

# *Diseño De Una Mezcla Asfáltica En Caliente Con Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)*

# 2

*Design Of A Hot Mix Asphalt With Reclaimed  
Asphalt Pavement (RAP)*

## **Autores**

**Jessica Gabriela Villafuerte Quimiz**

Estudiante de Maestría en Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador,  
[gabrielavillafuerte97@gmail.com](mailto:gabrielavillafuerte97@gmail.com),  
<https://orcid.org/0009-0001-7065-21651>

**Wesner Oliver Castro Garcia**

Ingeniero Civil, Profesional Independiente, Portoviejo, Manabí, Ecuador,  
[oliver-cg@hotmail.com](mailto:oliver-cg@hotmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0001-8725-84632>

**Eduardo Tejeda Piusseaut**

Docente en Universidad Técnica de Manabí, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador,  
[eduardo.tejeda@utm.edu.ec](mailto:eduardo.tejeda@utm.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-0589-99893>

# Diseño De Una Mezcla Asfáltica En Caliente Con Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)

# 2

## RESUMEN

En Ecuador, el reciclado de pavimentos asfálticos mediante la incorporación de Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP) no es una práctica común, a pesar de sus beneficios en la reducción del uso de nuevos agregados pétreos y el ahorro de asfalto, contribuyendo así a la preservación de los recursos naturales. En este estudio, se diseñó una mezcla asfáltica en caliente utilizando el método Marshall, incorporando un 30% de RAP y un 70% de agregado virgen. El proceso inició con la caracterización del RAP y el agregado nuevo, determinando la combinación óptima para lograr una granulometría dentro de la faja de 19 mm. A partir de la graduación del agregado, se estimó el contenido teórico de asfalto empleando las ecuaciones del Instituto de Asfalto. Posteriormente, se elaboraron briquetas de acuerdo con el método Marshall, variando el contenido de asfalto entre 5,5% y 7,5% en incrementos de 0,5%. Las propiedades Marshall y el análisis de densidad y vacíos permitieron determinar un Contenido Óptimo de Asfalto (COA) de 6,15%. Finalmente, se validaron los resultados mediante la fabricación de un nuevo conjunto de briquetas con dicho contenido de asfalto, confirmando el cumplimiento de los criterios Marshall para tráfico pesado.

**Palabras claves:** Método Marshall, mezcla asfáltica, pavimento asfáltico recuperado, reciclado de pavimento asfáltico.

## ABSTRACT

In Ecuador, asphalt pavements recycling through the incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is not a common practice, despite its benefits in reducing the use of new aggregates and saving asphalt, thus contributing to the preservation of natural resources. In this study, a hot-mix asphalt mixture was designed using the Marshall method, incorporating 30% RAP and 70% virgin aggregate. The process began with the characterization of the RAP and the new aggregate, determining the optimal combination to achieve a grading within the 19 mm range. Based on the aggregate grading, the theoretical asphalt content was estimated using the equations of the Asphalt Institute. Subsequently, briquettes were prepared according to the Marshall method, varying the asphalt content between 5.5% and 7.5% in 0.5% increments. Marshall properties and density and void analysis determined an Optimum Asphalt Content (OAC) of 6.15%. The results were finally validated by manufacturing a new set of briquettes with this asphalt content, confirming compliance with the Marshall criteria for heavy traffic.

**Keywords:** Marshall method, asphalt mixture, reclaimed asphalt pavement, asphalt pavement recycling.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP) es el hormigón asfáltico extraído de infraestructuras vigentes, está constituido por recursos no renovables como es el asfalto y los agregados, por lo cual su empleo garantiza la sostenibilidad en la construcción de pavimentos flexibles [1]. El RAP puede ser empleado para fabricar nuevas Mezclas Asfálticas en Caliente (HMA por sus siglas en inglés Hot Mix Asphalt), Mezclas Asfálticas Tibias (WMA por sus siglas en inglés Warm Mix Asphalt) y Mezclas Asfálticas en Frío (CMA por sus siglas en inglés Cold Mix Asphalt), para cada una existen particulares criterios de diseño que deben cumplirse para obtener una nueva mezcla satisfactoria [2].

Los estudios acerca del uso del RAP se han realizado desde los años 80 por parte del Departamento de Transporte de Illinois y la Universidad de Illinois, estos elaboraron un procedimiento de diseño e investigaron la contribución de este material en las mezclas [3]. En 2020, Zhu et al. [4] analizaron el rendimiento de una mezcla asfáltica de alto módulo con RAP, emplearon el método Marshall integrando los principios del método EME (Enrobé à Module Élevé que en español significa Mezcla Asfáltica de Modulo Elevado) para la preparación de la mezcla. Se implementó un método de regeneración modificado para controlar la variabilidad de la graduación del RAP y la débil adherencia entre el ligante virgen y envejecido. El rendimiento de la mezcla fue evaluado con pruebas de laboratorio. Se determinó que el método de regeneración modificado obtuvo una mezcla más estable y compacta con respecto al método tradicional, mientras que el rendimiento a temperaturas bajas permanece por debajo del normado. También, se prepararon muestras con varios contenidos de RAP para examinar su efecto. Se halló que con un 40% de RAP se obtuvo una mezcla óptima con respecto al módulo dinámico y susceptibilidad al daño por humedad, mientras que el rendimiento a temperaturas bajas es poco significativo con respecto al RAP.

En 2022, Abdel-Jaber et al. [5] estudiaron el empleo del RAP en mezclas asfálticas en caliente mediante el método Marshall, diseñaron cuatro mezclas asfálticas, la mezcla de control, mezclas con incorporación de 25%, 50% y 75% de RAP con contenidos de asfalto de 3,5% a 5,5% en incrementos de 0,5%. Se observó que la estabilidad mejoró con el incremento de RAP para mezclas 25% y 50% de RAP con contenidos de asfalto de 3,5% a 4,5%, inclusive, la mezcla con 75% de RAP con un contenido de asfalto de 4% tuvo el mayor valor de estabilidad que corresponde a 15,11 kN. También, los vacíos llenos con asfalto incrementaban conforme incrementaban los contenidos de asfalto en las mezclas con RAP, sin embargo, altos contenido de RAP pueden alterar las propiedades mecánicas de la mezcla, el flujo y los vacíos en el agregado mineral disminuyeron en comparación con la mezcla de control.

En 2023, Kumar et al. [6] evaluaron mezclas asfálticas en caliente con incorporación de RAP en un intervalo de 0% a 30% en incremento de 10%, se obtuvo la estabilidad Marshall y resistencia a la tracción indirecta. Se determinó que la mezcla asfáltica con 20% de RAP es la adecuada.

El método Marshall, desarrollado y difundido por el Instituto de Asfalto [7], es el procedimiento más ampliamente utilizado a nivel internacional y el más empleado en Ecuador para el diseño de mezclas asfálticas. En esta investigación, se aplica este método para determinar el contenido óptimo de asfalto mediante un diseño de mezcla en caliente destinado a tráfico pesado, utilizando Pavimento Asfáltico Recuperado.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La secuencia para un reciclaje de mezcla asfáltica en caliente debe iniciar con la graduación y contenido de asfalto del RAP, graduación del agregado nuevo, calcular la combinación de los agregados, obtener la demanda aproximada de asfalto de la combinación de los agregados, estimar el porcentaje de asfalto nuevo y finalmente efectuar las pruebas de la mezcla del método Marshall o Hveem [8], los cuales se realizan conforme a las normas ASTM D6927 [9] y ASTM D1560 [10], respectivamente.

El método Marshall permite su uso en proyectos de laboratorio y control de obra para mezclas asfálticas cuyo Tamaño Máximo del agregado (TM) es de 25 mm o inferior. Este procedimiento se caracteriza por desarrollar un análisis de densidades-vacíos y ensayos de estabilidad y fluencia a especímenes de mezcla asfáltica compactada de 63,5 mm de alto y 101,6 mm de diámetro [11]. Estas muestras se elaboran siguiendo procedimientos específicos descritos en la norma ASTM D6926 [12].

Los materiales que conformarán la mezcla asfáltica a diseñar corresponden a: Agregado de 19 mm y cisco proveniente de la cantera Uruzca localizada en el km 11 ½ autovía Portoviejo-Manta, arena de río del cantón Balzar, el asfalto de la Refinería Estatal de Esmeraldas y el RAP de la vía Puerto-Aeropuerto de Manta, carretera con flujo de tráfico pesado.

## 2.1. Caracterización Del Agregado Nuevo

Se inició con la caracterización del agregado nuevo que comprende al agregado de 19 mm, cisco y arena. La caracterización constó del análisis granulométrico, el cual proporciona la distribución de las partículas de acuerdo con el tamaño [13]. Se determinó la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de agregados gruesos y finos con la finalidad de proveer un valor promedio que simbolice la muestra de una fracción sólida de una cantidad considerable de partículas (excluyendo el volumen de vacíos entre partículas) [14], [15].

En las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, se establecen las características que deben cumplir los agregados que conforman las mezclas asfálticas [16]. Por ello, se verificó que la resistencia a la degradación del agregado grueso, determinada mediante la máquina de Los Ángeles, fuera inferior al 40% [17]. Asimismo, se comprobó que la desintegración de los agregados expuestos a sulfato de sodio no superara el 12%, lo que permite simular su comportamiento frente a la intemperie [18]. Además, se verificó que el equivalente de arena fuera superior al mínimo del 50% establecido para tráfico pesado, lo que limita la presencia de finos similares a la arcilla en un agregado [19]. En cuanto a la forma de las partículas, se constató que el contenido de partículas planas y/o alargadas fuera inferior al 10% [20] y la presencia de materiales deletéreos en los áridos se confirmó como menor al 1% [21].

En la Tabla 1, se observan los resultados de los diversos ensayos de caracterización de los agregados utilizados en el diseño de la mezcla asfáltica, los cuales cumplen con los requerimientos establecidos en las normativas.

**Tabla 1-** Resultados de la caracterización del agregado virgen

Ensayos	Agregado de 19 mm	Cisco	Arena	Especificaciones	Norma
Gravedad específica (SH) (kg/m <sup>3</sup> )	2685	2566	2562	-	
Gravedad específica (SSS) (kg/m <sup>3</sup> )	2746	2646	2653	-	
Gravedad específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2858	2787	2816	-	
Absorción (%)	2,25	3,09	3,52	-	
Degradación (%)	21	-	-	< 40%	ASTM C131
Intemperismo (%)	10	-	-	< 12%	ASTM C88
Equivalente de arena (%)	-	76	-	> 50%	ASTM D2419
Partículas planas y/o alargadas (%)	4	-	-	< 10 %	ASTM D4791
Deletéreos (%)	0,62	0,85	0,80	< 1%	ASTM C142

## 2.2. Caracterización del RAP

El RAP utilizado como agregado en la mezcla fue obtenido mediante un proceso de fresado en una vía en rehabilitación. Se le realizó el análisis granulométrico, además de los ensayos de densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de agregados gruesos y finos, cuyos resultados son mostrados en la Tabla 2.

**Tabla 2-** Gravedades específicas y porcentajes de absorción del RAP

Gravedad específica	RAP grueso	RAP fino
Gravedad específica (SH) (kg/m <sup>3</sup> )	2572	2346
Gravedad específica (SSS) (kg/m <sup>3</sup> )	2660	2404
Gravedad específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2821	2490
Absorción (%)	3,42	2,46

Adicionalmente, se determinó el contenido de asfalto presente en el RAP a través de la norma ASTM D2172, titulada "Métodos de prueba estándar para la extracción cuantitativa de aglutinante asfáltico de mezclas asfálticas". Esta norma propone cinco métodos que difieren principalmente por el equipo de extracción, manejo del disolvente y nivel de automatización [22]. El disolvente utilizado fue el tricloroetileno y el procedimiento aplicado corresponde al método A, el cual emplea una centrifuga de extracción. El contenido de asfalto se determinó por diferencia de peso, obteniéndose un valor de 4,21%.

### 2.3. Graduación del agregado combinado

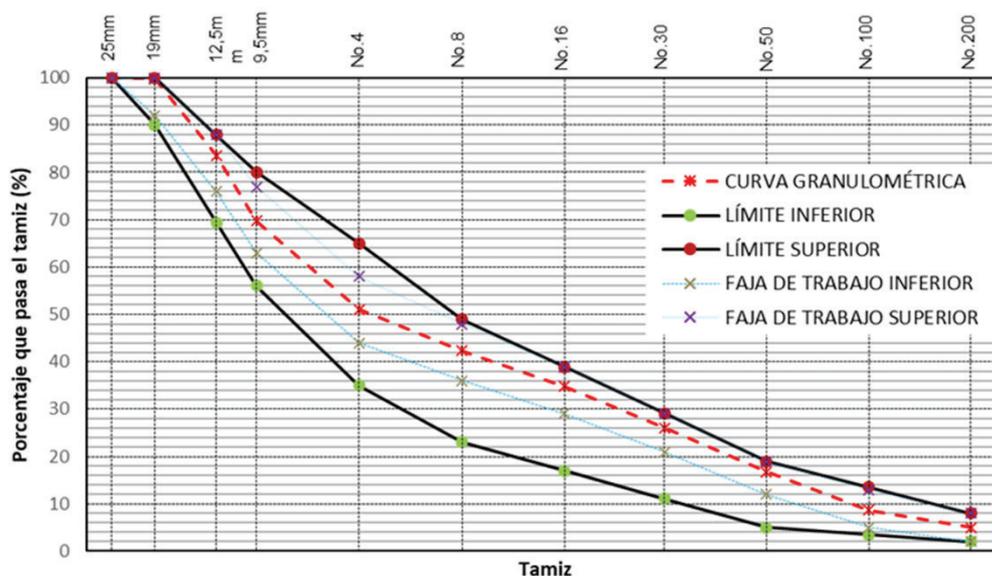
La graduación de los agregados que hace referencia a la distribución de tamaños de las partículas que conformarán la mezcla asfáltica, es un proceso de gran envergadura, tiene influencia en la estabilidad, flujo, vacíos de aire, vacíos de agregado mineral, vacíos llenos con asfalto y densidad de la mezcla asfáltica. Para representar la granulometría, se emplea comúnmente una gráfica semilogarítmica, donde en el eje de las abscisas se encuentra el tamaño de abertura del tamiz en milímetros cuya escala es logarítmica y en el eje de las ordenadas se presenta el porcentaje pasante por cada tamiz con escala lineal. La selección de una faja granulométrica adecuada está dada en función del Tamaño Máximo Nominal del agregado (TMN) y los rangos de porcentajes pasantes para cada tamiz que definen las líneas de control, como lo indica la norma ASTM D3515 [23].

En la Tabla 3 se muestra la dosificación de los agregados que conforman la mezcla asfáltica, la granulometría resultante de la mezcla, los límites mínimos y máximos establecidos para la mezcla asfáltica densa de un TMN de 19mm.

**Tabla 3-** Combinación de agregados de la mezcla asfáltica con RAP

Material	Porcentaje utilizado (%)	Graduación combinada de la mezcla										
		25mm	19mm	12,5m m	9,5m m	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200
Agregado de 19 mm	42	100,0	99,4	62,2	33,1	1,8	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
RAP	30		100,0	98,2	92,8	76,3	58,7	45,2	34,4	25,2	12,4	6,0
Cisco	14				100,0	97,2	76,2	59,2	46,0	35,1	25,0	16,6
Arena	14				100,0	98,8	96,2	88,6	62,2	26,8	6,4	2,4
<b>Mezcla obtenida</b>		100,0	99,7	83,6	69,8	51,1	42,3	34,8	26,0	16,8	8,7	5,0
Especificación ASTM D3515	Inferior	100	90		56	35	23			5		2
	Superior	100	100		80	65	49			19		8
Media		100	95		68	50	36			12		5
Tolerancias		±8	±8	±8	±7	±7	±6	±6	±5	±5	±4	±3
Faja de trabajo inferior		100,0	92,0	76,0	63,0	44,0	36,0	29,0	21,0	12,0	5,0	2,0
Faja de trabajo superior		100,0	100,0	87,9	77,0	58,0	48,0	38,9	29,1	19,0	13,0	8,0

La mezcla asfáltica resultante quedó compuesta por un 42% de agregado de 19 mm", 14% cisco, 14% arena y 30% RAP, cuya curva granulométrica se muestra en la Figura 1. Como se observa está dentro de las líneas de control normadas y las fajas de trabajos obtenidas que consideran las tolerancias, sin puntos de inflexión notables y sigue una forma similar convexa.



**Fig. 1-** Curva granulométrica de la combinación de agregados de la mezcla asfáltica

La elección de un 30% de RAP como porcentaje de sustitución se basa en un informe técnico titulado “Pavimento asfáltico recuperado en mezclas asfálticas: Estado de la práctica” de la Administración Federal de Carreteras (FHWA por sus siglas en inglés Federal Highway Administration), el cual menciona que con base a una evaluación de pavimentos con un 30% de RAP a través del programa Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo (LTPP por sus siglas en inglés Long-Term Pavement Performance) se determinó que el rendimiento de los pavimentos que contienen hasta un 30% de RAP es similar al de los pavimentos construidos con materiales vírgenes [24].

## 2.4. Porcentaje Teórico De Asfalto

La demanda aproximada de asfalto para la mezcla, con la combinación de agregados determinada, se puede establecer mediante el método de prueba estándar para el equivalente centrífugo de keroseno (CKE por sus siglas en inglés Centrifuge Kerosine Equivalent), ensayo basado en la norma ASTM D5148 y que forma parte del procedimiento del método Hveem para el diseño de mezclas asfálticas en caliente [25]. También puede determinarse a través de una ecuación empírica cuyos parámetros dependen de la granulometría y absorción combinadas de los agregados [8].

$$P = 0,035a + 0,045b + Kc + F \quad (1)$$

Donde:

$P$ : Demanda total aproximada de asfalto de la mezcla, en porcentaje en peso de la mezcla

$a$ : Porcentaje de agregado mineral retenido en el tamiz de 2,36 mm (No. 8)

$b$ : Porcentaje de agregado mineral que pasa por el tamiz de 2,36 mm (No. 8) y retenido en el tamiz de 75  $\mu$ m (No. 200)

$c$ : Porcentaje de agregado mineral que pasa por el tamiz de 75  $\mu$ m (No. 200)

$K$ : 0,15 para el 11-15% que pasa por el tamiz de 75  $\mu$ m (No. 200)

0,18 para el 6-10% que pasa por el tamiz de 75  $\mu$ m (No. 200)

0,20 para el 5% o menos que pasa por el tamiz de 75  $\mu$ m (No. 200)

$F$ : 0-2. Basado en la absorción del agregado liviano o pesado. En ausencia de otros datos, se sugiere un valor de 0,7.

Sustituyendo en la ecuación (1), el porcentaje de asfalto  $P$  tiene un valor de 6,70%.

## 2.5. Porcentaje De Asfalto Nuevo

La cantidad de asfalto nuevo a ser incorporado a la mezcla asfáltica con RAP se obtiene mediante una ecuación dada en uno de los capítulos de Reciclaje de Mezcla Asfáltica en Caliente del Instituto de Asfalto [8], que depende de la demanda aproximada de asfalto de la mezcla, el contenido de asfalto del RAP y el conjunto de porcentaje de agregado mineral nuevo y recuperado.

$$P_{nb} = P_b - \frac{(100-r)P_{sb}}{100} \quad (2)$$

Donde:

$P_{nb}$ : Asfalto adicional y/o agente de reciclaje en la mezcla reciclada

$P_b$ : Demanda total aproximada de asfalto de la mezcla, en porcentaje en peso de la mezcla

$P_{sb}$ : Contenido de asfalto de la mezcla recuperada (RAP)

$r$ : Porcentaje de material de agregado nuevo y/o recuperado con respecto al agregado total en la mezcla reciclada

Empleando la ecuación (2) se obtuvo el porcentaje adicional de asfalto ( $P_{nb}$ ) que debe utilizarse para los diferentes contenidos de asfalto en las briquetas, según el método Marshall.

## 2.6. Resistencia del flujo plástico de mezclas bituminosas

Para el diseño de la mezcla asfáltica se elaboraron tres especímenes por cada contenido de asfalto que van desde 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0% y 7,5%, empleando 30% de RAP y 70% de agregado virgen, en todas las muestras. Los especímenes de mezcla asfáltica compactada son de 63,5 mm de alto y 101,6 mm de diámetro.

Con la dosificación de los agregados definidos, se procedió a secarlos en el horno a una temperatura de 110°C para posteriormente tamizarlos. Para cada espécimen se pesó en varios recipientes la cantidad de cada porción de tamaño requerida para elaborar el espécimen con las dimensiones normadas cuyo peso es de aproximadamente 1200 g. Los agregados fueron calentados en el horno a una temperatura de 155 °C, luego al retirarlos fueron mezclados en seco, creándose un cráter para adicionar el asfalto cuya temperatura debía encontrarse a 150 °C, para finalmente mezclarlos uniformemente en un tiempo no superior a 90 segundos [9]. Es importante mencionar, que el RAP fue calentado a una temperatura de 125 °C, lo cual evita envejecer el asfalto existente al calentarlo por separado y al incorporarlo en conjunto con los agregados vírgenes y el asfalto nuevo.

Simultáneamente a la preparación de la mezcla asfáltica, la placa base, el conjunto de molde y la cara del martillo de compactación se limpiaron y se calentaron en una placa caliente a una temperatura entre 93,3 y 148,9 °C. Previo al vertido de la mezcla asfáltica en el interior del molde, se colocó un papel filtro en el fondo para impedir la adherencia con el mismo. Se vertió la mezcla asfáltica en el molde y se le hincó con una espátula 15 veces por el perímetro y 10 veces en el interior, colocando otro papel filtro e introduciéndose el martillo de compactación en el molde [9], para aplicar a la cara superior e inferior 75 golpes con una caída libre de 457,2 mm, correspondiente a un tráfico pesado de acuerdo con los criterios del método Marshall dados por el Instituto de Asfalto [7]. Después de la compactación, se dejó enfriar por aproximadamente 2 horas, se retiraron las muestras de los moldes y se colocaron sobre una superficie plana y lisa para que reposen a temperatura ambiente durante la noche (mínimo 12 horas). Se procedió a medir y pesar las muestras [9].

Desarrollado el proceso de mezclado y compactación, los especímenes fueron sometidos a baño María entre 30 y 40 min a una temperatura de 60 °C, para luego colocar el espécimen en el segmento inferior del cabezal de rotura y sobre la muestra colocar el segmento superior del cabezal de rotura, este conjunto completo fue puesto en su respectiva posición en la prensa Marshall para poder aplicar carga a una velocidad constante de 50,8 mm/min hasta llegar a la carga máxima (estabilidad Marshall). Simultáneamente a la obtención de la estabilidad Marshall, se sostuvo el medidor de deformaciones sobre la barra guía y cuando empezó a disminuir la carga, se anotó la lectura como valor de flujo [9].

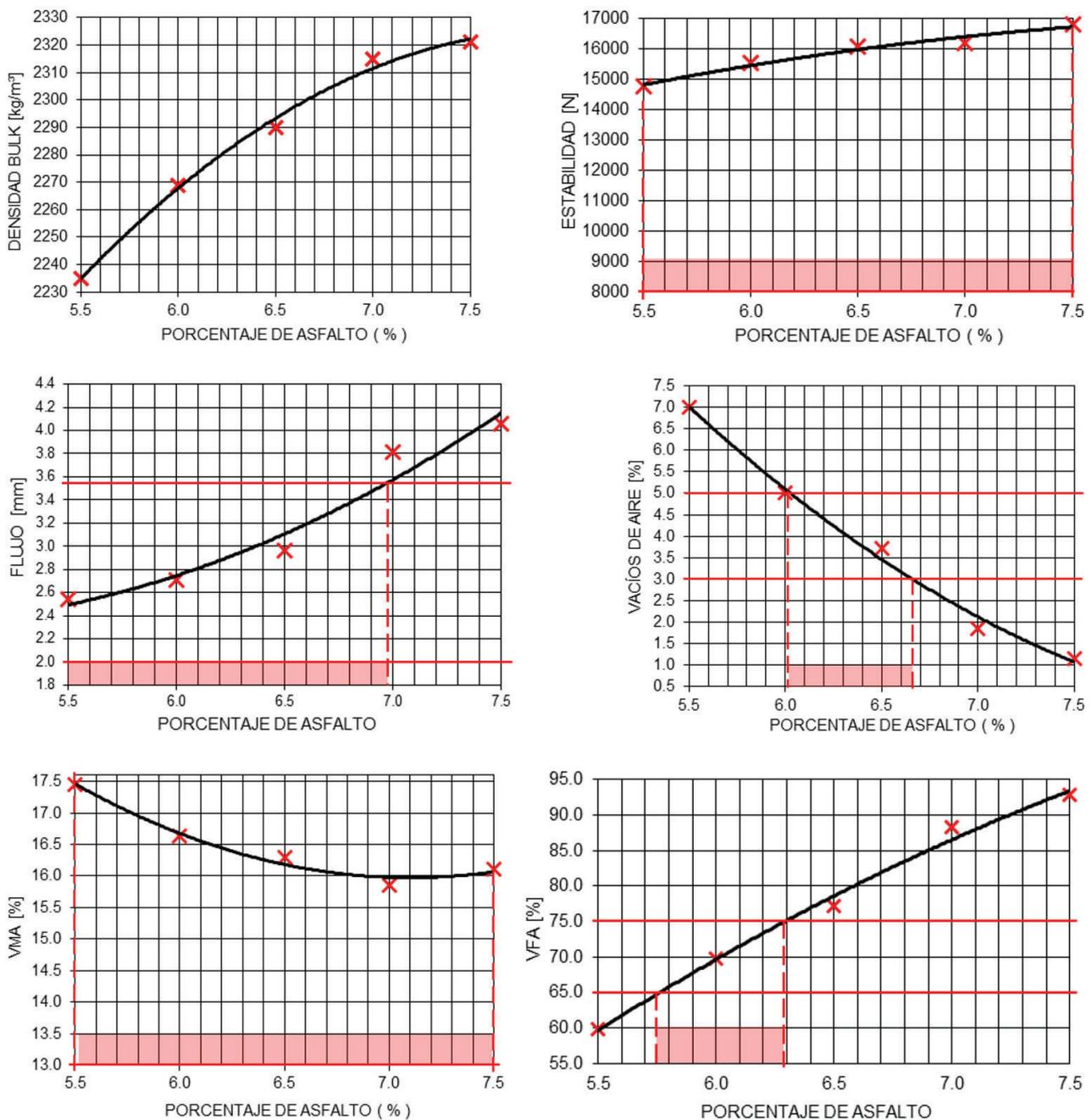
El análisis de densidad-vacíos fue desarrollado en dos fases. La primera fase fue previo a la falla de las briquetas, en la cual se determinó la densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes (ASTM D2726), también conocida como densidad Bulk [26]. La segunda fase fue culminado el ensayo de estabilidad y flujo, en la cual se determinó la gravedad específica máxima teórica de mezclas de pavimento bituminoso no compactadas a 25°C (ASTM D2041), también llamada densidad Rice [27], parámetros que son afectados por la constitución de los materiales en función de sus propiedades y dosificación.

Empleando la gravedad específica de la mezcla de los agregados, densidad Bulk y la densidad Rice, se calculó el porcentaje de vacíos de aire, porcentaje de vacíos en el agregado mineral y porcentaje de vacíos llenos con asfalto.

## 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 3.1. Selección del contenido óptimo de asfalto

Se elaboraron un total de quince especímenes, tres para cada contenido de asfalto desde 5,5% hasta 7,5% con incrementos de 0,5%. Los resultados de los ensayos de densidad Bulk, Estabilidad y Flujo, así como con los cálculos de los porcentajes de vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos con asfalto (VFA) para cada contenido de asfalto fueron representados en diferentes gráficos, en conjunto con los criterios Marshall para una mezcla asfáltica de tráfico pesado dados por el Instituto de Asfalto que corresponde a: Estabilidad mínima de 8006 N, el flujo debe estar entre 2,032 mm y 3,556 mm, los vacíos de aire están entre 3% y 5%, el mínimo de los vacíos en el agregado mineral es de 13% y los vacíos llenos con asfalto deben estar entre 65% y 75% [7], como se muestra en la Fig. 2.



**Fig. 2-** Gráficas de las propiedades Marshall para diferentes contenidos de asfalto

Se pudo observar que la densidad Bulk aumentó con el incremento del contenido de asfalto, este comportamiento se debe a que un mayor contenido de ligante mejora el recubrimiento de los agregados y facilita una mejor distribución durante la compactación, reduciendo los vacíos de aire. Aunque teóricamente esta densidad alcanza un máximo y luego disminuye con exceso de asfalto.

Al igual que la densidad, la estabilidad aumentó con el incremento del contenido de asfalto, esto sucede debido a una mayor cohesión del ligante y mejor adherencia entre el asfalto y los agregados, lo que incrementa la resistencia de la mezcla. Tampoco se pudo evidenciar el punto en el que un exceso de ligante disminuya la estabilidad.

Con respecto al flujo, incrementó con el aumento del contenido de asfalto, esto se debe a que a medida que el asfalto recubre en mayor proporción los agregados, la mezcla tiende a volverse más plástica, permitiendo mayores deformaciones sin fracturarse. Aunque valores elevados podrían indicar una mezcla blanda y pérdida de estabilidad.

En el análisis de vacíos, se observó que el porcentaje de vacíos de aire disminuyó a medida que incrementó el contenido de asfalto, debido a una mayor compactación y menor espacio no ocupado. En cuanto al porcentaje de vacíos en el agregado mineral, mostraron una tendencia descendente inicial, seguida de un aumento, lo cual indica el paso de una mezcla densa a una con exceso de ligante. Finalmente, el porcentaje de vacíos llenos con asfalto aumentó de forma continua, reflejando una mayor proporción de vacíos ocupados por el ligante.

El análisis de los gráficos, en comparación con las especificaciones de la mezcla, permite establecer un rango de contenido de asfalto que cumple con cada uno de los requisitos evaluados. Asimismo, se determina el intervalo en el que se satisfacen simultáneamente todas las propiedades exigidas, lo que permite seleccionar el contenido óptimo de asfalto. Para la mezcla con un 30 % de RAP, el porcentaje óptimo de asfalto determinado es de 6,15 %.

### 3.2. Comprobación De Propiedades Marshall Con El Contenido Óptimo De Asfalto

Para validar los resultados, finalmente se elaboraron tres briquetas de comprobación con el contenido óptimo de asfalto obtenido de 6,15%, las que fueron sometidas a los ensayos respectivos para la obtención de las propiedades Marshall. Los resultados se muestran en la Tabla 4, en la cual se evidencia que la mezcla asfáltica cumplió con los parámetros establecidos en la normativa para una mezcla densa de tráfico pesado.

**Tabla 4-** Propiedades de la mezcla asfáltica con el contenido óptimo de asfalto

Propiedades	Resultados	Especificaciones
Estabilidad (N)	15454	> 8006
Flujo (mm)	2,88	2,032 - 3,556
Vacíos en el agregado mineral (%)	16,56	> 13
Vacíos de aire (%)	4,63	3 - 5
Vacíos llenos con asfalto (%)	72,01	65 - 75

## 4. CONCLUSIONES

La mezcla asfáltica fue diseñada con una distribución granulométrica correspondiente a un TMN de 19 mm, incorporando un 30% de RAP y un 70% de agregado virgen. La combinación de agregados resultante consistió en un 42% de árido de tamaño de 19 mm, un 14% de cisco, un 14% de arena y un 30% de RAP, obtenido del fresado de un pavimento en proceso de rehabilitación.

Los ensayos de caracterización indicaron que el contenido de asfalto en la fracción recuperada (RAP) era del 4,21%. A partir del diseño de la mezcla, se determinó un contenido óptimo de asfalto del 6,15%.

Los resultados obtenidos evidencian que la mezcla cumple holgadamente con los requisitos de estabilidad exigidos para mezclas densas destinadas a tráfico pesado, con un valor promedio de 15454 N. Asimismo, el flujo registrado fue de 2,88 mm, dentro del rango especificado de 2,032 a 3,556 mm. En cuanto al porcentaje de vacíos en la mezcla, el valor obtenido fue del 4,63%, lo que se encuentra dentro del intervalo normativo de 3% a 5% para mezclas densas.

La incorporación del 30 % de RAP en la mezcla asfáltica en caliente ha demostrado que, con los áridos empleados, es posible obtener una mezcla cuyas propiedades mecánicas cumplen con las especificaciones técnicas establecidas por el Instituto del Asfalto. Los resultados de la investigación confirman que este porcentaje permite satisfacer los requisitos estructurales exigidos para mezclas diseñadas para soportar tráfico pesado. No obstante, la presencia de asfalto envejecido en el material fresado es un factor determinante, ya que sus características influirán directamente en la determinación del contenido óptimo de asfalto de la nueva mezcla, afectando su desempeño y durabilidad.

1. G. Tarsi, P. Tataranni, and C. Sangiorgi, "The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: A review," *Materials*, vol. 13, no. 18, pp. 1–26, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13184052>
2. J. Montañez, S. Caro, D. Carrizosa, A. Calvo, and X. Sánchez, "Variability of the mechanical properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) obtained from different sources," *Constr Build Mater*, vol. 230, pp. 1–12, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116968>.
3. A. S. Figueroa Infante and E. Fonseca Santanilla, "Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR," *Infraestructura Vial*, vol. 22, no. 39, pp. 20–28, Jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.15517/iv.v22i39.41205>
4. J. Zhu, T. Ma, J. Fan, Z. Fang, T. Chen, and Y. Zhou, "Experimental study of high modulus asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement," *J Clean Prod*, vol. 263, pp. 1–11, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121447>.
5. M. Abdel-Jaber, R. A. Al-shamayleh, R. Ibrahim, T. Alkhrissat, and A. Alqatamin, "Mechanical properties evaluation of asphalt mixtures with variable contents of reclaimed asphalt pavement (RAP)," *Results in Engineering*, vol. 14, pp. 1–7, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100463>.
6. S. Kumar Pradhan, U. Das, and A. Ranjan Patra, "Utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in HMA mixtures for flexible pavement construction," *Mater Today Proc*, May 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.464>.
7. Asphalt Institute, MS2: Asphalt Mix Design Methods, 7th ed. Lexington, KY, USA: Asphalt Institute, 2014. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/558949727>
8. Asphalt Institute, MS-20: Asphalt Hot-Mix Recycling, 2nd ed. College Park, MD, USA: Asphalt Institute, 1986. [Online]. Available: <https://p2infohouse.org/ref/33/32444.pdf>
9. ASTM D6927-22, Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures, vol. 04.03. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022. doi: <https://doi.org/10.1520/D6927-22>.
10. ASTM D1560-15, Standard Test Methods for Resistance to Deformation and Cohesion of Asphalt Mixtures by Means of Hveem Apparatus (Withdrawn 2024). West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2015. [Online]. Available: <https://store.astm.org/d1560-15.html>
11. Asphalt Institute, MS-4: The Asphalt Handbook, 7th ed. Lexington, KY, USA: Asphalt Institute, 2007. [Online]. Available: <https://idoc.pub/documents/manual-del-asfalto-instituto-del-asfaltodecrypted-34m7w87d1p46>
12. ASTM D6926-20, Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus, vol. 04.03. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2020. doi: <https://doi.org/10.1520/D6926-20>.
13. ASTM C136/C136M-19, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, vol. 04.02. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2019. doi: [https://doi.org/10.1520/C0136\\_C0136M-19](https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19).
14. ASTM C127-24, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, vol. 04.02. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2024. doi: <https://doi.org/10.1520/C0127-24>.
15. ASTM C128-22, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, vol. 04.02. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022. doi: <https://doi.org/10.1520/C0128-22>.
16. Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes. MOP-001-F, 1era ed. Quito, Ecuador: MOP, 2002. [Online]. Available: [https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/MPR\\_Chimborazo\\_Cumanda\\_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf](https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/MPR_Chimborazo_Cumanda_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf)
17. ASTM C131/C131M-20, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, vol. 04.02. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2020. doi: [https://doi.org/10.1520/C0131\\_C0131M-20](https://doi.org/10.1520/C0131_C0131M-20).
18. ASTM C88/C88M-24, Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, vol. 04.02. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2024. doi: [https://doi.org/10.1520/C0088\\_C0088M-24](https://doi.org/10.1520/C0088_C0088M-24).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

19. ASTM D2419-22, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, vol. 04.03. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022. doi: [https://doi.org/ 10.1520/D2419-22](https://doi.org/10.1520/D2419-22)
20. ASTM D4791-19(2023), Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate, vol. 04.03. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2019. doi: [https://doi.org/ 10.1520/D4791-19R23](https://doi.org/10.1520/D4791-19R23)
21. ASTM C142/C142M-17(2023), Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates, vol. 04.02. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017. doi: [https://doi.org/ 10.1520/C0142\\_C0142M-17R23](https://doi.org/10.1520/C0142_C0142M-17R23).
22. ASTM D2172/D2172M-24, Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures, vol. 04.03. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2024. doi: [https://doi.org/ 10.1520/D2172\\_D2172M-24](https://doi.org/10.1520/D2172_D2172M-24).
23. ASTM D3515-01, Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures (Withdrawn 2009). West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2001. [Online]. Available: <https://store.astm.org/d3515-01.html>
24. Federal Highway Administration, "Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice," Washington, D.C., USA, 2011. [Online]. Available: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40918>
25. ASTM D5148-10, Standard Test Method for Centrifuge Kerosine Equivalent (Withdrawn 2018). West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2010. [Online]. Available: <https://store.astm.org/d5148-10.html>
26. ASTM D2726/D2726M-21, Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures, vol. 04.03. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2021. doi: [https://doi.org/10.1520/D2726\\_D2726M-21](https://doi.org/10.1520/D2726_D2726M-21)
27. ASTM D2041/D2041M-19, Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures, vol. 04.03. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2019. doi: [https://doi.org/ 10.1520/D2041\\_D2041M-19](https://doi.org/10.1520/D2041_D2041M-19)