




DESIGN AND ASSESSMENT OF SUSTAINABLE PAVEMENTS USING RECYCLED PLASTICS AND RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)

Jorge Polanco-Argüelles¹; Luz Saico-Florez²; Victor Carpio-Quispe³

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c23135@utp.edu.pe, u18305846@utp.edu.pe, u17306128@utp.edu.pe

Abstract – This research analyses the use of recycled materials as a sustainable solution for pavement construction, utilizing plastics and Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Hot Mix Asphalt (HMA). The aim is to reduce both the environmental impact and the costs associated with pavement construction by utilizing waste materials that would otherwise pollute the environment. The study is conducted in the Arequipa region of Peru, where the mechanical and physical properties of the mixtures and their economic viability were evaluated. The results aim to offer viable alternatives to improve the durability and sustainability of road networks, while also promoting the efficient recycling of plastic and asphalt waste, thus contributing to the reduction of pollution and the development of sustainable infrastructures.

Keywords: Sustainable pavement, Plastic, Reclaimed Asphalt.

Diseño y evaluación de pavimentos sostenibles utilizando materiales reciclados de plástico y pavimento de asfalto recuperado RAP.

Jorge Polanco-Argüelles¹; Luz Saico-Florez²; Victor Carpio-Quispe³

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c23135@utp.edu.pe, u18305846@utp.edu.pe, u17306128@utp.edu.pe

Resumen - Esta investigación analiza el uso de materiales reciclados como una solución sostenible para la pavimentación, utilizando plásticos y Pavimento Asfáltico Recuperado o RAP por sus siglas en inglés "Reclaimed Asphalt Pavement", en Mezclas Asfálticas en Caliente, HMA por sus siglas en inglés "Hot Mix Asphalt". Se busca reducir tanto el impacto ambiental como los costos asociados a la construcción del pavimento, aprovechando residuos que, de otro modo, contaminarían el medio ambiente. El estudio se lleva a cabo en la región de Arequipa en Perú, donde se evaluaron las propiedades mecánicas y físicas de las mezclas y su análisis económico. Los resultados pretenden ofrecer alternativas viables para mejorar la durabilidad y sostenibilidad de las redes viales, y al mismo tiempo fomentar el reciclaje eficiente de desechos plásticos y asfálticos, contribuyendo así a la disminución de la contaminación y el desarrollo de infraestructuras sostenibles.

Palabras clave: Pavimento sostenible, Plástico, Asfalto recuperado.

I. INTRODUCCIÓN

El asfalto se utiliza ampliamente en la construcción de pavimentos y carreteras, está compuesto principalmente por betún, que es un material derivado del petróleo caracterizado por su durabilidad, resistencia a la intemperie y capacidad para soportar cargas pesadas, y asfalto, que se emplea como aglutinante en mezclas asfálticas, combinado con agregados minerales para formar una superficie uniforme y resistente al tráfico vehicular [1].

La recuperación de asfalto es un proceso sostenible que consiste en la reutilización de materiales provenientes de pavimentos asfálticos envejecidos o dañados. Este proceso permite extraer y reprocesar los componentes del asfalto, como el betún y los agregados para su incorporación en nuevas mezclas asfálticas. La recuperación de asfalto no solo reduce la demanda de materiales vírgenes, sino que también minimiza los residuos generados en la construcción y mantenimiento de carreteras, contribuyendo a la economía circular [2].

En este contexto, se ha promovido ampliamente la reutilización de este tipo de residuos a través del RAP el cual se obtiene mediante técnicas de fresado y trituración de

pavimentos existentes, el cual se puede incorporar nuevas mezclas asfálticas en porcentajes que varían según las especificaciones técnicas y normativas. Este enfoque promueve la sostenibilidad ambiental al reducir el consumo de recursos no renovables y disminuir las emisiones de carbono asociadas a la producción de materiales nuevos resaltando sus beneficios tanto ambientales y económicos [3][4].

A nivel mundial, se producen anualmente aproximadamente 430 millones de toneladas métricas de plástico, de las cuales solo el 9% se recicla con éxito, mientras que el 22% se deshecha de manera inadecuada [5]. La incorporación de aditivos derivados de residuos del Tereftalato de Polietileno (PET) en mezclas bituminosas ha demostrado mejoras significativas en las propiedades de las mezclas que contienen RAP, lo que contribuye a una mayor sostenibilidad en la pavimentación [6]. Estudios recientes indican que el uso de RAP y PET no solo mejora las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, sino que también optimiza su durabilidad, flexibilidad y resistencia al agrietamiento [7]. Además, la combinación de estos materiales permite reducir los costos de producción, lo que la convierte en una alternativa viable desde el punto de vista técnico y económico [5]. Sin embargo, todavía no se ha establecido un porcentaje óptimo para la implementación de plástico reciclado y RAP en pavimentos sostenibles [8].

La extracción, producción y eliminación inadecuada de plásticos y RAP representan una amenaza significativa para el medio ambiente, contribuyendo inadecuadamente a la contaminación de los ecosistemas y al aumento del calentamiento global. Cada año, entre 19 y 23 millones de toneladas de residuos plásticos terminan en cuerpos de agua como lagos, ríos y océanos [10]. En América Latina, se generan 17.000 toneladas diarias de residuos plásticos, de las cuales el 30% se deposita en basureros a cielo abierto [11]. En Perú, se generan 886 toneladas diarias de residuos plásticos, lo que representa el 46% del total nacional [12]. En el ámbito de la pavimentación, el 90% de las carreteras a nivel mundial están construidas con asfalto, pero solo el 36% de este pavimento es sometido a reciclaje [13], esta situación no solo

genera altos costos en el sector de la construcción de carreteras, sino que también contribuye al impacto ambiental negativo debido a la sustitución de pavimentos asfálticos convencionales y la mala gestión del RAP [8].

Por lo tanto, existe una necesidad urgente de desarrollar soluciones sostenibles y económicas que optimicen el reciclaje de residuos plásticos y RAP, reduciendo tanto el impacto ambiental como los costos de construcción.

Este estudio busca responder a la pregunta: ¿Cómo manejar pavimentos sostenibles empleando materiales reciclados de plástico y RAP en mezclas asfálticas en caliente para garantizar su diseño a través del análisis en la región de Arequipa en el 2024?

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Este artículo se basa en un enfoque cuantitativo, recolectando datos y analizando las características del pavimento sostenible utilizando materiales reciclados PET y RAP. La investigación es experimental, ya que se realizó un análisis detallado de la información existente y, además, se realizan ensayos con muestras realizadas en la ciudad de Arequipa en Perú.

La identificación de RAP, el material proveniente de proyectos de rehabilitación y mantenimiento de carreteras en la ciudad de Arequipa. Posteriormente, es triturado y tamizado por la malla de 0.75 pulgadas. Además, el PET es recolectado, limpiado, picado y molido para su uso en la mezcla de pavimentos sostenibles, como se visualiza en la Fig. 1.



Figura 1 Identificación de RAP, en a) pavimento recuperado triturado, b) pavimento recuperado de carreteras, c) PET reciclado y d) PET picado

A. Caracterización física de los agregados y RAP

Las características de los agregados inician por muestreo, se realiza el cuarteo de los materiales finos y gruesos, que permite obtener una muestra representativa, que posteriormente será utilizada para el tamizado, como se muestra en la Fig. 2.



Figura 2 Cuarteo de material fino y material grueso



Figura 3 Granulometría de agregado fino y agregado grueso

Seguidamente, se realiza el análisis granulométrico, que consiste en cuantificar la distribución de tamaños de las partículas de los agregados fino y grueso mediante el uso de un grupo de tamices con diferentes medidas, como se muestra en la Fig. 3. Adicionalmente se analiza el peso específico, clasificando los agregados por densidad siendo útil para el cálculo de proporciones para el diseño de mezclas, optimizando así costos y calidad. La absorción determina cuánta agua retiene el agregado, lo que es crucial para controlar la humedad y la resistencia de la mezcla, como se muestra en la Fig. 4. Estos factores permiten predecir el comportamiento a largo plazo de los agregados y prevenir problemas de durabilidad.



Figura 4 Peso específico y absorción de material fino

Se analiza el peso unitario del material fino y grueso, que es útil para verificar que los agregados cumplan con las especificaciones técnicas requeridas, influyendo directamente en la durabilidad y resistencia del pavimento, como se muestra en la Fig. 5.



Figura 5 Peso unitario de agregado fino y agregado grueso

B. Diseño de mezcla asfáltica convencional

Este diseño inicia introduciendo el agregado fino, agregado grueso y las briquetas al horno a 120 °C, este proceso permite obtener una combinación más inherente entre ellas, en la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos identificando los niveles de asfalto desde 4,0% hasta 6,2%.



Figura 6 Calentado y mezclado de materiales

Este proceso continúa pesando los agregados y el cemento asfáltico, considerando el porcentaje óptimo en cada caso y repitiendo el proceso tres veces, luego se llevan al horno durante sesenta minutos, las muestras son transferidas a un sartén sobre la hornilla junto con el cemento, se controla la temperatura asegurando 140°C para las muestras y 120°C para el cemento, se mezcla homogéneamente hasta que el cemento cubra completamente los agregados.

Tabla 1 Porcentaje óptimo de asfalto y dosificación de materiales.

Material dosificado	Nivel de asfalto				
	4,0%	4,5%	5,0%	5,6%	6,2%
Arena (gr)	540,5	537,6	534,7	531,2	527,7
Grava (gr)	609,5	606,2	602,9	599	595
Asfalto 60/70	49,9	56,1	62,4	69,8	77,3

Al retirar la briqueta del horno, se procede a engrasarla internamente y colocar papel filtro en la base y sobre la mezcla, llevándola a la máquina compactadora, configurada para aplicar 75 golpes en la base inferior y superior, después de 24 horas se desmoldarán las briquetas para medir su altura y peso, y analizar la capacidad de las briquetas para resistir la absorción de agua y su rendimiento en condiciones húmedas, para esto se envuelven las 15 briquetas en parafina y son sumergidas en agua durante 30 minutos, finalmente se pesan las briquetas sumergidas, este ensayo de Resistencia a la Humedad se muestra en la Figura 7.

Para determinar la proporción óptima de asfalto que debe contener una mezcla para que cumpla con los requisitos de estabilidad, fluencia y densidad, buscando un equilibrio entre resistencia y flexibilidad se realiza el ensayo de Marshall.



Fig. 7 Compactación de briquetas, análisis de resistencia de humedad y ensayo de Marshall

Los resultados se muestran en la Tabla 2, determinando el porcentaje de asfalto y dosificaciones ideales de los agregados.

Tabla 2 Porcentaje de dosificación de asfalto y agregados

Porcentaje de dosificación	
Agregado Grueso	53,0%
Agregado Fino	47,0%
Asfalto PEN 60/70	5,4%

C. Diseño de mezcla asfáltica sostenible

Una vez obtenida la dosificación ideal para el diseño de mezcla, se realizó el proceso para la combinación de los diferentes componentes de la mezcla, que incluyen el agregado grueso o grava, la arena, el asfalto PEN, el RAP y el PET, para ello se utilizó la dosificación obtenida de los resultados experimentales de la Tabla 2,

Después, para la preparación de las muestras, se utilizó 1,200 kg de mezcla, y considerando el 53% de proporción de grava se obtiene la cantidad de grava necesaria para cada muestra, se realiza igualmente con el agregado fino, considerando el 47% para obtener la cantidad correspondiente, mientras que, para el asfalto PEN, se realizó el cálculo con 5,4%.

Tabla 3: Dosificación total en gramos de los materiales

Agregado Grueso (gr)	601,7
Agregado Fino (gr)	533,5
Asfalto (gr)	64,8

Utilizando la dosificación total para los materiales de la Tabla 3, se calcula la dosificación para el agregado diferenciado por RAP al 15, 20 y 25% de agregado grueso y PET en 1, 2 y 3% del agregado fino, mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4: Dosificación en gramos de los agregados, RAP y PET

Porcentaje de RAP	15%	20%	25%
Porcentaje de PET	1%	2%	3%
Agregado Grueso (gr)	511,4	481,4	451,3
Pavimento Recuperado	90,26	120,3	150,4
Agregado fino	528,2	522,8	517,5
PET	5,34	10,67	16,01
Cemento asfáltico PEN 60/70	64,8	64,8	64,8

Finalmente, continúan los mismos procedimientos aplicados en la mezcla asfáltica convencional, comenzando con el calentamiento de los agregados y el asfalto hasta alcanzar las temperaturas controladas adecuadas para su mezcla, asegurando que tanto los materiales se encuentren en condiciones óptimas para su combinación, sin embargo, en este caso, se incorpora el RAP y el PET, los cuales se integrarán a la mezcla para evaluar su impacto en las propiedades del asfalto. Estos materiales reciclados no solo contribuyen a la sostenibilidad del proyecto, sino que también influyen en la resistencia, durabilidad y desempeño de la mezcla final, se realiza también el ensayo Marshall de la misma manera que en las mezclas tradicionales.

D. Costos de fabricación de mezclas

Se realizará el Análisis de Precios Unitarios, el cual es fundamental para verificar los costos asociados con la producción de pavimentos sostenibles y convencional, siguiendo los pasos:

1) *Identificar todos los componentes y recursos necesarios para la producción de pavimentos sostenibles y convencionales:* esto incluye materiales como el asfalto convencional, agregados, RAP, PET, así como mano de obra, equipos y energía.

2) *Determinar las cantidades necesarias:* de cada componente por unidad de medida.

3) *Obtener los costos unitarios de cada componente y recurso:* estos costos pueden ser obtenidos a través de cotizaciones de proveedores locales, bancos de datos que contienen información sobre los costos de materiales utilizados en la construcción.

4) *Cálculo de Costos Parciales:* el cual se realiza multiplicando las cantidades medidas de cada componente por sus respectivos costos unitarios para obtener los costos parciales de cada elemento del pavimento.

5) *Totalización de Costos:* Suma todos los costos parciales para obtener el costo total estimado, ya sea para el pavimento sostenible y el pavimento convencional.

III. RESULTADOS

A. Propiedades físicas de los agregados

Los resultados de análisis de tamaño de las partículas mostrados en la Tabla 5, identifica que las partículas más grandes se retienen en mallas más gruesas, como la malla de 19 mm, mientras que las partículas más pequeñas logran pasar a través de mallas con aberturas menores como la malla de 0,075 mm, además, el porcentaje retenido de las partículas combinadas que quedan en cada malla se muestra en la columna correspondiente, por ejemplo, el 17,3% de la masa total se retuvo en la malla de 19 mm, el 4,9% en la malla de 0,60 mm y así sucesivamente hasta llegar al fondo.

El porcentaje acumulado indica cuánta masa total ha quedado en las mallas hasta el punto correspondiente, el 17,3% de la muestra queda retenido con 19 mm y un 82,7%, de la diferencia del 100% con 17,3% del retenido combinado.

Tabla 5 Análisis de tamaño de partículas

Gradación MAC-1					
Código de informe		DA015M1	DA015M2	Retenido combinación (%)	Retenido acumulado (%)
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido Grava (%)	Retenido Arena (%)		
4 in.	100,00				
3 1/2 in.	90,00				
3 in.	75,00				
2 1/2 in.	63,50				
2 in.	50,00				
1 1/2 in.	37,50				
1 in.	25,00			0,00	100,00
3/4 in.	19,00	31,50		17,30	82,70
1/2 in.	12,50	26,40		14,50	68,10
3/8 in.	9,50	15,10		8,30	59,80
No. 4	4,75	26,30	5,50	16,90	42,90
No. 8	2,36	0,60	9,00	4,40	38,50
No. 10	2,00		2,40	1,10	37,40
No. 16	1,18		7,70	3,50	33,90
No. 30	0,60		10,90	4,90	29,00
No. 40	425,00		6,60	3,00	26,10
No. 50	300,00		6,80	3,10	23,00
No. 80	180,00		14,20	6,40	16,60
No. 100	150,00		6,50	2,90	13,70
No. 200	75,00		16,80	7,50	6,10
Fondo			13,60	6,10	0,00

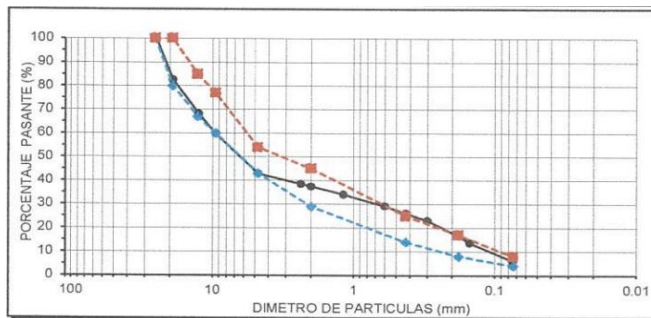


Fig., 8 Curva granulométrica

La Fig. 8 muestra cómo se distribuyen las partículas en función de su tamaño, esta gráfica en el eje horizontal contiene el tamaño de las partículas en milímetros desde la más gruesas (19 mm) hasta las más finas (pasante 0,075 mm), y, en el eje vertical el acumulado retenido en porcentaje, que es la proporción de material que ha pasado por cada malla, lo que indica cuántas partículas están presentes en cada rango de tamaño. Por lo tanto, según la curva tanto el agregado grueso como el fino, están dentro del rango para ser un buen material para usar.

Tabla 6: Porcentaje de contenido de humedad

Humedad de muestra		DA015MI	DA015M2
		Agregado grueso	Agregado fino
Ítem	Descripción	1,00	1,00
1	Peso de la muestra húmeda con tara	1354,4	580,7
2	Peso de la muestra seca con tara	1348,9	533,5
3	Peso de la tara	0,0	0,0
4	Contenido de humedad	0,4	8,9

La Tabla 6 presenta los resultados del ensayo de contenido de humedad del agregado grueso y de la arena gruesa, obtenidos mediante la diferencia de masa entre la muestra húmeda y la muestra seca, se incluyen varios datos importantes como el peso de muestra húmeda con tara, el peso de muestra seca con tara, en estas se han incluido su paso con el recipiente o tara, también se identifica la masa del recipiente vacío utilizado para medir las muestras. A partir de estos valores, se calcula el contenido de humedad, que muestra el porcentaje de humedad presente en la muestra, permitiendo así conocer la cantidad de agua que contiene el agregado grueso (0,4%) y el agregado fino (8,9%) en su estado natural, estos datos son esenciales para ajustar las proporciones de los materiales en la mezcla de concreto asfáltico.

Tabla 7: Peso específico y unitario de los agregados

Descripción	Agregado grueso	Agregado fino	PEN 60/70
Peso específico SSD (g/cm ³)	2,68	2,47	1,00
Peso Unitario compactado (g/cm ³)	1,58	1,56	-
Peso Unitario suelto (g/cm ³)	1,56	1,39	-
Pasante malla #200	-	13,6%	-
Forma de partículas	Sub angulosa	Sub angulosa	-
Origen	Sencomin	Kanashiro	Arequipa

Según la tabla 7, el agregado grueso presenta un peso específico SSD de 2,68 g/cm³ y el agregado fino de 2,47 g/cm³, lo que indica que el grueso es más denso y, por tanto, contribuye más a la resistencia de la mezcla. En cuanto al peso unitario compactado, es 1,58 g/cm³ para el agregado grueso y 1,56 g/cm³ para el fino, mientras que en estado suelto es 1,56 g/cm³ para el grueso y 1,39 g/cm³ para el fino. Estos valores ayudan a definir la cantidad de agregado necesario, impactando en la resistencia y la dosificación de cemento.

El agregado fino tiene un 13,60% de partículas que pasan la malla #200, implica que un contenido de finos significativo que afecta la estabilidad y cohesión del trabajo, ambos agregados poseen una forma sub angular, mejorando la adherencia y resistencia de la mezcla, aunque exigen un ajuste de dosificación de agua para asegurar la manejabilidad.

B. Desempeño estructural de pavimento convencional

La tabla 8, se analiza las propiedades identificadas de las briquetas de mezcla asfáltica, como el Peso Específico (PE), el porcentajes de Contenido de Asfalto (CA), que van desde 4,00% hasta 6,20% en peso, resalta que a medida que aumenta el CA, el porcentaje de vacíos disminuye de 10,58% a 5,20%, lo que indica que más vacíos están siendo llenados por el asfalto, mejorando la cohesión de la mezcla, también, la estabilidad corregida muestra un aumento hasta alcanzar un pico de 865,57 kg en la briketa con 5,60% de CA, antes de reducirse, lo que indica que una mayor cantidad de asfalto contribuye a la estabilidad hasta cierto punto, después del cual puede comprometerse.

Tabla 8 Ensayo de Marshall de Pavimento Convencional

No.	Detalle	Briketa				
		1	2	3	4	5
1	% CA en peso de la mezcla	4,00	4,50	5,00	5,60	6,20
2	% de agregado Grueso	51,84	51,57	51,30	50,98	50,65
3	% de agregado Fino	44,16	43,93	43,70	43,42	43,15
4	% de filler	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	PE del C.A. (gr/cm3)	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
6	PE del Agregado Grueso (gr/cm3)	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
7	PE del Agregado Fino (gr/cm3)	2,44	2,44	2,44	2,44	2,44
8	PE del filler (gr/cm3)	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40
9	PE de la parafina (gr/cm3)	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
10	Peso unitario de briketa (gr/cm3)	2,15	2,16	2,16	2,20	2,21
11	Máxima densidad teórica de mezcla (gr/cm3)	2,40	2,39	2,37	2,35	2,33
12	% de vacíos	10,58	9,66	9,12	6,61	5,20
13	Estabilidad corregida (kg)	523,11	682,99	670,67	865,57	790,38
14	Flujo (mm)	3,02	4,17	3,85	3,52	3,88
15	PE bulk del agregado total	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55
16	Vacío agregado mineral	19,05	19,02	19,85	18,72	18,70
17	% de vacío llenados por CA	44,50	50,39	53,38	64,78	72,21
18	PE efectivo del agregado total	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55
19	% Asfalto efectivo	4,00	4,50	5,00	5,60	6,20

El peso unitario de la briketa incrementa gradualmente con el contenido de asfalto, alcanzando 2,21 g/cm³ en la mezcla de 6,20% de CA, reflejando una mezcla más densa, la densidad máxima teórica de la mezcla disminuye conforme aumenta el asfalto, y el flujo, o indicador de deformación, se mantiene estable entre 3,02 mm y 4,17 mm, asegurando flexibilidad en las mezclas. en términos de Vacíos Llenados por Asfalto (VFA), el porcentaje sube desde 44,50% hasta 72,21% con el aumento de CA, indicando que el asfalto está ocupando más del espacio disponible en la mezcla, mejorando su durabilidad y resistencia al tráfico.

Tabla 9 Resumen de desempeño del pavimento Convencional

Cantidad golpes	75
% de cemento asfáltico	5,4
Peso Específico (gr/cm3)	2,18
Estabilidad (kg)	800
Flujo (mm)	3,5
Vacíos (%)	6,8
Vacío agregado mineral (%)	19,2
Estabilidad / flujo	2286
Temperatura de mezcla	140°C

C. Desempeño estructural de pavimento sostenible

Para el desempeño estructural del pavimento sostenible se examina las características de tres briquetas de mezcla asfáltica con CA de 5,40% en peso.

Tabla 10: Ensayo de Marshall en Pavimentos Sostenibles

No.	Detalle	Briketa		
		1	2	3
1	% CA En peso de la mezcla	5,40	5,40	5,40
2	% de agregado Grueso	53,00	53,00	53,00
3	% de agregado Fino	47,00	47,00	47,00
4	% de Filler	0,00	0,00	0,00
5	PE del CA (gr/cm3)	1,02	1,02	1,02
6	PE del Agregado Grueso (gr/cm3)	2,65	2,65	2,65
7	PE del Agregado Fino (gr/cm3)	2,44	2,44	2,44
8	PE del Filler (gr/cm3)	0,00	0,00	0,00
9	PE de la parafina (gr/cm3)	0,85	0,85	0,85
10	Peso Unitario de la briketa (gr/cm3)	2,50	2,60	2,70
11	Máxima densidad teórica de la mezcla (gr/cm3)	3,38	3,49	3,58
12	% de vacíos	24,03	23,56	23,26
13	Estabilidad corregida (kg)	510,00	523,40	576,83
14	Flujo (mm)	3,58	4,70	4,43
15	PE bulk del agregado total	5,00	5,00	5,00
16	Vacío agregado mineral	12,45	13,67	15,93
17	% de vacíos llenados por CA	15,30	15,45	16,84
18	PE efectivo del agregado total	2,55	2,55	2,55
19	% Asfalto efectivo	5,40	5,40	5,40
20	GE del agregado total	5,10	5,10	5,10

III. DISCUSIÓN

En la Tabla 10 podemos identificar que con el incremento del CA, el porcentaje de vacíos disminuye de un 24,08% a un 23,26%, lo que sugiere que el asfalto llena una mayor cantidad de vacíos, mejorando la cohesión de la mezcla. Además, la estabilidad corregida muestra un aumento hasta alcanzar un máximo de 576,83 kg en la briqueta con 5,40% de CA, para luego disminuir, lo que indica que, hasta cierto nivel, un mayor contenido de asfalto mejora la estabilidad, pero más allá de ese punto, puede afectar negativamente. Por último, se muestra una tabla resumen de los datos encontrados.

Tabla 11 Resumen de desempeño del pavimento Convencional

Cantidad golpes	75
% de cemento asfáltico	5.4
Peso Específico (gr/cm ³)	2.6
Estabilidad (kg)	537
Flujo (mm)	4.23
Vacios (%)	23.1
V.M.A. (%)	13.56
Estabilidad / flujo	2212
Temperatura de mezcla	140°C

D. Costos de fabricación de mezclas

La estimación del costo de fabricación de mezcla asfáltica incluye los costos de materiales, transporte, herramientas y ensayos de laboratorio. La prueba Marshall representa una parte importante del costo total, lo que refleja la importancia de este ensayo en el diseño y control de calidad de las mezclas asfálticas.

Tabla 10 Análisis de precios unitarios de fabricación de mezclas

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Sub total
<i>Cemento asfáltico</i>				
Cemento asfáltico	Gln	1,00	S/ 35,00	S/ 35,00
Envío	Und	1,00	S/ 10,00	S/ 10,00
				S/ 45,00
<i>Materiales</i>				
Agregado fino	Kg	40,00	S/ 0,20	S/ 8,00
Agregado grueso	Kg	40,00	S/ 0,20	S/ 8,00
Petróleo diesel	Gln	1,00	S/ 3,50	S/ 3,50
Gas premium	Gln	0,50	S/ 25,00	S/ 12,50
Gasolina regular	Gln	3,00	S/ 13,70	S/ 41,10
Sacos	Und	5,00	S/ 0,50	S/ 2,50
				S/ 75,60
<i>Herramientas manuales</i>				
Guantes	Und	2,00	S/ 4,00	S/ 8,00
Instrumentos de escritura	Und	1,00	S/ 8,50	S/ 8,50
				S/ 16,50
<i>Ensayo de laboratorio</i>				
Granulometría	Und	2,00	S/ 25,00	S/ 50,00
Pesos unitarios	Und	2,00	S/ 20,00	S/ 40,00
Gravedad específica y absorción	Und	2,00	S/ 25,00	S/ 50,00
Contenido de humedad	Und	2,00	S/ 20,00	S/ 40,00
Prueba Marshall	Und	1,00	S/ 800,00	S/ 800,00
				S/ 980,00
			TOTAL	S/ 1,117,10

Los costos asociados con la producción de una mezcla asfáltica, muestran que para la realización de la mezcla asfáltica sostenible y convencional se utilizó 1 117,10 soles.

Se han realizado pruebas con las muestras seleccionadas, observándose que los valores de flujo aumentan tanto con el incremento del CA como con la adición de mayores proporciones de RAP. Este comportamiento sugiere que, bajo las proporciones utilizadas, el flujo de la mezcla se mantiene dentro de parámetros adecuados reflejando una buena estabilidad mecánica al incorporar RAP. Estos hallazgos difieren de las conclusiones presentadas por Abdel [14], quien afirma que los valores de flujo disminuyen al incrementar la proporción de RAP, coincidiendo con estudios previos que respaldan dicha tendencia.

Por otro lado, se ha evidenciado que la incorporación de PET y RAP mejora significativamente tanto la resistencia como la estabilidad de las mezclas asfálticas. Esta combinación reduce los hundimientos y aumenta la durabilidad del material, como se demuestra en los resultados presentados. Estos hallazgos contradicen las conclusiones de Abdel [14], pero se alinean con los estudios de Hayat [15], quien señala que la adición de PET mejora la resistencia al ahuellamiento, aunque altos porcentajes de PET pueden afectar negativamente la estabilidad Marshall. En este sentido, la mezcla óptima con 4% de PET y 30% de RAP cumple con los criterios de porosidad y resistencia, demostrando su eficacia frente a cargas de tráfico pesado y condiciones de altas temperaturas.

Además, se ha considerado la posibilidad de sustituir parcialmente el betún por polímeros, tal como sugiere Marta [16], con el objetivo de reducir los impactos ambientales. Sin embargo, en este estudio se ha optado por no incluir betún debido a los costos adicionales que implica su uso. En su lugar, se ha demostrado que el empleo de RAP y PET en proporciones precisas permite obtener resultados comparables o incluso superiores, sin incurrir en gastos adicionales. Esto refuerza la viabilidad técnica y económica de utilizar materiales reciclados en la producción de mezclas asfálticas sostenibles.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación permiten concluir que las propiedades físicas de los agregados, tanto gruesos como finos, cumplen con los requisitos necesarios para su uso en mezclas asfálticas. El análisis granulométrico mostró una distribución adecuada de partículas, con un 17,3% retenido en la malla de 19 mm y un 82,7% pasante, lo que indica una gradación óptima para garantizar la compactación y resistencia de la mezcla. Además, el contenido de humedad del agregado fino (8,9%) y del agregado grueso (0,4%) proporciona información crucial para ajustar las proporciones de agua en la mezcla, asegurando su manejabilidad y cohesión.

En cuanto al desempeño estructural del pavimento convencional, se observó que el CA influye significativamente en las propiedades mecánicas de la mezcla, un CA de 5,60% mostró la mayor estabilidad corregida (865,57 kg), mientras que el flujo se mantuvo dentro de un rango aceptable, de 3,02

mm a 4,17 mm, lo que indica una adecuada flexibilidad y resistencia a la deformación. Además, el porcentaje de vacíos disminuyó de 10,58% a 5,20% al aumentar el CA, esto sugiere una mejor cohesión y durabilidad de la mezcla. Estos resultados confirman que un contenido óptimo de asfalto mejora la resistencia y estabilidad del pavimento, aunque un exceso puede comprometer su desempeño.

Por otro lado, el análisis del pavimento sostenible demostró que es posible lograr un equilibrio entre sostenibilidad y desempeño estructural. Con un CA de 5,40%, se observó una disminución en el porcentaje de vacíos (de 24,03% a 23,26%) y un aumento en la estabilidad corregida (hasta 576,83 kg), lo que indica que la mezcla sostenible puede alcanzar propiedades mecánicas comparables a las del pavimento convencional. Sin embargo, el mayor porcentaje de vacíos en la mezcla sostenible sugiere la necesidad de optimizar la dosificación de materiales para mejorar su cohesión y resistencia a largo plazo.

En términos económicos, el costo total de fabricación de las mezclas asfálticas ascendió a S/ 1,117.10, siendo la prueba Marshall el componente más costoso (S/ 800.00). Este costo refleja la importancia de los ensayos de laboratorio para garantizar la calidad y durabilidad de las mezclas. No obstante, la incorporación de materiales reciclados y sostenibles podría reducir los costos a largo plazo, al disminuir la dependencia de materiales vírgenes y minimizar los residuos generados.

En conclusión, esta investigación demuestra que es posible diseñar mezclas asfálticas con un desempeño estructural adecuado, tanto en pavimentos convencionales como sostenibles. La optimización del contenido de asfalto y la dosificación de materiales reciclados, como RAP y PET, no solo mejora las propiedades mecánicas de la mezcla, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental y económica. Estos hallazgos respaldan la viabilidad de implementar prácticas constructivas más sostenibles en la industria de la infraestructura vial, promoviendo así la economía circular y la reducción de impactos ambientales.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Un agradecimiento para todas las personas que permitieron la realización de las pruebas utilizadas de gran importancia para la realización de nuestra investigación.

REFERENCES

[1] J. Read and D. Whiteoak, *The Shell Bitumen Handbook*, London: Thomas Telford Publishing, 2003.

[2] M. N, Aziz, M, R, Hainin, and M, K, Idham, "Recycling of asphalt pavement: A sustainable approach in road construction," *Journal of Cleaner Production*, vol, 172, pp, 3199–3207, 2018.

[3] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*, Paris: OECD Publishing, 2022, Available: <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>.

[4] A. Copeland, "Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice," Federal Highway Administration (FHWA), Rep, No, FHWA-HRT-11-021, 2011,

[5] Z, Leng, A, Sreeram, R, K, Padhan y Z, Tan, Aplicación de valor añadido de aditivos basados en residuos de PET en mezclas bituminosas que contienen alto porcentaje de pavimento asfáltico recuperado (RAP), vol, 196, *Revista de Producción Más Limpia*, 2018.

[6] U, Hayat, A, Rahim, A, H, Khan y Z, Ur Rehman, Uso de residuos plásticos y asfalto recuperado para el desarrollo sostenible, vol, 15, *Revista Báltica de Ingeniería de Carreteras y Puentes*, 2020,

[7] R. A. A. Abdel Jaber, "Evaluación de propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con contenidos variables de pavimento asfáltico recuperado (RAP)," *Resultados en Ingeniería*, vol. 14, Jordan, 2022.

[8] L, PF Abreu, J, R,M, Oliveira, H, M,R,D, Silva y P, V, Fonseca, Mezclas asfálticas recicladas producidas con alto porcentaje de diferentes materiales de desecho, vol, 84, *Materiales de Construcción y Construcción*, 2015.

[9] T, Birega, A, Geremew y , M, Nigatu, Uso potencial de agregados de pavimento asfáltico recuperado y botellas de plástico de desecho para la producción sostenible de pavimento asfáltico, 2024.

[10] O, D, L, Naciones, Unidas, "ONU Programa para el medio ambiente," [Online], Available: <https://www.unep.org/es/contaminacion-por-plasticos#:~:text=L%20contaminaci%C3%B3n%20por%20pl%C3%A1sticos%20e> [Accessed: 11/11/2024]

[11] Corresponsables, "En América Latina se generan 17.000 toneladas de residuos plásticos diariamente," 9 enero 2024. [Online]. Available: <https://www.corresponsables.com/mx/actualidad/en-america-latina-se-generan-17000-toneladas-de-residuos-plasticos-diariamente/>. [Accessed: 11/11/2024]

[12] Gobierno del Perú, "Información sobre problemática (título desconocido)," 21 de marzo de 2024. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/58443-problematica>. [Accessed: 11/11/2024]

[13] R, Galvis, "Una visión sobre el procesamiento del material RAP para (Jaber, 2022) su reutilización en planta," *Asfalto y Pavimentacion*, 2021,

[14] M, Abdel, "Evaluación de propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con contenidos variable de pavimento asfáltico recuperado (RAP)" *Resultados de ingeniería*, 2022,

[15] U, Hayat, "Uso de residuos plásticos y asfalto recuperado para el desarrollo sostenible" *Revista Báltica de Ingeniería de Carreteras y Puentes*, 2020.

[16] M. Vázquez-Carrillo, "Análisis de la influencia del uso de poliestireno reciclado como sustitutivo del betún en el comportamiento de hormigones bituminosos y mezclas porosas," 2017. Available: https://www.researchgate.net/publication/317585883_Analisis_de_la_influencia_del_uso_de_poliestireno_reciclado_como_sustitutivo_del_betun_en_el_comportamiento_de_hormigones_bituminosos_y_mezclas_porosas. [Accessed: 11/11/2024]