ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.1060

Design and evaluation of asphalt mixtures using 30% and 40% reclaimed asphalt pavement (RAP) contributions

David Andres Murillo Paredes, Ing. Civil[1], Osmán Enrique Pérez Zavala, Ing. Civil[2], Ada S. Rodríguez Máster Ing. en Estructuras[3]
[1,2,3] Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Honduras, *davidmurillo@unitec.edu, osman.perez07@unitec.edu, ada.rodriguez@unitec.edu.hn*

Abstract*– Demolition of deteriorated pavements generates large volumes of waste that contaminate the environment. The use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in the production of Hot Asphalt Mixtures (HMA) presents a sustainable alternative that turns waste into an integral component of new pavements. The objective of the research was to analyze the properties of dense HMA mixtures incorporating RAP with 30% and 40% contributions in order to identify the benefits that its production can offer. Using the control mix from a predecessor study as a comparative base, the research aimed to identify the influence that RAP contributions will have on the stability and flow of the HMA through the Marshall method and on the tensile strength in relation to the change in moisture resistance. For the HMA with a 30% RAP contribution, an optimal asphalt content of 5.3%, a Marshall stability of 3564lbs, a flow of 11.64/100", and a tensile strength ratio of 82.6% were determined. For the HMA with a 40% RAP contribution, an optimal asphalt content of 5.23%, a Marshall stability of 3502lbs, a flow of 10.97/100", and a tensile strength ratio of 80.4% were determined. It was concluded that with the increase of RAP, the optimal asphalt content decreases and the susceptibility to moisture damage increases. All determined results were within the standards, so the use of RAP represents a good alternative to HMA made with 100% virgin aggregates.

***Keywords*—Asphalt, Pavement, Recycled, Resistance, Mechanical Properties.**

Diseño y evaluación de mezclas asfálticas con 30% y 40% de pavimento asfáltico recuperado (RAP)

David Andres Murillo Paredes, Ing. Civil[1], Osmán Enrique Pérez Zavala, Ing. Civil[2], Ada S. Rodríguez Máster Ing. en Estructuras[3]
[1,2,3] Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Honduras, *davidmurillo@unitec.edu, osman.perez07@unitec.edu, ada.rodriguez@unitec.edu.hn*

Resumen* – Los trabajos de demolición de pavimentos deteriorados generan grandes volúmenes de desperdicios que contaminan el ambiente. La utilización de pavimentos asfálticos recuperados (RAP) en la creación de mezclas asfálticas calientes (MAC) se presenta como una alternativa sostenible que convierte un desecho en un elemento integral de nuevos pavimentos. El objetivo de la investigación fue analizar las propiedades de MAC densas que incorporan RAP utilizando aportes de 30% y 40% con el fin de identificar los beneficios que puede ofrecer su producción. Utilizando la mezcla control de una investigación predecesora como base comparativa, la investigación procuró identificar la influencia que tienen los aportes de RAP en la estabilidad y flujo de las MAC mediante el método Marshall y en la resistencia a la tracción indirecta frente al cambio en la resistencia a la humedad. Para las MAC con un aporte de 30% de RAP se determinó un contenido óptimo de asfalto de 5.3%, estabilidad Marshall de 3564, un flujo de 11.64/100", y una resistencia tensil retenida de 82.6. Para las MAC con aporte de 40% de RAP se determinó un contenido óptimo de asfalto de 5.23%, estabilidad Marshall de 3502lbs, un flujo de 10.97/100", y una resistencia tensil retenida de 80.4. Se concluyó que, con el incremento de RAP, disminuye el contenido óptimo de asfalto e incrementa la susceptibilidad al daño por humedad. Todos los resultados determinados se encuentran dentro de normativa, por lo que el uso de RAP representa una buena alternativa a las MAC con 100% de agregados vírgenes.

Palabras clave* — Asfalto, Pavimento, Reciclado, Resistencia, Propiedades Mecánicas.

I. Introducción

Las carreteras actuales cubren una distancia total de 16.3 millones de kilómetros del planeta y se estima que para el año 2050 esta cifra suba a 25 millones. Como cualquier estructura creada por el hombre, los pavimentos tienen un tiempo de vida útil, por lo que después de su uso deben de ser removidos y desechados utilizando la tierra disponible y contaminando el medio ambiente [1]. Estos pavimentos antiguos son fresados y removidos en partes. El material fresado, que en este punto es considerado un desperdicio, es luego almacenado en sitios de construcción, basureros municipales o terrenos baldíos en grandes cantidades, causando contaminación ambiental tanto visual como terrenal [2]. Según el Instituto Nacional de Estadística, el concreto asfáltico representa un 56.15% de la red principal del Honduras. Considerando que los pavimentos asfálticos deben de reemplazarse cada 5 a 20 años, se espera que la cantidad de desecho de pavimento incremente y con esta el espacio requerido para su almacenamiento; sumándosele el costo de mantenimiento y agregados para las nuevas mezclas asfálticas [3]. Sumándose al problema, debido al aumento de las emisiones de gases tóxicos (como el monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y CO2), los trabajos de cantera han experimentado un declive en las últimas décadas; resultando en una escasez de áridos gruesos y un aumento de sus costos [4]. Con el alto incremento de demanda de carreteras, se ha vuelto una necesidad buscar alternativas para la creación de concreto asfáltico que reutilicen materiales que de otra manera serían considerados inutilizables.

Desde la década de los 90, el principio de sostenibilidad surgió como uno de los objetivos de desarrollo creados por las Naciones Unidas, generando esfuerzo en la comunidad de investigación para crear alternativas sostenibles, a partir de donde surgió la técnica de reutilización del pavimento asfáltico recuperado (RAP) en mezclas asfálticas [5]. La iniciativa busca reutilizar los fragmentos de pavimentos asfálticos fresados en la creación de nuevas mezclas asfálticas. El pavimento asfáltico recuperado (RAP) se ha utilizado ampliamente en la búsqueda de nuevas mezclas asfálticas en caliente (MAC) y su alta resistencia a los daños más comunes en las carreteras ha impulsado su uso en mayores cantidades. La utilización de RAP en MAC no es un concepto nuevo y ha sido utilizado con alto éxito desde los 70 en países europeos y otras partes del mundo [6]. Un estudio realizado en Chile reveló que las MAC con RAP logran una mayor aportación al uso eficiente de recursos naturales, innovación, economía, y salud; en comparación con mezclas asfálticas tibias y mezclas con aditivos químicos [7]. Las mezclas asfálticas que contienen RAP son mucho más rígidas y resistentes en comparación a las mezclas que solo tienen materiales vírgenes, debido al endurecimiento que experimenta el ligante del RAP a lo largo de su vida útil [8]. En comparación a mezclas asfálticas templadas o frías, las MAC proporcionan el mayor rendimiento [9]. Dependiendo del tipo de gradación, las mezclas asfálticas en caliente (MAC) se pueden clasificar en tres grados diferentes: Densas, abiertas y huecas. Una MAC densa es aquella que es densamente graduada de manera que sea impermeable una vez colocada [10]. La incorporación de RAP en MAC densas influye en las propiedades Marshall de diseño de las mezclas. Se ha observado que, a medida que incrementa el aporte de RAP, el valor de estabilidad Marshall, los vacíos en la mezcla y el contenido óptimo de asfalto disminuyen [11]. De la misma manera, la resistencia a la tracción (TSR) disminuye con el aumento de contenido de

RAP [12]. Respecto al uso de RAP, se ha demostrado que debe utilizarse solamente como reemplazo parcial de agregados vírgenes [13]. Múltiples países, como Estados Unidos y Dinamarca, han establecido un máximo aporte de RAP de 30% en base a regulaciones nacionales; otros países, como Alemania y Bélgica, elevan este límite a 100% [14]. No obstante, no se puede utilizar 100% de RAP de manera efectiva sin necesidad de añadir aditivos [15]. Entre las principales ventajas del uso de RAP se encuentra la reducción de la huella de carbono, mejora de calidad del aire y agua, y la desviación de residuos de los vertederos [16].

El propósito de la investigación es detallar un análisis de las mezclas asfálticas en caliente densas con incorporaciones porcentuales de 30% y 40% de RAP. Se estudiarán muestras de RAP extraídas del Canal Seco en Honduras mediante proceso de fresado y transportadas de Comayagua a la ciudad de San Pedro Sula. Se llevarán a cabo los ensayos de Marshall y Lottman para determinar los cambios de las características de las MAC con aportes de RAP. Se estará utilizando la misma metodología, y los mismos agregados y RAP que se utilizaron en el pasado para una investigación similar con aportes de RAP de 10% y 20. Utilizando como base las normativas ASTM y AASHTO, junto a las conclusiones de la investigación anterior, se obtendrá un análisis completo que aporte a la posible inclusión futura de RAP en MAC en Honduras.

II. Metodología

Para realizar el estudio investigativo experimental se utilizó un enfoque cuantitativo por medio de ensayos de laboratorio, en conjunto con asesorías de ingenieros especializados. El enfoque cuantitativo, consiste en una serie de procesos estructurados, sigue una secuencia lógica y comprobatoria. Cada proceso antecede a la siguiente y no es posible evitar u omitir los pasos [17]. Se determinó un alcance exploratorio, utilizando métodos de análisis mecánico y físico. Se categorizó el estudio como un diseño transversal, debido a que los datos fueron obtenidos una vez y no a lo largo de un periodo de tiempo.

A. Normas

Las normas establecen los procedimientos correctos, los parámetros de especímenes y procesos de ensayos de laboratorio. La investigación toma como base ASTM D 1559 “Resistencia al flujo plástico de las mezclas bituminosas utilizando el equipo Marshall”, AASHTO T 283 “Resistencia de las mezclas asfálticas compactadas al daño inducido por humedad”, utilizando como apoyo a estas:

- AASHTO T 166: Gravedad específica aparente de mezclas asfálticas compactadas utilizando especímenes con superficie saturada y seca
- ASTM C 136: Método de ensayo estándar para el análisis por tamizado de agregados finos y gruesos
- AASHTO T 209: Gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas
- AASHTO T 269: Método Estándar de Prueba para el Porcentaje de Vacíos de Aire en Mezclas Asfálticas Densas y Abiertas Compactadas
- INVÍAS E-725: Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta
- INVÍAS E-748: Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente utilizando el equipo Marshall

B. Variables de investigación

Se identificaron como variables independientes las características del ligante asfáltico, las propiedades físicas y mecánicas del asfalto recuperado en MAC y los materiales pétreos vírgenes del RAP. Como variable dependiente se definió el comportamiento de las mezclas asfálticas calientes (MAC) con distintos aportes de pavimento asfáltico recuperado (RAP).

C. Población y muestra

La población del estudio fue seleccionada de forma no probabilística, lo que indica que los resultados obtenidos no fueron elegidos de manera aleatoria, sino basándose en criterios y parámetros definidos por normativas y procedimientos relevantes para la investigación. Como continuidad de investigación precedente, el tamaño de la muestra se distribuye de la misma manera. Para el ensayo Marshal, 7 especímenes para cada contenido porcentual de asfalto utilizando 4.5%, 5%, 5.5%, 6% y 6,5% con el fin de encontrar el contenido óptimo de asfalto para los diseños de 30% y 40% de RAP. Para el ensayo de resistencia a la tracción indirecta frente al cambio de humedad Lottman se utilizaron 10 especímenes para los diseños de 30% y 40% de RAP. En la Tabla 1 se detalla el uso de los 90 especímenes en total.

TABLA 1
Tamaño de la Muestra

Especímenes para MAC con 30% de RAP		
Diseño de la mezcla (Marshall)	Resistencia Tensil Retenida (Lottman)	TOTAL
35	10	45
Especímenes para MAC con 40% de RAP		
Diseño de la mezcla (Marshall)	Resistencia Tensil Retenida (Lottman)	TOTAL
35	10	45

D. Materiales

De acuerdo con su granulometría, los agregados pétreos se dividen en finos y gruesos; finos si la mayoría de sus partículas pasan por el tamiz número 4 con abertura de 4.76mm y gruesos si la mayoría son retenidas [18]. Para la investigación se utilizaron tanto agregados gruesos como finos, con granulometrías de 3/4”, 3/8” y 1/4".

El pavimento asfáltico recuperado (RAP) se refiere al material reutilizado que se obtiene de la extracción y procesamiento de capas de pavimento asfáltico previamente construidas y envejecidas. Este material es triturado y

tamizado para ser empleado nuevamente en la fabricación de mezclas asfálticas [19]

El ligante asfáltico es un material compuesto originado del procesamiento del petróleo de apariencia negra o marró y con una consistencia que puede variar de sólida a semisólida dependiendo de la temperatura del material. Su flexibilidad y resistencia lo hacen esencial para su uso en aplicaciones de pavimentación y construcción [20]. Para llevar a cabo la investigación se utilizó asfalto AC-30.

III. Resultados y Análisis

Los diseños de MAC tomaron en cuenta el uso de 4 agregados: Agregados con tamaño máximo nominal de 3/4", 3/8" y 1/4" y el RAP, al cual se le determinó un tamaño máximo nominal de 3/8”. Para el diseño de mezcla asfáltica se combinaron todos los agregados en distintos porcentajes con el fin de obtener una combinación granulométrica dentro de las especificaciones Marshall. Después de haber establecido los aportes de cada agregado para cada diseño de mezcla, se crearon los especímenes en iteraciones incrementales de contenido de asfalto para obtener el contenido óptimo de asfalto de la mezcla. Una vez obtenido, se crearon los especímenes para Lottman y se realizaron los procedimientos preparativos de los especímenes. Una vez realizado el ensayo resistencia a la tracción indirecta, se tabularon los resultados obtenidos tanto para 30% como para 40%.

A. Diseño de Mezcla Asfáltica con 30% de RAP

Para un diseño con 30% de RAP, se determinó utilizar 10%, 22% y 38% de los agregados 3/4", 3/8” y 1/4” respectivamente. En la Fig. 1 se muestra la curva granulométrica combinada junto con los máximos y mínimos permitidos.

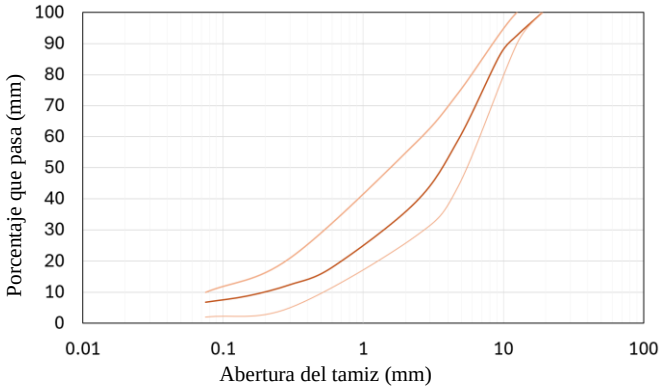

Fig 1. Curva granulométrica de 30% con máximos y mínimos.

La Tabla 2 demuestra los resultados obtenidos del diseño de mezcla en base a la combinación granulométrica establecida para el 30%.

TABLA 2
Datos de Diseño

Característica	Unidades	Resultados
Cantidad de Asfalto	%	5.30
Densidad	g / cm³	2.279
Estabilidad	lb	3564
Vacíos en la Mezcla	%	4.05
Escurrimiento o Flujo	1/100”	11.64
Vacíos en Agregado Mineral	%	15.16
Vacíos Llenos con Asfalto	%	75.2

B. Diseño de Mezcla Asfáltica con 40% de RAP

Para un diseño con 40% de RAP, los aportes de los agregados fueron de 10%, 22% y 28%. En la Fig. 2 se muestra la curva granulométrica combinada junto con los máximos y mínimos permitidos.

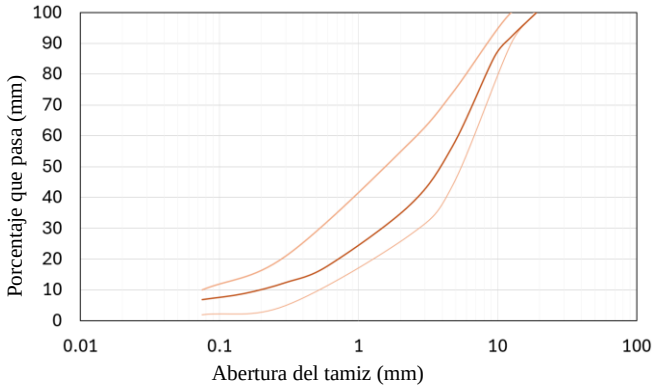

Fig 2. Curva granulométrica de 40% con máximos y mínimos.

La Tabla 3 demuestra los resultados obtenidos del diseño de mezcla en base a la combinación granulométrica establecida para el 40%.

TABLA 3
Datos de Diseño

Característica	Unidades	Resultados
Cantidad de Asfalto	%	5.23
Densidad	g / cm³	2.255
Estabilidad	lb	3502
Vacíos en la Mezcla	%	4
Escurrimiento o Flujo	1/100”	11
Vacíos en Agregado Mineral	%	15.13
Vacíos Llenos con Asfalto	%	74.75

C. Determinación de golpes para Lottman

Para llevar a cabo el ensayo de resistencia al daño por humedad, es necesario que los especímenes contengan 7% de vacíos. Debido a que el diseño Marshall genera 4% de vacíos a los 75 golpes, es necesario ajustar la cantidad de golpes para obtener 7% +- 1% de vacíos. Para ello se realizó una curva de golpes utilizando la mezcla con 40% de RAP para determinar el número de golpes necesarios para alcanzar los vacíos deseados. En base a la Fig.3, se determinó que para la mezcla con 40% de RAP se necesitarían 29 golpes. Para la mezcla con 30% de golpes se realizaron iteraciones alrededor de este valor, finalizando en 27 golpes.

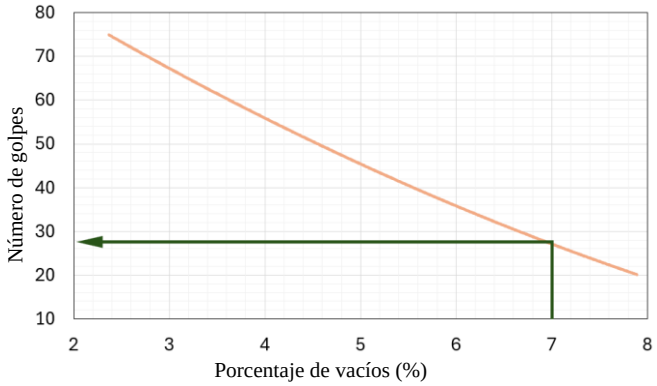

Fig 3. Determinación de número de golpes

Con el número de golpes determinados, se crearon 6 especímenes para proceder con el ensayo de resistencia ante el daño por humedad de ambas mezclas.

D. Lottman para MAC con 30% de RAP

Habiendo validado el porcentaje de vacíos de los especímenes y realizado los procedimientos requeridos, incluyendo el baño maría de los especímenes saturados a 60°C por 24 horas y de todos los especímenes a 25°C por dos horas, se realizó la prueba de resistencia tensil. Los resultados para los especímenes con 30% de RAP se muestran en la Tabla 4.

TABLA 4
Resultados de Ensayo de Resistencia Tensil Retenida

Descripción	Seco			Saturado		
	3	5	6	1	2	4
Lectura	235	233	240	170	230	182
Fa	9.78	9.78	9.78	9.78	9.78	9.78
Carga	2298	2279	2347	1663	2249	1780
Resistencia Tensil (psi)	148.4	144.6	149.0	106.5	144.4	113.9
Promedio	147.3			121.6		
Resistencia Tensil Retenida	82.5					

E. Lottman para MAC con 40% de RAP

Para los especímenes con 40% de RAP se realizó el mismo procedimiento. Los resultados para los especímenes con 40% de RAP se muestran en la Tabla 5.

TABLA 5
Resultados de Ensayo de Resistencia Tensil Retenida

Descripción	Seco			Saturado		
	3	5	7	2.1	2	6
Lectura (lb)	255	285	260	230	230	170
Factor del anillo	9.78	9.78	9.78	9.78	9.78	9.78
Carga (lb)	2494	2787	2543	2249	2249	1663
Resistencia Tensil (psi)	154.4	178.9	159.3	148.5	143.2	104.2
Promedio (psi)	164.2			132		
Resistencia Tensil Retenida (%)	80.4					

IV. COMPARATIVO

Utilizando el mismo RAP y los mismos agregados, Romero et al. llevaron a cabo una investigación similar utilizando aportes de 10% y 20% de RAP. Con los resultados obtenidos para 30% y 40%, es posible extender el proceso de análisis haciendo una comparación con los resultados obtenidos en la investigación previa. Para ello, se estará utilizando la mezcla control con 0% de RAP, mezcla con 10% de RAP y mezcla con 20% de RAP de su investigación. Toda la información que a continuación se presentará sobre la mezcla control, mezcla con 10% de RAP y mezcla con 20% de RAP fue extraída de la investigación realizada por Romero et al en 2024. Dentro de los valores tomados se encuentra el contenido óptimo de asfalto, la estabilidad Marshall, el flujo Marshall y la resistencia tensil retenida para las tres mezclas.[21].

a. Contenido óptimo de asfalto

Como se observa en la Fig. 4, el contenido óptimo de asfalto tiene una tendencia decreciente ante el aumento de RAP. Sin embargo, se observa un incremento entre el 20% y 30%, que puede haberse dado debido a que las investigaciones tienen un año de separación y el RAP pudo haber cambiado algunas de sus propiedades físicas. Aparte de esta excepción, se observa una tendencia casi linear en la disminución del asfalto con el aumento del RAP. El contenido óptimo de asfalto para la muestra control fue mayor a aquel de todas las mezclas con RAP con un 5.6% en comparación a 5.45%, 5.25%, 5.3% y 5.23%. Esto pudiera ser debido a que más contenido de RAP significa más asfalto en los agregados, reduciendo la cantidad de asfalto que debe de ser añadida.

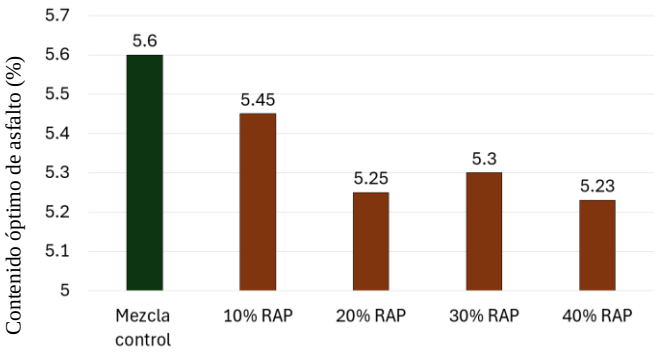

Fig 4. Comparativo de contenido óptimo de asfalto

b. Estabilidad Marshall

Como se puede observar en la Fig. 5, la estabilidad Marshall de todas las MAC con RAP superó aquella de la mezcla control. La estabilidad de la mezcla control (3446lbs) fue menor a la estabilidad de las mezclas con 10%, 20%, 30% y 40% (3456lbs, 3743lbs, 3564lbs y 3502lbs). Se puede observar una tendencia creciente en la estabilidad a partir de la mezcla control hacia la mezcla con 20% donde la estabilidad comienza a disminuir. En un sentido, la estabilidad tiene un comportamiento parabólico, de la misma manera que se puede observar en los gráficos Marshall al realizar iteraciones de contenido de asfalto. En base a los resultados obtenidos, se puede concretar que las MAC con mayor estabilidad son las que tienen 20% y 30% de RAP. No sería fuera de lo razonable

asumir que los valores de estabilidad disminuirán con aportes de RAP mayores al 40%. Tanto la mezcla control como las MAC con aportes de RAP, todas superaron las 1800lbs especificadas de estabilidad Marshall.

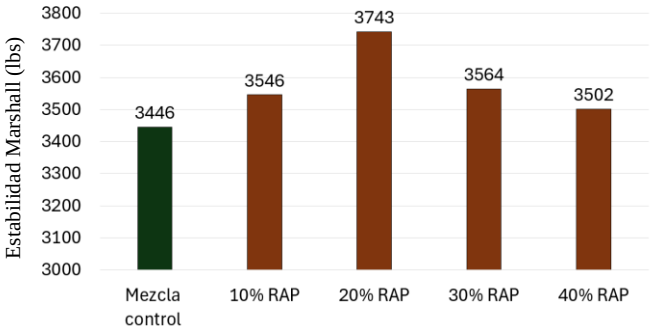

Fig 5. Comparativo de estabilidad Marshall.

c. Flujo Marshall

La Fig 6. demuestra los flujos Marshall de la mezcla control y las mezclas con RAP. Se observa un comportamiento irregular en el flujo Marshall con valores de 11.55, 11.5, 11.64 y 10. 97 centésimas de pulgada para las mezclas de 10%, 20%, 30% y 40%. Se puede observar que los valores levemente disminuyen a partir de la mezcla del 10% de RAP con la excepción del 30% donde se observa un incremento en el flujo. Existe un gran salto entre la mezcla con 0% de RAP y la mezcla con 10% de RAP. Es posible que si fuesen estudiados aportes intermedios (2.5%, 5%, 7.5%), se pueda definir un incremento más leve en el flujo antes de llegar al 10%. El flujo es un valor que se ha observado que varía dentro de un mismo diseño de mezcla asfáltica, por lo que se esperan variaciones. Todas las MAC con RAP superaron al flujo de la mezcla control de 10.3/100pulg y todos los flujos se encuentran dentro de los parámetros establecidos por Marshall.

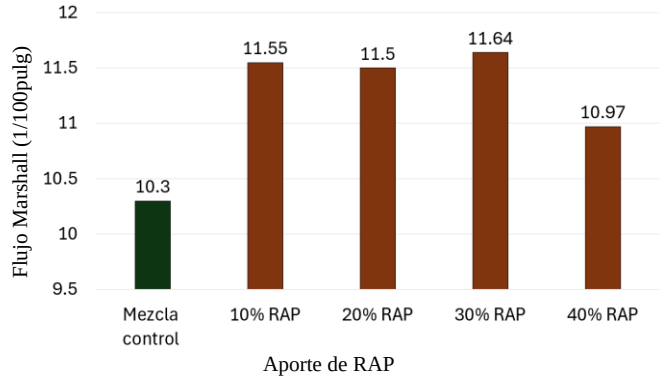

Fig 6. Comparativo de contenido óptimo de asfalto

d. Resistencia Tensil Retenida

En la Fig. 7, se detallan las resistencias tensiles retenidas de cada una de las mezclas asfálticas. La mezcla con mayor resistencia tensil retenida fue la mezcla control con un valor de 95.1%. A partir de este, la resistencia tensil disminuyen gradualmente en las MAC con 10%, 20%, 30% y 40% de RAP con valores de 94.32%, 93.6%, 82.6% y 80.4%. Se puede observar un salto entre la mezcla de 20% a 30%; este pudo haberse dado debido a que el RAP ha sido expuesto a condiciones climatológicas y sus propiedades físicas pudieron haber sido alteradas. Debido a que el RAP ha estado a la intemperie, este pudo haberse comenzado a ser dañar internamente por humedad. Esto demuestra que la edad del RAP y su estado previo a ser utilizado influyen en la resistencia tensil de las mezclas asfálticas que lo utilicen. Las 4 MAC con RAP se encuentran por encima el 8.

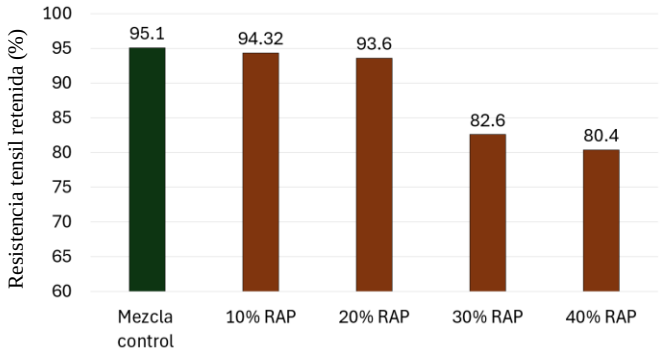

Fig 7. Comparativo de contenido óptimo de asfalto

VI. Conclusiones

La mezcla asfáltica con 30% de RAP presentó un contenido óptimo de asfalto de 5.3% y la mezcla con 40%, un 5.23%. La mezcla control, con 0% de aporte de RAP, presentó un contenido óptimo de 5.6%. Los resultados mostraron que mientras aumenta la cantidad de RAP, el contenido óptimo de asfalto disminuye. Tomando como base la mezcla control, se concluye que el RAP aportó un 0.3% en la mezcla con aporte de 30% y 0.38% en la mezcla con aporte de 40%.

Para los diseños de mezcla con 30% y 40% de RAP se obtuvo una estabilidad Marshall de 3446lbs y 3502lbs respectivamente. De las 4 mezclas asfálticas con RAP (10%, 20%, 30% y 40%), el 40% presentó la menor estabilidad Marshall. Se observa una tendencia parabólica en la estabilidad con el aumento de RAP, comenzando con la mezcla control (3446lbs), incrementando en 10% y 20% (3546lbs y 3743lbs) y disminuyendo en 30% y 40%. Se obtuvo un flujo de 11.64/100” para 30% y 10.97/100” para 40%. Estos flujos son mayores que el de la mezcla control (10.3/100”), sin embargo, los valores de flujo pueden ser irregulares y pueden variar para los mismos diseños. Los diseños de MAC con 30% y 40% de RAP cumplen los estándares establecidos por el ensayo Marshall.

La resistencia tensil retenida de las mezclas con 30% y 40% de RAP fue 82.6% y 80.4% respectivamente. Estos valores fueron menores al de la mezcla control de 95.1% y los de las MAC con 10% y 20% de RAP (94.6% y 93.6%). Se concluye que, con el incremento de RAP en la mezcla

asfáltica, la resistencia tensil retenida disminuye, por lo que la mezcla es más susceptible a daño por humedad. No obstante, tanto la mezcla de 30% como 40% supera el mínimo de resistencia tensil retenida de 80%, por lo que su utilización no se puede descartar en base a este parámetro.

En base a los resultados obtenidos, la investigación demostró que para aportes arriba de 30%, las propiedades mecánicas de las MAC comienzan a verse afectadas. A pesar de que el RAP puede ser implementado con mayores aportes en mezclas asfálticas vírgenes, se concluye que 30% es un límite adecuado para el aporte de RAP.

Esta investigación, en conjunto con la anterior, fue realizada utilizando pavimento asfáltico recuperado de una ubicación de Honduras. Esta investigación es verídica para los agregados extraídos del río Chamelecón y el RAP obtenido del Canal Seco. A pesar de que es importante impulsar la técnica de utilización de RAP en MAC nuevas, es necesario expandir el entorno de investigación. Si se desease continuar investigando RAP en Honduras, se recomienda utilizar agregados y RAP de distintas zonas y/o departamentos y realizar un comparativo de sus distintos rendimientos alrededor del país.

REFERENCIAS

[1] J. R. Ramírez-Vargas, S. A. Zamora-Castro, A. L. Herrera-May, L. C. Sandoval-Herazo, R. Salgado-Estrada, and M. E. Diaz-Vega, "A Review of Sustainable Pavement Aggregates," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 16, 2024, doi: 10.3390/app14167113.

[2] T. Uygunoğlu, İ. B. Topçu, and E. Ç. Resuloğullari, "Durability effect of reclaimed asphalt aggregate on concrete road pavement," *Mater. Constr.*, vol. 74, no. 353, 2024, doi: 10.3989/mc.2024.356823.

[3] "Carreteras y Aeropuertos 2017-2021 - INE." Accessed: Oct. 21, 2024. [Online]. Available: https://ine.gob.hn/v4/2022/11/28/carreteras-y-aeropuertos-2017-2021/

[4] G. kumar Pala, "A Comprehensive Review on the Replacement of Virgin Material using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material in Flexible Pavements," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1006, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/1006/1/012041.

[5] S. Moradi and K. Kähkönen, "Sustainability Indicators in Building Construction Projects through the Lens of Project Delivery Elements," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1101, no. 2, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1101/2/022032.

[6] K. Holtz and T. T. Eighmy, "Scanning European advances in the use of recycled materials in highway construction," *Public Roads*, vol. 64, no. 1, pp. 34–40, 2000.

[7] L. Sierra-Varela, G. Valdes-Vidal, A. Calabi-Floody, L. Lleuful-Cruz, N. Villegas-Flores, and Á. Filun-Santana, "Determination of the Social Contribution of Sustainable Asphalt Mixes," *Sustainability*, vol. 15, no. 21, 2023, doi: 10.3390/su152115205.

[8] J. M. Lizárraga, A. J. del Barco-Carrión, A. Ramírez, P. Díaz, F. Moreno-Navarro, and M. C. Rubio, "Mechanical performance assessment of half warm recycled asphalt mixes containing up to 100 % RAP," *Mater. Constr.*, vol. 67, no. 327, 2017, doi: 10.3989/mc.2017.05116.

[9] S. Ismail *et al.*, "Properties of dense-graded asphalt mixture compacted at different temperatures," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 220, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/220/1/012010.

[10] H. A. Kazim, A. F. Naser, and Z. F. Jawad, "A Review Study on the Improving the Hot Mixture Asphalt Properties by Using Different Types of Polymers as Additive for Asphalt Material," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1279, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1279/1/012022.

[11] A. K. Arshad, M. Mohammad, E. Shaffie, W. Hashim, and A. G. Abdul Halim, "Volumetric Analysis and Performance of Hot Mix Asphalt with Variable Rap Content," *MATEC Web Conf.*, vol. 103, 2017, doi: 10.1051/matecconf/201710309004.

[12] A. K. Arshad, H. Awang, E. Shaffie, W. Hashim, and Z. A. Rahman, "Performance Evaluation of Hot Mix Asphalt with Different Proportions of RAP Content," *E3S Web Conf.*, vol. 34, 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20183401026.

[13] H. Nasir, M. Kaur, and S. Faheem, "A statistical Review on the Usage of Reclaimed Asphalt Pavement waste as a recyclable material," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1327, no. 1, 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1327/1/012021.

[14] M. Tsakoumaki and C. Plati, "A Critical Overview of Using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Road Pavement Construction," *Infrastructures*, vol. 9, no. 8, 2024, doi: 10.3390/infrastructures9080128.

[15] R. Mariyappan, J. S. Palammal, and S. Balu, "Sustainable use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in pavement applications—a review," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 16, pp. 45587–45606, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-25847-3.

[16] A. F. Jasim, Z. K. Ali, and I. F. Al-Saadi, "A Comprehensive Review of Life Cycle Cost Assessment of Recycled Materials in Asphalt Pavements Rehabilitation," *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2024, 2024, doi: 10.1155/2024/2004803.

[17] R. H. Sampieri, "Metodología de la investigación - Sexta Edición," 2014.

[18] Ó. Palacio-León, Á. Chávez-Porras, and Y. L. Velásquez-Castiblanco, "Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados," *Tecnura*, vol. 21, no. 53, pp. 96–106, 2017, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.3.a06.

[19] P. Meena, G. R. R. Naga, and P. Kumar, "Effect of Mechanical Properties on Performance of Cold Mix Asphalt with Recycled Aggregates Incorporating Filler Additives," *Sustainability*, vol. 16, no. 1, 2024, doi: 10.3390/su16010344.

[20] A. D. J. García, "Análisis del comportamiento micromecánico del asfalto," *Infraestruct. Vial*, vol. 18, no. 31, Jan. 2017, doi: 10.15517/iv.v18i31.27763.

[21] D. V. Romero, J. S. U. Santos, and A. S. Rodriguez, "Behavior Analysis of Dense Asphalt Mixtures using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)," in *Proceedings of 6th International Conference on Civil Engineering and Architecture, Vol. 1*, T. Kang and Y. Lee, Eds., Singapore: Springer Nature, 2024, pp. 345–354. doi: 10.1007/978-981-97-5311-6_33.