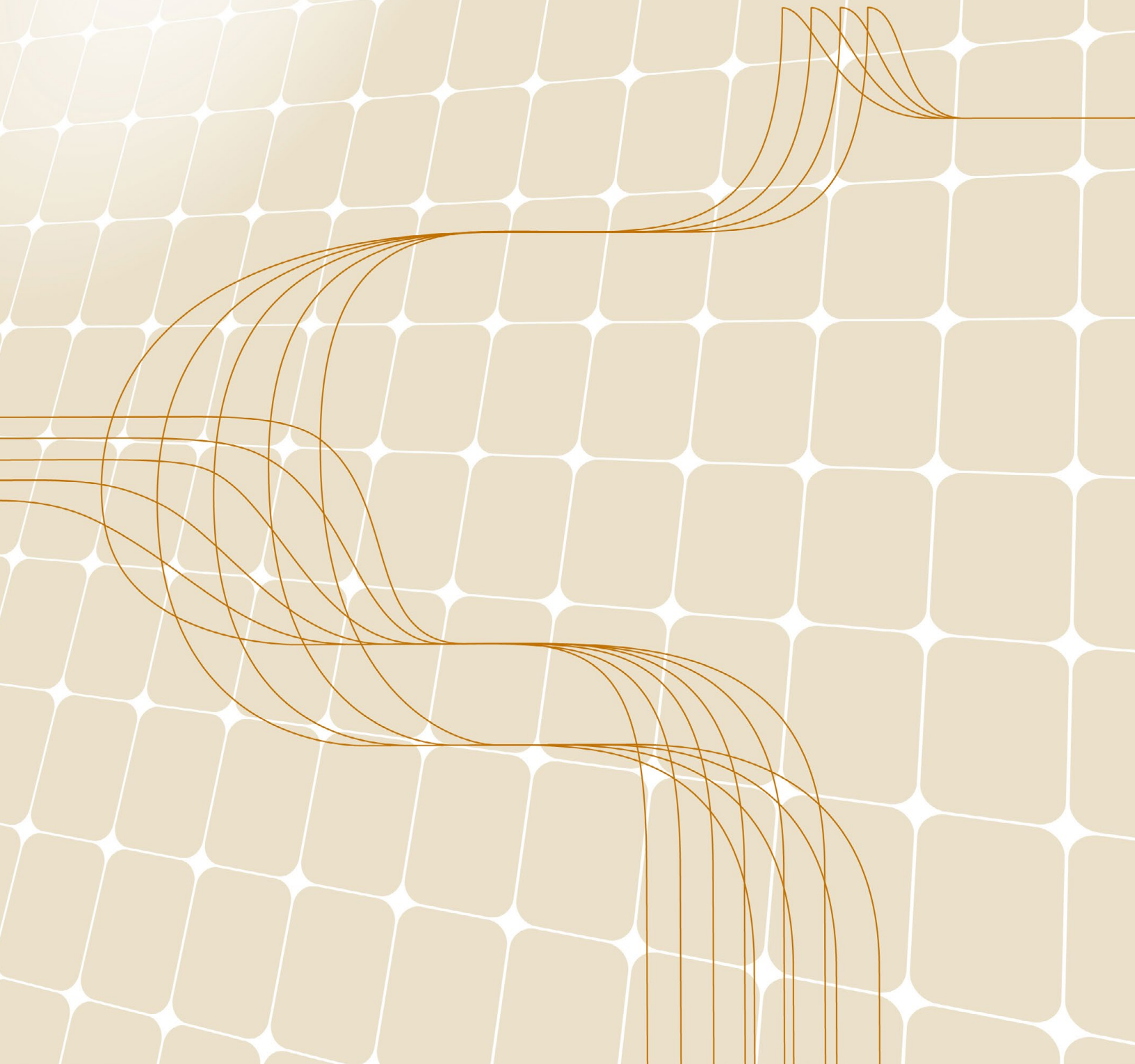


<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/index>
www.ucr.ac.cr / ISSN: 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 2023 - VOLUMEN 33 (2)



Modificación de la mezcla asfáltica por vía seca mediante la incorporación de dióxido de titanio

Modification of the asphalt mix by dry route by incorporating titanium dioxide

Benjamín Erick Joel Rivera Figueroa

Universidad Cesar Vallejo

e-mail: berivera@ucvvirtual.edu.pe

ORCID: [0000-0003-0936-0099](https://orcid.org/0000-0003-0936-0099)

Sleyther Arturo De la Cruz Vega

Universidad Cesar Vallejo

e-mail: sdelacruzv@ucv.edu.pe

ORCID: [0000-0003-0254-301X](https://orcid.org/0000-0003-0254-301X)

Ccori Siello Vega Neyra

Universidad Nacional de Barranca

e-mail: cvegan182@unab.edu.pe

ORCID: [0000-0002-7168-4636](https://orcid.org/0000-0002-7168-4636)

Recibido: 14 de diciembre de 2022

Aceptado: 30 de marzo de 2023

Resumen

En este trabajo, se planteó como objeto de estudio la determinación de las propiedades mecánicas y fotocatalíticas del asfalto modificado con dióxido de titanio mediante los ensayos Marshall y degradación de rodamin B. La metodología se adaptó a la investigación de tipo aplicada, diseño experimental y enfoque cuantitativo. La población de estudio incluyó veinticuatro especímenes en total: seis muestras patrón, seis muestras con 2 % de dióxido de titanio, seis con 4 % de dióxido de titanio y seis con 8 % de dióxido de titanio. Se llegó a la conclusión de que el dióxido de titanio es un buen aditivo para mejorar las propiedades mecánicas. La adición de 2 % brinda los mejores resultados con una estabilidad adecuada para permitir la durabilidad del asfalto, con un flujo de 3.85 mm dentro de los 4 mm. establecidos por la norma, un porcentaje de vacíos 3.49 % para una mezcla más impermeable con los vacíos suficientes para evitar la exudación y vacíos de agregado mineral de 14.74 % suficientes para envolver de manera óptima el agregado mineral.

Palabras Clave:

Dióxido de titanio, fotocatalisis, mezcla asfáltica, pavimentos, rodamin B.



Abstract

In this work, the determination of the mechanical and photocatalytic properties of asphalt modified with titanium dioxide through the Marshall tests and rhodamine B degradation was proposed as an object of study. The methodology was adapted to applied research, experimental design and focus quantitative. The study population included twenty-four specimens in total: six standard samples, six samples with 2 % titanium dioxide, six with 4 % titanium dioxide, and six with 8 % titanium dioxide. It was concluded that titanium dioxide is a good additive to improve mechanical properties. The addition of 2 % provides better results with adequate stability to allow the durability of the asphalt, with a flow of 3.85 mm within the 4 mm established by the standard, percentage of voids of 3.49 % for a more impermeable mixture with sufficient voids to prevent exudation and mineral aggregate voids of 14.74 % sufficient to optimally envelop the mineral aggregate.

Keywords:

Asphalt mix, pavements, photocatalysis, rhodamine, titanium dioxide.

1. INTRODUCCIÓN

Existen grandes problemas que abruman a la humanidad y que están lejos de ser resueltos a inicios del siglo XXI, uno de ellos es sin duda la contaminación ambiental, originada en gran parte por el hombre mismo. En la actualidad, la cantidad de vehículos incrementa cada vez más de manera acelerada, lo cual genera que el desgaste del pavimento en las regiones más cálidas se deba a la formación de surcos y daños por humedad [1].

El aumento de las cargas produce esfuerzos y deformaciones en las capas asfálticas mayores. Estos mayores niveles de carga deben ser contrarrestados con materiales asfálticos que presenten mejores comportamientos que los diseños tradicionales y procesos constructivos adecuados (como mantenimiento y control de sobrecargas) con el fin de mejorar las propiedades de los materiales asfálticos y las mezclas [2]. Por otro lado, la mejora constante de operaciones petroleras disminuye la calidad de los asfaltos, volviéndose ideal el uso de mezclas asfálticas modificadas [3].

Para poder resolver problemas de esta magnitud, se necesita que en la ingeniería se innove constantemente para mejorar la eficiencia de los materiales con el objetivo de optimizar su efectividad o para beneficio de la sociedad. Los compuestos de fotocatalisis, como el dióxido de titanio (TiO_2), atrapan y degradan partículas orgánicas e inorgánicas en el aire y, por lo tanto, eliminan contaminantes del aire nocivos como óxidos de nitrógeno (NO_2) y compuestos orgánicos volátiles en presencia de luz ultravioleta (luz solar) [4].

La mayoría de las investigaciones se centran en los métodos de incorporar TiO_2 en hormigón de cemento y cómo lograr un buen efecto de dispersión y buena durabilidad en aplicación de pavimento de hormigón [5]. Por ejemplo, [4] exhibe que sus modificaciones mostraron menor pérdida de masa en el envejecimiento a corto plazo, por lo que demuestra ser una alternativa antioxidante [6]. Al añadir dióxido de titanio en un valor del 3 % en masa de árido, los valores de abrasión y rueda cargada mejoran, debido a la mayor presencia de finos en la mezcla [7].

Este artículo de investigación tiene por objetivo exponer los resultados de la evaluación del asfalto modificado con dióxido de titanio, material reconocido a nivel mundial por purificar el aire a través de la fotocatalisis, y que apunta no solo a la descontaminación ambiental, sino también a mejorar las propiedades mecánicas del material que lo contiene.

2. METODOLOGÍA

Este artículo es de investigación de tipo aplicada, pues el objetivo final de los resultados es que se pueda aplicar en los pavimentos flexibles para mejorar sus características. Esta investigación se enfoca en resolver problemas [8], al aplicar un diseño experimental, que consiste en comparar muestras sometidas a experimento con muestras no experimentales [9]. Es decir, se propone la modificación de los componentes de la carpeta asfáltica de los pavimentos flexibles, en busca de la mejora de estos a través de ensayos de laboratorio, que se aplican a los especímenes de asfalto que contienen TiO_2 en cantidades del 2 %, 4 % y 8 %. Luego, se comparan los resultados con los de una mezcla patrón sin dióxido de titanio para concluir sobre los cambios en las propiedades mecánicas y la capacidad de degradación. Además, esta investigación tiene un

enfoque cuantitativo, porque emplea ensayos de laboratorio estandarizados [10] por normas internacionales y nacionales como ASTM D 1559, AASHTO T 245, Norma (UNI) 11259:2008, Manual de carreteras EG 2013, entre otras.

La muestra estudiada está compuesta por las probetas especificadas en el CUADRO I. Estas están divididas en probetas que son empleadas en el ensayo Marshall y probetas que son utilizadas en el ensayo de Rodamina B, las cuales suman un total de veinticuatro. La muestra es un grupo de elementos que determina una población de estudio, debido a que pocas veces es posible estudiar a toda la población [11].

CUADRO I
NÚMERO DE MUESTRAS POR PORCENTAJE DE DIÓXIDO DE TITANIO

Adición de dióxido de titano	Marshall	Rodamina B	Parcial
Patrón (0 %)	3	3	6
2 %	3	3	6
4 %	3	3	6
8 %	3	3	6
Total			24

Como técnica de investigación, se utiliza la observación participante mediante la realización de ensayos, registro y procesamiento de datos; como instrumento, se emplean cuadros estandarizados mediante normas a través de la elaboración de hojas de cálculo en Excel. Esta técnica participativa es un proceso caracterizado por el investigador con el fin de involucrarse en todo lo que le sea posible, con el propósito de recolectar datos a través del contacto directo [9]. Con base en esto, se sigue el siguiente procedimiento:

- Primero, se realiza un análisis de los agregados empleados en el diseño de mezclas asfálticas al utilizar el Manual de carreteras EG 2013.
- Segundo, se procede con la elaboración de las veinticuatro muestras, al cumplir con la norma ASTM D 6926: seis muestras patrón, seis muestras con 2 % de dióxido de titanio, seis con 4 % de dióxido de titanio y seis con 8 % de dióxido de titanio.
- Tercero, se realiza el ensayo de estabilidad y flujo Marshall al emplear el Manual de ensayo de materiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones y la norma MTC E 504 Resistencia de mezclas bituminosas, al emplear el aparato de Marshall y el análisis de las propiedades fotocatalíticas según los procedimientos especificados por el Organismo de Unificación Nacional Italiana (UNI) 11259:2008 (determinación de la actividad fotocatalítica – método de ensayo rodamina). Sin embargo, las muestras no se someten a rayos ultravioleta (UV) artificiales y constantes, sino a rayos UV naturales, al utilizar como fuente el sol, con la finalidad de hacer más real la prueba. Además, se toman en cuenta solo las horas en que las probetas permanecen expuestas al sol, donde

se registran datos mediante un colorímetro en un tiempo de ($t = 0$), ($t = 4$ h) y ($t = 26$ h), tal como exige la norma. Para este ensayo, se utilizan las muestras con numeración 1, 2 y 3 de los grupos 2 %, 4 %, 8 % y patrón.

- Cuarto, se analizan los resultados obtenidos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica adicionada con dióxido de titanio

Se prepararon especímenes a los cuales se les adicionó dióxido de titanio para comprobar las propiedades resistentes que porta y se realizaron pruebas de resistencia [12] (ver CUADRO II).

CUADRO II
RESULTADOS DEL PROMEDIO DE LA ESTABILIDAD MARSHALL
(RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN) DE LAS MUESTRAS PATRON,
2 %, 4 % Y 8 %

Muestra	Resistencia a la deformación (estabilidad) kg	Especificaciones Man-EG 2013	Resultados
Muestra Patrón 0 %	1206	Mínimo 815 kg	CUMPLE
Muestra 2 % dióxido de titanio	1460.8		CUMPLE
Muestra 4 % dióxido de titanio	1528.4		CUMPLE
Muestra 8 % dióxido de titanio	1527.3		CUMPLE

En el CUADRO II, se muestran los resultados de resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica adicionada con dióxido de titanio en proporciones del 0 %, 2 %, 4 % y 8 %, de acuerdo con el ensayo Marshall establecido en la norma E 504 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, la norma ASSTM- 1559 y las especificaciones técnicas establecidas en el Manual de Carreteras EG 2013. Se observa que las muestras con 2 %, 4 % y 8 % de dióxido de titanio incrementan su estabilidad Marshall en comparación con la mezcla patrón, de forma que demuestra que el dióxido de titanio aumenta la resistencia a la deformación ante cargas. Además, se observa que a partir del 8 % la estabilidad empieza a descender, pero aun así se mantiene dentro de los límites establecidos por la norma, que indica que 815 kg es la estabilidad mínima. Las muestras con 2 % de dióxido de titanio aumentan su resistencia en 21.12 %, mientras que con 4 %, en 26.74 %, y con 8 %, en 26.64 %, en comparación con la muestra patrón.

B. Capacidad de degradación de la mezcla asfáltica modificada con dióxido de titanio

Las propiedades fotocatalíticas que genera el dióxido de titanio incrementan la durabilidad de muchos materiales de construcción, al mismo tiempo que, por el eficiente proceso de

descomposición de contaminantes del aire, ayuda a disminuir la contaminación en ambientes interiores y exteriores [13] (ver CUADRO III).

CUADRO III
RESUMEN DE RESULTADOS DE DEGRADACIÓN DE RODAMINA B, PROMEDIO DE R4 Y R26 DE LAS MUESTRAS PATRÓN, 2 %, 4 % Y 8 % DE DIÓXIDO DE TITANIO

Dióxido de titanio %	Resultados		Especificaciones	Resultados	
	Promedio R4 %	Promedio R26 %	UNI 11259 min	R4	R26
Muestra patrón sin dióxido de titanio	3.37	6.47	R4 > 20 %	x	x
Muestra 2 % de dióxido de titanio	4.42	12.18		x	x
Muestra 4 % de dióxido de titanio	5.00	13.90	R26 > 50 %	x	x
Muestra 8 % de dióxido de titanio	11.76	28.49		x	x

Leyenda: x: No cumple.

R4: Degradación de rodamina B a las cuatro horas de exposición a los rayos UV.

R26: Degradación de rodamina B a las veintiséis horas de exposición a los rayos UV.

En el CUADRO III, se muestran los resultados de R4 y R26 del promedio de las muestras que contienen 0 %, 2 %, 4 % y 8 %. Se observa que las muestras patrón de dióxido de titanio (TiO_2) producen una degradación de rodamina B de 3.37 % para R4, y 6.47 % para R26, valores inferior es atodas muestras adicionadas con TiO_2 . Para la adición del 2 % de dióxido de titanio, los resultados fueron de 4.42 % para R4, y 12.18 % para R26. En cuanto a la adición de 4 %, se obtuvieron resultados de 5.00 % para R4 y 13.90 % para R26. Por otro lado, las muestras que mejores resultados presentaron en R4 y R26 del ensayo de rodamina B fueron las adicionadas con 8 % de TiO_2 ; para R4 con 8 % de dióxido de titanio, se obtuvo un porcentaje de 11.76 %, por debajo de la norma, que establece que el porcentaje mínimo para R4 es de 20 %; mientras que para R26 con 8 % de dióxido de titanio, se obtuvo una degradación de 28.49 % por debajo de la norma, que establece que para R26 el mínimo es del 50 %.

C. La dosificación adecuada de dióxido de titanio en la mezcla asfáltica

En los CUADROS IV-VII, se muestra el resumen del ensayo Marshall realizado a las muestras con porcentajes del 0 %, 2 %, 4 % y 8 %, respectivamente, para determinar en qué porcentaje mejoran todas las propiedades mecánicas del asfalto, al cumplir con las especificaciones técnicas establecidas en la norma MTC E 504 (ver CUADRO IV).

CUADRO IV
RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MAC-2,
MEZCLA PATRÓN

Especificaciones Marshall	Resultados	Especificaciones		Resultados
		Man EG 2013		
		mín.	máx.	
Óptimo contenido de c.a.	5.8	-	-	
Peso unitario (g/cm³)	2.334	-	-	
Vacíos (%)	4.5	3	5	Cumple
V.M.A (%)	16.9	14	-	Cumple
V.F.A (%)	73.7	-	-	
Flujo (mm)	3.6	2	4	Cumple
Estabilidad (kg)	1206	815		Cumple
Índice de rigidez (kg/cm)	3385	1700	4000	Cumple

Leyenda: c.a : contenido de aire.

V.M.A: Vacíos de agregado mineral.

V.F.A : Vacíos llenos de asfalto.

En el CUADRO IV, se muestran los resultados del ensayo Marshall aplicado a la mezcla asfáltica convencional. Se realizó este ensayo con la finalidad de obtener muestras patrón que cumplan con los parámetros establecidos en el Manual de Carretas EG 2013, para así comparar las propiedades mecánicas de la muestra patrón con las propiedades mecánicas de las muestras modificadas con dióxido de titanio en porcentajes de 2 %, 4 % y 8 % para determinar qué dosificación mejora las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

CUADRO V
RESUMEN DE RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN
CALIENTE MAC-2, 2 % DIÓXIDO DE TITANIO

Especificaciones Marshall	Resultados	Especificaciones		Resultados
		Man EG 2013		
		mín.	máx.	
Óptimo contenido de c.a.	5.8	-	-	
Peso unitario (g/cm³)	2.397	-	-	
Vacíos (%)	3.49	3	5	Cumple
V.M.A (%)	14.74	14	-	Cumple
V.F.A (%)	76.36	-	-	
Flujo (mm)	3.85	2	4	Cumple
Estabilidad (kg)	1460.8	815	-	Cumple
Índice de rigidez (kg/cm)	3792	1700	4000	Cumple

Leyenda: c.a : contenido de aire.

V.M.A: Vacíos de agregado mineral.

V.F.A : Vacíos llenos de asfalto.

En el CUADRO V, se muestran los resultados del ensayo Marshall aplicado a la mezcla asfáltica modificada con 2 % de dióxido de titanio, donde se comparan con los resultados de la

muestra patrón para determinar si efectivamente sus propiedades mecánicas mejoran en relación con la mezcla patrón y a las especificaciones técnicas establecidas en Manual de Carreteras EG 2013.

Al comparar los resultados presentados en los CUADROS IV y V, se observa que el porcentaje de vacíos de la mezcla modificada con 2 % de dióxido de titanio disminuye en 22.4 % respecto al patrón, pero se mantiene dentro del porcentaje de vacíos establecido por el Manual de Carreteras EG 2013, que es del 3 % al 5 %. Para el V.M.A (vacíos en el agregado mineral), se observa una disminución del 12.78 % respecto a la muestra patrón, el cual se mantiene dentro del mínimo establecido por dicha norma, que es 14 %. Para el flujo, se registra un aumento de 6.49 % respecto al patrón, el cual permanece dentro del rango establecido por la norma de 2 mm a 4 mm. Para la estabilidad, se aprecia una mejora de 17.44 % respecto al patrón, al superar la estabilidad mínima establecida por la norma 815 kg. En cuanto al índice de rigidez, se aprecia un aumento del 10.73 % respecto al patrón, al encontrarse dentro del rango de 1700 y 4000 kg/cm².

CUADRO VI
RESUMEN DE RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN
CALIENTE MAC-2, 4 % DIÓXIDO DE TITANIO

Especificaciones Marshall	Resultados	Especificaciones		Resultados
		Man EG 2013		
		mín.	máx.	
Óptimo contenido de c.a.	5.8	-	-	
Peso unitario (g/cm³)	2.428	-	-	
Vacios (%)	2.24	3	5	No cumple
V.M.A (%)	13.64	14	-	No cumple
V.F.A (%)	83.59	-	-	
Flujo (mm)	4.21	2	4	No cumple
Estabilidad (kg)	1528.4	815	-	Cumple
Índice de rigidez (kg/cm)	3629	1700	4000	Cumple

Leyenda: c.a : contenido de aire.

V.M.A: Vacíos de agregado mineral.

V.F.A : Vacíos llenos de asfalto.

Según el CUADRO VI y IV, su resultado obtenido del porcentaje de vacíos de la mezcla modificada con 4 % de dióxido de titanio tiende a disminuir en 50.22 % al compararlo con el diseño patrón, con datos inferiores del porcentaje de vacíos mínimo de 3 % del Manual de Carreteras EG 2013. El vacío de agregado mineral disminuye en 19.29 % con respecto a su diseño patrón, al ubicarse debajo del mínimo establecido de 14 %. Su flujo muestra un aumento de 14.49 % frente al diseño patrón, lo cual supera el rango de la norma de 2 mm a 4 mm. Su estabilidad logra una mejora de 21.09 % en comparación con el diseño patrón, al superar la estabilidad mínima de 815 kg. En cuanto al índice de rigidez, se aprecia un aumento de 6.72 % respecto al patrón, al permanecer dentro del rango de 1700 y 4000 kg/cm².

CUADRO VII
RESUMEN DE RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN
CALIENTE MAC-2, 8 % DIÓXIDO DE TITANIO

Especificaciones Marshall	Resultados	Especificaciones		Resultados
		Man EG 2013		
		min.	máx.	
Óptimo contenido de c.a.	5.8	-	-	-
Peso unitario (g/cm³)	2.469	-	-	-
Vacíos (%)	0.61	3	5	No cumple
V.M.A. (%)	12.20	14	-	No cumple
V.F.A (%)	95.03	-	-	
Flujo (mm)	4.72	2	4	No cumple
Estabilidad (kg)	1527.3	815	-	Cumple
Índice de rigidez (kg/cm)	3231	1700	4000	Cumple

Leyenda: c.a : contenido de aire.

V.M.A: Vacíos de agregado mineral.

V.F.A : Vacíos llenos de asfalto.

Los CUADROS VII y IV, sobre la comparación del patrón y del experimental, reflejan que el porcentaje de vacíos de la mezcla modificada con 8 % de dióxido de titanio tiende a disminuir en 86.44 %, al ubicarse por debajo de vacíos mínimo según Manual de Carreteras EG 2013 que es del 3 %. Para el V.M.A, se muestra una disminución de 27.81 % comparado con el patrón, al permanecer por debajo del mínimo de 14 %. Para el flujo, se registra un aumento de 23.73 % respecto al patrón, lo cual supera el rango de la norma, que es de 2 mm a 4 mm. Para la estabilidad, se observa una mejora de 21.04 % en comparación con el patrón, al sobrepasar la estabilidad mínima establecida por la norma 815 kg. El índice de rigidez disminuye 4.55 % comparado con el patrón, al encontrarse dentro del rango de 1700 y 4000 kg/cm.

4. CONCLUSIONES

Se concluye que las muestras con 2 %, 4 % y 8 % de dióxido de titanio aumentan su estabilidad Marshall al alcanzar valores iguales a 1460.8 kg, 1528.4 kg, 1527.3 kg, respectivamente, y superan, en los tres casos, a la muestra patrón en la que se obtuvo una resistencia de 1206 kg, por lo tanto, demuestran que el dióxido de titanio aumenta la resistencia a la deformación ante cargas y sobrepasan la resistencia mínima establecida por el Manual de Carreteras EG 2013. En esta etapa, se concluye también que, a partir del 8 % de dióxido de titanio, la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica empieza a descender, pero aun así se mantiene dentro de los requerimientos establecidos por las normas.

En cuanto a la propiedad fotocatalítica de degradación de rodamina B de la mezcla asfáltica, la muestra con 0 % de dióxido de titanio produjo una degradación de rodamina B para R4 y R26 de 3.37 % y 6.47 %, respectivamente, los cuales son valores inferiores a las muestras adicionadas con TiO₂. Para la adición del 2 % de dióxido de titanio, los resultados fueron de 4.42 % para R4 y 12.18 % para R26; para la adición de 4 %, se obtuvieron resultados de 5.00 % para R4,

y 13.90 % para R26. Las muestras que mejores resultados presentaron en R4 y R26 fueron las adicionadas con 8 % de TiO_2 : para R4 un porcentaje de 11.76 % y para R26 una degradación 28.49 %; cabe señalar que, a pesar de que se muestra la propiedad fotocatalítica, no se puede considerar al asfalto modificado con dióxido de titanio como un material fotocatalítico, debido a que no supera las especificaciones establecidas por la norma UNI 11259, que establecen que R4 debe ser mayor 20 % y R26 mayor a 50 % para considerarse como fotocatalítico. La evaluación de las propiedades mecánicas del asfalto determinó que, con la adición del 2 % de dióxido de titanio, la estabilidad aumentó de 1206 kg a 1460.8 kg, por lo que se descarta la adición de 4 % y 8 %, debido a que un incremento excesivo en la estabilidad reduce la durabilidad del asfalto; en cuanto al flujo, aumentó de 3.6 mm a 3.85 mm al permanecer dentro de los 4 mm establecidos por la norma. Además, el porcentaje de vacíos disminuyó de 4.5 % a 3.49 % al obtenerse una mezcla más impermeable con los vacíos suficientes para evitar la exudación; el porcentaje de VMA disminuyó de 16.9 % a 14.74 %, al mantener los vacíos suficientes para envolver de manera óptima el agregado mineral. De este modo, la adición ideal para mejorar las propiedades mecánicas es de 2 %.

ROLES DE AUTORES

Benjamín Erick Joel Rivera Figueroa: diseño de la investigación, conceptualización, elaboración de ensayos, análisis de resultados

Sleyther Arturo De la Cruz Vega: diseño de la investigación, conceptualización, metodología y revisión de documentos, revisión de artículo final y recomendaciones.

Ccori Siello Vega Neyra: diseño de la investigación, metodología y redacción de los documentos complementarios

REFERENCIAS

- [1] M. Enieb, A. Cengizhan y S. Karahancer, "Evaluation Of Physical-Rheological Properties of Nano Titanium Dioxide Modified Asphalt Binder and Rutting Resistance of Modified Mixture", *Pavement Res. Technol.*, vol. 16, pp. 285-303, 2022, <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00131-0>.
- [2] H. Rondón y F. Reyes, "Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con asfáltica", *Revista de Ingeniería*, vol. 36, pp. 12-19, 2012, http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-9932012000100003.
- [3] R. Villegas, J. Moya y L. Salazar, "Diseño de mezcla asfáltica con materiales de desecho", *Revista Ingeniería de Obras Civiles*, vol. 8, no. 1, pp. 07-18, 2018, <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/article/view/2000/1790>
- [4] M. Hassan, M. Mohammad, L. Cooper y H. Dylla, "Evaluation of Nano-Titanium Dioxide Additive on Asphalt Binder Aging Properties", *Transportation Research Record*, vol. 2207, no. 1, pp. 11-15, 2011, <https://doi.org/10.3141/2207-02>.
- [5] Q. Guoping, Y. Huanan, G. Xiangbing y Z. Lu, "Impact of Nano-TiO₂ on the NO₂ Degradation and Rheological Performance of Asphalt Pavement", *Construction and Building Materials*, vol. 218, pp. 53-63, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.075>.

- [6] O. Melo, A. Albuquerque, T. Souza, G. Basto, L. Lopes y V. Sousa, "Rheological Analysis of Asphalt Binders Modified with Hydrated Lime and Titanium Dioxide Nanoparticles", *International Journal for Innovation Education and Research*, vol. 8, no. 11, pp. 579-598, 2020, 10.31686/ijer.vol8.iss11.2787.
- [7] J. Lopez, J. Reyes, M. Silvera y F. Campos, "Evaluation of the effect of titanium dioxide on hot mix asphalt mixtures for flexible pavement at high temperatures", presentado en el *Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería* (CONIITI), 2022.
- [8] Z. Cordero, "La investigación aplicada: Una forma de conocer las realidades con evidencia científica", *Revista educación*, vol. 33, no. 1, pp. 155-165, 2009.
- [9] A. Aguirre, *Etnografía: metodología cualitativa en la investigación socio cultural*. España: Marcombo, 1995.
- [10] M. Vega, J. Ávila, A. Vega, N. Camacho, A. Becerril y G. Leo, "Paradigmas en la investigación. Enfoque cuantitativo y cualitativo", *European Scientific Journal*, vol. 10, no. 15, pp. 523-528, 2014.
- [11] R. Hernández, R. Fernández y P. Baptista, *Metodología de la investigación*. México: Mc Graw, 2014.
- [12] T. Fuentes, C. Vázquez, y K. Vázquez, "Incorporación de nanomateriales en el concreto fotocatalítico para la reducción de NOX y CO2", *Revista de Energía Química y Física*, vol. 3, no. 8, pp. 50-56, 2016.
- [13] A. Ramírez, "Fotocatálisis de TiO2 para crear Materiales de Construcción más durables", *Prospectiva*, vol. 4, no. 2, pp. 12-17, 2006.