

## Influencia de la adición de pavimento asfáltico reciclado en el desempeño a la humedad y deformación permanente de mezclas asfálticas

Juan Olivera<sup>1</sup>, Jahel S. Ledezma<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

\*sarvialedezma@fcyt.umss.edu.bo

### Resumen

El uso de materiales vírgenes para la elaboración de mezclas asfálticas en Bolivia es una práctica generalizada. Si bien a nivel internacional ya se emplea Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) en el diseño de mezclas por sus beneficios en la conservación de recursos naturales y reducción de energía, a nivel nacional aún no se ha validado experimentalmente el desempeño de mezclas asfálticas que incluya porcentajes de este material en su diseño. De esta forma, la presente investigación evaluó la influencia de la adición de porcentajes de RAP en el desempeño a la humedad y deformación permanente de mezclas asfálticas. Para esto, se realizaron ensayos de tracción indirecta y rueda de Hamburgo de las mezclas asfálticas elaboradas: una con materiales vírgenes y otras con porcentajes del 15, 20 y 25% de RAP, previo análisis de sus características y su combinación con materiales vírgenes. Los resultados demostraron que las mezclas con adición de RAP presentaron un desempeño igual o superior en comparación con la mezcla elaborada únicamente con materiales nuevos. Específicamente, la mezcla con un 15% de RAP mostró resultados similares en cuanto a susceptibilidad a la humedad y deformación permanente. Las mezclas con un 20% y 25% de RAP presentaron un aumento del 6,2% y 1,8% en la resistencia a la humedad, respectivamente, y una reducción del 37% y 39% en la deformación permanente, ambos en comparación con la mezcla asfáltica original. Estos resultados respaldan la viabilidad y conveniencia de considerar la inclusión de materiales reciclados en el diseño de pavimentos asfálticos.

**Palabras clave:** *Pavimento Asfáltico, RAP, Desempeño de mezclas asfálticas, Susceptibilidad a la humedad, Deformación permanente.*

### Abstract

The use of virgin materials for the production of asphalt mixes in Bolivia is a widespread practice. Although Recycled Asphalt Pavement (RAP) is already used internationally in the design of mixes due to its benefits in the conservation of natural resources and energy reduction, at the national level the performance of asphalt mixes that includes percentages has not yet been experimentally validated. of this material in your design. In this way, the present investigation evaluated the influence of the addition of RAP percentages on the performance to humidity and permanent deformation of asphalt mixtures. For this, indirect traction and Hamburg wheel tests were carried out on the asphalt mixtures made: one with virgin materials and others with percentages of 15, 20 and 25% of RAP, after analyzing their characteristics and their combination with virgin materials. The results showed that the mixtures with the addition of RAP presented an equal or superior performance compared to the mixture made only with new materials. Specifically, the 15% RAP mix showed similar results in terms of moisture susceptibility and permanent deformation. Mixtures with 20% and 25% RAP showed a 6.2% and 1.8% increase in moisture resistance, respectively, and a 37% and 39% reduction in permanent deformation, both compared with the original asphalt mix. These results support the feasibility and convenience of considering the inclusion of recycled materials in the design of asphalt pavements.

**Key words:** *Asphalt Pavement, RAP, Performance of asphalt mixes, Susceptibility to humidity, Permanent deformation.*

## 1. Introducción

Es conocido que, las redes viales pavimentadas con asfalto constituyen uno de los pilares fundamentales de la economía de cada país. Estas carreteras permiten aumentar la productividad y fomentar el crecimiento económico. Sin embargo, están sujetas a la constante acción del tráfico y el medioambiente, factores que, combinados con las propiedades intrínsecas del material, los procesos constructivos y la calidad de la mano de obra, ocasionan su deterioro progresivo. Esto conlleva a una reducción de su vida útil, lo que a su vez implica una mayor frecuencia de mantenimiento en las vías, aumentando los costos y los recursos necesarios para su conservación, rehabilitación y reconstrucción. Además, este proceso genera un significativo incremento en la generación de escombros (Ochoa, 2021).

Actualmente, en nuestro país no se tiene un adecuado mantenimiento preventivo, derivando directamente en la rehabilitación de las redes carreteras pavimentadas, en la cual, se retira el material existente y se reemplaza por material nuevo. Sin embargo, el material que se retira de la capa de rodadura, presenta características tecnológicas superiores al resto de la estructura del pavimento, lo cual puede ser reutilizado futuramente en la misma estructura. al ser este empleado en la capa de rodadura de la estructura. Es así que, desde hace muchos años se ha buscado la implementación de métodos que reduzcan los costos y los daños ambientales, que estas prácticas generan, siendo una de las soluciones el Pavimento Reciclado Asfáltico (RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*).

El RAP surgió de la necesidad de eliminar de forma útil los materiales de los revestimientos antiguos, para que

no se apilen en los vertederos. Parte de este principio consiste también en optar por una medida que no perjudique, sino que proteja, el medio ambiente. Otro factor para la aplicación de esta técnica es el ahorro de recursos naturales, el menor consumo de energía, la menor emisión de gases y la menor necesidad de espacios físicos en vertederos (Canchanya, 2017).

Otros países han logrado resultados exitosos con el uso de mezclas asfálticas con adición de RAP, mismos que tienen por normativa incluir un cierto porcentaje de RAP al momento de construir, rehabilitar y/o expandir su longitud de sus carreteras, gracias a su buen comportamiento en el desempeño, que son similares o superiores aquellos que se construyen con el 100% de materiales nuevos, a esto se suma los beneficios económicos y el cuidado al medio ambiente.

## 2. Materiales y métodos

En este estudio, se realizaron análisis exhaustivos para evaluar las características y propiedades de los materiales utilizados con el fin de determinar su idoneidad para su aplicación en mezclas asfálticas. Los materiales se dividieron en tres categorías principales: agregados minerales, cemento asfáltico y caracterización del RAP.

### 2.1 Caracterización de los agregados minerales vírgenes

Los agregados utilizados en la presente investigación provienen del acopio de agregados de Sacaba. En la Tabla 1, se detalla los ensayos realizados para la caracterización de los agregados minerales nuevos.

Tabla 1

*Caracterización de los agregados minerales vírgenes*

Ensayo	Unidad	Norma	Límite	Resultado	Verificación
<b>Agregado Grueso</b>					
Gravedad específica del agregado grueso	g/cm <sup>3</sup>	ASTM C127	-	2,77	-
Abrasión de los Ángeles	%	ASTM C131	Máx 40%	30,03	Cumple
Caras fracturadas	%	ASTM D5821	Min 90%	80	No cumple
Resistencia a los sulfatos (Sanidad)	%	ASTM C2419	Máx 12%	10,58	Cumple
<b>Agregado Fino</b>					
Gravedad específica del agregado fino	g/cm <sup>3</sup>	ASTM C128	-	2,63	-
Equivalente de arena	%	ASTM D2419	Min 45%	86,16	Cumple

*Fuente: Autores*

## 2.2 Caracterización del cemento asfáltico

El cemento asfáltico empleado para la investigación es de procedencia peruana, con una clasificación

por penetración 85/100. Para la caracterización del cemento asfáltico se realizó los ensayos presentados en la Tabla 2.

Tabla 2  
Caracterización del cemento asfáltico virgen

Ensayo	Unidad	Norma	Límite	Resultado 85/100	Verificación
Penetración a 25°C	mm	ASTM D5	Mín. 80	80,92	Cumple
Peso específico del asfalto a 25°C	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D71	-	1,022	-
Ductilidad a 25°C	cm	ASTM D113	Mín. 100	102,33	Cumple
Recuperación elástica a 25°C	%	ASTM D6084	Mín. 90	83,70	No cumple
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36	45 - 52	45,10	Cumple
Punto de inflamación	°C	ASTM D92	Mín. 230	314,60	Cumple
Adhesividad agregado grueso con el cemento asfáltico	%	DNER-ME 078	Min 95	97,58 (con 0,09% de mejorador de adherencia)	Cumple

Fuente: Autores

## 2.3 Caracterización de los materiales componentes del RAP disponible

La Tabla 3, presenta los resultados de los ensayos de caracterización al cemento asfáltico y agregado mineral recuperado del RAP. Para esto, el RAP

utilizado en las nuevas mezclas fue inicialmente disgregado y tamizado, desechando todo material mayor a 19 mm para evitar segregaciones en la mezcla resultante o producir una mala compactación, que podría ocasionar exceso de vacíos en los cuerpos de prueba.

Tabla 3  
Caracterización de los materiales componentes del RAP disponible

Ensayo	Unidad	Norma	Límite	Resultado	Verificación
<b>Cemento asfáltico recuperado</b>					
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36	45-52	55,70	No cumple
<b>Agregado mineral recuperado</b>					
Gravedad específica neta del agregado recuperado (Gsb)	-	<i>Instituto del Asfalto</i>	-	2,473	-
Caras fracturadas	%	ASTM D5821	Min. 90%	95	Cumple
Determinación de la forma de los fragmentos de roca triturada	%	NBR-5564	Cúbica Alargada Laminar	78 17 5	-
Gravedad específica neta del agregado recuperado (Gsb)	-	<i>Instituto del Asfalto</i>	-	2,473	-
Equivalente de arena	%	ASTM D2419	Min. 45%	71,18	Cumple

Fuente: Autores

Posteriormente, se realizó el diseño de las mezclas propuestas y la evaluación del desempeño a la susceptibilidad a la humedad y deformación permanente.

## 2.4 Diseño de mezcla asfáltica convencional y la adicionado con RAP

La mezcla convencional se dosificó utilizando la metodología Marshall, conforme a las especificaciones del Instituto del Asfalto (2004a).

Se definió una única gradación de áridos seleccionada, para la mezcla convencional y las adicionadas con RAP. Posteriormente, para definir el contenido óptimo de cemento asfáltico de cada mezcla, se evaluaron cinco contenidos diferentes de asfalto según diversos criterios volumétricos del método Marshall y de resistencia según la categoría de tránsito seleccionada para el diseño.

Para abordar el caso específico de las mezclas que contienen adición de RAP, se llevaron a cabo ajustes en el diseño volumétrico en función del porcentaje de RAP incorporado. Estos ajustes son necesarios debido a que el RAP no solo contribuye con agregado recuperado, sino que también contiene un porcentaje de cemento asfáltico envejecido. En relación a la curva

granulométrica del agregado recuperado, se realizó un ajuste utilizando agregado mineral nuevo (Tabla 4), asegurando así el cumplimiento de los límites granulométricos establecidos en la especificación ABC, específicamente en la faja “C” (Figura 1). Además, se determinó la densidad máxima teórica (Gmm) del RAP, lo que permitió calcular la gravedad específica de los agregados del RAP. Este valor es crucial para el parámetro de diseño VAM (porcentaje de vacíos en el agregado mineral), ya que requiere información precisa sobre la gravedad específica de los agregados combinados. Por último, se determinó el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezclas asfálticas que contienen un 15%, 20% y 25% de adición de RAP.

Tabla 4  
Granulometrías adoptadas para el diseño de las mezclas asfálticas evaluadas

Abertura (mm)	Abertura (pulgadas)	Faja granulométrica		Granulometrías de las mezclas asfálticas			
		Superior	Inferior	MAC	MA-15% RAP	MA-20% RAP	MA-25% RAP
19.000	3/4	100	97	100	100	100	100
12.500	1/2	88	76	82,7	85,4	85,1	85,7
9.500	3/8	80	68	69,9	74,1	73,4	74,4
4.750	N4	59	49	50,5	54,8	54,5	55,7
2.360	N8	45	36	35,7	40,4	40,1	41
1.180	N16	31	22,6	24,6	29,3	29,1	29,7
0.700	N30	25,3	17,1	17,4	21,6	21,5	22
0.300	N50	16,6	10,1	11,9	15	15	15,5
0.150	N100	10,2	5,4	6,6	8,4	8,5	8,9
0.075	N200	7	3	3	4,9	4,7	4,8

Fuente: Autores

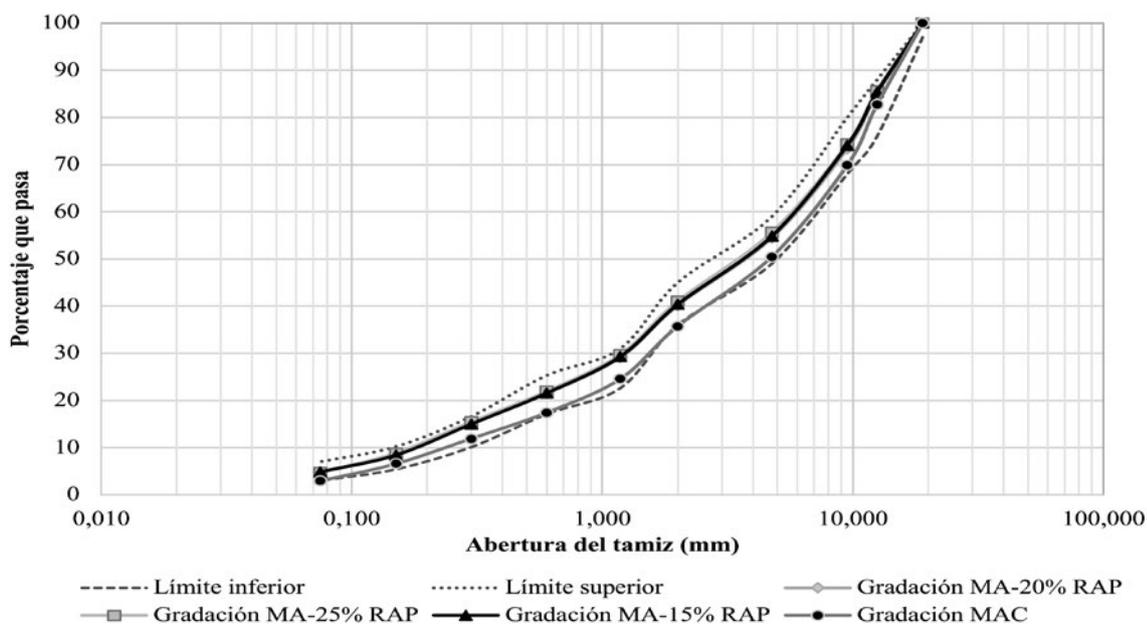


Figura 1. Curva granulométrica de las distintas mezclas asfálticas evaluadas.

## 2.5 Ensayo de susceptibilidad a la humedad

Para la evaluación de la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas diseñadas se empleó la norma ASTM 4867 (2014). Se consideraron mezclas asfálticas convencionales y aquellas adicionadas con 15%, 20% y 25% de RAP, todas ellas dosificadas con los contenidos óptimos de cemento asfáltico obtenidos mediante el método volumétrico Marshall.

Para cada tipo de mezcla, se moldearon seis especímenes con un diámetro de 102 mm y una altura de 63,5mm, asegurando que los especímenes de prueba presentaran un volumen de vacíos entre el 6% y el 8%, para lo cual se utilizó un compactador giratorio.

Posteriormente, las probetas se dividieron en dos grupos (húmedo y seco) y se llevaron a rotura para determinar la resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral. El grupo húmedo, conformado por tres probetas, fue sometido a un proceso de acondicionamiento previo. Este proceso consistió en la saturación de las probetas con agua destilada al 55-80% de su capacidad mediante una bomba de vacío, seguido de un sumergimiento en baño de agua a 60°C durante 24 horas. Una vez finalizado este tiempo, las probetas se trasladaron a otro baño de agua a 25°C durante una hora. Al mismo tiempo, el grupo seco fue acondicionado a 25°C durante 20 minutos. Una vez concluido el acondicionamiento, se procedió a realizar la ruptura de las probetas aplicando una carga diametral hasta alcanzar la carga máxima (P). En este

punto se determinó la resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral.

## 2.6 Ensayo de deformación permanente

La evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente se llevó a cabo siguiendo las pautas establecidas en la norma AASHTO T324 (2004). Se utilizaron cuerpos de prueba para la mezcla asfáltica convencional y la mezcla adicionada con RAP. Estos cuerpos de prueba se elaboraron utilizando el compactador giratorio SUPERPAVE hasta lograr un índice de vacíos entre el 7% y el 8%. Las dimensiones de los cuerpos de prueba fueron de 150 mm de diámetro y 62 mm de altura, con una tolerancia de  $\pm 2$  mm tanto para el diámetro como para la altura. Se realizaron un total de 4 cuerpos de prueba para cada tipo de diseño. En cuanto al ensayo de deformación permanente, se estableció un límite de 20.000 pasadas en la rueda de Hamburgo o hasta alcanzar una deformación máxima de 20 mm, a una temperatura de ensayo estándar de 50°C.

## 3. Resultados

### 3.1 Diseño de la mezcla asfáltica convencionales y la adicionada con RAP

En la Tabla 5 se presentan los resultados de los parámetros volumétricos del diseño Marshall, junto con la rigidez obtenida. Además, se indica el porcentaje óptimo de cemento asfáltico determinado para cada uno de los diseños, siguiendo las recomendaciones de diseño establecidas por el Instituto del Asfalto (2014).

Tabla 5  
Resultados obtenidos del diseño volumétrico de las mezclas asfálticas

Parámetros volumétricos	Unidad	Requerimiento Instituto del Asfalto	Tipos de mezclas asfálticas			
			MAC	MA-15% RAP	MA-15% RAP	MA-15% RAP
Contenido de cemento asfáltico óptimo	%	-	5,1	5,0	4,5	4,4
Vacíos de aire en la mezcla compactada "Va"	%	3 - 5	4,0	4,0	3,5	3,5
Vacíos en agregado mineral "VMA"	%	Min. 14	11,2	7,9	10,8	11,3
Vacíos llenos de asfalto "VFA"	%	65-75	66,0	47,3	67,1	67,9
Estabilidad	N	Min. 8006	14493,3	16188,5	17493,0	17494,5
Flujo	0,25 mm	8 - 14	10,7	12,2	11,9	14,0
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	-	2378,7	2332,5	2362,4	2341,7
Rigidez Marshall	KN/mm	3 - 6	1,28	1,33	1,50	1,46

Fuente: Autores

### 3.2 Evaluación de la susceptibilidad a la humedad

En la Tabla 6 se muestran los resultados de la resistencia conservada “TSR”, así como los resultados de los grupos seco (Std) y húmedo (Stm) para los distintos diseños realizados, mismos que cumplieron con el mínimo requerido de 80%.

Tabla 6  
Resultados obtenidos del ensayo de susceptibilidad a la humedad

Tipo de mezcla asfáltica	Porcentajes de Cemento asfáltico	Grupo de evaluación	Porcentaje de vacíos en la mezcla (Va)	Resistencia a la tracción indirecta (KPa)	Resistencia a la humedad (%)
Convencional	5,1	Seco	6,8	636,6	80,6
		Acondicionado	6,9	512,8	
MA-15% RAP	5,0	Seco	7,2	721,1	80,1
		Acondicionado	7,3	577,8	
MA-20% RAP	4,5	Seco	7,5	788,8	85,9
		Acondicionado	7,4	677,6	
MA-25% RAP	4,4	Seco	6,9	728,0	82,1
		Acondicionado	7,1	597,4	

Fuente: Autores

La Figura 2 presenta la resistencia a la tracción indirecta de los grupos evaluados en el ensayo de susceptibilidad a la humedad.

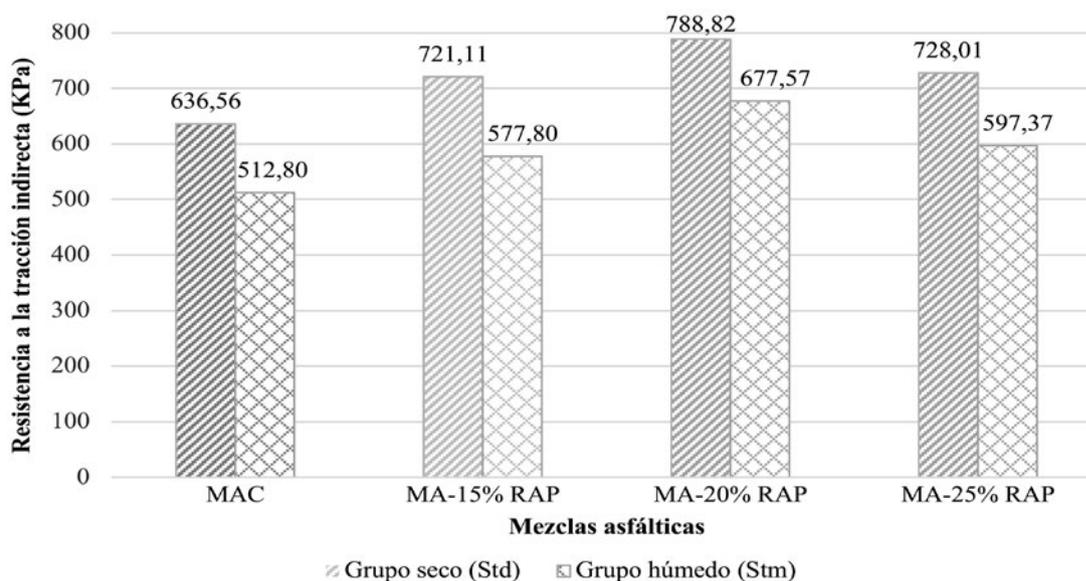


Figura 2. Resistencia a la tracción indirecta de las mezclas asfálticas evaluadas.

Se puede observar en la Figura 2 que la mezcla asfáltica convencional desarrolla menor resistencia a la tracción indirecta en comparación a las mezclas asfálticas con de adición de RAP, tanto en el grupo seco (Std) y húmedo (Stm).

Los resultados de la resistencia a la humedad “TSR”, de las mezclas asfálticas evaluadas en el trabajo de investigación es presentada en la Figura 3.

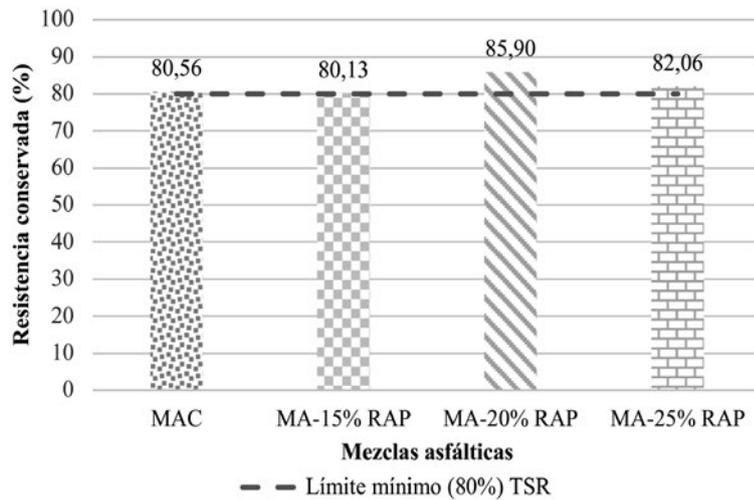


Figura 3. Resistencia a la humedad en las mezclas asfálticas evaluadas.

En la Figura 3 se observa que las mezclas asfálticas con 20% y 25% de adición de RAP desarrolla mayor resistencia a la susceptibilidad a la humedad en relación a la mezcla asfáltica convencional y la adicionada con 15% de RAP.

### 3.3 Evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente

Los resultados obtenidos de las mezclas asfálticas evaluadas en el ensayo de susceptibilidad a la deformación permanente mediante la rueda de Hamburgo se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7  
Resultados obtenidos del ensayo de la rueda de Hamburgo

Tipo de mezcla asfáltica	Porcentaje de cemento asfáltico	Rueda	Número de pasadas al punto de stripping	Tipo de falla	Ahuellamiento desarrollado	Media de ahuellamiento
Convencional	5,1	1	6271	Número de pasadas	20,45	20,24
		2	8229		20,03	
MA-15% RAP	5,0	1	3628	Número de pasadas	20,69	20,32
		2	3017		19,95	
MA-20% RAP	4,5	1	-	Número de pasadas	16,14	14,88
		2	9987		13,61	
MA-25% RAP	4,4	1	10800	Número de pasadas	14,87	14,46
		2	12000		14,04	

Fuente: Autores

Según los resultados obtenidos, se pudo observar que la mezcla asfáltica convencional y la mezcla adicionada con un 15% de RAP presentan una menor resistencia a la deformación permanente en comparación con las mezclas asfálticas que contienen un 20% y un 25% de RAP. La curva de deformación en función del número de pasadas para la mezcla asfáltica convencional dosificada con un 100% de materiales vírgenes y la mezcla asfáltica adicionada con un 15% de RAP muestra que alcanzaron el punto de desgranamiento a las 7200 y 3300 pasadas, respectivamente. Esto contribuyó a aumentar la tasa de

deformación, llegando a una deformación máxima de 20 mm a las 10.000 pasadas. Por otro lado, se observó que la curva de deformación en función del número de pasadas para las mezclas asfálticas adicionadas con un 20% y un 25% de RAP alcanzaron el punto de desgranamiento a las 10.000 y 11.400 pasadas, respectivamente. A diferencia de las mezclas asfálticas anteriores, estas últimas cumplieron con las 20.000 pasadas y presentaron una deformación permanente considerablemente menor en comparación con la mezcla asfáltica convencional (Figura 4).

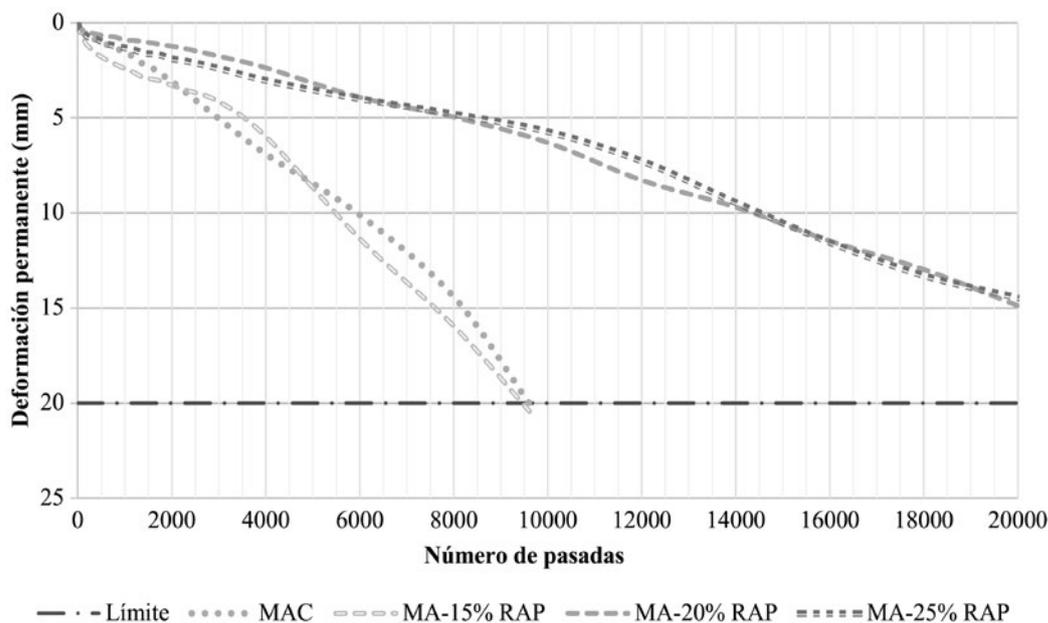


Figura 4. Deformación permanente de las mezclas asfálticas evaluadas.

La Figura 5 ilustra el promedio de los resultados obtenidos del ensayo de deformación permanente para cada una de las mezclas asfálticas elaboradas,

así mismo la reducción de cemento asfáltico virgen a mayor porcentaje de adición de RAP en las mezclas asfálticas.

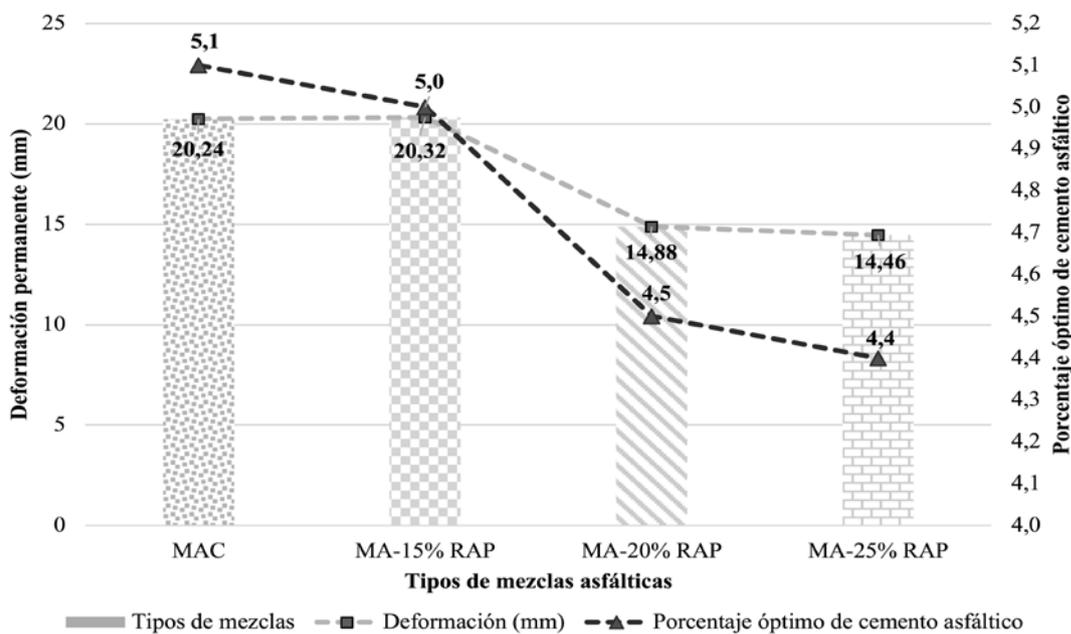


Figura 5. Resultados del ensayo de deformación permanente y porcentaje óptimo de cemento asfáltico de las mezclas asfálticas evaluadas.

#### 4. Conclusiones

Al evaluar la resistencia a la susceptibilidad a la humedad, se observa que tanto la mezcla asfáltica

convencional como la mezcla adicionada con RAP muestran resultados similares. Sin embargo, se observa un incremento del 6,2% y 1,8% en la mezcla asfáltica con adición de 20% y 25% de RAP, respectivamente.

Se ha demostrado que a medida que se aumenta el porcentaje de RAP en la mezcla asfáltica, se reduce la deformación permanente en comparación con la mezcla asfáltica convencional elaborada con 100% de materiales nuevos. En el caso de la mezcla MA-15% RAP, la deformación permanente fue similar a la mezcla convencional, pero ambas mezclas no cumplieron con las 20.000 pasadas, alcanzando una deformación máxima de 20 mm a las 10.000 pasadas. Además, ambas mezclas presentaron puntos de desgranamiento, lo cual contribuyó a un aumento en la tasa de deformación.

En cuanto a la mezcla MA-20% RAP, se observó una reducción del 37% en la deformación permanente, mientras que para la mezcla MA-25% RAP, la reducción fue del 39%. Estas dos últimas mezclas cumplieron con los límites especificados norma AASHTO T324, es decir, alcanzaron las 20.000 pasadas o los 20 mm de deformación permanente.

## 5. Recomendaciones

Se recomienda incorporar RAP en las nuevas mezclas mediante dosificaciones adecuadas, ya que esto mejora significativamente el comportamiento de las mezclas en términos de resistencia a la deformación permanente. La deformación permanente es una de las fallas más comunes en los pavimentos a nivel nacional. Por lo tanto, la inclusión de RAP en las mezclas puede ayudar a mitigar este problema y mejorar la durabilidad de los pavimentos.

## Agradecimientos

Agradecimiento especial al Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos por brindar los medios necesarios por los cuales fue posible ejecutar este proyecto.

## 6. Referencias bibliográficas

- AASHTO T 324. (2004). *Standard Method of Test for Hamburg Wheel Tracking Testing of Compacted Hot Mix Asphalt*. USA. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ABC. (2011). *Manual de especificaciones técnicas de construcción*. Administradora Boliviana de Carreteras. Bolivia.
- ASTM D4867. (2014). *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Pavement Mixtures*. USA. American Society of Testing and Materials.
- Canchanya, J. (2017). *Avaliação do comportamento mecânico e reológico de mistura asfáltica com adição de 20% de material fresado – RAP*. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, Brasil.
- Instituto del Asfalto. (2014). *Marshall Method of Mix Design (7th Edition)*. Asphalt Mix Design Methods (Chapter 7, p. 77).
- Instituto del Asfalto. (2014a). *Recycled Asphalt Materials in the Mix Design Process (7th Edition)*, Asphalt Mix Design Methods (Chapter 11, p. 135).
- Ochoa, L. (2021). *Mezclas asfálticas con RAP (Sesión de congreso)*. 1er Congreso Académico del Asfalto AMAAC, Tlalpan, México. [https://www.odoo.com/es\\_ES/typo?domain=itafec-mexico.odoo.com&autodbname=itafec-mexico&hosting=eu164a](https://www.odoo.com/es_ES/typo?domain=itafec-mexico.odoo.com&autodbname=itafec-mexico&hosting=eu164a).