

Influence of polypropylene fiber on physical-mechanical properties in cold asphalt mix with 100% recycled pavement

Valderrama- Solano Kevin Ernesto, Ing¹ , Jacobo- Minchola Melvin Otilio, Ing.² , Sagástegui-Vásquez Germán, Mg. Ing³ 

^{1,3} Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú, N00154091@upn.pe, german.sagastegui@upn.edu.pe

² Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú. N00095829@upn.pe

Abstract– The objective of this research is to determine the influence of polypropylene fiber on the physical-mechanical properties of a cold asphalt mixture with 100% recycled pavement. A pure experimental design was used to develop the thesis. The sampling technique used was not probabilistic due to expert judgment, and data collection was based on observation using the observation guide. Inferential statistics were applied for data analysis. The results showed a stability of 5.15 kN and a creep of 9.08 mm in the standard mixture, while in the mixtures with 0.25%, 0.30% and 0.35% of polypropylene fiber, 5.54 kN - 7.25 mm, 7.06 kN - 8.22 mm were obtained. . and 6.19 kN - 9.25 mm respectively. Regarding the percentage of voids, 3.65% was recorded in the standard mixture and 3.85%, 4.29% and 4.43% in the mixtures with 0.25%, 0.30% and 0.35% of polypropylene fiber. It is concluded that the polypropylene fiber has a significant influence on the physical-mechanical properties of the cold asphalt mix with 100% recycled asphalt pavement (RAP), demonstrating that the addition of 0.30% achieves better performance in the Marshall test.

Keywords-- Polypropylene fiber, cold mix asphalt, recycled asphalt pavement (RAP), stability, flow, void percentage.

Influencia de fibra de polipropileno en propiedades físico-mecánicas en mezcla asfáltica en frío con 100% de pavimento reciclado

Valderrama- Solano Kevin Ernesto, Ing¹, Jacobo- Minchola Melvin Otilio, Ing.², Sagástegui-Vásquez Germán, Mg. Ing³

^{1,3} Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú, N00154091@upn.pe, german.sagastegui@upn.edu.pe

² Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú, N00095829@upn.pe

Abstract– *The objective of this research is to determine the influence of polypropylene fiber on the physical-mechanical properties of a cold asphalt mixture with 100% recycled pavement. A pure experimental design was used to develop the thesis. The sampling technique used was not probabilistic due to expert judgment, and data collection was based on observation using the observation guide. Inferential statistics were applied for data analysis. The results showed a stability of 5.15 kN and a creep of 9.08 mm in the standard mixture, while in the mixtures with 0.25%, 0.30% and 0.35% of polypropylene fiber, 5.54 kN - 7.25 mm, 7.06 kN - 8.22 mm were obtained. . and 6.19 kN - 9.25 mm respectively. Regarding the percentage of voids, 3.65% was recorded in the standard mixture and 3.85%, 4.29% and 4.43% in the mixtures with 0.25%, 0.30% and 0.35% of polypropylene fiber. It is concluded that the polypropylene fiber has a significant influence on the physical-mechanical properties of the cold asphalt mix with 100% recycled asphalt pavement (RAP), demonstrating that the addition of 0.30% achieves better performance in the Marshall test.*

Keywords-- *Polypropylene fiber, cold mix asphalt, recycled asphalt pavement (RAP), stability, flow, void percentage.*

Resumen– *La presente investigación tiene como objetivo determinar la influencia de la fibra de polipropileno en las propiedades físicas-mecánicas de una mezcla asfáltica en frío con 100% de pavimento reciclado. Para el desarrollo de la tesis se utilizó un diseño experimental puro. La técnica de muestreo empleada fue no probabilístico por juicio de expertos, y la recolección de datos se basó en la observación utilizando la guía de observación. Para el análisis de datos se aplicó la estadística inferencial. Los resultados mostraron una estabilidad de 5.15 kN y una fluencia de 9.08 mm en la mezcla patrón, mientras que en las mezclas con 0.25%, 0.30% y 0.35% de fibra de polipropileno se obtuvieron 5.54 kN - 7.25 mm, 7.06 kN - 8.22 mm y 6.19 kN - 9.25 mm respectivamente. En cuanto al porcentaje de vacíos, se registró un 3.65% en la mezcla patrón y un 3.85%, 4.29% y 4.43% en las mezclas con 0.25%, 0.30% y 0.35% de fibra de polipropileno. Se concluye que la fibra de polipropileno tiene una influencia significativa en las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica en frío con 100% de pavimento asfáltico reciclado (RAP), demostrando que la adición de 0.30% logra un mejor desempeño en el ensayo Marshall.*

Palabras clave: *Fibra de polipropileno, mezcla asfáltica en frío, pavimento asfáltico reciclado (RAP), estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos.*

I. INTRODUCCIÓN

En el estado límite de servicio de un pavimento flexible se producen fallas por causa, de los esfuerzos de las cargas vehiculares, factores climáticos, asentamientos diferenciales, deformaciones plásticas y envejecimiento de los materiales. Que afectan directamente a la carpeta de rodadura del pavimento, provocando su deterioro progresivo y ocasionando variaciones en términos de valores de serviciabilidad y confiabilidad con la que fue diseñada para cumplir durante su tiempo de vida útil. Ante esto es necesario realizar trabajos de conservación y rehabilitación; uno de los principales problemas de aplicar alternativas tradicionales como colocar una capa sobre el pavimento existente, radica en la diferencia de niveles que se provoca en la vía. Siendo recomendable en trabajos de rehabilitación y conservación, como el “reciclaje” removiendo el pavimento deteriorado para su reutilización, este material recuperado se puede emplear como material constituyente de la capa subrasante, en la mezcla asfáltica y carpeta de rodadura [1].

En todo el mundo, el incremento del uso del pavimento asfáltico reciclado, conocido como “RAP”, en proyectos de construcción y rehabilitación de carreteras se ha transformado en una estrategia conveniente para mejorar la sostenibilidad de la infraestructura de transporte y contribuir a compensar los aumentos de costos de materias primas. Siendo la materia prima la que representa el 70% del costo total para la producción de una mezcla asfáltica [2]. También genera un impacto en el aspecto ambiental, como en la disminución de los desechos en los vertederos, la explotación de canteras, la producción de materiales asfálticos y el consumo de agregados pétreos.

En el Perú, no debería ser la excepción contar con esta tecnología, ya que las vías existentes, mayormente, se encuentran dañadas o en ciertos lugares aún sin asfaltar y sin

ningún tipo de cronograma para sus respectivos mantenimientos. Actualmente, las carreteras departamentales asfaltadas representan casi el 9.7% de su totalidad, mientras que el 90.3% son trochas en mal estado o caminos nivelados. Mientras tanto, los volúmenes de tráfico siguen aumentando con el paso de los años, generando de esta manera mayores cargas al pavimento. Estas, junto con la meteorología, la inadecuada pavimentación y el deterioro de los materiales con el pasar del tiempo, provocan daños y un menor tiempo de vida útil del pavimento. Por tal motivo, se empieza a requerir la necesidad de implementar nuevas alternativas sostenibles para el diseño y construcción de pavimentos, obteniendo así estructuras más duraderas, económicas y amigables con el medio ambiente [3].

En España, se elaboraron mezclas bituminosas en frío, de tipo grava – emulsión con el 100% de árido reciclado y las de control con solo el empleo de árido natural; para determinar sus propiedades volumétricas, resistencia a la deformación permanente, modulo resiliente, tracción indirecta. Los resultados demostraron que estos residuos de construcción y demolición, además de ser viable su uso en carreteras de mediano y bajo tránsito, tienen la ventaja de mejorar algunas propiedades de las mezclas en comparación de las diseñadas con áridos nuevos. Proponiéndose una mezcla optima con árido reciclado, compuesta de 9% de agua inicial durante el mezclado y un contenido de emulsión asfáltica entre 6% y 7% [4].

Por otro lado, en Costa Rica se evaluaron las propiedades del RAP para determinar su viabilidad como sustituto y/o complemento del material virgen para capas de bases granulares. Durante esta evaluación, se logró examinar las propiedades físico-mecánicas del RAP y compararlas con las de las fuentes de material granular virgen. Se observó que existen diferencias significativas entre las fuentes de RAP, debido a la variabilidad de su composición (material de algún tipo de mantenimiento o material de pavimento original). Por lo tanto, es necesario caracterizar el material previo a su utilización [5].

A partir de esto, el reciclado en frío de pavimentos asfálticos resulta ser una técnica que permite reutilizar el 100% de material reciclado y no requiere calentar ningunos de los componentes de la mezcla, siendo elaborada a temperatura de ambiente. Al considerarse cantidades superiores de RAP, el comportamiento físico-mecánico de la mezcla asfáltica cambia, reduciendo la durabilidad y su resistencia final, resultando necesario la utilización de polímeros con la finalidad de mejorar el comportamiento de las mezclas que contengan cantidades mayores al 50% de RAP.

Actualmente se conocen los beneficios ambientales y económicos del empleo del pavimento asfáltico reciclado. Sin embargo, las propiedades del RAP son muy variables, dependiendo de las características iniciales tanto de la mezcla como de los agregados que provienen, del periodo de servicio, de la cantidad de tráfico que soporto, el contenido de ligante. Todos estos factores influyen en el comportamiento de una mezcla asfáltica nueva fabricada con pavimento asfáltico reciclado [6].

Por tal razón los esfuerzos por mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas, están principalmente enfocadas a modificaciones con polímeros siendo favorable conservar las propiedades técnicas y mecánicas de las mezclas en frío. Dejando un campo amplio para el estudio de mezclas asfálticas modificadas con otros tipos de materiales, incluyendo modificadores para mezclas tibias, RAP y fibras sintéticas. Además, las mezclas asfálticas en frío sus propiedades resultan ser menores a comparación de una mezcla asfáltica en caliente. Es por ello, que este estudio tiene como objetivo determinar la influencia de la fibra de polipropileno en las propiedades físicas-mecánicas de una mezcla asfáltica en frío con 100% de pavimento reciclado.

➤ *Reciclado de pavimento asfáltico*

Se le denomina de pavimento asfáltico a la recuperación y reutilización de pavimentos deteriorados mediante el proceso de fresado, con el fin de que el material del pavimento reciclado que contiene asfalto y agregado recuperados, se puedan emplear en la fabricación de nuevas mezclas asfálticas que cuenten con las características de soportar cargas como al inicio de construcción [7].

➤ *Pavimento con mezcla asfáltica reciclada en frío.*

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2013) sostiene que el pavimento con mezcla asfáltica reciclada en frío es una mezcla destinada a la construcción y rehabilitación de pavimentos. Lo que caracteriza a este tipo de mezcla es que se emplea material asfáltico extraído de carpetas asfálticas antiguas que cumplieron su finalidad inicial o su vida útil. Se basa en mezclar el material asfáltico y agregados recuperados con una proporción de emulsión asfáltica como ligante nuevo. En algunos casos, se le adiciona agregados nuevos, agentes rejuvenecedores y otros aditivos, con el principal objetivo de cumplir con las especificaciones técnicas correspondientes y de conformidad a los requerimientos para su aplicación [8].

➤ *Reciclado del 100% de pavimento asfáltico reciclado.*

El reciclado en frío con emulsión es una técnica que permite emplear el 100% de RAP. Esto es viable cuando se

trata de tratamientos a nivel de superficie de rodadura o carpeta asfáltica con espesores de 2 a 4 pulgadas y cuando se requiera trabajos a mayor profundidad debe tener un espesor entre 5 a 6 pulgadas [9]. Es entonces que se puede implementar en su totalidad el material granular reciclado, en el caso que no se requiera adicionar agregado nuevo para corregir su gradación.

➤ *Fibra de polipropileno*

La fibra de polipropileno se define como un material compuesto que está formada por fibras continuas o discontinuas de polipropileno ensambladas en una matriz plástica. Esta fibra es obtenida mediante procesos de extrusión, que consiste en un estiramiento en caliente del material mediante un troquel. A este tipo de polímero termoplástico se le considera hidrofóbicas al no absorber agua, lo que permite que no sea corrosivo. Una de sus principales características es su capacidad de resistencia ante los solventes químicos, como ataques álcalis y ácidos [10].

II. MATERIALES METODOS

A. RAP.

Respecto a los agregados, se empleó un 100% de material pétreo reciclado para la fabricación de mezcla asfáltica en frío. El pavimento asfáltico reciclado empelado se extrajo de la Av. España en la ciudad de Trujillo. Este trabajo consistió en el corte total de la capa de rodadura a temperatura ambiente, en 3 secciones de 1 m por 1 m. Para el inicio del fresado, la superficie estuvo totalmente limpia para evitar la contaminación con materiales extraños para no alterar los resultados. Como resultado del fresado, se extrajo 150 kg de material (muestra de campo) que fue transportado al laboratorio para su estudio y ensayos.

B. Emulsión asfáltica.

La emulsión asfáltica seleccionada para el diseño de mezcla fue el de tipo de catiónica de rotura lenta (CSS-1H), debido a que este tipo de emulsión permiten obtener mezclas estables y son empleadas en mezclas con agregados de granulometría cerrada. Esta clase de emulsión nos permite prolongados períodos de trabajabilidad que permiten el mezclado y compactación. En el proceso rotura de la emulsión, el asfalto se separa del agua para recubrir el agregado y esto depende básicamente de la evaporación del agua [11].

C. Fibra de polipropileno.

La fibra de polipropileno fue adquirida de la empresa Z ADITIVOS ubicada en la ciudad de Trujillo. El producto

tiene el nombre de Fibra de Monofilamento Z PL 60 cuenta con una longitud de 58 mm, fue adicionada en reemplazo del peso total de los agregados de la mezcla asfáltica convencional o patrón.

En esta investigación, considero como muestra patrón 3 briquetas de mezcla asfáltica en frío con 100% de RAP. Además, se adiciono tres porcentajes de fibra de polipropileno: 0.25%. 0.30% y 0.35%, dando un total de 12 briqueta.

D. Lavado asfáltico de pavimento asfáltico reciclado RAP o extracción cuantitativa de asfalto para pavimentos (MTC E 502 / ASTM D 2172 / AASHTO T 164).

El principal objetivo de este ensayo es determinar cuantitativamente el porcentaje de cemento asfáltico y la granularidad del agregado dentro de un pavimento asfáltico reciclado. Mediante un proceso de disolución, para la extracción del asfalto se usó cloruro de metileno como disolvente.

Ecuación 1. porcentaje de asfalto en la porción de ensayo.

$$\% \text{ de Asfalto} = \left| \frac{(W1 - W2) + (W4 - W3)}{(W1)} \right| * 100$$

Donde:

W1 = Masa inicial de muestra (g).

W2 = Masa de muestra lavada (g).

W3 = Masa inicial de filtro (g).

W4 = Masa final de filtro + finos (g).

E. Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas (MTC E 503 / ASTM D C-136 / AASHTO T 30).

El objetivo de este ensayo es determinar la granulometría de los agregados grueso y finos recuperados de las mezclas asfálticas recicladas, por medio de tamices de abertura cuadrada. Los resultados que se obtienen son tomados para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de las partículas con los requisitos que exige la especificación técnica, para así proporcionar datos para el control de probetas de ensayo.

F. Ensayos de caracterización de los agregados obtenidos del RAP.

Para caracterizar los agregados del RAP se practica los ensayos de rigor que normalmente se realizan sobre agregados vírgenes [12].

- *Contenido de humedad del RAP.*
- *Porcentaje de alargamiento y aplanamiento.*
- *Porcentaje de caras fracturadas en los agregados.*
- *Resistencia al desgaste de máquina de los ángeles.*
- *Peso unitario y peso específico.*

G. *Determinación de contenido óptimo de emulsión asfáltica*

Luego de la caracterización del material granular reciclado (RAP), es importante determinar la cantidad suficiente de emulsión asfáltica para cubrir el agregado y proporcionar estabilidad frente la acción del tráfico sin deformaciones fuera de los límites especificados, con una cantidad mínima de vacíos para mantener esta estabilidad, y en última instancia proporcionar una trabajabilidad suficiente que no requiera algún esfuerzo mayor para ser colocada y compactada en obra [13].

El Manual Básico de Emulsiones Asfálticas [14], mediante el Instituto del Asfalto de Norteamérica dispone de la siguiente fórmula empírica para determinar el porcentaje de emulsión en una mezcla asfáltica reciclada.

Ecuación 2. Cálculo de emulsión asfáltica óptima.

$$Pa = \frac{0.035 * A + 0.045 * B + K(C) + F}{R}$$

Donde:

Pa = % de emulsión asfáltica.

A = % de material mayor al tamiz N° 8.

B = % de material entre el tamiz N° 08 y el tamiz N° 200.

C = Porcentaje de menor al tamiz N° 200.

K = 0.15, si el factor C esta entre el rango de 10% y 15%

0.18, si el factor C esta entre el rango de 5% y 10%

0.20, si el factor C es menor a 5%

F = Depende de la absorción del agregado grueso, está en los rangos de 0% y 2%. Se puede adoptar un valor entre 0.7% y 1.0%

R = Asfalto residual presente en la mezcla. Para emulsiones asfálticas los valores en el Rango de 60% a 65%.

H. *Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall modificado (MTC E 504).*

Se hizo este ensayo con el objetivo de determinar la resistencia a la deformación plástica de la mezcla bituminosa para un pavimento flexible. Se hicieron probetas cilíndricas de 101.6 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2 1/2") de altura para ser ensayadas en el aparato Marshall y así determinar los parámetros de comportamiento como la estabilidad, flujo, vacíos de aire de la mezcla.

➤ *Ensayo de estabilidad y flujo:*

Se colocó las briquetas en el baño María a 25 °C, durante 2 horas, para que de esta manera se represente la temperatura que puede experimentar la mezcla asfáltica en frío.

Retiramos las briquetas del baño y la colocamos el amordaza inferior, montando la mordaza junto con el medidor de deformación (flujómetro) calibrado en cero.

Luego se sitúa la briqueta en la zona central de la prensa Marshall, para aplicar la carga a razón constante de 50 mm/min, hasta lograr la falla, cuando haya alcanzado la carga máxima, se tomó nota de ese registro como estabilidad Marshall. El valor del flujo se registra del dial micrómetro en el momento en que la máxima carga comience a decrecer.

I. *Gravedad específica aparente o Bulk y Densidad de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes parafinados (MTC E 506 / ASTM D 1188 / AASHTO T 275)*

Se realizó con el objetivo de determinar el peso específico bulk o aparente de las briquetas compactadas.

Ecuación 3. Cálculo de gravedad específica aparente de briquetas recubiertas con parafina.

$$F = \left| \frac{D_{AL} - A_{AL}}{D_{AL} - E_{AL} - \frac{A_{AL}}{G_{AL}}} \right|$$

Donde:

F = Gravedad específica aparente de briquetas recubiertas con parafina (g/cm³).

D_{AL} = Masa seca de la muestra recubierta (g).

E_{AL} = Masa de la muestra recubierta bajo el agua (g).

G_{AL} = Gravedad específica del cilindro de calibración (g/cm³).

Ecuación 4. Cálculo de gravedad específica Bulk.

$$GS_{Bulk} = \left| \frac{A}{D - E - \frac{D - A}{F}} \right|$$

Donde:

GS_{Bulk} = Gravedad específica Bulk (g/cm³).

A = Masa de la muestra seca en el aire (g).

D = Masa de la muestra seca recubierta (g).

E = Masa de la muestra recubierta bajo el agua (g).
 F = Gravedad específica de recubrimiento determinado a 25 °C.

Ecuación 5. Cálculo de densidad de la muestra.

$$\text{Densidad} = GS_{Bulk} * \gamma$$

Donde:

γ = Densidad del agua a 25 °C 997 Kg/m3.

GS_{Bulk} = Gravedad específica Bulk (g/cm3).

J. *Peso específico teórico máximo (MTC E 508 / ASTM D 2041).*

Se hizo este ensayo con el objetivo de determinar la gravedad específica teórica máxima y densidad de una mezcla bituminosa no compactada. El resultado es usado para el cálculo de vacíos de aire de una mezcla bituminosa compactada (briquetas).

Ecuación 6. Cálculo de peso específico teórico máximo.

$$PS_{TM} = \left| \frac{A}{A + B - C} \right| * \frac{dw}{0.9970}$$

Donde:

PS_{TM} = Peso específico teórico máximo (g/cm3).

A = Masa de la muestra seca en el aire (g).

B = Masa picnómetro lleno con agua (g).

C = Masa del picnómetro lleno de agua y muestra (g).

d_w = Peso unitario del agua a la temperatura de ensayo (Mg/m3).

0,9970 = Peso unitario del agua a 25 °C, Mg/m3.

K. *Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas (MTC E 505 / ASTM D 3203 / AASHTO T 269).*

Para este ensayo se usaron briquetas compactadas elaboradas en laboratorio con el objetivo de determinar el porcentaje de vacíos con aire de una mezcla asfáltica densa cuando el porcentaje de vacíos está por debajo de 10%, y mezclas compactadas abiertas si el porcentaje de vacíos es mayor al 10% se diseñará como mezcla asfáltica abierta.

Ecuación 7. Cálculo de porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica compactada

$$\%_{Vacios} = \left| 1 - \frac{GS_{Bulk}}{PS_{TM}} \right| * 100$$

Donde:

$\%_{Vacios}$ = Porcentaje de vacíos (%).

GS_{Bulk} = Gravedad específica aparente Bulk ((g/cm3).

PS_{TM} = Peso específico teórico máximo (g/cm3).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Lavado asfáltico de pavimento reciclado RAP.

TABLA I
 RESULTADOS DE LAVADO ASFÁLTICO DE PAVIMENTO RECICLADO RAP

Descripción	Unid	muestra 1	muestra 2	muestra 3
W1: Masa inicial de muestra	g	1,500.00	1,500.00	1,500.00
W2: Masa de muestra lavada	g	1,425.32	1,432.24	1,428.22
W3: Masa inicial de Filtro	g	16.45	16.42	16.46
W4: Masa final de Filtro+finos	g	24.50	25.02	24.85
W5: Masa residual de la muestra	g	82.73	76.36	80.17
% de Asfalto	%	5.52%	5.09%	5.34%

Prom. % de Asfalto **%** **5.32%**

Nota. Esta tabla muestra los resultados del ensayo de lavado asfáltico realizado al material reciclado (RAP), del cual se obtiene un promedio de porcentaje de asfalto de 5.32%.

B. Caracterización de agregados provenientes del pavimento asfáltico reciclado RAP.

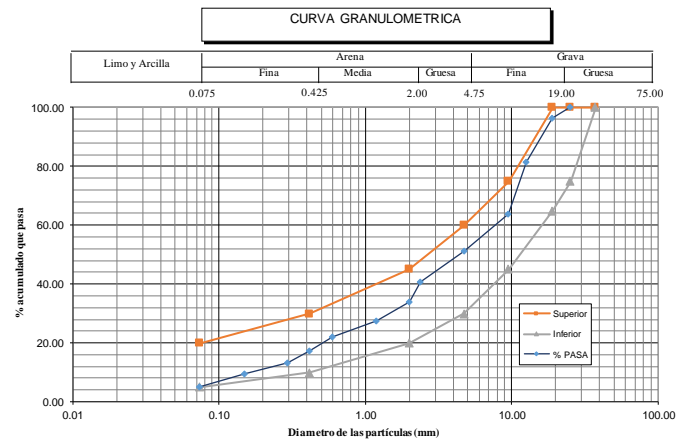


Figura 01: Curva granulométrica obtenida del ensayo realizado al material RAP, así mismo se observa que está dentro de los límites especificados para para la realización de mezclas asfáltica recicladas.

C. Caracterización de agregados proveniente del pavimento asfáltico reciclado RAP.

TABLA II
 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS DEL RAP

Ensayo De Laboratorio	Requerimiento Tabla 424-01 Eg-2013	Resultado	Cumple
Contenido De Humedad Total	NP	0.90% 0.91%	-

Evaporable			
Peso Especifico Y Porcentaje De Absorción De Agregado Grueso	NP	2.60 g/cm ³ 0.96 %	-
Peso Especifico Y Porcentaje De Absorción De Agregado Fino	NP	2.78 g/cm ³ 0.47 %	-
Peso Unitario Suelto Y Compactado De agregado Fino	NP	1730.03 Kg/cm ³ 1894.76 Kg/cm ³	-
Peso Unitario Suelto Y Compactado De agregado Grueso	NP	1632.89 Kg/cm ³ 1789.45 Kg/cm ³	-
Degradación Por Abrasión E Impacto En Máquina Los Angeles	25% Máx	20.79%	SI
Porcentaje De Partículas Fracturadas En Agregados Gruesos	75% Min.	90.21%	SI
Partículas Planas, Alargadas O Planas Y Alargadas En Agregado Grueso	NP NP 10% Máx.	24.09% 16.80% 9.83%	SI
Equivalente De Arena	50% Min.	46.59%	NO
Durabilidad Al Sulfato De Magnesio MgSO ₄	18% Máx.	9.81%	SI
Sales Solubles En Agregados De Pavimentos Flexibles -Fino	NP	0.14%	-

Nota. Esta tabla muestra el resumen comparativo de resultados de la caracterización de agregados proveniente del pavimento asfáltico reciclado y los requerimientos de la normativa MTC EG-2013.

D. Contenido óptimo de emulsión asfáltica.

TABLA III
RESULTADOS DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA

Descripción	Und	Datos
A: Porcentaje de material mayor al Tamiz N°8	%	48.84
B: Porcentaje de material entre el Tamiz N°8 y el Tamiz N°200	%	45.93
C: Porcentaje de material menor al Tamiz N°200	%	5.23
Kc: 0.15 (Si el factor C esta entre los rangos de 10% y 15%) 0.18 (Si el factor C esta entre los rangos de 5% y 10%) 0.20 (Si el factor C es menor a 5%)	%	0.18
F: Depende de la absorción del agregado, está en los rangos de 0% y 2%. Se puede adoptar un valor entre 0.7% y 1.0%.	%	0.72
R: Asfalto residual presente en la mezcla. Para emulsiones asfálticas los valores varían en el rango de 60% a 65%.	%	61.00

Pa: Porcentaje de Emulsión Asfalto. % **7.67**

Nota. Esta tabla muestra que el porcentaje de emulsión asfáltica es de 7.67%, el cual es un parámetro considerado en el diseño de mezcla.

E. Estabilidad y flujo Marshall.

TABLA IV
RESULTADOS DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL

Agregado Reciclado (RAP)	% de Emulsión Asfáltica	% de fibra de polipropileno	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)
		0%	5.15	9.08
100%	7.67 %	0.25%	5.54	7.25
		0.30%	7.06	8.22
		0.35%	6.19	9.25

Nota. Esta tabla muestra el resumen de resultados de los parámetros Marshall de estabilidad y fluencia en las mezclas de estudio.

En la figura 02, se visualiza que la probeta de mezcla con RAP, más 0.30% de fibra de polipropileno, alcanzan una estabilidad óptima de 7.06 kN. De esta manera, la fibra de polipropileno logra mejorar la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir la deformación y el desplazamiento ante la acción de las cargas que resultan del tránsito vehicular. Por lo cual, se puede decir que la adición de fibra de polipropileno como agregado cumple con el parámetro Marshall de estabilidad, siendo de 5.44 kN en mezclas de briquetas asfálticas para Tránsito Medio y 2.22 kN en mezcla de agregados – Emulsión Asfáltica, según lo exigido por el Manual de Carretera MTC EG-2013.

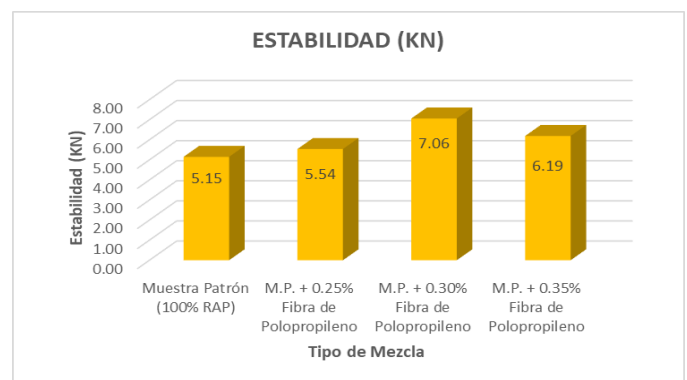


Figura 02: Gráfico comparativo de resultados promedios de Estabilidad Marshall.

En la figura 03 se observa que las probetas recicladas alcanzan un flujo de 9.08 mm, manteniéndose dentro de los límites indicados por la norma. Por otro lado, con la adición del 0.25% de fibra de polipropileno, el flujo disminuye a 7.25 mm; sin embargo, medida que se aumenta el porcentaje de

fibra el flujo incrementa. Se determina que las probetas con un 0.30% de fibra alcanzan un flujo de 8.22 mm, y las probetas con un 0.35% de fibra alcanzan un valor máximo de 9.25 mm de flujo, manteniendo los resultados dentro de los límites establecidos.

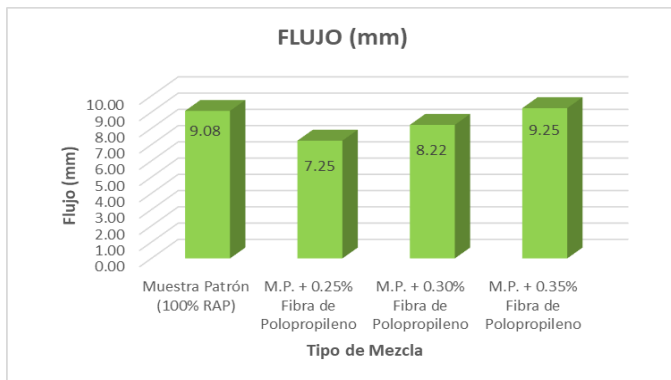


Figura 03: Gráfico comparativo de resultados promedios de Flujo Marshall.

F. *Determinación de gravedad específica Bulk o Aparente y densidad.*

El manual de carreteras EG 2013 no indica parámetros requeridos para este ensayo.

TABLA V
RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK O APARENTE Y DENSIDAD.

Agregado Reciclado (RAP)	% de Emulsión Asfáltica	% de Fibra de Polipropileno	Gravedad Específica Bulk (g/cm ³)	Densidad (g/cm ³)
100%	7.67 %	0%	1.94	1.94
		0.25%	1.92	1.91
		0.30%	1.94	1.93
		0.35%	1.94	1.93

Nota. Esta tabla muestra el resumen de resultados de gravedad específica bulk y densidad en las mezclas de estudio.

Los resultados de la figura 04 indican que las probetas recicladas tienen un Peso Específico Bulk de 1.94 g/cm³ y una densidad de 1.93 g/cm³. Por otro lado, con la adición del 0.25% de fibra, tanto el peso específico bulk como la densidad disminuyen a 1.92 g/cm³ y 1.91 g/cm³, respectivamente. Sin embargo, a medida que se incrementa el porcentaje de fibra, estas propiedades tienden a aumentar hasta alcanzar un punto óptimo, logrando un valor máximo de 1.94 g/cm³ de peso específico y 1.93 g/cm³ de densidad en las mezclas con 0.30% y 0.35% de fibra de polipropileno.

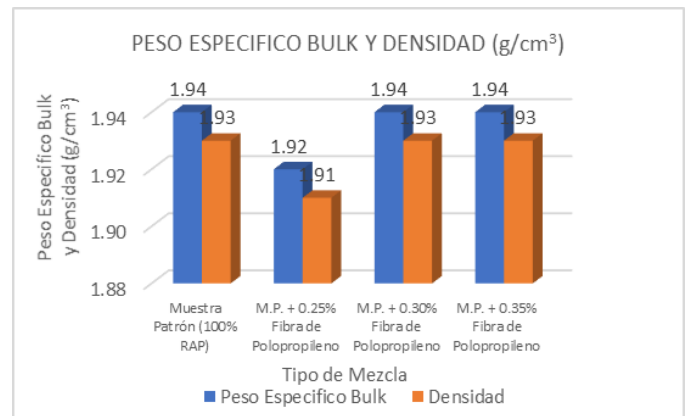


Figura 04: Gráfico comparativo de resultados promedios de Peso Específico Bulk y Densidad.

G. *Determinación de Peso específico teórico máximo.*

Cabe indicar que la normativa, como el Manual de Carreteras EG 2013, no establece parámetros para este ensayo. Sin embargo, debemos tener en cuenta que los resultados sirvieron como referencia para el cálculo de vacíos de aire en la mezcla bituminosa compactada (probetas).

TABLA VI
RESULTADOS DE PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO.

Agregado Reciclado (RAP)	% de Emulsión Asfáltica	% de Fibra de Polipropileno	Peso Específico Teórico Máximo(g/cm ³)
100%	7.67 %	0%	2.01
		0.25%	2.00
		0.30%	2.02
		0.35%	2.02

Nota. Esta tabla muestra el resumen de resultados de peso específico teórico máximo en las mezclas de estudio.

En la figura 05 se observa que los resultados obtenidos de los ensayos fueron los siguientes: 2.01 g/cm³ para probetas recicladas, 2.00 g/cm³ para probetas recicladas con un 0.25% de fibra, 2.02 g/cm³ para probetas recicladas con un 0.30% de fibra, y 2.02 g/cm³ para probetas recicladas con un 0.35% de fibra.

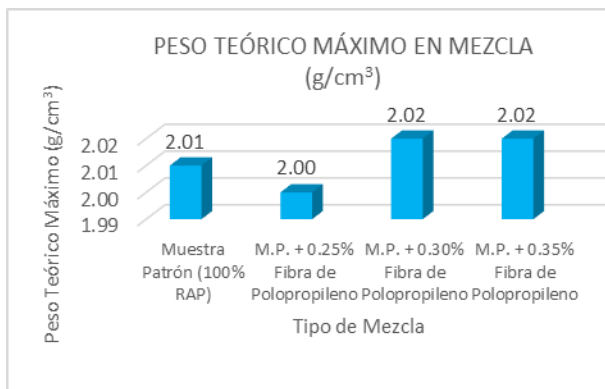


Figura 05: Gráfico comparativo de resultados promedios de Peso Teórico Máximo en Mezcla.

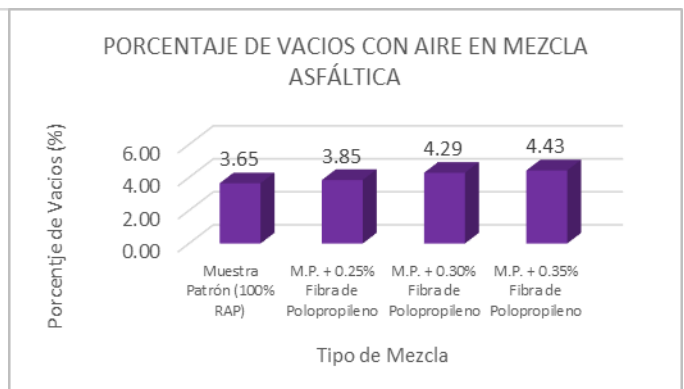


Figura 06: Gráfico comparativo de resultados promedios de Porcentaje de Vacíos con Aire en Mezcla ASFÁLTICA.

H. Determinación de Porcentajes de vacíos con aire en mezclas asfálticas.

Según el Manual de Carreteras EG 2013, se indica que el porcentaje de vacíos debe estar comprendido entre un mínimo del 3% y un máximo del 5%.

TABLA VII
RESULTADOS DE PORCENTAJES DE VACÍOS CON AIRE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Agregado Reciclado (RAP)	% de Emulsión Asfáltica	% de fibra de polipropileno	% de Vacíos con Aire
100%	7.67 %	0%	3.65%
		0.25%	3.85%
		0.30%	4.29%
		0.35%	4.43%

Nota. Esta tabla muestra el resumen de resultados porcentaje de vacíos en las mezclas de estudio.

En la figura 06, se observa que la probeta reciclada alcanza un porcentaje de vacíos de aire del 3.65%, estando dentro del parámetro indicado por la norma. Por otro lado, se registran valores de 3.85% de porcentaje de vacíos de aire para las probetas con 0.25% de fibra, 4.29% para probetas con 0.30% de fibra y 4.43% para las probetas con 0.35% de fibra. Estos valores muestran una tendencia de aumento en esta propiedad a medida que se incrementa el porcentaje de fibra de polipropileno, manteniéndose dentro del parámetro establecido por la norma.

En la investigación realizada en la ciudad de Cusco por Gómez Elorrieta, J. C. [15], se muestran resultados para una mezcla asfáltica en frío con un 50% de agregado reciclado y un 6% de emulsión asfáltica. Estos resultados indican una estabilidad de 14 kN, una fluencia de 3.70 mm, un porcentaje de vacíos del 5.00%, un peso específico aparente de 2.21 g/cm³, una densidad de 2.21 g/cm³ y un peso específico teórico máximo de 2.33 g/cm³ a una compactación de 50 golpes la briqueta.

Por otro lado, en nuestra investigación se obtuvieron resultados con un mayor contenido de emulsión asfáltica, del 7.67%, y con un 100% de RAP, lo que dio resultados de estabilidad de 5.15 kN, una fluencia de 9.08 mm, un porcentaje de vacíos del 3.65%, un peso específico aparente de 1.94 g/cm³ con una densidad de 1.93 g/cm³ y un peso específico teórico máximo de 2.01 g/cm³ a una compactación de 50 golpes la briqueta.

Se puede identificar que ambas investigaciones no muestran similitud o aproximación en los valores obtenidos. Esta diferencia en los resultados se debe a que en nuestra investigación se empleó en su totalidad el RAP sin adición de agregado virgen. Sin embargo, se puede inferir que los resultados obtenidos en ambas investigaciones se encuentran dentro de los parámetros especificados por la norma, que son un mínimo de 2.22 kN de estabilidad y un porcentaje de vacíos de 3 – 5%. En lo que respecta a la fluencia, solo el valor obtenido en nuestra investigación está dentro de lo exigido por la normativa (8 – 16 mm) para mezclas asfálticas en caliente, ya que la normativa vigente no establece requisitos de flujo para mezclas en frío.

Así mismo, en la investigación de Macas Juna, W. E. et al [16], en la cual buscaron determinar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío modificada al emplear RAP con polvo de caucho y emulsión asfáltica CSS-1h, se evidenció que la mezcla en la cual se utilizó solo RAP presenta una mayor estabilidad en comparación con la mezcla con RAP + 1% de caucho; esto es debido a que el material

empleado, al ser reciclado, ya contiene un porcentaje de asfalto residual que provee una mejor resistencia al agregado (RAP). Mientras que, en nuestra investigación, donde se optó por modificar con fibra de polipropileno la mezcla compuesta de RAP y emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta (CSS-1H), se observa que se tiene otro tipo de comportamiento, ya que los valores de estabilidad presentan un incremento conforme se va variando el porcentaje de adición de fibra de polipropileno.

IV. CONCLUSIONES

La adición de fibra de polipropileno tiene una influencia significativa en el incremento de las propiedades físico – mecánicas de la mezcla asfáltica en frío con 100% RAP. De las adiciones de 0.25%, 0.30% y 0.35% de fibra de polipropileno en relación al peso total del agregado se determinó que el porcentaje óptimo de fibra que presenta un mejor desempeño en los ensayos Marshall, es la de 0.30%; en consecuencia, esto proporciona mayor respuesta estructural del pavimento frente a carga vehicular.

Se determinó la caracterización física del material reciclado (RAP) empleando ensayos según las normas del MTC, ASTM y AASHTO, especificadas en el Manual de Carreteras EG-2013, Manual de Ensayo de Materiales y la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos; se obtuvieron resultados favorables para el diseño de mezcla asfáltica reciclada en frío para tránsito medio, manteniéndose dentro de los parámetros que exige cada norma.

Se determinó el contenido de porcentaje de Emulsión Asfáltica para el diseño de una mezcla bituminosa reciclada en frío mediante el Método Marshall Modificado, el cual resultó ser de 7.67%. Este resultado se obtuvo directamente utilizando la fórmula del Manual Básico de Emulsiones Asfálticas (MS - N°19). Los valores empleados en la fórmula se obtuvieron del ensayo de Análisis Granulométrico del agregado reciclado.

De otro lado se determina que, la reutilización de pavimento asfáltico reciclado (RAP) tiene una serie de beneficios sobre otro método de rehabilitación. Teniendo como principal, el hecho de reducir considerablemente el impacto ambiental, al no utilizar agregado virgen, en consecuencia, reduce el transporte y el consumo de energía. Agregado a ello, si se aplica de manera adecuada se tiene un buen resultado en el costo-beneficio.

REFERENCIAS

[1] Reyes, R. (7 de febrero de 2013). *Reciclado de pavimentos*. Blog de la UDLAP. <https://blog.udlap.mx/blog/2013/02/recicladedepavimentos/>

[2] Leiva-Villacorta, F. y Vargas-Nordbeck, A. (2017). Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP). *Revista Infraestructura Vial*, 19(33), 35-34. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/infraestructura/v19n33/2215-3705-infraestructura-19-33-35.pdf>

[3] Silvestre Velasquez, D. (2017). Comparación técnica y económica entre las mezclas asfálticas tradicionales reforzadas con plástico reciclado en la ciudad de lima -2017 [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional Universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/1506>

[4] Gómez Meijide, B. (2015). *Aplicación sostenible de residuos de construcción y demolición como árido reciclado de mezclas bituminosas en frío* [Tesis de doctorado, Universidade da Coruña]. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=45500>

[5] Camacho-Salazar, P. (2016). *Evaluación del reciclado de pavimentos asfálticos (RAP) para uso en pavimentos expuestos*. [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio TEC. <https://hdl.handle.net/2238/9127>

[6] Morales Fournier, J., Alonso Aenlle, A., Moll Martínez, R. y López Quintana, O. (2019). Influencia del ensayo de fragmentación en la combinación granulométrica de las mezclas asfálticas con adición de material fresado de los pavimentos. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 13(2), 1-12. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193960058002>

[7] Patiño Boyacá, N. B., Reyes-Ortiz, O. J. y Camacho-Taúta, J. F. (2015). Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas colombianas con adición de pavimento reciclado 100%. *Tecnura*, 19(43), 74-83. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a05>

[8] Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013.

[9] Paccori Mori, F. L. (2018). *Propuesta técnica de aplicación del pavimento flexible reciclado para rehabilitación vial – Pachacamac* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana los Andes]. Repositorio Institucional UPLA. <https://hdl.handle.net/20.500.12848/804>

[10] Conejo Poveda, D. H. y Vargas Camacho, S. A. (2017). *Análisis comparativo del comportamiento mecánico de mezclas de concreto asfáltico tipo 2 (MDC-19) con adición de polímeros* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia. <http://hdl.handle.net/10983/14549>

[11] Villa Chaman, V. M. (2007). *Reciclado In Situ en frío de pavimento empleando emulsiones asfálticas – aplicación: Colegio FAP Manuel Polo Jiménez, Urb. San Gabino – Santiago de Suco* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Institucional UPC.

[12] Hernández Hernández, P. J. (2014). *Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado, ligante hidráulico y emulsiones asfálticas* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55166>

[13] Macas Juna, W. E. y Méndez Ramos, J. G. (2022). *Análisis de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío modificada utilizando rap con polvo de caucho* [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/27340>

[14] Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. (2001). *Emulsiones Asfálticas (19ª ed.)*. https://www.academia.edu/28399064/Manual_Basico_de_Emulsiones_Asfalticas_MS_No_19_para_Publicar

[15] Gomez Elorrieta, J. C. y Gomez Peña, J. A. (2020). *Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a una mezcla patrón, Cusco 2019* [Tesis de pregrado, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio Institucional UAC. <https://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/3609>

[16] Macas Juna, W. E. y Méndez Ramos, J. G. (2022). *Análisis de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío modificada utilizando rap con polvo de caucho* [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/27340>

