



Universidad  
Señor de Sipán

**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y  
URBANISMO**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

**Aplicación de fibras de nanotubos para mejorar la  
calidad y vida útil de los pavimentos**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE BACHILLER  
EN INGENIERÍA CIVIL**

**Autores:**

Becerra Portocarrero Luis Alexander

<https://orcid.org/0000-0001-8979-4799>

De La Cruz Sanchez Martha Esther Maria

<https://orcid.org/0000-0003-0439-5970>

**Asesora:**

Ph.D. Heredia Llatas Flor Delicia

<https://orcid.org/0000-0001-6260-9960>

**Línea de Investigación**

**Tecnología e Innovación en el Desarrollo de la Construcción y la  
Industria en el Contexto de Sostenibilidad**

**Sublínea de Investigación**

**Innovación y Tecnificación en Ciencia de los Materiales, Diseño e  
Infraestructura**

**Pimentel – Perú**

**2024**



Universidad  
Señor de Sipán

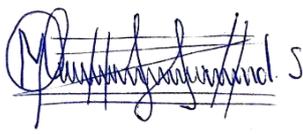
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Quien(es) suscribe(n) la DECLARACIÓN JURADA, soy(somos) estudiante (s)del Programa de Estudios de **Ingeniería civil** de la Universidad Señor de Sipán S.A.C, declaro (amos) bajo juramento que soy (somos) autor(es) del trabajo titulado:

**APLICACIÓN DE FIBRAS DE NANOTUBOS PARA MEJORAR LA CALIDAD Y VIDA ÚTIL DE LOS PAVIMENTOS**

El texto de mi trabajo de investigación responde y respeta lo indicado en el Código de Ética del Comité Institucional de Ética en Investigación de la Universidad Señor de Sipán, conforme a los principios y lineamientos detallados en dicho documento, en relación con las citas y referencias bibliográficas, respetando el derecho de propiedad intelectual, por lo cual informo que la investigación cumple con ser inédito, original y autentico.

En virtud de lo antes mencionado, firman:

Becerra Portocarrero, Luis Alexander	DNI: 73866616	
De La Cruz Sanchez, Martha Esther Maria	DNI: 76181292	

Pimentel, 26 de agosto de 2024

PAPER NAME

Aplicación de fibras de nanotubos para mejorar la calidad y vida útil de los pavimentos

AUTHOR

-Becerra Portocarrero Luis Alexander  
-De La Cruz Sanchez Martha Esther Maria

WORD COUNT

**6537 Words**

CHARACTER COUNT

**34667 Characters**

PAGE COUNT

**32 Pages**

FILE SIZE

**40.9KB**

SUBMISSION DATE

**Aug 26, 2024 11:17 PM GMT-5**

REPORT DATE

**Aug 26, 2024 11:18 PM GMT-5**

● **4% Overall Similarity**

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

- 4% Internet database
- 1% Submitted Works database
- 0% Publications database

## **Dedicatoria**

A mis padres, por su amor incondicional, apoyo incansable y por ser mi fuente de inspiración en cada paso de este camino.

A mis profesores, por su guía y sabiduría, que han sido fundamentales en mi formación académica y profesional.

A mis amigos, por su compañía y por estar siempre ahí en los momentos de desafío y celebración.

Y a mí mismo, por la perseverancia y el esfuerzo dedicados a la culminación de este importante logro.

**BECERRA PORTOCARRERO LUIS ALEXANDER**

El presente proyecto de investigación les dedico a mis padres, por su amor incondicional y su apoyo constante en cada paso de mi vida.

A mis hermanos, por ser mi fuente de inspiración y motivación.

A mis amigos, por sus palabras de aliento y su compañía en los momentos difíciles.

A mis profesores y mentores, por su guía y sabiduría que han sido fundamentales en mi formación. Y, finalmente, a todos aquellos que creyeron en mí y me ayudaron a alcanzar este logro.

**DE LA CRUZ SANCHEZ MARTHA ESTHER MARIA**

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por darme la fortaleza para llegar hasta aquí.

A mis padres, por su amor incondicional y constante apoyo, a mi familia por estar siempre a mi lado, y a mis amigos por su compañerismo.

Agradezco también a mis profesores, en especial al Dr. Heredia Llatas Flor Delicia, por su guía y dedicación en este proyecto.

A todos, gracias por su apoyo incondicional y por ser parte de este logro.

**BECERRA PORTOCARRERO LUIS ALEXANDER**

Agradezco primeramente a Dios por brindarme la vida, salud y la fortaleza para lograr culminar con mi carrera.

A mis padres y mis hermanos por ser comprensibles y brindarme su apoyo incondicional.

A mis amigos que me brindaron su apoyo en todos estos dos últimos ciclos.

Finalmente, agradezco a mi Docente la Dr. Heredia Llatas Flor Delicia, que nos motivó y brindo sus enseñanzas para poder culminar con la investigación.

**DE LA CRUZ SANCHEZ MARTHA ESTHER MARIA**

## Índice

Dedicatoria.....	4
Agradecimientos .....	5
Índice de tablas .....	6
Resumen .....	7
I. INTRODUCCIÓN .....	9
1.1. Realidad problemática. ....	9
1.2 Formulación del problema .....	13
1.3 Hipótesis.....	13
1.4 Objetivos .....	13
1.5 Teorías relacionadas al tema .....	13
II. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN .....	19
2.1 Tipo de investigación.....	19
III. RESULTADOS .....	20
IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	21
4.1- Discusión .....	21
4.2 Conclusiones .....	23
V. REFERENCIAS.....	24
ANEXOS.....	28

## Índice de tablas

Tabla 1.....	20
Tabla 2.....	20
Tabla 3 .....	20
Tabla 4 .....	20
Tabla 5.....	21
Tabla 6.....	21
Tabla 7.....	21

## Resumen

En la actualidad uno de los problemas que aqueja a la sociedad es la deficiencia en la duración de los pavimentos ya sea flexibles o rígidos, provocando accidentes e incomodidades entre los transeúntes y conductores ya que cada vez que se construyen poco a poco se va deteriorando. Ante esta situación, el objetivo de esta presente investigación es la de realizar una revisión sistémica que nos permitió analizar la calidad y vida útil de los pavimentos mediante la aplicación de fibras de nanotubos. Por ello se revisaron 50 artículos publicados en las bases de datos indexados entre los años 2020-2024 a partir del cual se evaluaron artículos de revistas de recientes investigaciones, del cual se determinó que la fibra de nanotubos hace una de las principales contribuciones dependiendo del porcentaje que se emplee en los pavimentos rígidos y flexible se puede tener en cuenta su resistencia, siendo esto indispensable para dar una solución a dicho problema. Concluyendo que la adición de la fibra de nanotubos en los pavimentos puede mejorar la calidad y la vida útil del material, de manera significativa, la adición de fibras de nanotubos proporciona estabilidad interna y aumenta la durabilidad de ambos tipos de pavimentos haciendo que su durabilidad sea más eficiente a comparación del método tradicional.

**Palabras Clave:** Fibras de nanotubos; Pavimento flexible; Pavimento rígido; Calidad; Vida útil.

## **Abstract**

At present, one of the problems that society afflicts is the deficiency in the duration of pavements, whether flexible or rigid, causing accidents and discomfort among passers-by and drivers since each time they are built little by little it deteriorates. Given this situation, the objective of this present investigation is to carry out a systemic review that allowed us to analyze the quality and useful life of pavements through the application of nanotube fibers. For this reason, 50 articles published in the indexed databases between the years 2020-2024 were reviewed, from which articles from recent research journals were evaluated, from which it was determined that the nanotube fiber makes one of the main contributions depending on the percentage that it is used in rigid and flexible pavements, its resistance can be taken into account, this being essential to provide a solution to said problem. Concluding that the addition of nanotube fiber in pavements can significantly improve the quality and useful life of the material, the addition of nanotube fibers provides internal stability and increases the durability of both types of pavements, making their durability more more efficient compared to the traditional method.

**Keywords:** Nanotube Fibers; Flexible pavement; Rigid pavement; Quality; Useful life.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad problemática.

En China el rápido aumento en el volumen y la carga del tráfico aumenta la demanda de materiales para pavimentos con alta durabilidad y resistencia, por lo que la aplicación e investigación de la adición de nanomateriales en el desarrollo de pavimentos ha mejorado significativamente la resistencia mecánica y térmica de los pavimentos, para los asfaltos epoxi en particular, se observan mejoras en la resistencia a la fatiga y el curado permanente, lo que indica una mayor durabilidad y vida útil del pavimento[1]

De igual manera en la misma nación, la deformación estructural del pavimento es una de las causas principales por ello se estudió la aplicación de la fibra de nanotubos de carbono como alternativa de mejora en la estructura del asfalto ya que con el tiempo el deterioro de la carpeta asfáltica es más susceptible a daños por cargas, lo cual se obtuvo como resultado un aumento del rendimiento a altas temperaturas, la estabilidad de almacenamiento y reduciendo la sensibilidad al agua, además, mejora significativamente la deformabilidad del asfalto y, por lo tanto, del bioasfalto, lo cual el uso de nanomateriales en ingeniería vial prolonga la vida útil de carreteras y mejora su rendimiento [2]

Otro estudio mencionan que en China la deformación o estrés del pavimento es común en carreteras debido a factores como el clima y congestión del tráfico, lo que acorta la vida útil, por ello se han desarrollado herramientas efectivas para detectar y prevenir deformaciones, siendo una de ellas los más efectivos como las fibras de nanotubos de carbono en resinas epoxi pueden ser una solución, evaluando sus propiedades mecánicas y capacidad de detectar deformaciones en la superficie del recubrimiento, pudiendo mejorar la construcción de carreteras duraderas y seguras [3]

En china, surgen varios problemas con la capacidad de soporte del pavimento por el excesiva carga vehicular, lo cual genera desperfectos en la estructura del pavimento como deformaciones y otras patologías evitando así que la vida útil se acorte, por ello un estudio menciona que la capacidad de autorreparación del betún se mejora con nanotubos de carbono de pared múltiple (MCNT), se evaluaron la compatibilidad, modificación, reología y temperatura de curado, con un porcentaje de MCNT al 1,5%, se mejora el flujo de la mezcla a altas y bajas temperaturas, por ello agregar los MCNT reduce la velocidad de flujo y aumenta la temperatura de curado, extendiendo la vida útil de los pavimentos y reduciendo costos de mantenimiento [4]

Por lo cual en esta misma región los pavimentos presentan problemas con muy frecuentes con respecto al tráfico vehicular el sobre peso de las cargas hacen que el pavimento se debilite con el tiempo por ello la adición de nanopartículas, como las fibras de nanotubos, en la ingeniería vial puede soportar cargas mecánicas y condiciones ambientales adversas en zonas con extremo calor o temperaturas elevadas, aumentando así la resistencia de los materiales utilizados en las superficies de las carreteras pavimentadas, extendiendo así su calidad de duración y disminuyendo la necesidad de costosos mantenimientos y reparaciones [5]

En Egipto los pavimentos requieren mantenimiento y renovación frecuente, por lo que se ha usado diversos materiales para evitar el desgaste con el tiempo, uno de ellos son los nanomateriales que mejoran propiedades mecánicas y se aplican para máxima resistencia a la compresión, adherencia y flexión, siendo los nanotubos los que mejoran la resistencia al agrietamiento y fatiga de los pavimentos [6], por ello se menciona que la aplicación de las fibras de nanotubos CNT en el cemento asfáltico mejora calidad mecánica de pavimentos, evaluando parámetros de permeabilidad, viscosidad, temperatura de reblandecimiento y formación de surcos, por ello el agregado de fibras de nanotubos da una mejor estabilidad y reduce la profundidad de los surcos, lo que resulta en mejor rendimiento en zonas frías y calientes, mayor vida útil y menores costos de mantenimiento [7]

En Arabia Saudita mencionan que debido al propio entorno o a las cargas de tráfico, la estructura del pavimento puede desarrollar problemas con el tiempo, por lo que se utilizan diversas tecnologías para mejorar el rendimiento de los materiales asfálticos, como gránulos de caucho y fibras, de ahí el surgimiento de la nanotecnología, como tecnología eficaz para mejorar su rendimiento, el uso de nanomateriales como los nanotubos en los ligantes de asfalto para mejorar la estabilidad térmica y reducir el envejecimiento del pavimento y el daño por humedad [8]

En Pakistán se menciona que una de las fallas de los pavimentos flexibles es la deformación permanente debido al aumento del tráfico en los pavimentos asfálticos el ahuellamiento, causada por cargas extremas y temperaturas altas, siendo esto un desafío para ingenieros viales que impacta seguridad y costos reparación, por ello el uso de aditivos de nanotecnología (fibras de nanotubos de carbono) mejora durabilidad y resistencia de superficies de carreteras [9]

En Iraq, el incremento de la industria automotriz, genera una mejora en las vías pavimentadas por ello el mantenimiento y la planificación de seguridad son cruciales para la conservación de las carreteras, por ello se han desarrollado innovaciones tecnológicas para mejorar los materiales utilizados en las estructuras

de transporte, aumentando la resistencia, durabilidad y seguridad del tráfico, estas innovaciones incluyen compuestos de concreto con polímeros y la fibra de nanotubos para reducir los riesgos de malas condiciones de los pavimentos, dando una mayor durabilidad con el tiempo [10]

En India la demanda creciente de infraestructura alienta a los desarrolladores a construir carreteras con durabilidad a largo plazo, por lo que el uso de nanomateriales como las fibras de nanotubos en los pavimentos se ha identificado como una de las opciones más eficientes y duraderas en comparación con los pavimentos convencionales sin su uso [11], siendo esta una tendencia creciente es el uso de nanomateriales en la construcción, uno de los cuales son las fibras de nanotubos, que ha demostrado su eficacia para proteger los materiales de construcción de la degradación y el desgaste debido a sus excelentes propiedades mecánicas, una de las muchas ventajas de este material frente a los materiales convencionales es que las fibras de nanotubos ayudan a medir la temperatura y la humedad, además ayuda a prevenir el desgaste del pavimentos provocado por el tránsito vehicular [12]

En Alemania los problemas que algunas vías terrestres es el deterioro de las capas asfálticas generando un mantenimiento costoso en su reparación, por ello una de las aplicaciones que son las fibras de nanotubos mejoran sus características mecánicas del asfalto, retrasan su envejecimiento y mejoran su rendimiento a altas y medias temperaturas, también mejoran las propiedades antifatiga, anti-deshielo y termofisuración del concreto asfáltico a baja temperatura, mejorando su calidad de vida [13]

En Colombia el desgaste de los pavimentos flexibles es un problema frecuente debido a la baja resistencia del mismo además expuesto a ambientes dañinos puede acortar su vida útil, por lo que los nanotubos de carbono son una solución para mejorar resistencia y durabilidad es aumentan el rendimiento mecánico y la resistencia térmica, que mejoran la calidad de la superficie, dispersan las moléculas de agua evitando así su acumulación, dando un lugar en la mejorar de seguridad vial y la calidad del pavimento [14]

En Brasil el uso de nuevos aditivos para mejorar el comportamiento mecánico de materiales de construcción, se estudió la capacidad de reparación de daños por fatiga del asfalto con una mezcla asfáltica que incluía fibras de acero y fibras de nanotubos de carbono, evaluando estas dos mezclas, una de referencia y otra con los aditivos, se determinó que la adición compuesta de ambos elementos generan en el pavimento un mejoramiento con respecto a sus propiedades haciéndola más efectivas con el tiempo [15]

En Lima el aumento de fibras de carbono al concreto puede mejorar significativamente las características mecánicas reduciendo así su resistencia, además, la aplicación de las fibras de carbono recicladas puede ser más adecuado para mejorar la resistencia a la flexión, mientras que las fibras de carbono vírgenes pueden ser más eficaces para aumentar la resistencia a la compresión, estos descubrimientos pueden tener un impacto significativo en la durabilidad del pavimento y el uso útil de la fibra de carbono [16]

La misma mención se dio en Puno donde las vías asfaltadas soportan grandes cargas de los camiones mineros de gran tonelaje que deforman la vía, generando diversas patologías, por ello es ideal el uso de un nuevo material en el asfalto considerando un 6,3%, establecido a través de la comparación de dos mezclas con y sin fibras de nanotubos (NTC), estos especímenes se crearon con distintos porcentajes de NTC y los resultados indicaron que una mezcla CNT presentó mejoras tanto físicas como mecánicas en comparación con la mezcla estándar, prolongando su vida útil y favoreciendo su uso en pavimentos [17]

En Lambayeque mencionas que hay más de 2000 nanoprodutos en el mercado, pero muchos no han sido evaluados en su impacto ambiental lo cual ha permitido mejoras en las cualidades del concreto en su resistencia a tracción/compresión entre ellas tenemos los Nano-TiO<sub>2</sub>, Nano-Silica y nanotubos de carbono son populares en construcción, alterando características del concreto en pavimentos para prolongar su vida útil [18]

La investigación sobre es muy importante dados los desafíos actuales de la ingeniería civil, donde la durabilidad y el rendimiento de los pavimentos es fundamental para la infraestructura urbana y rural. Estos pavimentos, que soportan tráfico ligero y pesado, se degradarán con el tiempo, por lo que mejorar su calidad y longevidad es fundamental, por ello las fibras de nanotubos proporcionan una solución innovadora, mejorando la resistencia mecánica, la flexibilidad y la durabilidad de los materiales, creando impactos económicos y sociales positivos, como la disminución en los gastos de mantenimiento y la eficiencia en la mejora de seguridad vial. Esta investigación aborda el tema del desarrollo de pavimentos capaces de soportar condiciones climáticas adversas y tránsito intenso, brindando soluciones al deterioro prematuro y contribuyendo a una gestión efectiva de los recursos. Además, también cierra la brecha tecnológica en la aplicación de nuevos insumos en la construcción, lo que puede redefinir los estándares de calidad del pavimento, mejorando así la seguridad, la economía y la sostenibilidad a largo plazo de la infraestructura vial.

## 1.2 Formulación del problema

¿Como pueden las fibras de nanotubos contribuir a aumentar la durabilidad y resistencia de los pavimentos frente a deterioros por factores climáticos y de tráfico?

## 1.3 Hipótesis

Los pavimentos son componentes esenciales de la infraestructura vial los cuales están sujetos a altas cargas, degradación y desgaste, lo que genera altos costos de construcción y mantenimiento, la calidad y vida útil de los pavimentos puede mejorar significativamente con el uso de fibras de nanotubos, lo que también aumentará su durabilidad y resistencia, además, al reducir la cantidad de materiales necesarios para la ejecución y mantenimiento de los mismos, la aplicación de esta tecnología puede disminuir el impacto que tiene sobre el medio ambiente, por ello es crucial investigar y desarrollar esta tecnología para aumentar la eficacia y la sostenibilidad de la infraestructura del transporte global.

## 1.4 Objetivos

### **Objetivo general**

Analizar la calidad y vida útil de los pavimentos mediante la aplicación de fibras de nanotubos

### **Objetivos específicos**

- Investigar y analizar las propiedades mecánicas de los pavimentos que han sido mejorados con fibras de nanotubos.
- Estudiar el comportamiento de las fibras de nanotubos en diferentes tipos de pavimentos y condiciones climáticas.
- Evaluar la durabilidad y resistencia al desgaste de los pavimentos mejorados con fibras de nanotubos.

## 1.5 Teorías relacionadas al tema

### **Pavimentos rígidos**

También llamado losa de concreto, del cual puede ser simple o reforzada, esta se apoya sobre una base o subbase, lo que le permite absorber grandes esfuerzos causados por el tránsito de vehículos livianos o pesados esto debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, la vida útil de esta losa oscila entre los 20 y los 40 años, por ello también requiere menos mantenimiento que los pavimentos flexibles. [19]

### **Pavimento flexible**

Los pavimentos flexibles se componen de tres capas de las cuales son: el pavimento, la base y la subbase, que se extienden y compactan sobre la subrasante, con posibles subcapas adicionales. El pavimento, que es la capa superior, está

hecho de una mezcla de material granular y bituminoso que está hecho para soportar las cargas del tránsito. Se divide en capas de rodadura e intermedia si el pavimento tiene un espesor superior a 10 cm. La base, que está hecha de material granular con una granulometría específica, absorbe la mayor parte de los esfuerzos verticales, lo que ayuda a mejorar el desempeño y la flexibilidad del pavimento. [20]

### **Fibra de nanotubos**

Los nanotubos de carbono, que son estructuras cilíndricas extremadamente delgadas compuestas por átomos de carbono, son la base de materiales avanzados conocidos como fibras de nanotubos. Estas fibras tienden a ser de peso ligero, alta resistencia a la tracción y excelente conductividad eléctrica y térmica [21]

Por sus notables propiedades estructurales, las fibras de carbono son ampliamente utilizadas en la ingeniería civil. Se destacan por su alta resistencia a la tracción, que es hasta diez veces mayor que la del acero, y su baja densidad, lo que reduce el peso de las estructuras [22]. Estas características los convierten en excelentes opciones para puentes y edificios altos. Además, son resistentes a la corrosión, lo que las hace adecuadas para entornos húmedos, siendo extremadamente resistentes, lo que les permite mantener la integridad estructural incluso bajo cargas extremas, y tienen una buena conductividad térmica, lo que facilita la disipación del calor, debido a su flexibilidad, se pueden moldear para una variedad de aplicaciones estructurales [23]

La incorporación de fibras de nanotubos puede mejorar significativamente las superficies de carreteras críticas para el tráfico, estas estructuras cilíndricas proporcionan resistencia mecánica, estabilidad estructural y la capacidad de disipar la energía del impacto, proporcionando una superficie duradera y adecuada para el tránsito vehicular o peatonal, por ello las capas de rodadura cuya función principal es soportar las cargas del tráfico adecuada para la transmisión de carga y seguridad al transeúnte [24].

Los pavimentos flexibles compuesto por capas de asfalto (betún) y agregados, estos tienen la capacidad de deformarse y poder transmitir cargas distribuidas en toda la estructura del mismo lo cual se adaptan a los cambios climáticos y tráfico vehicular, al fortalecer la mezcla con fibras de nanotubos como material de revestimiento, proporcionan una adecuada mejora en el soporte de cargas sin presentar deformación, además de reducir la vibración y la mejora en la calidad útil del mismo [25]

En comparación el pavimento rígido, este está constituido especialmente por concreto armado generando una rigidez con alta resistencia lo que le permite soportar todo tipo de cargas pesadas, su uso es especial en determinadas zonas

donde tiene un mayor sometimiento a desgastes, uno de los materiales más duraderos y con poca capacidad de deformación en su estructura aun así este mismo presenta una mayor vida útil con respecto al pavimento flexible [26]

Las fibras de nanotubos, también conocidas como nanofibras de carbono tienen forma de filamentos o fibras, la incorporación de estas en los materiales de pavimentación aumenta significativamente la resistencia lo que produce una mayor durabilidad y vida útil del pavimento, lo cual implica una reducción en los costos del mantenimiento y reparación del mismo a largo plazo, lo que las hace útiles en diversos campos de la ingeniería civil [27]

La incorporación de fibras de nanotubos en los pavimentos aumenta la resistencia, evita la propagación de grietas, protege los pavimentos de la corrosión y el desgaste, mejorando la durabilidad del pavimento, además estos pavimentos reforzados duran más y requieren menos mantenimiento, reduciendo costos y contribuyendo a la sustentabilidad de la infraestructura vial [28]

Las fibras de nanotubos se pueden utilizar como refuerzo para superficies de carreteras, aumentando su resistencia y capacidad de carga, su alta resistencia y rigidez de la misma se convierte en un material eficaz para mejorar sus propiedades del elemento, como la resistencia, durabilidad y rendimiento, siendo esta una manera eficaz para desarrollar infraestructuras viales más resistentes, económicas, sostenibles y alargando significativamente su vida útil [29]

Las fibras de nanotubos aumentan la resistencia del pavimento a la corrosión y lo protegen de elementos nocivos, presenta la capacidad para soportar altas temperaturas los hace adecuados para su uso en superficies de carreteras expuestas a condiciones extremas debido a su alta capacidad, de acuerdo a ello estas fibras son extremadamente duraderas siendo estas resistentes a la corrosión, altas temperaturas y la degradación características dispensables para el uso ingenieril [30]

En pavimentos el uso de las fibras de nanotubos es una excelente forma de aumentar la resistencia al desgaste debido a su estructura cristalina duradera, pudiendo soportar cargas pesadas y fuerzas abrasivas, lo que los hace propicios para utilizaciones que requieren una alta resistencia al desgaste, en especial en el rubro de la construcción en diversas aplicaciones como componente de mezclas, siendo un ejemplo en el uso de los pavimentos ya sea rígidos o flexibles [31]

**Otras teorías relacionadas al tema, son las investigaciones dadas por estudios anteriores sobre el uso aplicativo de las fibras de nanotubos en los pavimentos.**

En Arabia Saudita el envejecimiento de aglutinantes de asfalto puede

mejorarse con nanocompuestos poliméricos, lo cual se enfocó en adhesión y química a nanoescala, utilizando pruebas de laboratorio y simulaciones de envejecimiento, la mejor dosis recomendada es 4-5% SBS y 5% SB para resistencia al envejecimiento, además un 0.5% de CNT es el mejor porcentaje para efecto antienviejimiento en pavimentos, siendo un estudio importante sobre la aplicación de fibras de nanotubos en investigación vial [32]

En Irán el impacto de las nanopartículas microestructurales, como las fibras de nanotubos en la superficie de pavimentos rígidos, se realizó un análisis óptimo de reemplazo de nanotubos, y en la segunda parte se construyó concreto nanomodificado, como soluciones, la arena, como en el caso del concreto, que contiene varias nanopartículas, lo que causó la mejora más importante de la abrasión (aproximadamente el 23 %), mientras que en otro no hubo cambios en relación con su estructura, lo que mantiene una mejora del 0 % [33]

En china, la incorporación de nanomateriales, especialmente nanomateriales en forma de fibras como los nanotubos, en los componentes cementosos del concreto de pavimento rígido, incluidos los CNT, puede mejorar significativamente la resistencia al desgaste y así mismo en las juntas cementosas en un 160 %, un 43,4 % y un 20,6 %, que muestra un gran potencial para prolongar la vida útil de la capa superficial del concreto en vías pavimentadas [34]

Además, otro estudio demostró lo siguiente con respecto a las propiedades del asfalto utilizado en los pavimentos SBS se pueden mejorar significativamente agregando fibras de nanotubos de carbono (CNT) al proceso de fabricación de asfalto mejorado; sin embargo, se debe tener en cuenta un porcentaje específico de CNT agregado no debe exceder el 1.5% para evitar la aglomeración del material y maximizar los beneficios del agregado [35]

Posteriormente En china se cree que los materiales del pavimento del futuro comprenden nanocompuestos bituminosos y nanotubos de carbono (CNT) en determinados porcentajes variando entre 5% hasta 10% donde al interactuar con el asfalto dan una resistencia con respecto a la durabilidad del mismo por lo cual las fibras de nanotubos se emplean como nanomateriales unidimensionales y se está estudiando su mecanismo de interacción multicapa [36]

Además el comportamiento mecánico del concreto asfáltico depende de la temperatura y condiciones del clima; por eso que los científicos están utilizando la nanotecnología para disminuir la temperatura en las superficies pavimentadas, el desgaste provocado por las lluvias, lo cual muestra que los aditivos y los nanotubos de carbono (CNT) en la formulación pueden dispersar uniformemente CNT y GNP en el adhesivo permitiendo que la adición de CNT 0-2 % y/o RNP 0-15 % mejora la

conductividad térmica en ambientes con demasiado calor en un 26% [37]

En China, La modificación del asfalto con nanomateriales es un proceso eficaz para mejorar las características del asfalto, se modificaron y se produjeron nanotubos de carbono/asfalto epoxi (CNT-EA), se analizó el rendimiento del aglutinante superficial por inmersión y se encontró que la dinámica la estabilidad e intensidad del ligante de la matriz de concreto asfáltico mejoró en 118, 6% y 85%, mientras que la estabilidad del CNT-EAPB se mantuvo en 90,8%, que es superior al 77,44% de la matriz bituminosa alcanzando un 5801 veces, esta mejora se debe principalmente al excelente desempeño del nanotubo en el pavimento [38]

Por consecuente el uso de nanotubos de carbono (CNT) se estudió para mejorar las propiedades del concreto utilizado para construir carreteras, el CNT permitió la dispersión uniforme de nanotubos en el betún asfáltico, lo que mejoró significativamente su rendimiento a altas temperaturas en términos de rigidez con la adición de las mismas fibras lo que produce una significativa resistencia del 20% al 35%, lo cual enfatiza el valor de la calidad de dispersión en agua de los nanomateriales y su potencial para mejorar la ingeniería de pavimentos [39]

Adicionalmente en otro estudio, se ha encontrado que el uso de nanotubos de carbono reduce la cantidad de cemento requerida para hacer pavimentos; sin embargo, la modificación del citado pavimento con nanocelulosa ofrece prometedoras mejoras en su rendimiento, siendo un 15% más efectivo que el de fibra de nanotubos [40]

En Pakistán, en la investigación de la mezcla de nanotubos de carbono y adhesivos, se descubrió que el porcentaje de aumento de las nanopartículas compuestas era menor que el adhesivo. El porcentaje de nanopartículas compuestas aumentó al 3%, y los valores encontrados para estas partículas fueron 10,94%, 18,75%, 25% y 31,25%. Como resultado, la mezcla sea más resistente al daño mecánico durante el transporte de la carga [41]

Otro estudio demostró que las mezclas asfálticas modificadas con nanotubos de carbono y residuos de películas plásticas, se evaluaron en la misma el agrietamiento por fatiga y formación de surcos en las ruedas, lo cuales se obtuvieron un total de 30 muestras con un porcentaje de hojas y diferencias de nano de carbono de 0.1 a 0.4% y mejora del pavimento en un 15% a 22%, mostrando que el incremento de nanopartículas de carbono aumenta significativamente la estabilidad del asfalto y reduce la formación de ranuras al nivel superficial comparado asfalto normal, implicando su duración en vida útil [42]

En India, la mezcla de nanotubos en una mezcla homogénea mezcla sin aglomeración de Nano, se agregaron 2 materiales, el Nano-carbono brinda la mayor

estabilidad en comparación con las fibras de nanotubos, el contenido óptimo de betún obtenido es 5.55%, lo cual permitió que el uso de nanotecnología innovadora no solo mejorará la construcción de carreteras, sino que también aumentará la vida útil de la carretera y contribuirá a la mejora del medio ambiente [43]

En Arabia Saudita, se examinaron las propiedades físicas de los asfaltos originales y modificados con nanoarcillas y nanotubos, empleando variados porcentajes de su contenido en la mezcla, con el fin de mejorar la calidad del ligante en materiales de pavimento flexible y extender su vida útil. Los hallazgos demostraron que la modificación del asfalto con nanoarcillas y nanotubos mejora sus propiedades. El asfalto que se ha cambiado con un 7 % de nanoarcilla y nanotubos exhibe una mejor resistencia a la formación de surcos [44]

En Iraq, los nanotubos de carbono CNT industriales usado como aditivo de curado, se investigó su aplicación en superficies de pavimentos de alta resistencia, en las que se adicionaron cuatro dosis a dos tipos de asfalto 40/50 y 60/70 con el límite superior de 2.0% de este material, se mostraron que el asfalto de mayor viscosidad usó relativamente menos CNT, mientras que el grado de asfalto 40/50 proporcionó resistencia al hundimiento, 61.0% de ganancia y 35.0% de estabilidad con 1.5% CNT, mientras que el betún 60/50 70 requiere 2.0% CNT, el material debe estar cerca de estos valores de ganancia [45]

En Lima se hizo un estudio en los pavimentos de estructuras marítimas sufren desgaste por sulfatos y cloruros, por lo que se analizó la incorporación de los nanotubos en las mezclas de concreto, se desarrollaron dos diseños de mezcla, uno con NTC-0% y otro con adiciones de NTC (0,05%, 0,10% y 0,15%). Se probaron para determinar su viabilidad económica y observar diversas propiedades físicas y mecánicas, el concreto con NTC incrementa la resistencia a su compresión, tracción y flexión, reduce el asentamiento y la penetración de agua [46]

Aquí mismo se dio un estudio de revestimiento de pavimentos, con una mezcla con un 2,5% de nanotubos de carbono de pared múltiple mejoró las propiedades físicas en un 3,06% en viscosidad y en un 6,43% en propiedades reológicas, un aumento del 28,73%. El ligante con nanotubos de carbono demostró una mejora del 34% en las propiedades mecánicas en comparación con el ligante bituminoso. Ambas mezclas mejoraron las propiedades mecánicas del pavimento para un mejor desempeño a largo plazo en comparación con la mezcla asfáltica HMA-2 modificada con nanotubos [47]

En Cajamarca la aplicación del plastificante SikaCem(r) para reemplazar parcialmente el agua en el concreto utilizado en pavimentos de alta resistencia y se evalúan sus efectos sobre las cualidades mecánicas del material, las pruebas de

compresión y flexión a los 7, 14 y a los 28 días como parte de un experimento con porcentajes de reemplazo de 0%, 0,8% y 1%. Según los resultados, la sustitución del 1% del agua con ello aumentó la resistencia a la compresión y el rendimiento en un 41,57% y un 25%, respectivamente, y mejoró el fraguado de la mezcla en un 36%, aun futuro el agregado de nanotubos de carbono a la mezcla mejoraría aún más las propiedades del concreto en pavimentos [48]

En Chiclayo el efecto de agregar polvo de grafito infundido con nanotubos a la mezcla de pavimento y concreto. Se probaron las propiedades del concreto, como la trabajabilidad, el contenido de aire y la resistencia a la compresión, dando lugar a un diseño experimental que evaluó dosificaciones de 0% a 0,09% en peso de cemento. Según los resultados, una dosis con nanotubos de 0,06% es ideal para aumentar dichas propiedades; una dosis de 0,07% mejora resistencia a tracción, afectando drásticamente en el concreto de pavimentos [49]

Se estudió otro ensayo en esta misma localidad mostrando lo siguiente, el uso de NTC mejora propiedades físicas y mecánicas del concreto en pavimentos rígidos. Experimentos con dosis del 0%, 5%, 10% y 15% mostraron aumento en resistencia a la tracción por compresión y flexión. La dosis del 5% aumentó un 7,24% y 82,09%, y el 15% un 13,49% y 93,53%, respectivamente, la permeabilidad aumentó un 4,4% con la dosis del 10%. La adición de NTC mejora significativamente las propiedades del concreto hidráulico [50]

## **II. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN**

### **2.1 Tipo de investigación**

Este proyecto es una investigación presenta un tipo Básica lo cual es no experimental con un enfoque cualitativo, dado que para confirmar la hipótesis se ha consultado fuentes de diferentes autores tanto internacionales, nacionales y/o locales, La metodología empleada es cualitativa, dado que la hipótesis se verifica mediante las opiniones o experiencias de los investigadores.

Se buscaron 50 artículos en base de datos indexados y distribuidos de la siguiente manera, 28 de Scopus, 10 de Science Direct, 6 de Google académico y 6 de sitios web especializados (Renati), estos artículos datan desde el año 2020 hasta 2024, entre ellos los artículos buscados han sido en español e inglés, mediante palabras claves, Nanotube fibers, Flexible pavement, Rigid pavement, Quality and Useful life o Fibras de nanotubos, Pavimento flexible, Pavimento rígido, Calidad y Vida útil, para un mejor detallado y entendimiento en la tabla 1 se muestra los artículos distribuidos de acuerdo a la base de datos y su publicación.

**Tabla 1**

Distribución de artículos según base de datos

BASE DE DATOS	Año de Publicación					TOTAL
	2020	2021	2022	2023	2024	
Scopus	3	4	11	5	5	28
Science Direct	1		4	5		10
Google Académico	1	2	1	1		6
Sitio Web Especializado		3	3			6
<b>TOTAL</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>19</b>	<b>11</b>	<b>5</b>	<b>50</b>

### III. RESULTADOS

**Tabla 2***uso de fibra de nanotubos en pavimentos en relación de su vida útil*

Estudio	Material	% Fibras de Nanotubos: vida útil
[34]	Concreto	20.6% - 43.4%
[36]	Asfalto	5% - 10%
[35]	Asfalto	1.50%

Por lo tanto, los tres estudios sobre las fibras de nanotubos en diferentes tipos de pavimentos presentan una determinada cantidad de porcentaje de fibras los cuales tienen una influencia directa con la vida del material, analizando la tabla se ve que hay una mayor calidad de vida con respecto al concreto que el asfalto que aumenta de 1.50% hasta un 10%.

**Tabla 3***Aplicación de fibra de nanotubos en la mejora de rendimiento en pavimentos.*

Estudio	Material	Mejora en el Rendimiento
[38]	Asfalto	85% y 118.6%
[37]	Concreto	0.15%
[5]	Concreto	20% a 35%

Estas investigaciones tienen un punto en común y es que el empleo de fibras de nanotubos se considera una buena ventaja para el aumento del rendimiento en un pavimento, los estudios de la cita [37] presentan un mayor rendimiento con los tipos de materiales con respecto a la investigación de [38].

**Tabla 4***Aplicación de fibra de nanotubos y mejora de las propiedades mecánicas.*

Estudio	Material	Porcentaje de Fibras de Nanotubos	Mejora Propiedades mecánicas
[42]	Asfalto	0.1% - 0.4%	15% - 22%,
[41]	Concreto	10,94%, 18,75% y 25%	31,25%.

El aumento del porcentaje de fibras de nanotubos en un 25% contribuyen a que el pavimento sea más resistente frente a daños mecánicos y temperaturas, dando como

resultado que las dos investigaciones usan un porcentaje por debajo del 0.5% y en la mejora del pavimento varían entre un 15% a 22%.

**Tabla 5**

*Aplicación de fibra de nanotubos y la mejora de propiedades*

<b>Estudio</b>	<b>Material</b>	<b>Porcentaje de Fibras de Nanotubos</b>	<b>Mejora en Propiedades</b>
[40]	Asfalto	0.05%, 0.10%, 0.15%	15% (Óptimo)
[47]	Asfalto	2.5%	34%
[48]	Concreto	1%	Resistencia a compresión: 41.57% y rendimiento: 25%

Las investigaciones dadas por los estudios mencionadas tienen resultados que, en las mejoras de sus propiedades en los pavimentos, varían entre un 34% hasta un 41.57% con respecto a la resistencia a la compresión y un 25% a su rendimiento.

**Tabla 6**

*Aplicación de fibra de nanotubos en la mejora en pavimentos en la ciudad de Chiclayo.*

<b>Estudio</b>	<b>Material</b>	<b>Porcentaje de Fibras de Nanotubos</b>	<b>Mejora en el Pavimento</b>
[49]	Asfalto	0.06% (fibras), 0.7% - 0.9% (otro material)	Mejora en la resistencia del pavimento en un 16%
[50]	Asfalto	0%, 5%, 10%, 15%	Mejora en desgaste y resistencia en un 36%

Ambos estudios indican que la inclusión de fibra de nanotubos en un 0.06% hasta un 15%, pueden mejorar la resistencia de los pavimentos y propiedades del mismo.

**Tabla 7**

*Aplicación de fibra de nanotubos en condiciones climáticas.*

<b>Estudio</b>	<b>Material</b>	<b>Porcentaje de Fibras de Nanotubos</b>	<b>Mejora: condiciones climáticas</b>
[37]	Pavimento	2%-15%	26%

Este estudio determina que la adición de fibra de nanotubos no solo influyen en la mejora de los pavimentos si no también son más resistente frente a condiciones climáticas extremas, en un 26%

## **IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

### **4.1- Discusión**

Del análisis de los resultados obtenidos en las investigaciones podemos mencionar, que la calidad y vida útil de los pavimentos está en función al tipo material usado como vemos en los pavimentos flexibles presentan una calidad menor con respecto a las vías pavimentadas con concreto [42], como [24] coinciden en que la adición de fibras de nanotubos en los pavimentos rígidos, como el concreto, permite una interacción más efectiva con las fibras, lo que resulta en una

mejora sustancial en calidad y vida del material, Por otro lado, el estudio de [23] destaca que la adición de fibras de nanotubos en los pavimentos flexibles, como el asfalto, también puede mejorar la calidad de vida, Aunque la mejora es menor que en los pavimentos rígidos, la incorporación de fibras en los pavimentos flexibles contribuye a una mayor estabilidad interna y vida útil prolongada.

Se puede mencionar que la adición de fibras de nanotubos a pavimentos flexibles como el asfalto mostró mejoras en las propiedades mecánicas del 15 % al 37 % a niveles del 0,1 % al 3 % de la fibra, por otro lado, en pavimentos rígidos como el concreto, se encontró una mejora en las propiedades mecánicas en el rango de contenido de fibra de 1% a 25%, de 25% a 41.57%, mostrando que la cantidad de fibras de nanotubos tiene un efecto directo para la mejora de sus propiedades mecánicas del recubrimiento, mientras tanto en las investigaciones, ya sea el estudio de [43] o el de [26] coinciden en que la adición de fibras de nanotubos al pavimento, ya sea flexible o rígido, mejorará en gran medida las propiedades mecánicas de ellos mismos.

Del análisis de los resultados se puede mencionar que ambos estudios destacan que el uso de fibras de nanotubos en las superficies de las carreteras aumenta su resistencia a condiciones climáticas extremas como el calor y la lluvia, también destacan que las propiedades de las fibras de nanotubos, como su capacidad para soportar altas temperaturas y proteger las superficies del pavimento, las hacen duraderas y adecuadas para aplicaciones de ingeniería vial, además el primer estudio señaló que la adición de nanotubos de carbono a los pavimentos flexibles y rígidos mejoro en un 25 % y un 37 %, respectivamente, mientras que el segundo se centró en mejorar la conductividad térmica del adhesivo en ambientes sobrecalentados en un 26 %, por lo que en ambos estudios coinciden en que las fibras de nanotubos de carbono brindan beneficios significativos para mejorar la resistencia del pavimento y la resistencia a condiciones climáticas extremas.

Podemos mencionar del análisis de los hallazgos de las investigaciones que ambos estudios se destaca la variación en los porcentajes de fibras de nanotubos utilizados en los estudio, mientras que el estudio mencionado por [32] indica que un porcentaje de 0.7% a 0.9% de fibras de nanotubos puede mejorar la durabilidad y resistencia al desgaste en un 16%, el estudio de [29] menciona diferentes porcentajes de 0%, 5%, 10% y 15%, los cuales logran una mejora en la durabilidad y resistencia al desgaste en un 36%, por lo cual existe una coincidencia clave y es que ambos enfatizan que la adición de fibras de nanotubos, al pavimento puede mejorar significativamente la resistencia al desgaste y prolongar la vida útil del pavimento, además ambos estudios han identificado las fibras de nanotubos como

una opción adecuada para aumentar la resistencia y durabilidad de las superficies de las carreteras, particularmente en áreas sujetas a tráfico y desgaste de vehículos pesados.

#### 4.2 Conclusiones

El estudio muestra que la adición de fibras de nanotubos en los pavimentos rígidos y flexibles puede mejorar la calidad y la vida útil del material, se observaron mejoras significativas de hasta un 43,4 % para pavimentos rígidos como el concreto y hasta un 10 % para pavimentos flexibles como el asfalto, lo cual la adición de fibras proporciona estabilidad interna y aumenta la durabilidad de ambos tipos de pavimentos, aunque en menor medida en los pavimentos flexibles.

La incorporación de fibras de nanotubos en pavimentos rígidos y flexibles mejora sus propiedades mecánicas, en el asfalto aumentó de 15% a 37% con la adición de 0,1% a 3% de fibra, mientras que el concreto aumentó de 25% a 41,57% cuando el contenido de fibra estuvo entre 1% y 25%, estos resultados destacan el efecto directo de la cantidad de fibras de nanotubos sobre la calidad de las propiedades mecánicas del pavimentos ambos estudios previos demostraron que esta modificación puede brindar beneficios significativos a los pavimentos tanto flexibles como rígidos.

El uso de fibras de nanotubos en carreteras expuestas a condiciones climáticas extremas aumenta significativamente su resistencia, tanto para pavimentos flexibles como rígidos, la adición de 1% a 15% de fibra puede mejorar el rendimiento en un 25% a 37%, haciéndolos más resistentes a los cambios ambientales, además estas fibras ayudan soportar altas temperaturas y proteger las superficies de las carreteras, lo que las convierte en una solución viable en condiciones climáticas adversas y para mejorar la durabilidad de las superficies de las carreteras.

El uso de fibras de nanotubos en el pavimento está directamente relacionado con la fuerza y la resistencia al desgaste, se demostró que porcentajes de fibra entre 0,7 % y 0,9 % aumentan la fuerza y la resistencia a la abrasión en un 16 %, mientras que porcentajes más altos, como 5 %, 10 % y 15 %, pueden aumentar en un 36 %, estos resultados respaldan la idea de que las fibras de nanotubos pueden ser efectivas para mejorar la resistencia y durabilidad del pavimento, especialmente en áreas de alto tráfico y carga, por ello la adición de fibras de nanotubos a los componentes de los pavimentos puede mejorar significativamente la resistencia al desgaste y prolongando la vida útil de la carretera así ayudando a mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la infraestructura vial.

## V. REFERENCIAS

- [1] F. Zhang et al., "Study on preparation and properties of new thermosetting epoxy asphalt," *Constr. Build. Mater.*, vol. 311, no. 125307, p. 125307, 2021.
- [2] D. Zhu and L. Kong, "Laboratory evaluation of carbon nanotubes modified bio-asphalt," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, no. e01944, p. e01944, 2023.
- [3] X. Xin et al., "Self-sensing behavior and mechanical properties of carbon nanotubes/epoxy resin composite for asphalt pavement strain monitoring," *Constr. Build. Mater.*, vol. 257, no. 119404, p. 119404, 2020.
- [4] F. Zhang, Y. Cao, A. Sha, W. Wang, R. Song, and B. Lou, "Mechanism, rheology and self-healing properties of carbon nanotube modified asphalt," *Constr. Build. Mater.*, vol. 346, no. 128431, p. 128431, 2022.
- [5] Y. Yao and H. Lu, "Mechanical properties and failure mechanism of carbon nanotube concrete at high temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 297, no. 123782, p. 123782, 2021.
- [6] A. Hassan, S. Galal, A. Hassan, and A. Salman, "Correction: Utilization of carbon nanotubes and steel fibers to improve the mechanical properties of concrete pavement," *Beni-Suef Univ. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 12, no. 1, 2023.
- [7] M. S. Eisa, A. Mohamady, M. E. Basiouny, A. Abdulhamid, and J. R. Kim, "Mechanical properties of asphalt concrete modified with carbon nanotubes (CNTs)," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, no. e00930, p. e00930, 2022.
- [8] M. Arifuzzaman, R. A. Tarefder, and M. S. Islam, "The behavior of carbon nano-tubes (CNTs) as a modifier to resist aging and moisture damage in asphalt," *Nanosci. Nanotechnol.-Asia*, vol. 11, no. 2, pp. 224–229, 2021.
- [9] P. K. Akarsh and A. K. Bhat, "Graphene oxide incorporated concrete for rigid pavement application," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 199–219.
- [10] I. Kamal and Y. Bas, "Materials and technologies in road pavements - an overview," *Mater. Today*, vol. 42, pp. 2660–2667, 2021.
- [11] K. Debbarma, B. Debnath, and P. P. Sarkar, "A comprehensive review on the usage of nanomaterials in asphalt mixes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 361, no. 129634, p. 129634, 2022.
- [12] N. K. Dhiman, N. Sidhu, S. Agnihotri, A. Mukherjee, and M. S. Reddy, "Role of nanomaterials in protecting building materials from degradation and deterioration," in *Biodegradation and Biodeterioration At the Nanoscale*, H. M. N. Iqbal, M. Bilal, T. A. Nguyen, and G. Yasin, Eds. Elsevier, 2022, pp. 405–475.
- [13] L. Luo, P. Liu, S. Leischner, and M. Oeser, "Atomic insight into the nano-cracking resistance and interfacial bonding mechanism of carbon nanotube reinforced

- bitumen,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 628, no. 157384, p. 157384, 2023.
- [14] J. D. G. Morales, “Estado del arte del uso de nanotecnología para pavimentos hidráulicos y flexibles en Colombia,” *Universidad Santo Tomás*, pp. 1–37, 2022.
- [15] L. Schuster, J. V. Staub de Melo, and J. A. Villena Del Carpio, “Effects of the associated incorporation of steel wool and carbon nanotube on the healing capacity and mechanical performance of an asphalt mixture,” *Int. J. Fatigue*, vol. 168, no. 107440, p. 107440, 2023.
- [16] Calderon Quintana, Carmen Olga & Nieto Agreda, Bryan Alexis, “Adición de fibras de carbono para incrementar las propiedades mecánicas y disminuir la resistividad eléctrica de los hormigones conductores,” *Universidad Ricardo Palma, Lima. Peru*, 2022.
- [17] D. G. Candia Ponce and V. L. Ccorahua Quispe, “Análisis comparativo de las propiedades físico – mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con NTC (nanotubos decarbono) con respecto a una mezcla asfáltica convencional, según el método marshall,” *Universidad Andina del Cusco*, 2020.
- [18] S. P. Muñoz Pérez, Y. M. Tuse Vargas, K. J. Guerrero Santisteban, and Y. A. Vázquez Pérez, “Uso de Nanomateriales en la Producción del Concreto: Revisión Literaria,” *Rev. Eng. Pesqui. Apl.*, vol. 6, no. 4, pp. 74–87, 2021.
- [19] F. Alex, Y. Quispe, and A. Vildoso, “La Evaluación Fisicomecánica del Concreto al Adicionar Cenizas del Tallo de Algarrobo para Pavimentos Rígidos - Ayacucho, Perú,” *Rev. Politéc.*, vol. 53, no. 2, pp. 89–96, 2024.
- [20] R. V. Darwin and M. R. Moreno, “Development of a multicriteria matrix for decision making in the management of flexible pavements in an urban road network. Case study the city of Itagüí – Colombia,” *Scopus*, vol. 39, no. 1, pp. 1–16, 2024.
- [21] R. Tenía and B. Rojas de Gáscue, “Aplicación del ssa para el estudio de interacciones en nanocompuesto de pezr-g-MAH y PEZr-g-MAH/4-Ampy con nanotubos de carbono de paredes múltiples,” *Rev. LatinAm. Metal. Mat.*, vol. 42, no. 2. Simón Bolívar University, Sep-2023.
- [22] E. Plaza et al., “Dureza y propiedades estructurales de compuestos basados en nanotubos de carbono y aluminio,” *Rev. LatinAm. Metal. Mat.*, vol. 41, no. 2. Zenodo, Jan-2021.
- [23] Z. M. Aljaleel, N. Y. Ahmed, and Y. K. A. Atemimi, “Finite element modeling to predicting rutting in flexible pavements under overloading,” *Salud, Ciencia y Tecnología - Serie de Conferencias*, vol. 3, p. 822, 2024.
- [24] S. Kumar Pradhan, U. Das, and A. Ranjan Patra, “Utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in HMA mixtures for flexible pavement construction,” *Mater. Today*, 2023.

- [25] Z. Zhao, L. Xu, X. Li, X. Guan, and F. Xiao, "Comparative analysis of pavement performance characteristics of flexible, semi-flexible and rigid pavement based on accelerated pavement tester," *Constr. Build. Mater.*, vol. 387, no. 131672, p. 131672, 2023.
- [26] R. Pal and P. Pratim Sarkar, "Developing a model of porous concrete-filled rigid pavement," *Mater. Today*, 2023.
- [27] F. Wang et al., "Advanced functional carbon nanotube fibers from preparation to application," *Cell Rep. Phys. Sci.*, vol. 3, no. 8, p. 100989, 2022.
- [28] K. Li et al., "Carbon-based fibers: Fabrication, characterization and application," *Adv. Fiber Mater.*, vol. 4, no. 4, pp. 631–682, 2022.
- [29] G. Migliaccio, R. Des Roches, and G. Royer-Carfagni, "Theoretical mechanical properties of strands and cables made of wound carbon nanotube fibers," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 236, no. 107706, p. 107706, 2022.
- [30] L. Galuppi and V. A. Muratore, "A refined model for the effective tensile stiffness of Carbon NanoTube fibers," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 251, no. 108303, p. 108303, 2023.
- [31] P. Caputo et al., "Effect and mechanism of rejuvenation of field-aged bitumen extracted from reclaimed asphalt pavement," *Transp. Res. Procedia*, vol. 69, pp. 863–870, 2023.
- [32] M. Arifuzzaman, "Polymer nanocomposites for road construction: investigating the aging performance of polymer and carbon nanotube–modified asphalt binder," in *Advanced Polymer Nanocomposites*, M. E. Hoque, K. Ramar, and A. Sharif, Eds. Elsevier, 2022, pp. 319–334.
- [33] P. Ghoddousi, M. Zareechian, A. A. Shirzadi Javid, and A. Habibnejad Korayem, "Microstructural study and surface properties of concrete pavements containing nanoparticles," *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, no. 120103, p. 120103, 2020.
- [34] L. Li, X. Wang, H. Du, and B. Han, "Comparison of compressive fatigue performance of cementitious composites with different types of carbon nanotube," *Int. J. Fatigue*, vol. 165, no. 107178, p. 107178, 2022.
- [35] J. He, W. Hu, R. Xiao, Y. Wang, P. Polaczyk, and B. Huang, "A review on Graphene/GNPs/GO modified asphalt," *Constr. Build. Mater.*, vol. 330, no. 127222, p. 127222, 2022.
- [36] C. Yu and Q. Yang, "Multiscale interfacial interactions in carbon nanotube–asphalt nanocomposites: Implications for asphalt pavement materials," *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 6, no. 9, pp. 7715–7730, 2023.
- [37] X. Yu, M. Zadshir, J. R. Yan, and H. Yin, "Morphological, thermal, and mechanical properties of asphalt binders modified by graphene and carbon nanotube," *J. Mater.*

- Civ. Eng., vol. 34, no. 5, 2022.
- [38] C. Chen, C. Wang, G. Qian, B. Zhang, B. Liang, and Q. Liu, "Multi-walled carbon nanotubes enhanced the performance of epoxy asphalt pavement binder," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 20, no. 8, pp. 5037–5042, 2020.
- [39] Q. Yang et al., "Performance evaluation of bitumen with a homogeneous dispersion of carbon nanotubes," *Carbon N. Y.*, vol. 158, pp. 465–471, 2020.
- [40] P. Ataeian, J. Cheon, Y. Azimi Alamdary, and K. C. Tam, "Development of asphalt cements for road pavement using sustainable nanomaterials: A review," *J. Vinyl Addit. Technol.*, 2022.
- [41] N. Ali, I. Hafeez, and M. A. Baluch, "PERFORMANCE EVALUATION OF COMPOSITE ASPHALT BINDER," *ResearchGate*, pp. 1–13, 2021.
- [42] A. A. Khan, I. U. Khan, M. M. Abid\*, M. Noman, U. A. Khan, and M. Bilal, "Performance evaluation of flexible pavement using carbon nanotubes and plastic waste as admixtures," *Tehnicki Vjesnik*, vol. 29, no. 1, pp. 9–14, 2022.
- [43] A. Bobbili, S. K. Kollipara, V. Mallikarjuna, and M. Narra, "Comparative study on asphalt mixture with Nano materials and polymer," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1112, no. 1, p. 012019, 2021.
- [44] H. H. Zghair and H. H. Mohammed, "Investigating the preparation and characterization of nano-clay modified asphalts," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1895, no. 1, p. 012023, 2021.
- [45] M. Q. Ismael, M. Y. Fattah, and A. F. Jasim, "Improving the rutting resistance of asphalt pavement modified with the carbon nanotubes additive," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12, no. 4, pp. 3619–3627, 2021.
- [46] M. I. Galán Fiestas and M. A. Nieto Jaimes, "Propuesta de mejora de la permeabilidad del concreto expuesto a sulfatos mediante el uso de los nanotubos de carbono para obras portuarias, en la provincia constitucional del Callao, Perú," *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*, 2021.
- [47] A. Barzola and M. Cristina, "Ligante Asfáltico con Nanotubos de Carbono de Pared Múltiple para determinar su Caracterización Física y Reológica," *Universidad Ricardo Palma*, 2022.
- [48] C. Delgado and L. Ruth, "Sustitución del agua de amasado por SikaCem® Plastificante para mejorar las propiedades del concreto de alta resistencia, Cajamarca 2021," *Universidad César Vallejo*, 2021.
- [49] S. Tepo and M. Raul, "Comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas del concreto adicionando polvo de grafito, Chiclayo - 2021," *Universidad César Vallejo*, 2021.
- [50] Q. Jacinto and R. Yovana, "Propiedades del concreto hidráulico  $f'_c=280\text{kg/cm}^2$

en pavimentos rígidos con adición de nanotubos de carbono, Arequipa - 2022,”  
 Universidad César Vallejo, 2022.

## ANEXOS

Porcentaje de plagio en turnitin: 4%

The screenshot shows the Turnitin Draft Coach interface. The document title is "Documento sin título". The main text is titled "Resumen" and discusses the use of carbon nanotubes in rigid pavements. The overall similarity score is 4%. The sidebar on the right lists the following sources and their similarity percentages:

Source	Similarity Percentage
hdl.handle.net	1%
upc.aws.openrepository...	1%
repositorio.upn.edu.pe	<1%
www.mbtmexico.com...	<1%

### Similarity Report

PAPER NAME	AUTHOR
Aplicación de fibras de nanotubos para mejorar la calidad y vida útil de los pavimentos	-Becerra Portocarrero Luis Alexander -De La Cruz Sanchez Martha Esther Maria
WORD COUNT	CHARACTER COUNT
<b>6537 Words</b>	<b>34667 Characters</b>
PAGE COUNT	FILE SIZE
<b>32 Pages</b>	<b>40.9KB</b>
SUBMISSION DATE	REPORT DATE
<b>Aug 26, 2024 11:17 PM GMT-5</b>	<b>Aug 26, 2024 11:18 PM GMT-5</b>

#### ● 4% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

- 4% Internet database
- 0% Publications database
- 1% Submitted Works database