

Evaluación de la macrotextura de mezcla asfáltica permeable con fibra de vidrio como mejorador Marshall

Evaluation of the macrotexture of permeable asphalt mixture with glass fiber as a Marshall improver

Raúl Alexis Salazar Flores*

Universidad Nacional de Chimborazo.
Riobamba-Ecuador.
raul.salazar@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-6483-2613>

Diana Carolina Merino Gavilanes

Universidad Nacional de Chimborazo.
Riobamba-Ecuador.
diana.merino@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-3581-8833>

Julio Cesar Quizhpilema Acero

Universidad Nacional de Chimborazo.
Riobamba-Ecuador.
jcquizhpilema.fic@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0004-6474-0144>

Cristian David Pilicita Parra

Universidad Nacional de Chimborazo.
Riobamba-Ecuador.
cdpilicita.fic@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0004-6840-3997>

***Correspondencia:**

raul.salazar@unach.edu.ec

Cómo citar este artículo:

Salazar, R., Merino, D., Quizhpilema, J., & Pilicita, C. (2025). Evaluación de la macrotextura de mezcla asfáltica permeable con fibra de vidrio como mejorador Marshall. *Esprint Investigación*, 4(1), 39-50. <https://doi.org/10.61347/ei.v4i1.93>

Recibido: 19 de diciembre de 2024

Aceptado: 20 de enero de 2025

Publicado: 24 de enero de 2025

Copyright: Derechos de autor 2025 Raúl Alexis Salazar Flores, Diana Carolina Merino Gavilanes, Julio Cesar Quizhpilema Acero, Cristian David Pilicita Parra.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen: Las mezclas asfálticas permeables son materiales diseñados para permitir el paso del agua a través de su estructura, facilitan el drenaje y reducen la acumulación de agua en la superficie, lo que mejora la seguridad vial y contribuye a una gestión más sostenible de las aguas pluviales. Por su parte, la fibra de vidrio es un material compuesto por filamentos finos de vidrio que actúa como refuerzo, incrementando la resistencia, la tenacidad y la durabilidad de las mezclas asfálticas. Este estudio examina cómo la adición de fibra de vidrio influye en propiedades como la macrotextura, la permeabilidad y los parámetros Marshall, con el objetivo de desarrollar mezclas más seguras, resistentes y sostenibles frente a las demandas del tráfico moderno y las condiciones climáticas extremas. La metodología empleó un enfoque experimental-cuantitativo con diseño exploratorio, utilizando una fórmula maestra para comparar mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de fibra de vidrio. Identificado el porcentaje óptimo de fibra, se fabricó una loseta para medir la macrotextura mediante el ensayo de la mancha de arena, analizando su impacto en el desempeño del material. Los resultados evidenciaron que la fibra de vidrio en mezclas asfálticas permeables es un avance clave hacia infraestructuras viales más sostenibles y funcionales. Este material mejora significativamente la macrotextura y la permeabilidad del pavimento, lo que facilita la gestión de aguas pluviales y reduce el riesgo de hidroplaneo, aumentando así la seguridad vial. Se concluye que, este enfoque contribuye a la demanda de soluciones más seguras, eficientes y al desarrollo de prácticas de construcción vial más respetuosas con el medio ambiente.

Palabras clave: Estabilidad Marshall, infraestructura vial, permeabilidad, propiedades volumétricas, rugosidad.

Abstract: Permeable asphalt mixtures are materials designed to allow water to pass through their structure, facilitating drainage and reducing surface water accumulation, which enhances road safety and contributes to more sustainable stormwater management. Fiberglass, composed of fine glass filaments, acts as a reinforcement, increasing the strength, toughness, and durability of asphalt mixtures. This study examines how the addition of fiberglass influences fundamental properties such as macrotexture, permeability, and Marshall parameters, with the goal of developing safer, more durable, and sustainable mixtures to meet the demands of modern traffic and extreme weather conditions. The methodology employed an experimental-quantitative approach with an exploratory design, using a master formula to compare asphalt mixtures with varying percentages of fiberglass. Once the optimal percentage of fiber was identified, a slab was manufactured to measure macrotexture using the sand patch test, analyzing its impact on material performance. The results demonstrated that fiberglass in permeable asphalt mixtures is a key advancement towards more sustainable and functional road infrastructures. This material significantly improves the macrotexture and permeability of the pavement, which facilitates stormwater management and reduces the risk of hydroplaning, thus enhancing road safety. It is concluded that this approach contributes to the demand for safer, more efficient solutions and the development of more environmentally respectful road construction practices.

Keywords: Marshall stability, permeability, road infrastructure, roughness, volumetric properties.

1. Introducción

En la actualidad, el ámbito de la construcción de infraestructura vial enfrenta el desafío de integrar prácticas sostenibles y materiales innovadores que mitiguen su impacto ambiental y mejoren el desempeño estructural (Torres et al., 2019). El asfalto, derivado de la destilación fraccionada del petróleo crudo, resulta uno de los materiales predominantes en la pavimentación mundial (Rondón & Reyes, 2015). A pesar de su utilidad, naturaleza no renovable y durabilidad ciertos estudios han optimizado su comportamiento para prolongar la vida útil de las carreteras y minimizar la necesidad de reparaciones frecuentes (Quintero, 2016). Este enfoque busca reducir costos y mejorar la eficiencia y la resistencia de las superficies de rodadura frente a las demandas del tráfico moderno.

Las carreteras son vitales para el desarrollo económico y la movilidad, pero su diseño y mantenimiento presentan desafíos importantes, especialmente bajo condiciones climáticas adversas (Weikert, 2021). Las fuertes lluvias, por ejemplo, reducen la seguridad vial al incrementar el riesgo de hidroplaneo debido a la baja permeabilidad de las superficies convencionales (Díaz et al., 2011). En respuesta a esto, la mezcla asfáltica permeable ha sido diseñada para permitir que el agua se filtre a través de la capa asfáltica hacia sistemas de drenaje subyacentes, reduciendo así la acumulación de agua en la superficie y mejorando la tracción durante condiciones de lluvia. Este tipo de asfalto mejora la seguridad, ya además contribuye a la gestión sostenible del agua al mitigar el efecto de las escorrentías superficiales (Cárdenas et al., 2017).

La evaluación de la macrotextura en estas mezclas es crucial, porque influye directamente en la seguridad al conducir bajo lluvia. La macrotextura se refiere a las características superficiales del pavimento que afectan cómo el agua se dispersa sobre y a través de él (Amirola & Aliseda, 2012). La profundidad y uniformidad de los vacíos en la superficie del pavimento son evaluadas para entender la capacidad del pavimento de manejar el agua de lluvia, utilizando técnicas como el método del círculo de arena para proporcionar datos esenciales sobre esta capacidad. La correcta evaluación de la macrotextura resulta fundamental para asegurar que el pavimento mantenga un rendimiento óptimo bajo diversas condiciones meteorológicas y de carga (De Solminihaç, 2018).

Además, la incorporación de fibra de vidrio como un mejorador en las mezclas asfálticas ofrece beneficios significativos. Este material compuesto, hecho de filamentos finos de vidrio, no solo mejora la resistencia a la deformación permanente y reduce las grietas por fatiga, sino que aumenta la tenacidad de la mezcla asfáltica (Guo et al., 2023). Su uso en la construcción demuestra versatilidad y efectividad, al posibilitar mezclas asfálticas más duraderas y menos susceptibles a daños a largo plazo. La fibra de vidrio, al actuar como refuerzo en la matriz asfáltica, contribuye a un pavimento más resistente y confiable, capaz de soportar mejor las cargas dinámicas del tráfico pesado (Adrianzen et al., 2022).

Finalmente, las propiedades Marshall de estas mezclas se evalúan utilizando el método homónimo, un procedimiento estándar en la ingeniería de pavimentos que no solo determina el contenido óptimo de betún y la densidad ideal, sino que mide la estabilidad y la fluidez de las mezclas bituminosas, proporcionando indicadores cruciales sobre la calidad y durabilidad del pavimento (Cervantes & Sequeira, 2014).

Diversas investigaciones ofrecen un análisis comprensivo sobre la incorporación de fibras de vidrio en mezclas asfálticas, y exploran cómo esta adición afecta propiedades críticas como la densidad, estabilidad, fluencia, porosidad y permeabilidad.

Por ejemplo, un estudio ejecutado en Egipto en 2020 revela que al incrementar el porcentaje de fibra de vidrio de 0 % a 1 % en la mezcla asfáltica, se constata un aumento notable en la estabilidad de la mezcla, mientras que la densidad muestra variaciones leves y la fluencia tiende a incrementarse. Este estudio también destaca un aumento en la porosidad con mayores concentraciones de fibra, lo que podría influir en la permeabilidad del pavimento (Eisa et al., 2021).

Por otro lado, en Perú durante 2021 se evaluaron concentraciones más altas de fibras de vidrio (hasta un 5 %) en mezclas asfálticas calientes destinadas a la rehabilitación de pavimentos. A medida que aumentaba la proporción de fibra, la estabilidad y la fluencia de las mezclas disminuían, indicando posibles compromisos en el rendimiento mecánico a favor de aumentar la capacidad de drenaje, reflejada en una porosidad reducida (Ponce, 2021).

En investigaciones efectuadas en Estados Unidos e Irán se observa un enfoque particular en mezclas modificadas con nanosílice y fibras de basalto y vidrio, alcanzando una porosidad de 14.57 % y una permeabilidad excepcional de 41 mm/seg, subrayando la eficacia de estos compuestos en mejorar significativamente la capacidad de manejo de agua de las superficies pavimentadas (Tanzadeh et al., 2019).

Finalmente, en Guayaquil, Ecuador, un estudio enfocado en la estabilización de mezclas asfálticas drenantes mediante la inclusión de fibras de vidrio y metálicas destaca por mostrar una porosidad del 20.40 % y una alta permeabilidad de 13.94 mm/seg. Este enfoque no solo mejora la durabilidad del pavimento, sino su funcionalidad en condiciones de lluvia intensa, y ofrece una solución viable para mejorar la sostenibilidad y seguridad de las carreteras (Revelo, 2016).

Estos acercamientos demuestran que la adición de fibras de vidrio a las mezclas asfálticas puede constituirse en una estrategia eficaz para mejorar ciertas propiedades físicas del pavimento, aunque es crucial balancear la cantidad y tipo de fibra para alcanzar los objetivos deseados de cada proyecto específico de pavimentación.

Dada la importancia de mejorar la sostenibilidad y funcionalidad de las infraestructuras viales, el presente estudio, desarrollado en el marco de una investigación previa de Quizhpilema (2022), se centra en el diseño de una mezcla asfáltica permeable que incorpora fibra de vidrio, con el objetivo de evaluar cómo la adición de este material influye en la macrotextura, permeabilidad y propiedades Marshall de la mezcla, para proponer así soluciones innovadoras y efectivas para los retos contemporáneos en la ingeniería de pavimentos. Este enfoque holístico puede contribuir a mejorar la durabilidad y seguridad de las carreteras, y también avanza hacia una infraestructura más verde y resistente.

2. Metodología

La metodología de este estudio siguió un enfoque experimental-cuantitativo con un diseño exploratorio, comenzando con una fórmula maestra tomada de la literatura como referencia para comparar las características de mezclas asfálticas al incorporar diferentes porcentajes de fibra de vidrio. Este proceso determinó la proporción óptima de fibra de vidrio y, posteriormente, evaluó la macrotextura de la mezcla asfáltica permeable con esta proporción.

La recolección de datos se realizó mediante una revisión bibliográfica en diversas fuentes como libros, artículos científicos y plataformas digitales, enfocándose en el diseño de mezclas permeables y su textura superficial. Se trabajó con 18 especímenes: 3 sin fibra de vidrio y 15 con diferentes proporciones de este material.

El diseño de investigación inició con la adquisición de agregados provenientes de minas locales (Guamote y Chambo) y asfalto de la empresa Covipal. Los materiales seleccionados se basaron en una propuesta de mezcla asfáltica permeable con agregados de la región. Además, se utilizó fibra de vidrio de la empresa TRECX S. A. por su accesibilidad y calidad.

Para caracterizar los materiales, se realizaron ensayos de granulometría, peso específico, absorción, masa unitaria y porcentaje de vacíos. Para la fibra de vidrio se evaluaron la densidad específica y la absorción. Con base en estas caracterizaciones, se elaboraron seis mezclas asfálticas, incluyendo la fórmula testigo y cinco variantes con diferentes contenidos de fibra de vidrio.

Posteriormente, se realizaron ensayos como el peso específico (densidad aparente), estabilidad Marshall y densidad teórica máxima para evaluar las propiedades de las mezclas. Una vez identificado el porcentaje óptimo de fibra de vidrio, se fabricó una loseta asfáltica para medir su macrotextura mediante el ensayo de la mancha de arena. Los resultados se analizaron y discutieron para elaborar conclusiones y recomendaciones aplicables a futuros estudios.

3. Resultados

Se presentan los resultados del estudio, organizados en función de los objetivos planteados. En primer lugar, se describe la normativa que regula el diseño de mezclas asfálticas permeables, destacando las especificaciones granulométricas necesarias para garantizar un desempeño óptimo. Seguidamente, se detalla la realización del Ensayo Marshall, a partir del cual se determina el porcentaje óptimo de fibra de vidrio utilizando la fórmula maestra propuesta. Asimismo, se presentan los resultados del Ensayo de Macrotextura, realizado tanto con y sin el añadido de fibra de vidrio, seguido de un análisis comparativo de la textura superficial de las mezclas evaluadas.

Normativa para el diseño de una mezcla asfáltica permeable

Las distintas fracciones de agregados deberán combinarse en proporciones tales que la mezcla cumpla con una de las bandas granulométricas establecidas por la norma chilena que se presenta en la tabla 1.

Tabla 1

Banda granulométrica para mezcla permeable

Denominación del tamiz		PA 10	PA 12
(mm)	ASTM	% Que pasa en Peso	
20	3/4"		100
12.5	1/2"	100	70-100
10	3/8"	70 - 90	50-80
5	Nº 4	15-30	15-30
2.5	Nº 8	10-22	10-22
0.63	Nº 30	6-13	6-13
0.08	Nº 200	3-5	3-5

Nota. Fuente: (MTC - sección suelos, 2014).

Una vez caracterizada la fibra de vidrio y los agregados pétreos extraídos de las minas del cantón Guamote y Chambo, provincia de Chimborazo, mediante el uso de la normativa se elaboró las mezclas asfálticas, tanto la muestra de control como las muestras adicionadas los distintos porcentajes de fibra

de vidrio. El análisis de las curvas granulométricas mostró que los materiales disponibles en las distintas minas no se encuentran dentro de una granulometría establecida y precisa, pues el porcentaje retenido del tamaño del agregado no llegó a representar ni la mitad de la muestra, a excepción del agregado fino de la mina de Chambo. Un aspecto importante para tener en cuenta, ya que el material al ser tamizado disminuye su cantidad y provocaría un incremento del costo del proyecto.

Ensayo Marshall

Mediante la normativa ASTM D 1559 se ensayó las probetas, a una velocidad constante, que previamente fueron sometidas a baño maría por unos 50 minutos a 60 °C. De esta manera se obtuvieron los valores de Estabilidad y Fluencia para las distintas mezclas asfálticas permeables. La tabla 2 proporciona un análisis detallado del impacto de diferentes concentraciones de fibra de vidrio en mezclas asfálticas permeables, evaluando múltiples parámetros como la estabilidad Marshall, flujo, densidad teórica máxima y el porcentaje de vacíos.

Tabla 2

Resultados Ensayo Marshall

	Porcentaje de Fibra de Vidrio					
	0	0.3	0.6	1	1.5	2
Estabilidad Marshall (lbs)	1286	1378	1040	913	971	997
Flujo (mm)	5.25	5.18	4.38	4.85	4.92	4.38
Densidad Teórica máxima (Gmm)	2.77	2.47	2.45	2.48	2.30	2.79
Porcentaje de Vacíos de la Mezcla asfáltica permeable	17.85	8.54	10.50	14.30	17.35	21.50

Estabilidad Marshall: la estabilidad de la mezcla asfáltica se incrementa significativamente al añadir un 0.3 % de fibra de vidrio en comparación con la mezcla patrón (sin fibra), alcanzando un valor de 1378 libras. Sin embargo, incrementos adicionales en la concentración de fibra de vidrio resultan en una disminución de la estabilidad, con valores que decrecen hasta 913 libras para el 1 % de fibra y luego muestran una leve recuperación al aumentar aún más la concentración de fibra.

Flujo: a pesar de que las mediciones de flujo en las mezclas asfálticas no cumplen con los rangos normativos establecidos por INVIAS, se observa una mejora relativa en esta propiedad al añadir fibra de vidrio. Específicamente, las mezclas con 0.6 % y 2 % de fibra de vidrio presentan valores de flujo más cercanos al estándar, con mediciones de 4.38 mm y 4.38 mm, respectivamente, indicando una mejor capacidad de deformación controlada bajo carga.

Densidad Teórica Máxima (Gmm): según las normativas ASTM D 2041 y AASHTO T 209, la densidad teórica máxima de las mezclas tiende a disminuir con la inclusión de fibra de vidrio, excepto en la muestra con 2 % de fibra, donde se observa un aumento. Este comportamiento sugiere que la fibra de vidrio puede afectar la compactación de la mezcla asfáltica, posiblemente debido a su estructura y distribución dentro del material.

Porcentaje de vacíos: el porcentaje de vacíos en las mezclas muestra una reducción inicial cuando se añade una pequeña cantidad de fibra de vidrio (0.3 %), pero este porcentaje aumenta conforme se incrementa la cantidad de fibra. Al llegar a 2 % de fibra de vidrio, el porcentaje de vacíos excede incluso al de la mezcla patrón. Este patrón sugiere que la fibra de vidrio modifica la estructura porosa del material, inicialmente reduciendo los espacios vacíos, pero luego generando una estructura más abierta a medida que se añade más fibra.

Los resultados en general muestran que la adición de fibra de vidrio a las mezclas asfálticas permeables afecta de manera compleja la estabilidad, el flujo, la densidad y la porosidad de las mezclas. Estos cambios indican que la fibra de vidrio puede mejorar ciertas propiedades mecánicas y de manejo de agua en el asfalto, pero debe optimizarse la cantidad y distribución de la fibra para evitar efectos adversos en la estabilidad y la densidad del pavimento.

Porcentaje óptimo de fibra de vidrio

Analizando los resultados se encontró que el diseño de mezcla asfáltica óptima resultó al incorporar 2.00 % de fibra de vidrio al esqueleto mineral. Que a pesar de no cumplir con la estabilidad planteada en la normativa presentó propiedades relevantes, en especial el flujo y el porcentaje de vacíos cuya característica predomina en las mezclas permeables. En la tabla 3 se presenta la fórmula maestra propuesta.

Tabla 3

Fórmula maestra propuesta

Mezcla asfáltica permeable

Agregados	3/4	3/8	3/8	Fino	Fibra de Vidrio	Bitumen
Lugar/Tipo	Guamote	Guamote	Rio Chambo	Rio Chambo	TRECX S.A	Ligante Bituminoso
%	21.01	5.73	45.75	21.01	2.00	4.5

Tabla 4

Dosificación usada para la mezcla asfáltica (2.0 % de Fibra de vidrio)

Agregados	%	Gramos
3/4" (Guamote)	21.01	252.1
3/8" (Guamote)	5.73	68.8
3/8" (Chambo)	45.75	549.0
Arena (Chambo)	21.01	252.1
Fibra (TRECX S.A)	2	24.0
Asfalto (Covipal)	4.5	54.0

Tabla 5

Cumplimiento de la Banda de Diseño

Denominación del tamiz		% QUE PASA EN PESO			Observaciones
(mm)	ASTM	Valor Min	Formula Maestra	Valor Max	
20	3/4"	-	78.99	100	Cumple
12.5	1/2"	70	78.99	100	Cumple
10	3/8"	50	51.48	80	Cumple
5	Nº 4	15	19.74	30	Cumple
2.5	Nº 8	10	20.38	22	Cumple

0.63	Nº 30	6	11.88	13	Cumple
0.08	Nº 200	3	4.46	5	Cumple

La granulometría planteada en la fórmula maestra cumplió con los límites superior e inferior de la banda de diseño planteada en la normativa.

Ensayo de la Macrotextura

Se tomó en cuenta la norma ASTM D 1599 en la elaboración de la loseta de asfalto y la normativa NLT-335 para el ensayo de la mancha de arena.

Una vez determinada la fórmula maestra se elaboró una loseta de dimensiones (50x50x5) cm tanto como para la fórmula testigo como para aquella que incorporó fibra de vidrio. Se obtuvieron las siguientes dosificaciones para el volumen requerido:

Tabla 6

Dosificación para la loseta sin fibra de vidrio (Fórmula testigo)

Agregados	%	Gramos
3/4" (Guamote)	21.01	5,419.87
3/8" (Guamote)	5.73	1,478.15
3/8" (Chambo)	47.75	12,317.89
Arena (Chambo)	21.01	5,419.87
Asfalto (Covipal)	4.5	1,160.85
	100	25,796.62

Tabla 7

Dosificación para la loseta 2 % de fibra de vidrio (Fórmula maestra)

Agregados	%	Gramos
3/4" (Guamote)	21.01	5,419.87
3/8" (Guamote)	5.73	1,478.15
3/8" (Chambo)	47.45	11,802.0
Arena (Chambo)	21.01	5,419.87
Fibra (TRECX S.A)	2.00	515.9
Asfalto (Covipal)	4.5	1160.8
	100	25,796.62

Energía de compactación

La energía de compactación usada en las briquetas Marshall de mezcla asfáltica equivale a 1017 Joule, correspondiente a la caída de una masa de 4.5 kg a una altura de 45 cm para un total de 50 golpes por cada lado de la biqueta. La energía necesaria para la loseta se determinó mediante una ponderación lineal, obteniendo como resultado una energía de 42470 Joule, equivalente a de forma manual a 116 golpes de una masa de 50 kg a una altura de 75 cm.

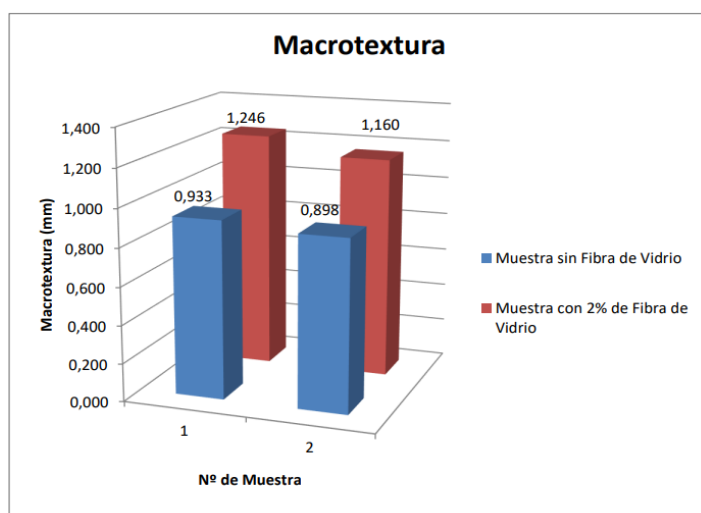
Tabla 8*Ensayo de macrotextura a la loseta sin fibra de vidrio*

Variable	Significado		
H	Profundidad media de textura superficial, en mm	Muestra 1	Muestra 2
V	Volumen de la arena utilizada, en mm^3	50 000	50 000
R	Radio medio del círculo de arena, en mm	261.25	266.25
	$\frac{V}{\pi * R^2}$	0.933	0.898

Tabla 9*Ensayo de macrotextura a la loseta con 2 % de fibra de vidrio- muestra 1*

Variable	Significado		
H	Profundidad media de textura superficial, en mm	Muestra 1	Muestra 2
V	Volumen de la arena utilizada, en mm^3	50 000	50 000
R	Radio medio del círculo de arena, en mm	226	234.25
	$\frac{V}{\pi * R^2}$	1.246	1.160

Comparación de la textura superficial

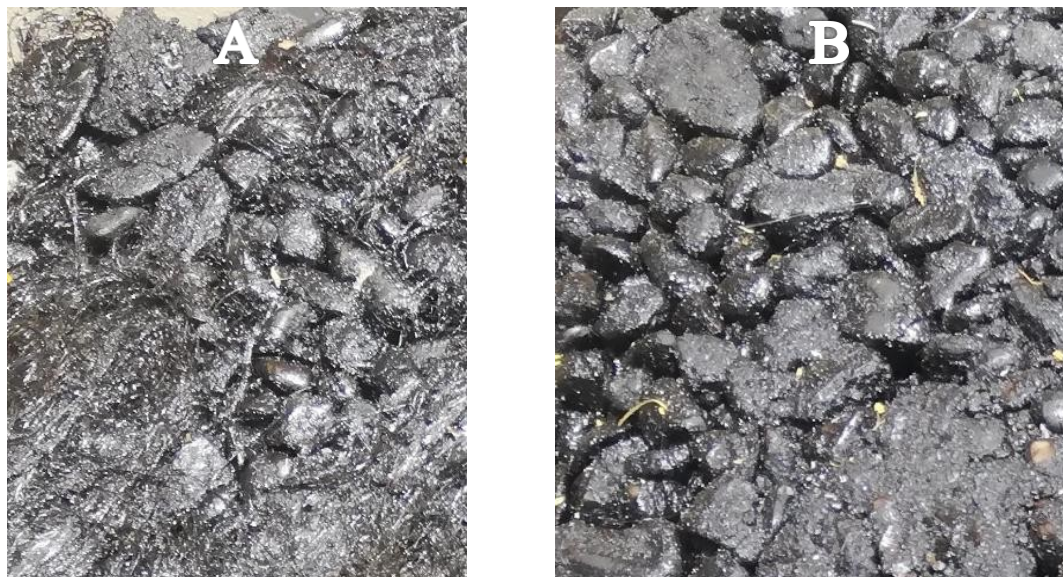
Figura 1*Textura superficial presente en las losetas elaboradas*

Se encontró que las mezclas asfálticas elaboradas con el 2 % de fibra de vidrio presentaron una mayor textura superficial en comparación con la muestra testigo. Según el MOP, el valor mínimo a obtener en el ensayo de macrotextura mediante el círculo de arena debe ser de 0.5 mm y los resultados de este ensayo se encuentran por encima de dicho valor normado, lo que indica que las mezclas permeables gozan de una rugosidad satisfactoria.

En la figura 2 se evidencian las losetas y su respectiva permeabilidad debido a los porcentajes de vacíos que estas mezclas presentan. En el gráfico A se aprecia la loseta con el 2 % de fibra de vidrio incorporado al esqueleto mineral (fórmula maestra) y en el gráfico B se encuentra la muestra de control (fórmula testigo).

Figura 2

Losetas realizadas con el 2 % y 0 % de fibra de vidrio



4. Discusión

El análisis de los resultados de este estudio evidencia el impacto significativo de la fibra de vidrio en las propiedades de las mezclas asfálticas permeables, corroborando hallazgos reportados en investigaciones previas. En primer lugar, el elevado porcentaje de absorción de la fibra de vidrio, en comparación con los demás agregados, afectó negativamente la estabilidad de la mezcla. Este fenómeno puede atribuirse a la disminución del recubrimiento de betún en los agregados con mayores adiciones de fibra, lo que reduce su cohesión y favorece la disgregación. Este comportamiento coincide con la investigación efectuada en Perú por Ponce (2021), quien reporta una disminución en la estabilidad al aumentar las concentraciones de fibra, indicando un compromiso entre las propiedades mecánicas y la mejora en la capacidad de drenaje.

La incorporación de fibra de vidrio también influyó en las propiedades volumétricas de las mezclas, aumentando su volumen y reduciendo el peso específico, lo que resultó en mezclas menos densas. Estas observaciones son consistentes con las tendencias reportadas en Egipto (Eisa et al., 2021), donde la adición de fibra incrementó la porosidad, afectando la densidad de las mezclas. En este caso, el incremento en el porcentaje de vacíos (20 % respecto a la fórmula testigo) y la permeabilidad resultante destacan como ventajas claves para la rápida evacuación de aguas pluviales, a pesar de la disminución en la estabilidad estructural.

En cuanto a las características Marshall, la estabilidad se redujo y no cumplió con los valores normados, mientras que el flujo fue superior al límite normativo. Sin embargo, se observó una tendencia a mejorar esta característica con mayores cantidades de fibra, sugiriendo una transición hacia una condición más plástica. Estos hallazgos contrastan parcialmente con un estudio efectuado en Guayaquil (Revelo, 2016), donde la inclusión de fibras de vidrio mejoró la funcionalidad drenante y la porosidad, sin comprometer significativamente la estabilidad.

Por otra parte, el porcentaje óptimo de fibra de vidrio determinado en este estudio logró proporcionar una granulometría adecuada ajustada a las especificaciones del Manual de Carreteras y la normativa chilena utilizada en la fórmula testigo. Además, la compactación mecánica empleada demostró ser eficaz para la elaboración de losetas, lo que respalda su aplicabilidad en la construcción de pavimentos.

Finalmente, el ensayo de la mancha de arena mostró un incremento del 33 % en la textura superficial al incorporar el porcentaje óptimo de fibra de vidrio, indicando un potencial aumento en la rugosidad y en el agarre neumático. Este hallazgo refuerza la viabilidad de esta mezcla para aplicaciones en capas de rodadura, mejorando la seguridad vial en condiciones de lluvia intensa. En concordancia con estudios realizados en Estados Unidos e Irán (Tanzadeh et al., 2019), estas propiedades de textura y permeabilidad son fundamentales para garantizar la funcionalidad y la sostenibilidad de las superficies pavimentadas.

5. Conclusiones

La incorporación de fibra de vidrio en mezclas asfálticas permeables representa un avance significativo en el desarrollo de infraestructuras viales más sostenibles y funcionales. Este material ha demostrado ser efectivo para mejorar la macrotextura y la permeabilidad del pavimento, características que contribuyen a una gestión más eficiente de las aguas pluviales. Al permitir una rápida evacuación del agua superficial, estas mezclas reducen el riesgo de hidroplaneo y mejoran la seguridad vial, especialmente en condiciones climáticas adversas. Además, este enfoque se alinea con los esfuerzos globales por integrar prácticas sostenibles e innovadoras en la construcción vial, mitigando el impacto ambiental de los materiales tradicionales como el asfalto.

El uso de fibra de vidrio también afecta significativamente las propiedades volumétricas, mecánicas y funcionales de las mezclas asfálticas. Aunque su incorporación puede reducir la estabilidad estructural, esta disminución se ve parcialmente compensada por el aumento en la permeabilidad y la mejora de la textura superficial, lo que garantiza un mejor agarre del neumático al pavimento. Los resultados coinciden con los de estudios previos que han demostrado un compromiso entre las propiedades mecánicas y funcionales al aumentar la proporción de fibras en la mezcla. Estos hallazgos refuerzan la importancia de determinar proporciones óptimas de fibra para cada aplicación específica.

En este estudio, el porcentaje óptimo de fibra de vidrio permitió ajustar las propiedades de la mezcla a las especificaciones normativas chilenas, logrando un equilibrio entre las características críticas del pavimento. La evaluación de la macrotextura mostró un incremento del 33 %, lo que confirma su idoneidad para mejorar la rugosidad y la adherencia en las capas de rodadura.

En conjunto, los hallazgos de este estudio subrayan la importancia de incorporar materiales innovadores como la fibra de vidrio en el diseño de mezclas asfálticas. Además de responder a las necesidades de una infraestructura más segura y funcional, este enfoque contribuye al desarrollo de soluciones sostenibles que optimizan el desempeño y reducen los costos de mantenimiento a largo plazo. Así, la mezcla asfáltica permeable con fibra de vidrio representa un avance técnico, y un paso hacia una infraestructura más resiliente y ambientalmente responsable.

Referencias

- Adrianzen, O. J., Azula, J. J., Pacherrres, C. F., & Muñoz, S. P. (2022). Uso de distintos tipos de fibras para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica: una revisión literaria. *Infraestructura Vial*, 24(43), 56-72. <http://dx.doi.org/10.15517/iv.v24i43.47931>
- Amirola, A., & Pérez, P. (2012). Macrotextura de pavimentos: evaluación de la MPD y su utilidad para la conservación y el diagnóstico de firmes. In *Retos de la ingeniería civil: sociedad, economía, medio ambiente*. (p. 47). Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. <https://catalogo.rebiun.org/rebiun/record/Rebiun03968181>
- Cárdenas, E., Albiter, Á., & Jaimes, J. (2017). Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua. *CIENCIA ergosum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 24(2), 173-180. <https://n9.cl/usgw9>
- Cervantes, V., & Sequeira, W. (2014). *Consistencia de los diseños de mezcla según la metodología Marshall*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales-UCR. <https://n9.cl/hdylq>
- Díaz, J., Díaz, L., Miralles, E., De la Peña, E., Del Real, E., Rocci, S., & Chicharro, R. (2011). *Manual de buenas prácticas para el diseño de márgenes de carreteras convencionales*. Asociación Española de Carretera. <https://n9.cl/uyd8w>
- De Solminihaç, T. (2018). *Gestión de infraestructura vial*. Ediciones UC. https://lc.cx/WiH_h7
- Eisa, M. S., Basiouny, M. E., & Daloob, M. I. (2021). Effect of adding glass fiber on the properties of asphalt mix. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14, 403-409. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0072-6>
- Guo, Y., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2023). The use of fibres in asphalt mixtures: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 390, 131754. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131754>
- Ponce, A. J. (2021). *Aplicación de fibras de vidrio en el diseño de mezcla asfáltica en caliente para rehabilitar pavimentos flexibles en Juliaca, 2021* [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional. <https://n9.cl/guhr9>
- Quintero, J. (2016). *Guía de buenas prácticas para carreteras ambientalmente amigables*. The Nature Conservancy & Latin America Conservation Council. <https://n9.cl/whg2p>
- Quizhpilema, J. C. (2022). Evaluación de la macrotextura a una mezcla asfáltica permeable al incorporar fibra de vidrio como mejorador de las propiedades Marshall [Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo]. Repositorio Digital UNACH. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/9936>
- Revelo, G. (2016). *Estabilización de mezclas asfálticas drenantes mediante la inclusión de fibras de vidrio y metálicas* [Tesis de grado, Universidad de Guayaquil]. Repositorio institucional. <https://n9.cl/2d1kn>
- Rondón, H. A., & Reyes, F. A. (2015). *Pavimentos materiales, construcción y diseño*. Ecoe Ediciones.
- Tanzadeh, R., Tanzadeh, J., & Tahami, S. A. (2019). Experimental study on the effect of basalt and glass fibers on behavior of open-graded friction course asphalt modified with nano-silica. *Construction and Building Materials*, 212, 467-475. <https://n9.cl/5hzui1>

Torres, D. M., Mosquera, L. F., Torres, J., Valencia, S. F., Gallego, S., & Álvarez, F. (2019). Estudio preliminar sobre el aprovechamiento de escoria de fundición de plomo secundario en la obtención de mezclas asfálticas. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 256-268. <https://doi.org/10.14482/inde.37.2.6241>

Weikert, F. (2021). *Infraestructura resiliente. Un imperativo para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe*. CEPAL. <https://n9.cl/h6l8r>

Transparencia

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna.

Fuente de financiamiento

Los autores financiaron completamente la investigación.

Contribución de autoría

Raúl Alexis Salazar Flores: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Diana Carolina Merino Gavilanes: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Julio Cesar Quizhpilema Acero: Conceptualización, software, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos.

Cristian David Pilicita Parra: Conceptualización, software, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos.

Los autores contribuyeron activamente en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del manuscrito final.