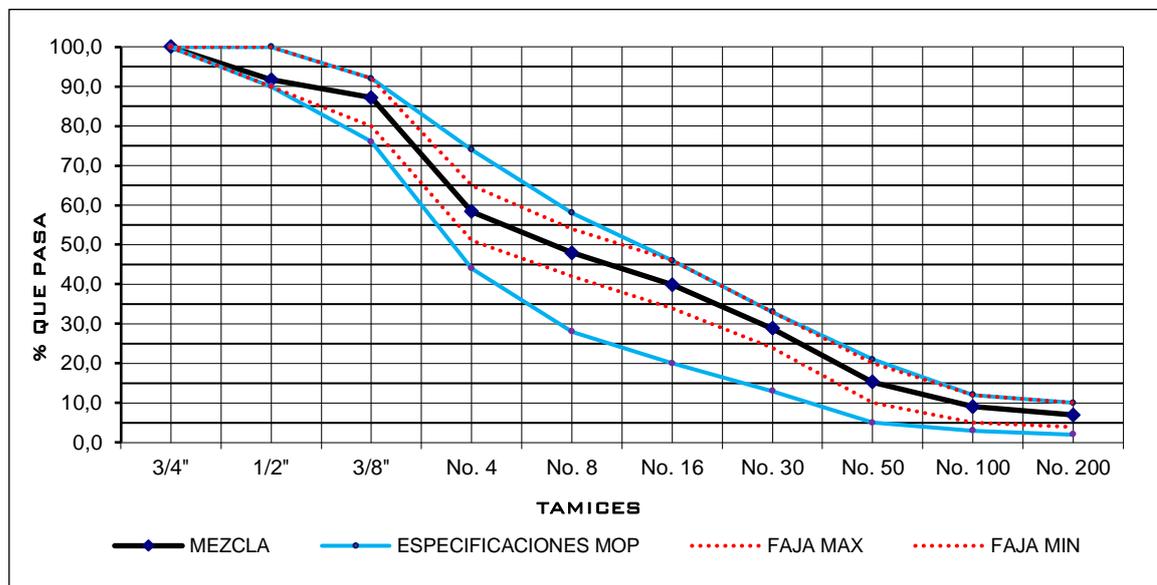
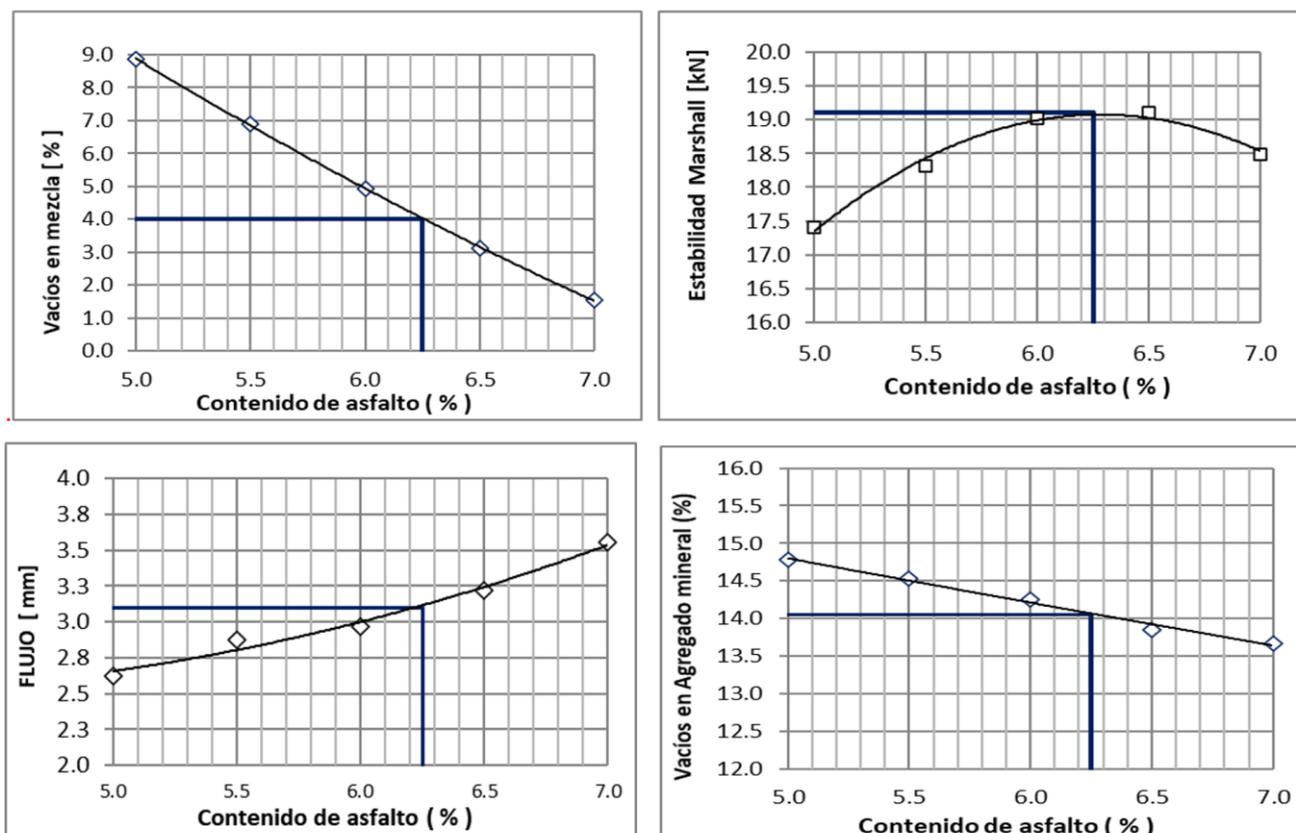


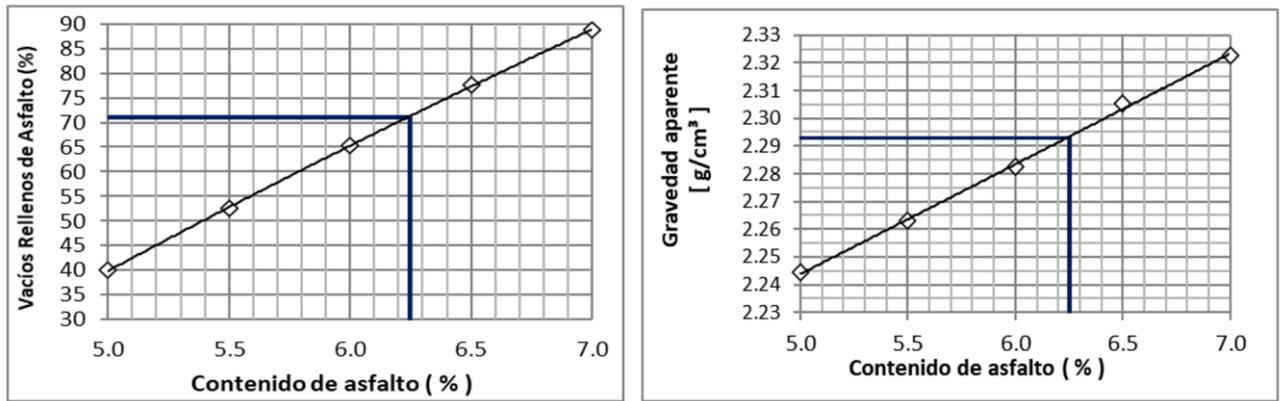
Figura 1: Curva granulométrica de los áridos mezclados con PNFU

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Diseño De La Mezcla Convencional

La figura 2 muestra los gráficos que representan las variaciones que experimentan los diferentes parámetros del Método Marshall respecto al contenido de asfalto para el diseño de la mezcla convencional. Los porcentajes de asfalto en la mezcla fueron añadidos desde 5% al 7,5%, con un incremento de 0,5%. En la mezcla convencional, al ingresar con el 4% en el gráfico del porcentaje de vacíos de aire (VM), se fijó un contenido de asfalto de 6,25%. Con este porcentaje, el gráfico de estabilidad mostró un valor superior a 19 kN; el gráfico de flujo indicó un valor entre 2 y 5 mm; y el gráfico de vacíos en el agregado mineral (VAM) presentó un valor de 14%. Por lo tanto, se adoptó el 6,25% como el contenido óptimo de asfalto (COA) para este diseño. Finalmente, en el gráfico de gravedad específica, se obtuvo la gravedad aparente esperada para la mezcla compactada con ese contenido óptimo de asfalto, igual a 2,295 g/cm<sup>3</sup>.





**Figura 2:** Resultados de la metodología Marshall aplicada a la mezcla convencional

En la obtención de la Gravedad específica máxima teórica para calcular el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica compactada, se aplicó el método RICE, establecido en la norma ASTM D2041-11, En la tabla 4 se presentan los resultados de este ensayo y la comprobación de la gravedad RICE para el porcentaje óptimo de asfalto. El asfalto utilizado para el diseño proviene de la refinería estatal de Esmeraldas, con un peso específico según el ensayo AASHTO T-228, es de 1,014 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabla 4:** Ensayo de comprobación RICE para mezcla convencional

	RICE					Comprobación	
	Porcentaje óptimo de asfalto	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,5%	6,25%
Peso estándar (g)		7323	7323	7323	7323	7323	7323
Peso + muestra (g)		8213,9	8205,9	8198,3	8192,5	8187,1	8196
Peso muestra (g)		1500	1500	1500	1500	1500	1500
RICE (g/cm <sup>3</sup> )		2,463	2,431	2,401	2,379	2,359	2,392

La tabla 5 contiene un resumen de los resultados del diseño de la mezcla convencional y las comprobaciones en cada uno de los parámetros en briquetas preparadas con el contenido óptimo de asfalto, igual a 6,25%. En la comprobación el porcentaje de vacíos fue de 4,09%, por lo cual se verificó la mezcla como densa, para una Gravedad aparente de 2,29 g/cm<sup>3</sup>, Estabilidad de 19,14 kN y deformación o flujo de 3,07 mm en el momento de la rotura, por lo que se confirman todos los parámetros del diseño.

**Tabla 5:** Propiedades de la mezcla asfáltica convencional

Dosificación (%)	Densidad Bulk (g/cm <sup>3</sup> )	RICE (g/cm <sup>3</sup> )	Vacíos (%)	VAM (%)	VFA (%)	Estabilidad corregida (kN)	Flujo (mm)
5,0	2,244	2,463	8,87	14,78	40,03	17,4	2,62
5,5	2,263	2,431	6,90	14,53	52,50	18,3	2,88
6,0	2,282	2,401	4,94	14,25	65,31	19,0	2,96
6,5	2,305	2,379	3,10	13,85	77,60	19,1	3,22
7,0	2,323	2,359	1,54	13,67	88,76	18,5	3,56
<b>Comprobación 6,25%</b>	<b>2,295</b>	<b>2,392</b>	<b>4,09</b>	<b>14,02</b>	<b>70,90</b>	<b>19,14</b>	<b>3,07</b>

La mezcla convencional, con un porcentaje óptimo de asfalto del 6,25%, presenta una alta capacidad estructural y estabilidad, combinada con una baja deformación, lo que la clasifica como una mezcla rígida. El diseño de una mezcla que incorpore polvo de neumáticos fuera de uso (PNFU) puede contribuir a la obtención de una mezcla más flexible, cumpliendo con las especificaciones de una mezcla densa.

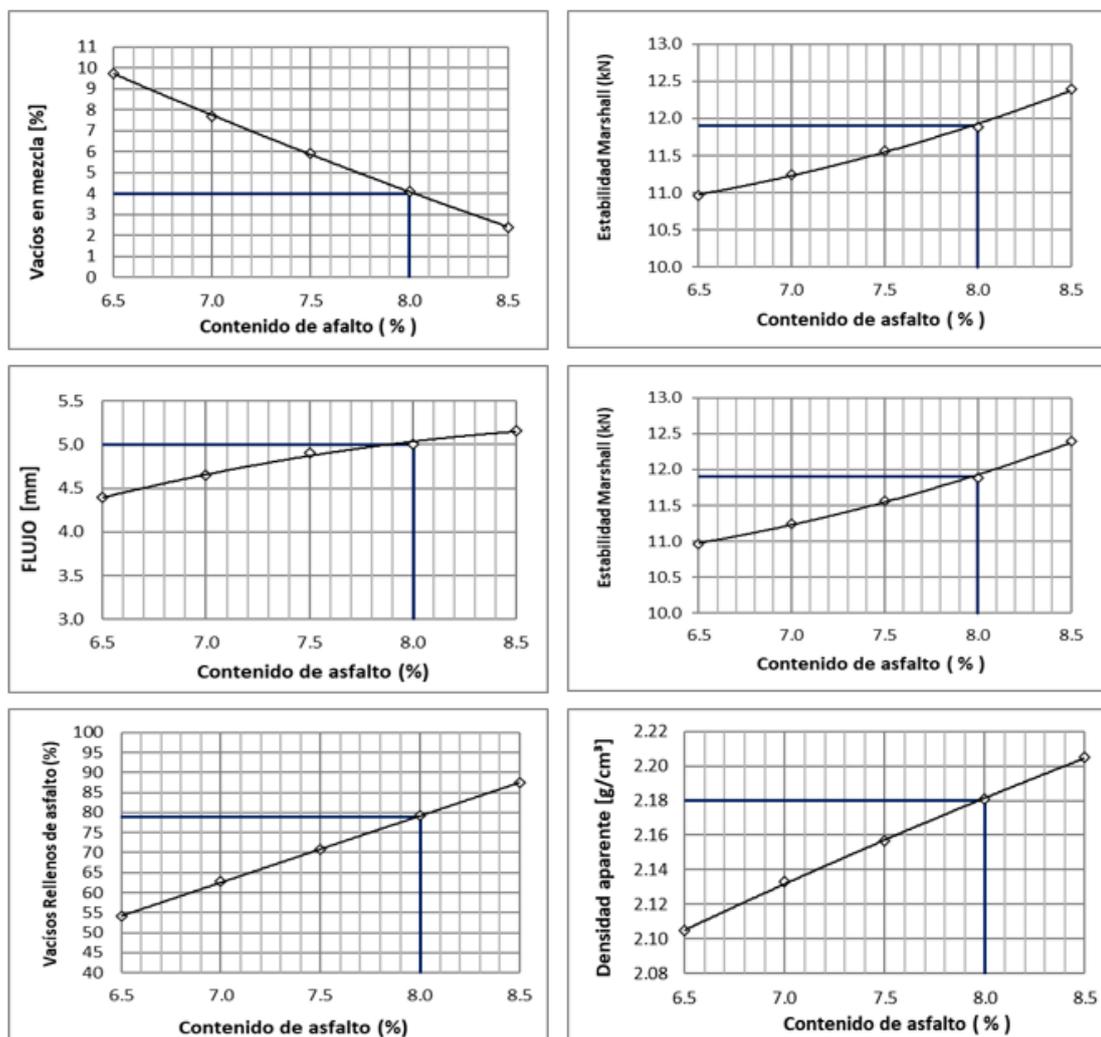
### 3.2. Diseño De La Mezcla Modificada Con PNFU

En el diseño de la mezcla modificada con PNFU, fue necesario garantizar su homogeneidad incrementando la temperatura y el tiempo de mezclado, hasta 180°C +/- 5°C y 120 segundos respectivamente. Después de varias pruebas se consideró necesario aplicar mayores porcentajes de asfalto que en la mezcla convencional, variando desde el 6,5% al 8,5%, en incrementos de 0,5%, como establece el método de diseño Marshall. En la tabla 6 se muestran los pesos de los diferentes agregados y del polvo de PNFU, en cada porcentaje de asfalto añadido.

**Tabla 6:** Pesos (g) individuales de agregados para la confección de briquetas.

Puntos de AC-20	Proporciones (%)	6,5%	7,0%	7,5%	8,0%	8,5%
AC - 20		97,50	105,00	112,50	120,00	127,50
Ripio de 19 mm (3/4")	16	224,40	223,20	222,00	220,80	219,60
Ripio de 9.5 mm (3/8")	25	350,63	348,75	346,88	345,00	343,13
Cisco	41	575,03	571,95	568,88	565,80	562,73
Arena de rio	16	224,40	223,20	222,00	220,80	219,60
PNFU	2	28,05	27,90	27,75	27,60	27,45
<b>Total</b>	100	1500	1500	1500	1500	1500

La figura 3 muestra los gráficos que representan las variaciones que experimentan los diferentes parámetros del Método Marshall respecto al contenido de asfalto. para el diseño de la mezcla modificada con PNFU. En la mezcla modificada, al ingresar con el 4% en el gráfico del porcentaje de vacíos de aire (VM), se fijó un contenido de asfalto de 8,0%. Con este porcentaje, el gráfico de estabilidad mostró un valor de 11,97 kN; el gráfico de flujo indicó un valor de 5 mm; y el gráfico de vacíos en el agregado mineral (VAM) presentó un valor significativamente mayor al 14%. Por lo tanto, se adoptó el 8% como el contenido óptimo de asfalto (COA) para este diseño. Finalmente, en el gráfico de gravedad específica, se obtuvo la gravedad aparente esperada para la mezcla modificada compactada con ese contenido óptimo de asfalto, igual a 2,18 g/cm<sup>3</sup>.



**Figura 3:** Resultados de metodología Marshall para mezclas modificadas con PNFU

De igual forma para la gravedad específica máxima teórica se utilizó el método RICE empelada en los cálculos de los porcentajes de vacíos en la mezcla asfáltica compactada. La tabla 7 contiene estos resultados, incluyendo la gravedad RICE para el porcentaje óptimo de asfalto. El peso específico del asfalto para el diseño es de 1,014 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabla 7:** Ensayo de comprobación RICE para mezcla modificada con PNFU

Ensayo RICE						Comprobación
Porcentaje óptimo de asfalto	6,5%	7,0%	7,5%	8,0%	8,5%	8,00%
Peso estándar (g)	7321	7321	7321	7321	7321	7321
Peso + muestra (g)	8177,7	8171,7	8166,5	8161,4	8157	8160,8
Peso muestra (g)	1500	1500	1500	1500	1500	1500
RICE (g/cm <sup>3</sup> )	2,332	2,310	2,292	2,274	2,259	2,272

La tabla 8 contiene un resumen de los resultados del diseño de la mezcla modificada y las comprobaciones en cada uno de los parámetros en briquetas preparadas con el contenido óptimo de asfalto, igual a 8,0%. En la comprobación el porcentaje de vacíos fue de 4,04%, por lo cual se verificó la mezcla como densa, para una Gravedad aparente de 2,18 g/cm<sup>3</sup>, Estabilidad de 11,97 kN y deformación o flujo de 5,0 mm en el momento de la rotura, por lo que se confirman todos los parámetros del diseño.

**Tabla 8:** Propiedades de la mezcla asfáltica modificada con PNFU (2%)

Dosificación (%)	Densidad Bulk (g/cm <sup>3</sup> )	RICE (g/cm <sup>3</sup> )	Vacíos (%)	VAM (%)	VFA (%)	Estabilidad corregida (kN)	Flujo (mm)
6,5	2,105	2,332	9,74	21,22	54,12	10,97	4,39
7,0	2,133	2,310	7,68	20,59	62,75	11,24	4,65
7,5	2,157	2,292	5,89	20,14	70,74	11,57	4,90
8,0	2,181	2,274	4,10	19,68	79,17	11,89	5,00
8,5	2,205	2,259	2,40	19,24	87,55	12,39	5,16
<b>Comprobación</b> <b>8,00%</b>	<b>2,180</b>	<b>2,272</b>	<b>4,04</b>	<b>19,71</b>	<b>79,50</b>	<b>11,97</b>	<b>5,0</b>

### 3.3. Análisis De Los Resultados. Comparación Entre Los Diseños De La Mezcla Convencional Y La Modificada Con PNFU

Los diseños de las mezclas, tanto la convencional como la modificada mediante la incorporación de PNFU por vía seca, se han realizado aplicando el Método Marshall y siguiendo las especificaciones establecidas para una mezcla densa en las normas del Ministerio de Obras Públicas del Ecuador. De acuerdo con estas especificaciones, la mezcla asfáltica densa debe tener un porcentaje de vacíos en mezcla (VM) entre 3% y 5%, alcanzar una estabilidad mayor a 10 kN, y una deformación o flujo entre 2 y 5 mm. Además, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) debe ser mayor al 14%. A continuación, se analizan las diferencias en los resultados de ambos diseños.

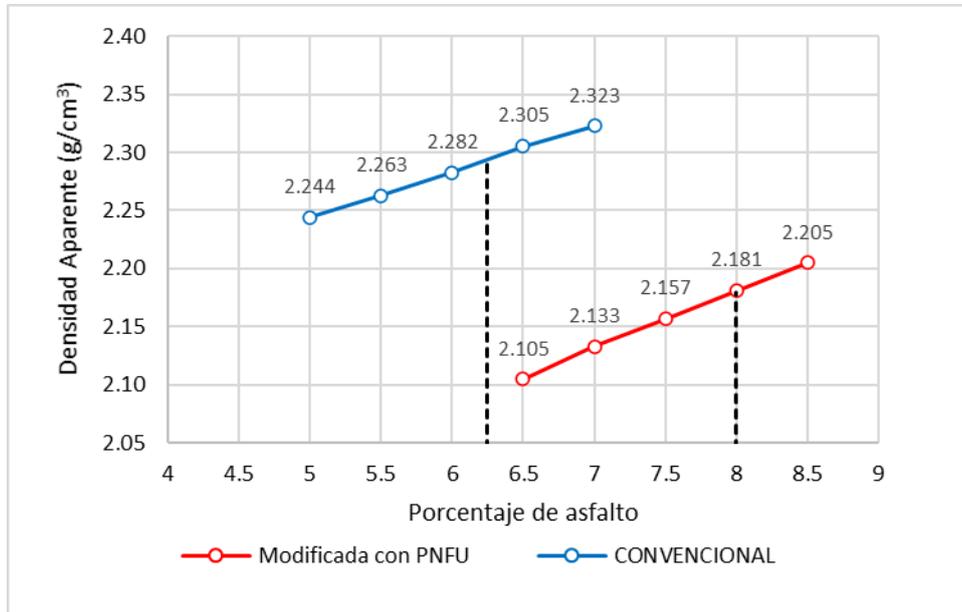
En la tabla 9 se muestra un resumen de los resultados de los diseños, así como las especificaciones. En el diseño de la mezcla convencional se obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto de 6,25%, mientras que para la mezcla modificada con un 2% de PNFU el porcentaje óptimo de asfalto se obtuvo con el 8,0%.

**Tabla 9:** Especificaciones y comprobaciones de propiedades Marshall

Comprobaciones	Especificaciones	Resultados de los diseños (C.O.A)	
		Mezcla convencional	Mezcla con PNFU
Contenido Óptimo de Asfalto	—	6,25%	8,0%
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	—	2,392	2,272
Estabilidad (kN)	≥ 10	19,14	11,97
Flujo (mm)	2 – 5	3,07	5,00
VAM (%)	> 14%	14,02	19,71
Vacíos de aire (%)	3% - 5%	4,09	4,04

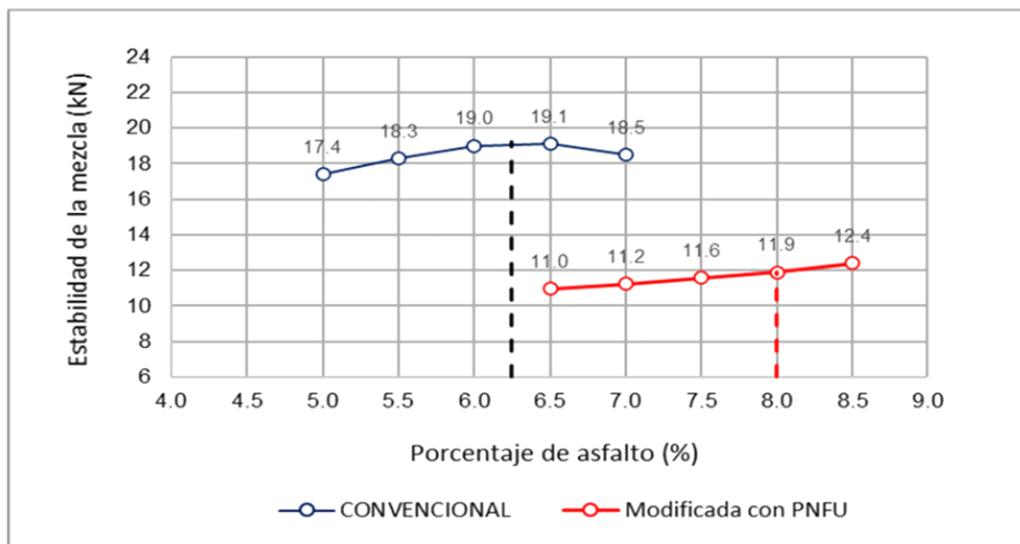
En el gráfico de la figura 4 se puede apreciar las diferencias encontradas en las densidades para los contenidos de asfalto añadidos a las mezclas. En ambos diseños se muestra un ascenso en la Densidad aparente en la medida en que se incrementó el porcentaje de asfalto, pero en la mezcla modificada los valores alcanzados en la Gravedad son apreciablemente menores.

Como se observa en la figura, para el contenido óptimo de asfalto (6,25%), en la mezcla convencional, la Densidad Aparente es de 2,29 g/cm<sup>3</sup>, mientras que en la mezcla modificada, en la que se ha requerido un mayor contenido de asfalto (8%), es de 2,181 g/cm<sup>3</sup>.



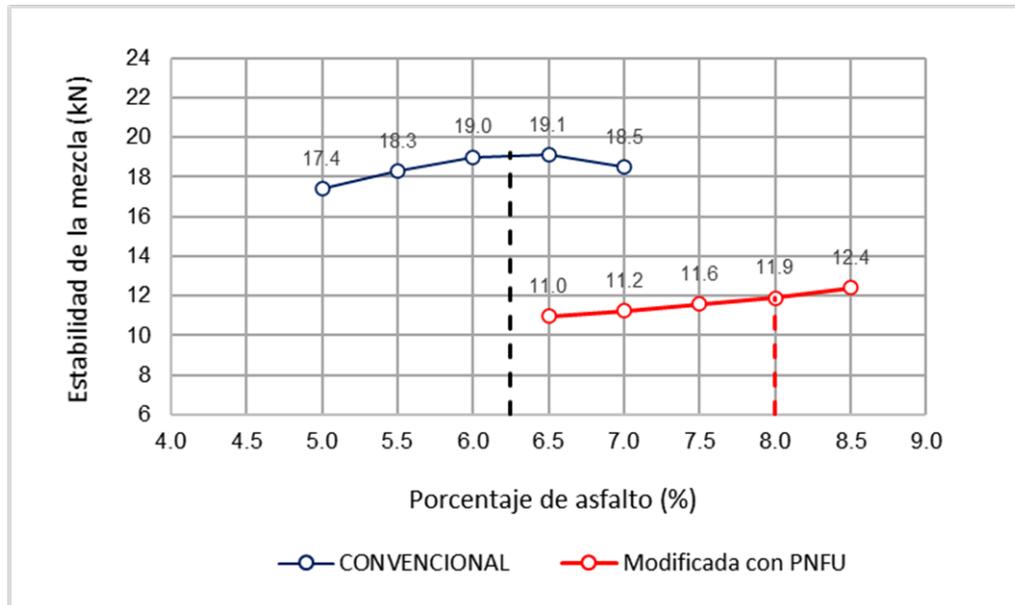
**Figura 4:** Curva de porcentajes de vacíos para mezcla convencional y con PNFU

En la Figura 5 se comparan las variaciones en el porcentaje de vacíos en las mezclas a medida que se incrementa el contenido de asfalto. Se observa que, para alcanzar la especificación del 4% de vacíos, como se exige en una mezcla densa, fue necesario aplicar un 8% de asfalto en la mezcla modificada con polvo de neumáticos fuera de uso (PNFU). Este valor es considerablemente superior al utilizado en la mezcla convencional, que fue de 6,25%. Es conocido que el porcentaje de vacíos en la mezcla se determina a partir de las densidades aparentes, por lo que es esperable que los porcentajes de vacíos en la mezcla con PNFU sean superiores a los de la mezcla convencional, debido a que las densidades en la mezcla modificada resultaron ser menores.



**Figura 5:** Curva de estabilidad para mezcla convencional y con PNFU

La Figura 6 muestra las diferencias encontradas en la estabilidad de las mezclas. Se observa que los valores de estabilidad en la mezcla modificada disminuyeron de forma apreciable en comparación con la mezcla convencional. Esta reducción en la resistencia se refleja en los valores obtenidos para los contenidos óptimos de asfalto de cada mezcla. Mientras que en la mezcla convencional se alcanzó una estabilidad de 19,14 kN con un 6,25% de asfalto, en la mezcla modificada la estabilidad fue de 11,97 kN, aplicando un mayor porcentaje de asfalto, igual al 8,0%. La reducción de la estabilidad en la mezcla modificada en comparación con la mezcla convencional, es una consecuencia de su menor densidad.



**Figura 6:** Curva de estabilidad para mezcla convencional y con PNFU

Para evaluar la respuesta de ambas mezclas asfálticas en el ensayo Marshall, se puede utilizar como parámetro la relación entre la estabilidad y el flujo (E/F). Esta relación, conocida como rigidez Marshall, es entendida físicamente como una resistencia mecánica evaluada en el estado de falla de las mezclas bajo carga [15]. En la mezcla convencional, la relación E/F es de 6,23 kN/mm, mientras que en la mezcla modificada con PNFU es de 2,39 kN/mm. Bajo este concepto, la diferencia de rigidez entre ambas mezclas se debe a varias razones relacionadas con las propiedades físicas y químicas del polvo de neumáticos y su interacción con el aglutinante asfáltico. El caucho de neumático añadido al asfalto modifica sus propiedades elásticas, haciendo que el ligante asfáltico sea más flexible y elástico debido a la presencia de polímeros en el caucho que aportan estas características.

El diseño de mezcla con la inclusión de polvo de neumáticos fuera de uso (PNFU) se concibió con una proporción del 2% de polvo de caucho en relación al peso total de la mezcla, siguiendo la experiencia española, que establece este porcentaje como mínimo para lograr resultados comparables con una mezcla convencional. Sin embargo, en la investigación se encontró que la mezcla modificada requería un incremento del 1,7% en el contenido de asfalto en comparación con la mezcla convencional, lo que podría no ser económicamente viable.

Los mayores porcentajes de asfalto en la mezcla, así como la baja densidad y estabilidad, se deben a que los agregados utilizados tienen un porcentaje de absorción elevado, lo cual es común en esta región del país. El porcentaje de absorción de los agregados combinados utilizados en las mezclas es del 4,4%. Generalmente, se recomienda que los agregados en mezclas asfálticas tengan un porcentaje de absorción de agua bajo, idealmente inferior al 2%. Un mayor porcentaje de absorción puede indicar la presencia de porosidad en los agregados, lo que puede llevar a la absorción de más asfalto en la mezcla, afectando negativamente sus propiedades, la durabilidad y el desempeño de la pavimentación. En resumen, se deben considerar en nuestra región, contenidos más bajos de PNFU que el utilizado en esta investigación.

Las mezclas asfálticas que utilizan polvo de neumáticos presentan una serie de ventajas. Entre ellas, se destaca la mejora de las propiedades elásticas del asfalto, lo que le permite soportar mejor las deformaciones bajo carga y reducir la aparición de grietas. Estas mezclas tienden a tener una mayor resistencia a la fatiga, lo que puede prolongar la vida útil del pavimento, además de mejorar la resistencia al envejecimiento. También pueden contribuir a reducir el ruido generado por el tráfico gracias a la mayor flexibilidad del pavimento. Un aspecto muy importante que justifica su uso es que contribuyen a disminuir los desechos sólidos, ofreciendo una solución ambientalmente amigable para el manejo de neumáticos fuera de uso.

No obstante, existen varias desventajas que deben considerarse. Las mezclas modificadas con polvo de neumáticos pueden ser más costosas debido a los costos adicionales de materiales y procesos de mezcla. Su proceso de fabricación es complejo, ya que requiere ajustes en la producción, lo que puede complicar la fabricación y aumentar el tiempo necesario para la preparación de la mezcla. Además, presentan una densidad inferior en comparación con las mezclas convencionales, lo que puede afectar algunas de sus propiedades mecánicas. Finalmente, la interacción entre el polvo de neumáticos y el aglutinante asfáltico puede variar, lo que podría influir en la homogeneidad y consistencia de la mezcla.

## 4. CONCLUSIONES

La importancia de la utilización de neumáticos fuera de uso en las mezclas asfálticas en caliente radica fundamentalmente en la reducción del impacto ambiental como resultado de la eliminación de los vertederos producidos por los neumáticos que son desechados, cada vez en mayor medida. La incorporación de estos materiales de residuo también puede favorecer el comportamiento de estas mezclas, porque funcionan, una vez añadidos, como modificadores del asfalto, aunque es más efectivo cuando se añaden por vía húmeda.

La comparación entre los diseños de las mezclas convencional y modificada añadiendo el 2% de PNFU, demostraron que la estabilidad en la mezcla se reduce de manera significativa con la incorporación del residuo, necesitando además un mayor porcentaje de asfalto para cumplir las especificaciones de una mezcla densa. En la mezcla modificada la densidad se redujo para el porcentaje óptimo de asfalto, respecto a la convencional y consecuente también la resistencia; en la mezcla convencional se alcanzó una alta estabilidad de 19,14 kN, con el 6,25% de asfalto, mientras que con la adición del PNFU la estabilidad disminuyó hasta 11,97 kN, con un contenido óptimo del 8%.

Los altos valores de estabilidad en las mezclas convencionales, unido a baja deformación muestran una mezcla más rígida, por tanto, la adición de PNFU puede, sin embargo, contribuir con el aumento de la flexibilidad en las mezclas con mayor capacidad de resistencia a la fatiga y durabilidad, siempre que el incremento del contenido de asfalto resulte viable desde el punto de vista económico. Menores porcentajes de PNFU que el utilizado en esta investigación, puede incrementar la estabilidad de estas mezclas.

1. M. O. Vizúete Montero, A. E. Miranda Campaña, R. M. Avilés Riera y M. J. Nole Salazar, «Reutilización de neumáticos fuera de uso para reducir niveles de contaminación y su aprovechamiento en espacios recreacionales,» *Ciencia Latina Revista Multidisciplinar*, vol. 7, pp. 6746-6761, nº 1, Enero 2023.
2. O. Campaña Cruz, S. Galeas Hurtado y V. Guerrero Barragán, «Obtención de asfalto modificado con polvo de caucho proveniente del reciclaje de neumáticos de automotores,» *Revista Politécnica*, vol. 36, pp. 1-6, nº 3, Septiembre 2015.
3. O. A. Lubo Gómez y R. A. Martínez Giraldo, «Asfaltos modificados con cauchos en vías primarias en las ciudades Santa Marta, Barranquillas y Bogotá como alternativa de mejoramiento de la capa de rodadura de los pavimentos flexibles entre los años 2012-2019,» *Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingenierías, Ingeniería civil*, vol. 1, pp. 1-10, nº 1, 2019.
4. S. Figueroa Infante, E. B. Fonseca Santillana y F. A. Reyes Lizcano, «Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado,» *Investigación y transferencia de la Universidad de la Salle*, vol. 13, pp. 45-70, nº 1, Enero 2009.
5. R. E. Vasquez Llamo, W. R. Vasquez Ramirez y S. P. Muñoz Pérez, «Uso de aditivos adherentes en el diseño de mezclas asfálticas en caliente: Una revisión,» *Revista Gaceta Técnica*, vol. 22, pp. 66-78, nº 1, Enero 2021.
6. Baldi, N. Cajina Cruz, J. P. Aguiar Moya y E. Camacho Garita, «Evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con residuos de PVC tipo blíster,» *Revista Infraestructura Vial*, vol. 23, pp. 13-22, nº 42, Julio 2021.
7. W. Cando, P. Bonilla, G. Yáñez, J. Bucheli, A. Muñoz, M. F. Orquera, L. Fernández y P. Espinoza Montero, «Efecto de la incorporación por vía seca de residuos de caucho obtenido tras su remoación de una pista de aterrizaje de aeropuerto en un asfalto AC-20,» *Revista Técnica de la facultad de Ingeniería*, vol. 43, pp. 3-11, nº 1, Enero 2020.
8. M. Calahorra, Z. Giménez, R. Herrera, J. Martínez y L. Salazar, «Análisis de ciclo de vida de mezcla asfáltica con/sin caucho: Estudio de caso,» *Revista nuevas tendencias en la construcción sostenible*, vol. 16, pp. 1-10, nº 17, Noviembre 2016.
9. P. Flores, A. Gatica, D. Trinidad y V. Sulca, «Uso de grano de caucho reciclado para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos: una revisión literaria,» *Investigatio*, vol. 18, pp. 34-49, Marzo 2022.
10. W. Al-Salih, «Using crumb rubber to improve the bituminous mixes: Experimental investigation of rutting behavior of flexible asphalt mix for road construction,» *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 1-8, nº 1527, 2020.
11. Z. Yildirim y M. Karacasu, «Modelado de residuos de caucho y fibra de vidrio con método de superficie de respuesta en mezcla asfáltica en caliente,» *Materiales de construcción y construcción*, pp. 11-19, nº 227, 2019.
12. L. M. Hoyos Díaz, S. P. Muñoz Pérez y K. d. C. Puicon Herrera, *Uso del caucho granulado en mezclas asfálticas: Una revisión literaria, Revista infraestructura Vial*, vol. 23, nº 41, pp. 11-19, 2021.
13. K. Ayala Cabrera y J. Heredia Miranda, *Mezclas asfálticas mejoradas con caucho de llantas añadido por vía seca, Guayaquil: Universidad Católica de Guayaquil*, 2019.
14. D. Y. Villamil Torres, *Análisis comparativo de parámetros de diseño de mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado (GRC) mediante la metodología de incorporación por vía húmeda vs vía seca, Bogotá*, 2022.
15. B. Rivela Carballal y J. D. Moscoso-Saquicela, «Estrategia de circularidad para la reducción de impactos: diseños de una mezcla asfáltica caliente con caucho reciclado en la provincia de Azuay,» *Green World Journal*, vol. 6, pp. 1-11, nº 2, Julio 2023.