

Self-repair of minor failures in the pavement using Mecanomutable Asphalt Material, in Jiron Arguedas, Villa Maria del Triunfo, year 2024

Lisi Gianella Vasquez Vasquez¹ ; Yamilet Nayl Tello Ambrosio² 

¹ Universidad Autónoma del Perú, Perú, lvasquezv@autonoma.edu.pe

² Universidad Autónoma del Perú, Perú, ytelloa@autonoma.edu.pe

Abstract– The prevalence of roads in poor condition violates safety and affects the comfort of drivers and pedestrians on their daily journeys. Therefore, in this research article, the influencing factors are determined during the self-repair process of the flexible pavement in Jiron Arguedas using mechanomutable asphalt material, in the Villa Maria del Triunfo district, compared to traditional asphalt mixture designs. It presents a quantitative approach, obtaining the results in numerical values through experimental tests with the study of its behavior at scale. From one of the results obtained, it can be highlighted that the interior heat conservation capacity of the samples is 0.28%. increased by 99.07% and that of 0.90% by 39.81% compared to that of 0% steel wool, of the three samples the one that presented a better level of self-repair is the one that had a average percentage of steel wool, allowing the tar to maintain its thermoplastic property for longer, filling its cracks, and when it is no longer exposed to heat it solidifies again, completing its self-repair cycle. It was concluded that the mechanomutable asphalt material can contribute to the reduction of road maintenance periods required by traditional flexible pavements through its self-healing property. This contribution to the development of self-healing pavements will not only improve its durability, but will also promote a safer and more efficient road environment for all users.

Keywords-- Mechano-mutable, self-healing, pavement, safety, comfort

Autoreparación de fallas menores en el pavimento utilizando Material Asfáltico Mecanomutable, en Jirón Arguedas, Villa María del Triunfo, año 2024

Lisi Gianella Vasquez Vasquez¹ ; Yamilet Nayl Tello Ambrosio² 

¹ Universidad Autónoma del Perú, Perú, lvasquezv@autonoma.edu.pe

² Universidad Autónoma del Perú, Perú, ytelloa@autonoma.edu.pe

Resumen– La prevalencia de las vías en mal estado vulnera la seguridad y afecta el confort de los conductores y peatones en sus trayectos diarios. Por ello, en este artículo de investigación se determina los factores influyentes durante el proceso de autoreparación del pavimento flexible en el Jirón Arguedas empleando material asfáltico mecanomutable, en el distrito de Villa María del Triunfo, frente a los diseños de mezclas asfálticas tradicionales. Presenta un enfoque cuantitativo, obteniendo los resultados en valores numéricos a través de pruebas experimentales con el estudio de su comportamiento a escala, de uno de los resultados obtenidos, se puede resaltar que la capacidad de conservación de calor interior de las muestras la de 0.28% aumentó en un 99.07% y la de 0.90% en un 39.81% respecto a la de 0% de lana de acero, de las tres muestras el que presentó un mejor nivel de autoreparación es el que tuvo un porcentaje medio de lana de acero, permitiendo que el alquitrán mantenga su propiedad termoplástica por más tiempo, rellenando sus fisuras, y al dejar de estar expuesto al calor se vuelve a solidificar, completando su ciclo de autoreparación. Se concluyó que el material asfáltico mecanomutable puede contribuir en la reducción de los periodos de mantenimiento vial que requieren los pavimentos flexibles tradicionales a través de su propiedad de autoreparación. Está contribución en el desarrollo de pavimentos autoreparables no solo mejorará la durabilidad del mismo, sino que también permitirá promover un entorno vial más seguro y eficiente para todos los usuarios.

Palabras clave– Mecanomutable, autoreparación, pavimento, seguridad, confort.

I. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos utilizados en las infraestructuras viales en el Perú se construyen de manera tradicional sin agregar componentes a los diseños de mezclas asfálticas que le permitan mejorar sus propiedades mecánicas, dando como resultado que al aparecer las fisuras y con el paso del tiempo de los vehículos pesados y la variación del clima, se convierta en una falla, a menos que se realicen los mantenimientos necesarios, los cuales son frecuentemente descuidados por la mayoría de municipalidades en Lima, como en el distrito de Villa María del Triunfo, en el Jirón Arguedas, donde la mayoría de sus vías presentan un mal estado.

Tras la evaluación del estado de una avenida en este distrito, obtuvieron un PCI (Índice de Condición del Pavimento) del 7.57, calificándolo como fallado, siendo la piel de cocodrilo la falla más repetitiva dentro del estudio con el 23% [1].

Esto afecta tanto a los conductores como a los transeúntes, debido a que esta situación genera incomodidad e inseguridad en sus viajes, en una encuesta que realizaron a 385 peatones el 35.32% considera ello una incomodidad y pérdida de tiempo un 28.31%. Además, el 68.83% de conductores afirman que sí son bastantes los daños que reciben sus vehículos por el mal estado de las vías [2].

Por ende, hoy en día hablar de tecnologías de autoreparación ya es una realidad, puesto que en el presente artículo se demostró que el pavimento flexible si puede autorepararse, si en el diseño de mezcla asfáltica se emplea el Material Asfáltico Mecanomutable (MAMs). El asfalto al estar combinado con las fibras de acero y ser expuesto a campos magnéticos como fuente de calor, hace que sea posible que este adquiera esa capacidad, pero principalmente de las microgrietas, debido a que al aumentar su temperatura interior, una vez captado ese calor inducido, el asfalto puede fluir dentro de las grietas que se hayan generado durante el tiempo de servicio del pavimento por medio de la capilaridad y autorellenarlas [3].

Al evaluar tres tipos de fibra en las mezclas asfálticas con ensayos de flexión para que se autoreparen, se recomienda la fibra de acero, respecto a la de carbono y lana de acero [4]. El método por inducción de calor por microondas con fibra de acero en 0.2%, tuvo el mismo efecto en muestras con el 1% a 5% mediante inducción eléctrica [5].

Tras realizar ensayos de abrasión, estabilidad y densidad con el método Marshall, y módulo resiliente, con muestras sin modificar y con fibras de acero del 0.20%, 0.30%, 0.40%, 0.50% y 0.60%, se concluye que a mayor porcentaje se tiene una mejor resistencia al desgaste, a su vez el óptimo módulo resiliente a una temperatura de 25°C es de 0.50% y con el 40°C es el de 0.60%, es decir que presentan mejores resultados lo que tienen mayor contenido de fibra de acero [6].

Dentro de las técnicas de autocuración de microfisuras, se recomienda el calentamiento por inducción, visto esto implementado en vías holandesas obteniendo resultados positivos al incorporar fibras de acero a la mezcla asfáltica, puesto que al conducir el calor hace que el betún se discurre y rellene las fisuras [7].

Existen varias investigaciones en las que se afirma que la inducción de calor con microondas es un método que permite estudiar el proceso de autocuración. Por medio de rayos X se observa que en las muestras de asfalto poroso (PAC) con el 6% de lana de acero se puede tener una mezcla más

homogénea a diferencia de usar el 3%, lo que a su vez se refleja en una mejor conductividad de calor [8]. Al incorporar escorias de acero en la mezcla asfáltica el calor se dispersa y aumenta su temperatura, debido a que las ondas electromagnéticas de las microondas se convierten en energía térmica [9].

El grado de autoreparación es directamente proporcional a la cantidad y tipo de meta, como al tiempo de inducción de calor, mejores resultados con la cascarilla de laminación en caliente que en fría [10]. Al utilizar escorias de acero en reemplazo de piedra caliza en el diseño de mezcla asfáltica, el calor si es conducido por todo su interior siendo visto por rayos X, pero un calentamiento excesivo reduce el nivel de autoreparación [11].

En diseños de mezclas asfálticas autorreparables el reemplazar agregado grueso por 20% de escoria de acero de arco eléctrico e incorporar fibra de lana de acero (SWF) en porcentajes menores al 1% en relación al peso de sus muestras, se mejora la resistencia al agrietamiento con el 0.2% de SWF [12]. La efectividad de la curación asistida se da por las adicciones metálicas, ya que ensayos con diferentes grados de calentamiento y agregados que normalmente se utilizan en la carpeta asfáltica del pavimento, aumenta la capacidad de autoreparación por la inducción de calor [13]. En una comparación entre el comportamiento de asfalto con los métodos convencionales de inducción de calor, el método por inducción por microondas, se dio a nivel molecular en cambio con los convencionales fue a nivel superficial [14].

El tipo de unión de grietas por microondas tiene un rango de resultados muy estrecho en TSRST, lo que puede interpretarse como una mayor uniformidad del área de unión en comparación con otras técnicas de unión [15]. Una temperatura de calentamiento adecuada para garantizar que el ligante asfáltico fluya sin sobrecalentarse es de 90°C, esto tras colocar diferentes muestras en un microondas y evaluar las temperaturas que alcanzaron [16].

Un mayor aumento de lana de acero puede hacer que la mezcla se vuelva más rígida y se formen motas, por ello se limita a un máximo de 6% de lana de acero [17]. Aumentar el contenido de ferrita hace que la estabilidad dinámica de la mezcla asfáltica aumente gradualmente y la resistencia a la formación de surcos de la mezcla asfáltica con 5% de ferrita es casi el doble de alta que la de la mezcla asfáltica ordinaria [18]. Uno de los métodos de autocuración para pavimento flexible es mediante microondas por la inducción de calor, además es importante mencionar que se requiere de periodos de descanso por el tránsito vehicular y no se genere la aparición de nuevas fisuras y la autocuración no sea lenta [19].

A su vez, el incorporar fibras de acero en el pavimento no tiene un impacto negativo en la capacidad de soportar cargas a tracción y flexión, resultados de la prueba IDT indicaron que la resistencia a la tracción aumentó en todas las muestras con un contenido de NG superior al 10 % [20]. Los SF de tipo gancho en el extremo exhibieron el impacto más significativo en la resistencia a la flexión [21].

Diseños de mezclas asfálticas con el método Marshall, incorporando el 0%, 2%, 4% y 6% de virutas de acero para evaluar la capacidad de autoreparación, sometidos a ensayos de flexión para inducirlos a la falla y ser sometieron en un microondas a 50 C° por 45 segundos, permite que sea posible que se rellenen esas fisuras, completando el ciclo de autoreparación luego de dejarlo a temperatura ambiente por 12 horas, luego de tres ciclos, concluyen que se debe considerar el 4% de virutas de acero, debido a que con el 6% su resistencia empieza a disminuir [22].

Implementar el 1% de fibra de acero y 1% de caucho en polvo dentro de un diseño de mezcla asfáltica autoreparable, y ser sometido a un ensayo de flexión para que se generarán la fisuras y por medio de la inducción de calor lograr que el asfalto rellene las fisuras, considerando una duración de 2 minutos al interior de un horno con temperaturas entre 150°C y 170°C, seguidamente volver hacer el ensayo de flexión, comprueba que el nivel de autoreparación se reduce luego de un ciclo de autoreparación, llegando a tener un 22.2% [23].

El incorporar fibras de acero y caucho para mejorar propiedades en mezcla asfáltica, permite tener un mejor nivel de autoreparación, con el 2% de fibra de acero más el 2% de caucho a una temperatura de 145°C durante 4 minutos, debido a que llegó hasta el tercer ciclo de autoreparación con el 17.9%, es decir que si bien no fue el que tuvo un mejor resultado en el primer ciclo de autoreparación fue el único que tuvo un mayor nivel en la última prueba [24].

Diseños de mezcla con fibras de acero y caucho, sometidos a ensayos de flexión, para una evaluación del grado de autoreparación, da como resultado luego de tres ciclos de autoreparación y una inducción de calor por microondas de 150°C por 250 segundos, un nivel óptimo con el 5% de fibra de acero más el 1.5% de caucho, debido a que de los tres diseños este fue el único que mantuvo su nivel de autoreparación con el 15.86 % [25].

En diseños de mezclas asfálticas por el método Marshall en el que incorporaron el 0%, 2%, 4%, 6% y 8% de fibras de acero para que tenga la capacidad de autoreparación, evaluando los resultados de manera indirecta, sometieron las probetas a distintos tiempos de inducción de calor con el microondas y a ensayos de flexión, considerando 6 ciclos de autoreparación para sus estudios, siendo el porcentaje óptimo el de 4% con 60 segundos en llegar a autorepararse y que la autoreparación óptimo que puede llegar es hasta el tercer ciclo con un 54% [26].

Como bases teóricas se tiene que, mecanomutable es la denominación que se le da a aquellos materiales que son capaces de modificar sus propiedades, en ese sentido, los Materiales Asfálticos mecanomutables (MAMs) vienen siendo una mezcla bituminosa modificada en la que se le incorpora fibras de acero para que, por medio de campos magnéticos o calor, el asfalto aumente su viscosidad de manera temporal [3].

La propiedad termoplástica en el asfalto hace referencia a la capacidad de fluir con la variación de temperatura [27]. Con el principio de capilaridad el asfalto puede fluir por las grietas,

puesto que al haber una diferencia de presiones se genera una fuerza que lo impulsa a fluir, siempre y cuando esté influenciado por una gran cantidad de energía externa para que se cumpla con lo antes mencionado, comportarse como un fluido newtoniano, es decir que a altas temperatura su viscosidad será constante, presentando una fluidez uniforme [28].

Como justificación se tiene que, a nivel teórico, esta investigación se fundamenta en la evaluación del comportamiento del MAMs incorporado en una mezcla asfáltica para un pavimento flexible, de tal manera que se determine a partir de qué temperatura este empieza a autorepararse y cómo varía su comportamiento con distintos porcentajes de acero y fuentes de calor, de tal manera conocer hasta qué nivel el pavimento puede llegar a autorepararse.

A nivel práctico, este proyecto de investigación proporciona pruebas de laboratorio, para determinar si realmente el emplear MAMs en el pavimento flexible permite que tenga la capacidad de autorepararse sin la necesidad de realizar un mantenimiento periódico o rutinario, el cual si es necesario para los pavimentos flexibles tradicionales. A nivel metodológico, contribuye en el desarrollo de pavimentos inteligentes en nuestro país, de tal manera que se tenga una visión real del comportamiento y composición dentro de la carpeta asfáltica modificada.

En este artículo de investigación se determina los factores influyentes durante el proceso de autoreparación del pavimento flexible en el Jiron Arguedas empleando material asfáltico mecanomutable, en el distrito de Villa Maria del Triunfo, frente a los diseños de mezclas asfálticas tradicionales.

Por ende, se tuvo como objetivos el determinar la influencia de la variación de los porcentajes de lana de acero en la propiedad termoplástica del asfalto mediante el aumento de temperatura en cada muestra durante un tiempo constante.

En ese sentido se evaluaron los tiempos de solidificación, luego de ser sometidos a varios ciclos de inducción de calor, una vez que las muestras se llevarán a la falla, determinando así el nivel de autoreparación indirectamente con estos factores.

II. MÉTODO

En el sentido que esta investigación se basa en la autoreparación de pavimentos empleando Material Asfáltico Mecanomutable en el Jirón Arguedas, se vio apropiado la consulta de artículos de revisión y tesis, con una antigüedad no mayor de cinco años, de los cuales se tiene [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [28], [30], [31] y [32] en un idioma distinto al español.

Como criterios para la selección de dichas fuentes se tiene que, dentro de las investigaciones se hayan considerado ensayos para estudiar las propiedades de las muestras asfálticas con contenidos de fibra de acero bajo inducción de calor, que las publicaciones estén en fuentes confiables como

ScienceDirect, repositorios y revistas científicas, y estén alineados a los objetivos de la presente investigación.

El estudio presenta un enfoque cuantitativo, debido a que mide dos variables en un contexto determinado y muestra los datos recolectados a través de números, el alcance es de tipo explicativo, dado que además de describir el problema, se presentó las consideraciones que se debe tener en cuenta para incorporar el material asfáltico mecanomutable en la capa de rodadura de un pavimento flexible con la capacidad de autorepare en un contexto actual, mediante una relación indirecta. El diseño es experimental, de tipo preexperimental, dado que la medida de las variables depende de un análisis en laboratorio.

La técnica escogida para la actual investigación cuantitativa es el de análisis documental, debido a que se hará un seguimiento al comportamiento de las muestras con distintos porcentajes de lana de acero incorporados en la mezcla asfáltica, bajo distintas condiciones y su efecto en la autoreparación de la carpeta de rodadura del pavimento, mediante la interpretación de los datos resultantes del estudio.

Los instrumentos empleados fueron las fichas de registro de datos, los cuales provienen de la recopilación de valores obtenidos dentro de los ensayos a menor escala de la carpeta de rodadura de un pavimento flexible, luego de generar una fisura en cada probeta con distintos porcentajes de lana de acero y ser colocado tanto en un microondas como en un horno con tiempos y temperaturas distintas para su autoreparación.

III. ANÁLISIS E INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Al determinar el nivel de autoreparación varios investigadores han seguido diferentes ensayos, de lo cual se puede resaltar lo siguiente, mediante el ensayo de flexión buscan inducir la falla en las muestras que han diseñado para que se genere la fisura y a su vez obtener la máxima carga dinámica que pueden resistir ante los esfuerzos de flexión, como simulación del comportamiento de la carpeta asfáltica del pavimento flexible, continuando con una inducción de calor a una cierta temperatura y tiempo en un microondas como en la mayoría de los ensayos, aunque también consideran el uso del horno como fuente de calor para que se rellenen las fisuras completando así un ciclo de autoreparación, este proceso lo realizan de 3 a 6 veces, determinando el grado de autoreparación en relación a la disminución de los valores de carga que va resistiendo las muestras por cada ciclo.

Para determinar el porcentaje óptimo de fibra de acero dentro de su dosificación de agregados para las briquetas que ensayan utilizan el método Marshall, para obtener el porcentaje de vacíos, estabilidad, vacíos en agregado mineral (VMA), vacíos llenados, flujo y vacíos llenos con ligante asfáltico (VFA), pero para hacer una evaluación detallada algunos investigadores utilizaron los rayos X como medio para tener una visión real de cómo se distribuye las fibras de acero en cada muestra y a su vez con las cámaras infrarrojas

determinaron como se expande el calor dentro de las muestras y en cuánto varía.

A. Captación de calor

Para evaluar el nivel de autoreparación se requiere tanto de la fibra de acero como la fuente de calor, muchas de las investigaciones consideran el microondas, pero debido a la literatura revisada se considera que el horno puede dar resultados más acercados a la realidad, puesto que el calor se propaga al exterior del objeto en cambio con el microondas llega a nivel molecular, es decir el calor se dispersa de manera directa hacia el objeto.

Según las investigaciones, con el método de inducción de calor a través del microondas, [22] y [26] con 4%, [17] y [25] con un 5% y [8] un 6% de fibra de acero en sus muestras llegaron a temperaturas con un rango de 20°C a 50°C. Teniendo en cuenta que esto reafirma la recomendación de [17] donde si el porcentaje de fibra de acero supera el 6% las muestras tienden a sobrecalentarse, dando como consecuencia la separación de agregados y acumulados de fibra de acero al no estar dispersado homogéneamente.

En cambio [23] en sus ensayos para inducir el calor a sus muestras de 1% de lana de acero y 1% de caucho, consideraron una temperatura entre 150°C y 170°C para un tiempo de 2 min en el horno y [24] optó por una temperatura de 145°C durante 4 minutos, teniendo mejores resultados con el 2% de fibra de acero y el 2% de caucho, siendo un factor influyente en sus resultados el caucho.

A diferencia de lo considerado por la mayoría de los investigadores, en el presente artículo se consideró el uso del horno para la inducción de calor y la medición de la temperatura que llega cada muestra con el 0%, 0.28% y 0.90% de lana de acero a valores constantes de tiempo y temperatura. Para lo cual, cada una de las muestras se colocaron en un horno a 150°C durante 4 minutos para que se tenga mejores resultados, pasado ese tiempo se retiró del horno e inmediatamente se insertó un termómetro digital de aguja para medir la temperatura interior a la que alcanza cada probeta.

Consideramos dos diseños de mezcla, el primero con arena gruesa, lana de acero y alquitrán, Tabla 1, con el cual el de 0% alcanzó una temperatura de 24.1°C, el 0.28% de 30.5°C y el de 0.90% llegó a 31.5°C, Figura 1, en el segundo se consideraron los mismos agregados mencionados anteriormente pero se le incorporó piedra chancada, Tabla 2, de lo cual en el primer ensayo el 0% alcanzó los 33°C en 10 min, el 0.28% a 35.3°C en 4 min y el de 0.90% llegó a 34.4°C en 5.30 min.

Como consideración al momento de emplear la lana de acero en las mezclas asfálticas se tiene que, su incorporación en la mezcla sea durante el proceso de calentamiento del alquitrán junto con los agregados, debido a que en las primeras muestras con el primer diseño de mezcla, la lana de acero al añadirse en su totalidad después que la mezcla de arena y alquitrán se retiraran del fuego, generó que se las fibra de lana de acero se hicieran motas, ya que estas tienden a agruparse,

también es importante mencionar por qué en varias investigaciones las muestras a probar con diferentes temperaturas no presenta un riesgo en su manipulación, esto es por una de sus propiedades mecánicas de las cuales la más resaltante es que no es inflamable, por eso no hay un límite para inducir calor a altas temperaturas en las muestras mencionadas en las diferentes fuentes de investigación [29].

TABLA 1
DOSIFICACIÓN PARA EL PRIMER DISEÑO DE MEZCLA

Agregados	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Arena gruesa (gr)	330	330	330
Alquitrán (gr)	56.6 gr	56.6 gr	56.6 gr
Lana de acero (gr)	0	1	3
Peso (gr)	325	355	335
Lana de acero (%)	0	0.28	0.90

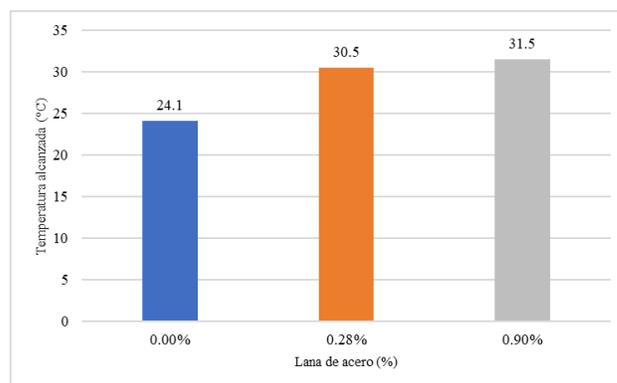


Fig. 1 Temperatura interior máxima con el diseño de mezcla 1.

TABLA 2
DOSIFICACIÓN PARA EL SEGUNDO DISEÑO DE MEZCLA

Agregados	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Arena gruesa (gr)	350	350	350
Piedra Chancada (gr)	25	25	25
Alquitrán (gr)	70	70	70
Lana de acero (gr)	0	1	3
Peso (gr)	345	345	343
Lana de acero (%)	0	0.28	0.90

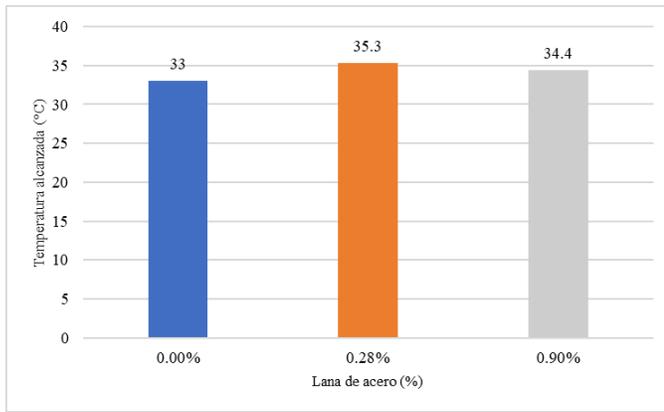


Fig. 2 Temperatura interior máxima con el diseño de mezcla 2.

TABLA 4
CICLO 2

Lana de acero (%)	Temperatura interior (°C)	Tiempo (seg.)
0%	31.8	64.8
	32.6	255
	30.2	600
0.28%	34.4	64.8
	36	240
	32.7	600
0.90%	40	64.8
	41.9	318
	35.9	600

TABLA 5
CICLO 3

Lana de acero (%)	Temperatura interior (°C)	Tiempo (seg.)
0%	33.6	64.8
	34.4	255
	32.1	600
0.28%	33.4	64.8
	34.8	318
	32.3	318
0.90%	35.6	64.8
	36.3	198
	32.8	600

B. Ciclos de inducción de calor

Dentro de la evaluación de la capacidad de autoreparación, se vio conveniente medir las temperaturas a las que llega cada muestra luego de estar bajo la inducción de calor durante 4 min en el horno, realizando este proceso más de una vez para que se pueda evaluar la capacidad de la lana de acero en conducir el calor luego de varios ciclos y determinar la influencia de este agregado en los diseños asfálticos tradicionales.

Con el segundo diseño de mezcla se realizó un primer ciclo, mencionado en la primera parte, en el cual las máximas temperaturas que alcanzó fueron, 33°C la de 0% de lana de acero, 35.3°C la de 0.28% y 34.4°C la de 0.90%, Tabla 3.

El segundo ciclo perteneció al ensayo de solidificación realizado luego de 3 días desde el primer ensayo, pero en este se consideró el mismo tiempo de 4 min pero a 350°C, con lo cual la de 0% alcanzó los 32.6°C, la de 0.28% a 36°C y la de 0.90% a 41.9°C, Tabla 4.

Con el último ciclo, se consideró un tiempo de descanso de aproximadamente dos horas desde el segundo ciclo, de lo cual la de 0% llegó a 34.4°C, la de 0.28% a 34.8°C y la de 0.90% alcanzó los 36.3°C, Tabla 5.

TABLA 3
CICLO 1

Lana de acero (%)	Temperatura interior (°C)	Tiempo (seg.)
0%	32,50	64,8
	33	600
	-	-
0.28%	33,5	64,8
	35,3	240
	33,2	600
0.90%	33	64,8
	34,4	318
	34,8	600

Adicionalmente a estos resultados, se calculó la velocidad de captación de calor por segundo de cada muestra, tomando el tiempo que demora en llegar a las temperaturas previamente mencionadas durante los ensayos, de tal manera tener una interpretación más precisa de la variación de las muestras en su capacidad de captar y conducir el calor en su interior, siendo esta una de las variables también calculadas en otra investigación, en la cual consideraron la evaluación de las propiedades térmicas de la carpeta asfáltica del pavimento al incorporar fibras de acero en distintos porcentajes, en donde también concluyen que a mayor porcentaje de este agregado expuesto a altas temperaturas, la velocidad de calentamiento es mayor [19], [30].

Sin embargo, dentro de sus ensayos no llegaron a considerar calcular esa velocidad luego de varios ciclos de inducción, por ello esto sí ha sido considerado en esta investigación como parte de la evaluación del nivel de autoreparación de la carpeta de rodadura de un pavimento flexible, todos estos resultados obtenidos se encuentran organizados en la Figura 3.

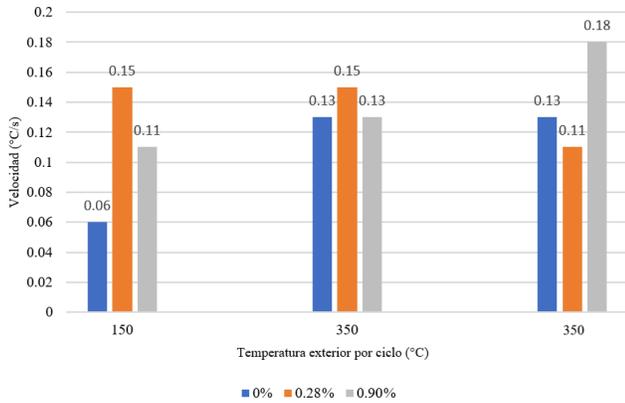


Fig. 3 Niveles de velocidad de captación por ciclo.

C. Solidificación

Dentro de los ensayos realizados por otros investigadores no han llegado a considerar el tiempo que demora cada muestra en llegar a una temperatura ambiente con distintos porcentajes de fibra de acero, siendo esto relacionado con la capacidad del pavimento en mantener el calor en su interior por más tiempo, para lo cual apoyándonos de un termómetro digital se tomó el tiempo que demora cada probeta en llegar a la misma temperatura estable y que temperaturas alcanza cada una con el mismo tiempo de descanso sin inducción de calor, considerando para este ensayo el segundo diseño de mezcla.

Luego de estar 4 min. en un horno a 350°C, la de 0% de lana de acero llegó a los 32.6°C, la de 0.28% a 36°C y de 0.90% a 41.9°, siendo este el ciclo 2, pasada 1.08 hr llegó a 23.4°C el de 0%, en cambio en ese primer tiempo la segunda presentó 24°C y la tercera a 24.3°C, finalmente la segunda demoró 2.15 hr en llegar a la primera temperatura que alcanzó la muestra que no tenía contenida de lana de acero y la tercera en 1.51 hr llegó a los 23.4°C, Tabla 6.

Estos resultados también se han representado por el nivel de conservación de calor de las muestras con lana de acero respecto a la que no tiene, la ecuación (1) expresa la variación del 0.28% respecto al tiempo obtenido por el 0% y la ecuación (2) con la misma relación, pero en relación al 0.90%.

$$\left(\frac{2.15 \text{ hr} - 1.08 \text{ hr}}{1.08 \text{ hr}}\right) \times 100 = 99.07\% \quad (1)$$

$$\left(\frac{1.51 \text{ hr} - 1.08 \text{ hr}}{1.08 \text{ hr}}\right) \times 100 = 39.81\% \quad (2)$$

TABLA 6
SOLIDIFICACIÓN POR CONTENIDO DE LANA DE ACERO

Lana de acero (%)	Tiempo (hr)	Temperatura (°C)
0	1.08	23.40
0.28	1.08	24.00
	2.15	23.40
0.90	1.08	24.30
	1.51	23.40

El nivel de conservación de calor se calculó, teniendo en cuenta el tiempo que le tomó a la muestra 1 en llegar a la temperatura estable que se consideró para este ensayo, es decir a los 23.4 °C, observando este comportamiento en la Figura 4.

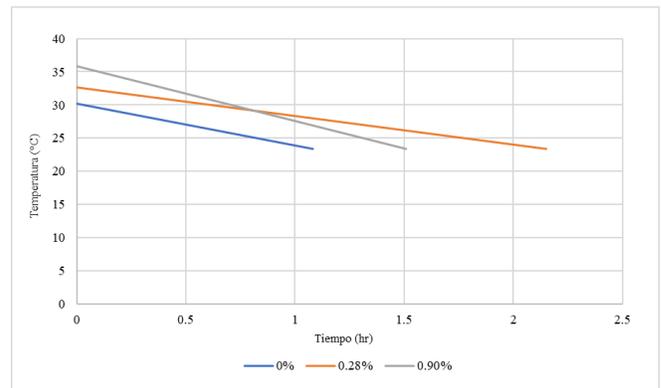


Fig. 4 Duración de calor captado.

D. Nivel de autoreparación

En primera instancia se consideró ensayar las muestras con el primer diseño de mezcla, pero considerando el uso de un microondas para acelerar el proceso de inducción de calor, el ciclo de autoreparación consistió en generar un corte vertical en la parte superficial a cada una de las muestras, posteriormente fueron colocadas durante 3 minutos a un nivel de potencia media alta según la escala del microondas de manera independiente.

Al ser retiradas las muestras se observó que aún seguían manteniendo la fisura, sin embargo las muestras 2 y 3 se empezaron a expandirse y desmoronar parcialmente, lo que nos llevó a volver a colocar las tres muestras en sus respectivos moldes y empezarlos a compactar con una comba de goma, simulando el efecto que tendría el tránsito de los vehículos sobre la carpeta de rodadura debido a que se deduce que esto pasaría mientras las fibras de acero conducen el calor hacia el interior del pavimento.

La primera muestra con 0% de lana de acero mantuvo la fisura que se le había generado, debido a que se volvió rígida rápidamente, la segunda con 0.28% se redujo las fisuras considerablemente y la tercera con 0.90% no presentó fisuras, al día siguiente se retiraron de los moldes y se observó que los

que estaban en una mejor condición eran las que tenían contenido de lana de acero en comparación del que no tuvo este agregado, es decir que las muestras 2 y 3 si llegaron a estar rígidas pero en un mayor tiempo, permitiendo que durante la compactación se empiecen a reducir las fisuras que presentó, en Figura 5.



Fig. 5 Nivel de autoreparación por microondas.

Los resultados obtenidos anteriormente no presentan el ciclo de autoreparación ideal que se evidencia en otras investigaciones, de lo cual se deduce que puede deberse a los agregados que se consideran para elaborar las muestras y que ensayan y la forma, debido a que ellos ensayan con briquetas semicirculares, en la mayoría de investigaciones consideran los agregados finos y gruesos, pero con variaciones en el tipo de acero y asfalto, [14] escoria de acero, basalto y asfalto Pen-70, [16] asfalto Pen-82 y escoria de acero, [18] asfalto, finos de basalto, ferrita, [19] asfalto y EAFS (Escoria de Acierria de Horno Eléctrico), [20] usa ligante asfáltico Pen 85-100, nanografita, [22] considera el cemento asfáltico, viruta de acero, grava, polvo de roca y gravilla, pero [23] cemento, lana de acero y caucho en polvo, y [24] usa cemento asfáltico, filler, fibra de acero y caucho.

Se considera que el no haber incorporado agregado grueso a las muestras pudo influir en los resultados, por ello, se volvió a realizar este proceso, pero con piedra chancada y con la inducción de calor en horno durante a 150°C, siendo esta la misma condición a las que se expusieron las muestras y cabe resaltar que este proceso se realizó luego de tres ciclos de inducción de calor, siendo la de 0% la que llegó a presentar microfisuras. En las muestras se generó la fisura vertical en la parte superior y posteriormente se dejó 30 min en el horno a la temperatura mencionada anteriormente, pero al no presentar ningún cambio se dejó 30 min, siendo en total 1 hr de inducción de calor.

Pasado ese tiempo se observó que las fisuras aún prevalecieron, por lo cual se optó por aplicar el mismo procedimiento mencionado anteriormente con 70 golpes en cada muestra para su compactación, de lo cual se observó que el de 0% llegó a cubrir su fisura, sin embargo, se queda de manera superficial la microfisuras que presentó luego de los 3 ciclos de calor, en Figura 6.

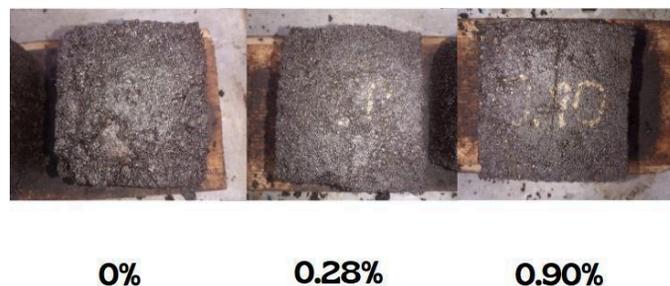


Fig. 6 Nivel de autoreparación por horno.

Puesto que el asfalto si presenta esta capacidad, pero no llega a ser lo suficiente para autorepararse [31]. La de 0.28% presentó un mejor resultado y en cambio la de 0.90% fue la que mantuvo parte del daño inducido. Por ello, la autoreparación requeriría de una recompactación para que en conjunto con la inducción de calor se reparen las fisuras generadas. Siendo este proceso mencionado en otras dos investigaciones [19] y [32].

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de las temperaturas alcanzadas por cada una de las muestras con los dos diseños de mezclas asfálticas, reflejan que las muestras con 0.28% y 0.90% alcanzaron una mayor temperatura respecto a la que no tiene lana de acero, cumpliendo con uno de los factores influyentes en la autoreparación del pavimento con 30.5°C y 31.5°C respectivamente, aunque con el segundo diseño de mezcla la muestra con 0.90% llegó a los 34.4°C, siendo la que tenía mayor lana de acero en comparación con la de 0.28%, la cual llegó a los 35.3°C, sin embargo los resultados reflejaron que la lana de acero aumenta la temperatura de las muestras asfálticas.

Con las velocidades de captación de calor que llegó cada una de las muestras, se observó que la muestra de 0.28% llega a una velocidad de 0.15°C/seg, demostrando así una velocidad rápida desde el primer ciclo de inducción de calor pero luego de dos ciclos su velocidad fue disminuyendo, pero en la muestra de 0.90% sucede lo contrario, ya que demuestra desde un inicio un velocidad baja de 0.11°C/seg comparada con las demás muestras pero con el pasar de los ciclos de inducción este llega a aumentar, llegando a 0.18 °C/seg.

Con los ensayos se pudo determinar que el que capta mejor el calor y lo mantiene en su interior por más tiempo es el de 0.28% con 2.15 hr, debido a que es el que le tomó más tiempo en llegar a los 23.4°C, temperatura a la que llegó la de 0% en 1.08 hr, siendo el de 0.90% el que tuvo una menor conservación de calor respecto al del 0.28% con 1.51 hr.

La autoreparación se va a dar con la captación de calor por medio de la lana de acero y el tránsito vehicular, puesto que esto fue evidenciado indirectamente con la compactación de las muestras luego que no se autoreparen después de ser inducidas a calor, tanto con el microondas como con el horno, y debido a que la segunda fuente de calor se estaría

asemejando a la distribución de calor externo a la que estaría expuesto el pavimento, se considera que el porcentaje óptimo de lana de acero respecto al peso de la muestra es de 0.28%, debido a que fue el que relleno más fisuras luego de la compactación, mejorando esta capacidad respecto al de 0%, este resultado con el segundo diseño de mezcla.

Finalmente, se recomienda que en posteriores ensayos se incorpore este MAM en la carpeta de rodadura de un pavimento en el tramo de una vía para obtener resultados reales y que sea de poca transitabilidad, debido a que los ensayos realizados se han considerado para fallas menores.

Asimismo, el clima adecuado para que se de la autoreparación sería el cálido, presentando una limitación en climas fríos, debido a que en los ensayos las muestras solo fueron inducidas bajo calor.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Agradecemos a nuestros padres por la motivación constante y apoyo incondicional, a su vez a nuestra Universidad por brindarnos el espacio y equipos necesarios para realizar los ensayos presentados en el presente artículo.

REFERENCIAS

[1] F.S. Espinoza Cochaches y N. S. Linares Loayza, “Mejoramiento de la infraestructura vial de la avenida Las Palmas, Distrito de Villa María del Triunfo, Lima”, Tesis de pregrado, Univ. César Vallejo, Lima, Perú, 2021. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/71639>

[2] F. W. Bravo Lopez ,G. E. Loja Valverde , W. J. Morán Martínez, y S. Pulido Esquerre “Deterioro del pavimento y sus consecuencias para el tránsito vehicular en el Centro Poblado San Jacinto, Distrito De Nepeña, Ancash – 2019”, Tesis de pregrado, Univ. Cesar Vallejo, 2019. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/36459/B_Bravo_LFW-Loja_VGE-Moran_MWJ-Pulido_ES.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[3] P. Leiva Padilla “Materiales asfálticos mecano mutables para la construcción de pavimentos inteligentes”, Tesis doctoral, Univ. de Granada, 2020. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/64575>

[4] H. Yang, J. Ouyang, Z. Jiang y J. Ou, “Effect of fiber reinforcement on self-healing ability of asphalt mixture induced by microwave heating”. *Revista ScienceDirect*, vol. 362, no. 362, 2 ene. 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822033578>

[5] F. Shiong y E. Shaffie, “Application of Steel Fibre to Improve the Self-Healing Mechanism of Bituminous Mixtures: A Review”. *Revista IOPscience*, vol. 920, no. 1, 12 sept. 2024. [En línea]. Disponible: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/920/1/012013/meta>

[6] N. A. M. Radzi, K. A. Masri, P. J. Ramadhansyah, N.E. Jasni , A. K. Arshad, J. Ahmad, N. Mashros y H. Yaacob, “Stability and Resilient Modulus of Porous Asphalt Incorporating Steel Fiber”. *Revista IOPscience*, vol. 712, no. 1, 2019. [En línea]. Disponible: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/712/1/012027/meta>

[7] P.G. Kumar y K. P. Kumar, “ Self-healing techniques for sustainable pavements - A review “. *Revista Journal of Review in Science and Engineering*, pp. 1-9, 5 may 2021. [En línea]. Disponible: https://jms.procedia.org/archive/RSE_376/procedia_2021_jrse-2012062112293.pdf

[8] S. Xu, X. Liu, A. Tabaković y E.Schlangen, “The prospect of microwave heating: Towards a faster and deeper crack healing in asphalt pavement”. *Revista Processes* , vol. 9, no. 3, p. 507, 11 marz 2021. [En línea]. Disponible : <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/3/507>

[9] B. Lou, A. Sha, Y. Li, W. Wang ,Z. Liu , W. Jiang y X. Cui, “Effect of metallic-waste aggregates on microwave self-healing performances of

asphalt mixtures”. *Revista ScienceDirect*, vol. 246, 20 Jun 2020. [En Línea]. Disponible: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820305158>

[10] E. Yalcin. “Effects of microwave and induction heating on the mechanical and self-healing characteristics of the asphalt mixtures containing waste meta”. *Revista ScienceDirect*, vol. 286, 7 jun 2021. [En línea]. Disponible: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006182100725X>

[11] J. Liu, T. Zhang, H. Guo, Z. Wang, X. Wang, “Evaluation of self-healing properties of asphalt mixture containing steel slag under microwave heating: Mechanical, thermal transfer and voids microstructural characteristics”. *Revista ScienceDirect*, vol. 342, 15 marz 2022. [En línea]. Disponible: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652622005704>

[12] A. A. Mahmoud, C. G. Shafik, M. R. Elshahat y A. E. Mostafa, “Producing Self-Healing Asphalt Pavement Mixture using Induction and Microwave Heating. *Trends in advanced sciences and technology*“. *Revista Trends in advanced sciences and technology*, vol. 1, no. 1, p. 8, 2024. [En línea]. Disponible: <https://tast.researchcommons.org/journal/vol1/iss1/8/>

[13] L. Trigos, J. Gallego, J. I. Escavy. “Heating potential of aggregates in asphalt mixtures exposed to microwaves radiation”. *Revista ScienceDirect*, vol. 230, 10 ene. 2020. [En línea]. Disponible: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819324778>

[14] H. Wang, Y. Zhang , Y. Zhang, S. Feng, G. Lu y L. Cao, “Laboratory and numerical investigation of microwave heating properties of asphalt mixture”. *Revista MDPI*, vol. 12, no 1, p.146, 3 ene. 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/1/146>

[15] M. Maliszewski, A. Zofka, D. Maliszewska, D. Sybilski, B. Salski, T. Karpisz, R. Rembelski, “Full-scale use of microwave heating in construction of longitudinal joints and crack healing in asphalt pavements”. *Revista MDPI*, vol. 14, no. 18, p. 5159, 8 sep. 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/18/5159>

[16] A. Sha, B. Lou, D. Barbieri y I. Hoff. “Microwave heating as an innovative road maintenance technology: Aging effect on binder and feasibility evaluation”. *Revista MDPI*, vol.15, no. 1, p. 316, 2 ene. 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/1/316>

[17] M. F. Haikal Mohd Ghazali , M. R. Mohd Hasan, A. A. Seman, D. D. Dorett, N. Mukhtar y R. P. Jaya, “A review of asphaltic crack healing approaches and its mechanism”. *Revista Adv Mater Sci Eng*, vol. 2021, no.1, p. 1093224, 7 dic. 2021. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1155/2021/1093224>

[18] X. Zhu, F. Ye, Y. Cai, B. Birgisson y K. Lee, “Self-healing properties of ferrite-filled open-graded friction course (OGFC) asphalt mixture after moisture damage”. *Revista ScienceDirect*, vol. 232, p. 518–530, 20 sep. 2019. [En línea]. Disponible: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619318955>

[19] F. Gulisano, “Microwave-assisted self-healing and self-sensing performance of asphalt mixtures: towards multifunctional road pavements”, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2023. [En línea]. Disponible: <https://oa.upm.es/73466/>

[20] A. Khavandi Khiavi y M. Asadi, “Effect of specific heat capacity of aggregates and nano-graphite on self-healing of hot mix asphalt under microwave radiation”. *Revista ScienceDirect*, vol.328, no.127091, p. 127091, 18 marz. 2022. [En línea]. Disponible: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822007735>

[21] J. Li, Z. Wang, J. Guo, J. Luo, X. Fan y Y. Zhu, “Study on physical and mechanical properties of complex-phase conductive fiber cementitious materials”. *Revista Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 63, no.1, p. 18, 20 jul. 2024. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1515/rams-2024-0041>

[22] R. H. Camargo Salome. “Evaluación del pavimento flexible y propuesta de mejoramiento usando mezcla asfáltica autorreparable en la Avenida Universitaria, Lima -2023”, Tesis de pregrado. Univ. Cesar Vallejo, Lima, Perú, 2023. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/123516>

[23] E. D. Quispe Castro y D. A. Torres Meza. “Diseño de mezcla asfáltica auto reparable mediante inducción de calor, para controlar fallas superficiales de tráfico pesado en vías metropolitanas de Lima”, Tesis de

- pregrado, Univ. Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú, 2020. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/652833>
- [24] A. A. Segundo Correa y C. C. Tesen Bravo, “Autorreparación bajo inducción de calor de la mezcla asfáltica en caliente al incorporar fibras de acero y caucho, Chiclayo 2021”, Tesis de pregrado, Univ. Cesar Vallejo, Lima, Perú 2021. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/97943>
- [25] W. Sánchez. “Efecto de la fibra de acero y caucho en la autorrecuperación, en mezclas asfálticas en caliente”. Tesis de pregrado, Univ. Señor de Sipán, Chiclayo, Perú, 2023. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/11833>
- [26] J. L. Romero Valero y J. C. Gonzales Quispe. “Diseño de mezcla asfáltica adicionando fibras de acero con la propiedad de auto reparación mediante inducción de microondas en la ciudad de Puno-2021”, Tesis de pregrado, Univ. Nacional del Altiplano, Puno, 2023. http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/20847/Romero_Jorge_Gonzales_Julio.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- [27] F. Quipusco y D. Villegas. “Efectos de sustituir agregado grueso convencional por siderúrgico en las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas en caliente”, Tesis de pregrado, Univ. Señor de Sipán, Chiclayo, Perú, 2019. <https://goo.su/fCraDk>
- [28] B. Liang, F. Lan, K. Shi, G. Qian, Z. Liu y J. Zheng, “Review on the self-healing of asphalt materials: Mechanism, affecting factors, assessments and improvements. Construction and Building Materials”. Revista ScienceDirect, vol. 266, p. 120453, 10 ene. 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820324582#preview-section-snippets>
- [29] P. M. Iverico Vigo. “Diseño de mezcla asfáltica en caliente mediante el ensayo marshall adicionando fibra de acero en la ciudad de Yurimaguas – 2019”. Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo; 2019. Disponible: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/58855/Iberico_VPM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [30] W. Liu, S. Wu, Q. Liu, J. Wang, P. Wan, H. Xu y Q. Jiang, “Research on the mechanical, thermal and induction healing properties of asphalt wearing course with steel fibers”. Revista MDPI, Vo.17, no. 9, pag. 2040, 26 abr. 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/9/2040>
- [31] Z. Jwaida, A. Dulaimi, M.A.O.Mydin, Y. N.Kadhim, S. Al-Busaltan. “The self-healing performance of asphalt binder and mixtures: a state-of-the-art review”. Revista Innovative Infrastructure Solutions, Vo.9, no 7, p. 247, 13 jun 2024. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1007/s41062-024-01547-w>
- [32] J. M. Lizárraga y J. Gallegos, “Self-healing analysis of half-warm asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) slag and reclaimed asphalt pavement (RAP) using a novel thermomechanical healing treatment”. Revista MDPI, 26 de abr. de 2024, Vo.17, no. 9, pag. 2040. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/11/2502>