

Mejora del Rendimiento de Pavimentos Rígidos mediante el Uso de Métodos Modernos en la Optimización de Capas


Improving Performance of Rigid Pavements through the Use of Modern Methods in Layer Optimization

Autores

Christian Edinson Murga Tirado 
Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú

Alex Flores Benites 
Universidad Continental, Perú

Anais Gabriela Vasquez Salazar 
Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú

Ronald Vilcahuaman Tadeo 
Universidad Continental, Perú

<https://doi.org/10.54556/gnosiswisdom.v3i3.65>

Fecha de aceptación: 2023/11/15

Fecha de envío: 2023/08/28

RESUMEN

En este artículo, se busca identificar y analizar los métodos modernos implementados hasta la actualidad para mejorar la estructura de los pavimentos rígidos y lograr un rendimiento óptimo a largo plazo. Para alcanzar este objetivo, se llevó a cabo una investigación en la que se seleccionaron 30 artículos siguiendo criterios de inclusión y exclusión. Estos artículos abarcan aspectos relacionados con el diseño, la construcción y el mantenimiento de los pavimentos rígidos. Durante el análisis realizado, se pudo constatar que existen diversas técnicas y enfoques disponibles para abordar el mejoramiento de los pavimentos rígidos. Se observó que factores aparentemente insignificantes, como las condiciones climáticas y el tráfico pesado, pueden tener un impacto significativo en la vida útil y el rendimiento de estos pavimentos a medida que transcurre el tiempo y se repiten las cargas. Entre los métodos identificados, se encontraron enfoques innovadores que involucran la utilización de nuevos materiales, técnicas de diseño avanzadas, métodos de construcción eficientes y estrategias de mantenimiento preventivo. Estos métodos buscan garantizar la durabilidad, la resistencia y la capacidad de carga de los pavimentos rígidos, así como minimizar los efectos negativos del envejecimiento y el desgaste. El estudio resalta la importancia de implementar adecuadamente estos métodos modernos en la planificación y ejecución de proyectos de pavimentación rígida. La aplicación de prácticas efectivas de diseño y construcción, así como un programa de mantenimiento adecuado, puede prolongar la vida útil de los pavimentos rígidos y garantizar un mejor rendimiento a largo plazo.

Palabras clave: *Pavimento Rígido, Ensayos de Compresión, Sílice, Cenizas Volantes.*

ABSTRACT

This article aims to identify and analyze modern methods implemented to improve the structure of rigid pavements and achieve optimal long-term performance. A research study was conducted, selecting 30 articles based on inclusion and exclusion criteria, which cover aspects related to the design, construction, and maintenance of rigid pavements. The analysis revealed the existence of various techniques and approaches available for addressing the improvement of rigid pavements. It was observed that seemingly insignificant factors such as climatic conditions and heavy traffic can have a significant impact on the service life and performance of these pavements over time and repeated loading. Among the identified methods, innovative approaches were found that involve the use of new materials, advanced design techniques, efficient construction methods, and preventive maintenance strategies. These methods aim to ensure durability, strength, and load-carrying capacity of rigid pavements while minimizing the negative effects of aging and wear. The study emphasizes the importance of properly implementing these modern methods in the planning and execution of rigid pavement projects. The application of effective design and construction practices, along with an appropriate maintenance program, can prolong the service life of rigid pavements and ensure better long-term performance.

Keywords: *Rigid Pavement, Compression Tests, Silica, Fly Ash.*

INTRODUCCIÓN

Un pavimento rígido se define como una losa de hormigón que descansa sobre el subsuelo o una capa de material seleccionado, posiblemente grava, conocida como subbase del pavimento rígido. Debido a la alta dureza y al alto módulo de elasticidad del concreto, las tensiones se distribuyen en un área considerable. Además, el concreto tiene cierta resistencia a la tracción, lo que hace que el comportamiento del pavimento sólido sea satisfactorio incluso en presencia de puntos débiles en el suelo. [1].

En la actualidad, hay numerosos métodos disponibles para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos rígidos. El Ministerio de Vivienda ha aprobado la norma técnica CE 0.10 con el objetivo de garantizar la calidad en las tres etapas de construcción de estos pavimentos. Sin embargo, como indica la norma, existen diversos factores que influyen en el diseño de los pavimentos rígidos estructurales, como el tráfico, el peso y el número de vehículos, el soporte de la subrasante, las propiedades de los materiales en la estructura del pavimento y el entorno medioambiental. [2].

En el ámbito de la ingeniería civil, específicamente en el campo de los pavimentos rígidos, es común observar un deterioro temprano en muchos casos, ya sea debido a un control deficiente durante la construcción o a la falta de mantenimiento adecuado.

Este deterioro de los pavimentos genera problemas, como el desgaste acelerado de los vehículos que transitan por estas vías de transporte, lo que a su vez resulta en una mayor emisión de gases contaminantes al medio ambiente. [3].

En lo que respecta a la cuestión de la duración antes del deterioro, los datos recopilados de los pavimentos rígidos en comparación con los pavimentos asfálticos (flexibles) muestran que estos últimos tienen un costo más alto debido a su mayor tiempo de vida útil. [4].

Es importante tener en cuenta que el mantenimiento requerido para los pavimentos rígidos es cada 10 años, mientras que para los pavimentos flexibles es cada 5 años, sin tener en cuenta el mantenimiento rutinario como la limpieza de alcantarillas, zanjas o prevención de deslizamientos de tierra. [5].

El análisis de los pavimentos rígidos es más complicado en comparación con el estudio de los pavimentos flexibles, debido a la estructura de los espaciadores, rieles y el análisis de la superficie inferior del pavimento. [6]. El reciclaje de pavimento asfáltico no es una práctica nueva. A nivel global, los recursos de pavimentos flexibles se están agotando debido al uso de pavimento asfáltico reciclado. [6,7].

Es ampliamente reconocido que el crecimiento acelerado de las ciudades demanda una infraestructura de transporte más extensa, lo que implica expandir la red vial existente. [7]. En

consecuencia, el Ministerio del Ambiente (MINAM), como entidad encargada de evaluar los impactos ambientales, establece parámetros para los vehículos que ingresan en circulación a partir de 2017. Estos vehículos tienen un límite permitido de emisiones de 7 g/km de CO, 1.5 g/km de HC y 0.4 g/km de NO. [8].

Por lo tanto, el objetivo de este artículo de revisión es identificar y analizar los métodos modernos existentes que se han implementado para mejorar la estructura de los pavimentos rígidos, con el fin de lograr un rendimiento óptimo durante un período prolongado. La importancia de contar con un pavimento bien diseñado y construido radica en sus implicaciones en términos de seguridad, seguridad vial, comodidad, economía, velocidad, capacidad de tránsito y conectividad, lo que a su vez genera oportunidades sociales y económicas significativas. [1].

Recursos de investigación e información

Con el fin de garantizar una revisión imparcial de los artículos de investigación en el campo de la ingeniería civil, se utilizarán cuatro bases de datos científicas relevantes. Estas bases de datos son ProQuest, ScienceDirect, Scopus y Scielo, y se aplicarán filtros según las opciones proporcionadas por cada plataforma para asegurar una selección adecuada de los estudios a revisar.

Búsqueda de información

ProQuest:

Se utilizó una cadena de búsqueda que consiste en "PAVIMENTO RÍGIDO" OR "RIGID PAVEMENT" para buscar información relevante. Los resultados se filtran teniendo en cuenta el idioma español, el período de tiempo comprendido entre 2019 y 2023, y el tipo de documento específico, que en este caso serían artículos

ScienceDirect:

En la búsqueda de información en esta base de datos, se utilizó, una cadena de búsqueda que incluye los términos "PAVIMENTO RÍGIDO" OR "RIGID PAVEMENT". De los resultados obtenidos, se deben tener en cuenta ciertos criterios, como el período de tiempo comprendido entre 2019 y 2023, el tipo de documento específico que corresponda a artículos de

investigación, la publicación de acceso libre y la relevancia con el campo de la ingeniería.

Scopus:

En Scopus, se utilizó una cadena de búsqueda que incluye los términos "PAVIMENTO RÍGIDO" OR "RIGID PAVEMENT" para buscar información relevante. Los resultados se filtran teniendo en cuenta el idioma tanto en inglés como en español, el período de tiempo comprendido entre 2019 y 2023, el tipo de documento específico que corresponda a artículos de investigación, la publicación de acceso libre y la relación con el campo de la ingeniería.

Scielo:

En la búsqueda de información en esta base de datos, se utilizó una cadena de búsqueda que incluye los términos "PAVIMENTO RÍGIDO" OR "RIGID PAVEMENT". De los resultados obtenidos, se deben tener en cuenta ciertos criterios, como el período de tiempo comprendido entre 2019 y 2023, el tipo de documento específico que corresponda a artículos y la relevancia con el campo de la ingeniería.

Tabla 1

Resultados de la búsqueda

Base de Datos	Resultados
ProQuest	3021
ScienceDirect	922
Scopus	1624
Scielo	9
Total	5576

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión

- Fecha desde el 2019 al 2023
- Publicaciones de acceso libre
- Artículo Relacionado a ingeniería

Criterios de exclusión

- Artículos de antes de 2019
- Artículos repetidos
- Estudios publicados en idiomas no incluidos en la revisión
- Estudios con poblaciones no relevantes

Procesos de selección

Aplicando criterios de inclusión y exclusión

Tabla 2

Aplicando criterios de inclusión y exclusión

Base de Datos	Resultados con CI y CE
ProQuest	5
ScienceDirect	39
Scopus	78
Scielo	5
Total	127

Evaluación de la calidad

Con el objetivo de obtener resultados más relevantes y alineados con nuestro tema, se llevó a cabo una revisión manual, la cual resultó en la selección de 30 artículos de investigación.

Tipos de fallas o problemas en los pavimentos

Las carreteras actuales han experimentado una evolución desde caminos rústicos hasta calles y carreteras modernas, diseñadas para acomodar tanto a peatones como a vehículos de gran tamaño. El desequilibrio existente en las vías, caminos y calles está directamente relacionado con el nivel de confort y seguridad de los usuarios, quienes pueden ser víctimas de accidentes de tráfico en cualquier momento.

Al realizar un análisis sistemático de los artículos, se identificó que una de las principales causas analizadas de los problemas en las carreteras es la degradación del pavimento debido a la frecuente sobrecarga de tráfico. Además, se observó que, en menor medida, los daños en el pavimento rígido pueden ser ocasionados por condiciones climáticas adversas y la contaminación ambiental.

En cada una de las situaciones analizadas, los daños en el pavimento rígido se presentaron como resultado de diferentes tipos de fallas y problemas. Estos hallazgos se obtuvieron a través de estudios realizados en Chile y otros lugares. [10], encontramos investigaciones que abarcan el país de México [7] y también se llevaron a cabo estudios en China. [11].

Se examinaron y analizaron las causas del deterioro del pavimento utilizando normas y ensayos específicos, que se basaron en el tipo de falla o problema experimentado por el pavimento rígido en cada país. [7], [10], [11].

En la actualidad, se han investigado y propuesto tecnologías alternativas que consideran los materiales

para mejorar ciertas propiedades del pavimento, como la resistencia a la flexión (módulo de fractura). El concreto, por ejemplo, puede alcanzar un alto nivel de resistencia a la flexión. Sin embargo, su diseño y clasificación pueden resultar en una baja resistencia a la flexión con relaciones de compresión que oscilan entre el 10% y el 20%. [7].

Metodología Utilizada

A medida que pasa el tiempo, la tecnología a nivel nacional e internacional continúa creciendo y desarrollándose, con el objetivo de abordar los problemas ambientales que enfrentamos. Esto también se aplica al campo de la Ingeniería Civil, especialmente en el diseño de pavimentos rígidos. Es óptimo que las metodologías utilizadas cumplan con requisitos de trabajabilidad y resistencia, tanto en compresión, tracción como flexión, para prolongar la vida útil del pavimento y reducir las emisiones de gases derivadas de su desgaste.

Una metodología ampliamente conocida y aplicada es la utilización de hormigón de cenizas volantes con escoria activada alcalina, que incorpora escoria como árido fino para pavimentos rígidos. La combinación de hidróxido de sodio, silicato de sodio, la relación de líquido alcalino aglutinante y las cenizas volantes resulta en mejoras en las resistencias, que aumentan a medida que se incrementa la concentración de NaOH, alcanzando los requisitos de resistencia a la compresión (40 MPa) y a la flexión (4.5 MPa). Además, la unión entre la escoria y la pasta de hormigón mejora la resistencia a la abrasión. Sin embargo, se observa que la trabajabilidad disminuye a medida que se aumenta la concentración de NaOH [12]. Para mejorar aún más la metodología mencionada, se ha explorado la adición de Nano Óxido de Hierro a las Cenizas Volantes. Esto se debe a que, según las evaluaciones iniciales, existe una desventaja en cuanto al retardo en la ganancia de resistencia, lo cual limita su uso como hormigón de calidad para pavimentos. En un ensayo de resistencia a la compresión, se observó que al añadir Fe₂O₃, la tasa de formación del gel CSH aumenta rápidamente, lo que resulta en un aumento significativo de la resistencia a la tracción, flexión y la trabajabilidad del hormigón [13].

Otra metodología es el uso de concreto fabricado con escoria de horno de arco eléctrico y vidrio molido reciclado, que se emplean como sustitutos de los

agregados finos y gruesos. Esta metodología implica el aprovechamiento de residuos provenientes de industrias como la de bebidas y la siderúrgica. La escoria cristalizada utilizada proporciona una mayor estabilidad en términos de volumen, durabilidad y adhesión al cemento. Para su uso en pavimentos rígidos, se recomienda reemplazar hasta un 75% de la grava y un 40% de la arena. Esta proporción permite obtener una resistencia temprana promedio y un nivel óptimo de trabajabilidad [14].

Otra metodología es el uso de concreto verde, que se compone de pajilla de arroz, aserrín y té residual de procesos. A través de ensayos, se descubrió que al reemplazar solo el 5% de la arena con pajilla de arroz, y el 10% y 15% de aserrín y té respectivamente, se logra desarrollar un concreto que cumple con los requisitos de trabajabilidad y resistencia, como lo demuestran los resultados obtenidos. Se observó una mayor resistencia a la flexión para el grado M20 utilizando pajilla de arroz; mayor resistencia a la tracción para el grado M20 utilizando aserrín y té residual; y mayor resistencia a la compresión para el grado M20 en general [15].

Las cuarta y quinta metodologías utilizan micro sílice. En el primer caso, se combina con la sustitución de adición de fibra de vidrio y propileo. Esta combinación proporciona una trabajabilidad óptima, ya que los valores obtenidos en un ensayo de asentamiento son manejables y facilitan el proceso de trabajo. Además, se observó un aumento en las resistencias del 5% al 7.5% con la adición de fibra de vidrio [16].

En la metodología siguiente, se realiza un reemplazo parcial de la arena de río por arena sílice y del cemento por escoria de alto horno granulada y molida. Al utilizar un 50% de arena sílice, se obtiene un concreto con condiciones óptimas de resistencia a la compresión, flexión y tracción [17].

Materiales para optimizar la estructura de los pavimentos rígidos

A través del análisis, se observó que todas las investigaciones se centran en la incorporación de materiales en el concreto, sin abordar las otras capas que conforman el pavimento rígido. Estos materiales incorporados pueden desempeñar roles como agregados, aditivos o incluso como componentes cementantes. El objetivo de incorporar estos

materiales en la investigación es mejorar las características físicas y químicas del concreto.

La incorporación de ceniza volante y escoria se considera como un aditivo, y ha demostrado brindar los mejores resultados, especialmente en términos de resistencia a la compresión, superando los 40 MPa [12, 13]. También se investigó la incorporación de fibras simples e híbridas, también consideradas como aditivos. Para este tipo de concreto, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, tracción y fatiga, y se observaron resultados notablemente mejores, con un aumento del 13.23% en comparación con el F'c [18, 20].

La inclusión de residuo de mármol se considera como un agregado fino en la investigación, y se ha demostrado que brinda mejores resultados en comparación con el agregado fino convencional (arena). Con este material, se logró una resistencia a la compresión de 32.37 N/mm² [19]. Otro material incorporado en las investigaciones es el reciclado de pavimento asfáltico, el cual se utiliza como agregado en el concreto. Este material proporciona resultados comparables a utilizar un agregado de cantera, por ejemplo, con una relación agua/cemento de 0.5, se obtiene un concreto con una resistencia similar al uso de agregado convencional. Sin embargo, si el reciclado de pavimento asfáltico reemplaza por completo los agregados del concreto, se logra obtener un concreto con características superiores, con una resistencia superior a los 40 MPa [7, 23].

Las fibras de acero y poliolefina se incorporan como aditivos en el concreto, y mejoran las propiedades físicas del mismo, destacando especialmente en la resistencia a la fatiga. Con la inclusión de estos dos materiales, se logra una resistencia en el concreto que varía entre un 9% y un 35% más de lo esperado [22, 24].

Elementos prefabricados de madera laminada encolada (GLT) y madera contrachapada o chapa laminada (LVL), unidos a una losa superior de hormigón vertido in situ. Las pruebas realizadas demuestran la resistencia, ductilidad e integridad del sistema en condiciones higrotérmicas exigentes [29]. Estudios recientes han confirmado la posibilidad de aplicar estos RCA en bases de carreteras como Material Granular Tratado con Cemento (CTGM), lo que redundaría en una mayor efectividad tanto en su

comportamiento mecánico como en su durabilidad [30].

La escoria de horno de arco eléctrico y el vidrio molido son materiales que se añaden al concreto como agregados fino y grueso, respectivamente. En la investigación se demostró que estos materiales son reemplazos perfectos de los materiales de cantera, ya que aportan las mismas características al concreto [14]. Para contrarrestar la permeabilidad del concreto y evitar problemas relacionados con el clima, se utilizaron fluoropolímeros, silicato de resina y materiales cristalinos en una investigación. Los resultados mostraron una absorción de agua de solo el 1.4% [17]. El humo de sílice o microsílíce se incorpora al concreto como material cementante y ha demostrado ser altamente efectivo, proporcionando resistencias a la compresión superiores a 40 MPa [16]. Por último, la arena de sílice se utiliza como agregado fino y se evaluó en términos de resistencia y módulo de elasticidad del concreto. Los resultados mostraron que el concreto con arena de sílice supera los valores de un concreto convencional, y su incorporación es beneficiosa debido a su bajo costo. Se obtuvo una resistencia de 47.35 N/mm² [17].

Métodos para evaluar la integridad estructural de un pavimento rígido

Todos los métodos se someten a un control de calidad para determinar si cumplen con las condiciones estructurales requeridas, como resistencia, durabilidad, trabajabilidad, entre otras. En caso contrario, no pueden ser implementados [16].

Una de las pruebas principales para evaluar la estructura es la resistencia a la compresión, la cual generalmente se rige según el estándar IS: 516-1999: "Method of Tests for Strength of Concrete". Se representa mediante un gráfico con dos variables: resistencia a la compresión en unidades de MPa y tiempo de curado en días [13].

Otra prueba común utilizada para evaluar la resistencia es la tracción indirecta, la cual se obtiene mediante un ensayo de tracción del concreto. Se toma una muestra de al menos 30 cm de longitud y 15 cm de diámetro, que luego se somete a fuerzas opuestas en una máquina de compresión para determinar la resistencia interna del concreto [24] [18].

Actualmente, se utiliza la prueba de vibraciones de carga de tráfico e interferencia con cargas de choque para evaluar los pavimentos rígidos. En esta prueba, se emplean especímenes de concreto de 28 días y se someten a vibraciones generadas por cargas de tráfico, junto con cargas de choque, para evaluar la respuesta de las losas de concreto [19].

Además, se realiza un análisis paramétrico y una nueva correlación de rendimiento de la temperatura. Este análisis tiene como objetivo examinar el impacto de factores como la radiación solar, la temperatura ambiente, la velocidad del viento y el albedo. Se utiliza un programa desarrollado en FORTRAN que utiliza la metodología de superficie de respuesta, un enfoque secuencial que combina técnicas matemáticas y estadísticas. También se emplea el análisis de varianza (ANOVA) para comparar las varianzas entre las medias. Estas variables mencionadas (irradiación solar, temperatura ambiente, velocidad del viento y albedo) se consideran para determinar la temperatura de la superficie, teniendo en cuenta las propiedades termofísicas de las diferentes capas, incluyendo sus densidades [25].

Actualmente, se le está otorgando cada vez más importancia al Estudio Estadístico y Defectos de Pavimentos Rígidos. Este enfoque analiza secciones y defectos de forma individual, proporcionando información sobre las necesidades de mantenimiento. Se basa en la norma ASTM D6433, que se utiliza directamente para evaluar la necesidad de mantenimiento de secciones de pavimento. Este método evalúa secciones específicas y las deficiencias individuales, y también identifica las razones detrás de los mantenimientos actuales. Sin embargo, no se utiliza para predecir futuros defectos. Los métodos empleados en este estudio incluyen el "kriging", un modelo desarrollado para el análisis espacial, y el variograma, una herramienta geostadística que revela la relación espacial entre los valores de las muestras [10].

El impacto de los métodos modernos en la calidad de los pavimentos rígidos

Durante la vida útil de un pavimento, se producen cambios y deterioro debido al uso, diseño o construcción deficientes. Por esta razón, se están investigando constantemente nuevos métodos para mejorar la durabilidad del pavimento.

El análisis sistemático de los artículos seleccionados revela que mediante la incorporación de diferentes materiales en el concreto utilizado en los pavimentos, junto con la utilización de materiales de alta calidad y mano de obra calificada, se puede obtener un pavimento de alta calidad que cumpla con los requisitos establecidos por las normas, y a un costo reducido.

Uno de los materiales más utilizados es la escoria de alto horno, que se puede emplear como agregado fino y cumple con los requisitos de resistencia y abrasión. Además, al ser de origen natural, ayuda a preservar el medio ambiente [12]. También se emplean fibras hidráulicas y de poliolefina, las cuales mejoran la resistencia a la tracción y abrasión al entrar en contacto con el concreto, lo que proporciona un mejor rendimiento [16, 13].

Se han identificado varias adiciones que tienen un impacto significativo en la calidad del pavimento rígido. Entre ellas, la escoria de horno de arco eléctrico combinada con vidrio molido reciclado ha demostrado crear un concreto de alta calidad sin necesidad de utilizar arena o grava como agregados tradicionales [14].

Además, se ha encontrado que los suelos rojos, arcillosos o de algodón negro, cuando se mezclan con cemento Portland, presentan una resistencia superior a la normal [26]. Se evaluó el efecto de agregar caucho a los agregados estabilizados con cemento en pavimentos semirrígidos para reducir la fluctuación de temperatura. Se realizaron pruebas de propiedades térmicas en diferentes porcentajes de volumen de caucho (0%, 5%, 10% y 20%).

Los resultados mostraron que el aumento del contenido de caucho redujo la difusividad térmica, la conductividad térmica y la capacidad calorífica específica de los materiales [27]. El uso de hormigón semifluido autocompactante (SFSCC) en la construcción de pavimentos como una alternativa al hormigón convencional. El SFSCC no requiere vibraciones rigurosas ni energía para la compactación, ya que se compacta por su propio peso. [28].

Otras adiciones, como la arena de mármol, arena de sílice, fluoropolímeros, resinas de silicato y materiales cristalizantes de acetato de sodio, han demostrado mejorar la permeabilidad y la resistencia

a la compresión, flexión y tracción del concreto [19, 16, 17].

Por otro lado, el concreto verde, que utiliza productos de desecho como ceniza de cáscara de arroz (RHA), aserrín de madera (WSD) y té de desecho de procesos (PWT), reemplaza la arena y cumple las mismas funciones, brindando una alternativa sostenible [15]. También se ha observado que el asfalto reciclado en condiciones de lavado mejora la resistencia a la compresión en un 3.98% [7].

CONCLUSIONES

A través del análisis realizado, se ha observado que las causas aparentemente inofensivas, como el clima y el tráfico, pueden tener un impacto significativo en la calidad de los pavimentos rígidos a lo largo del tiempo. Estos factores, cuando ocurren de manera constante y repetitiva, pueden generar un deterioro progresivo en los pavimentos, lo cual se convierte en un problema grave.

Además, este deterioro contribuye a la contaminación ambiental y afecta la calidad de vida de las personas. Es por esto que se continúa buscando nuevos métodos que permitan aumentar la vida útil de los pavimentos y mitigar estos impactos negativos.

La aplicación de métodos modernos en el diseño de pavimentos rígidos puede tener diversos beneficios, como la reducción de costos y un impacto positivo en el medio ambiente. Sin embargo, es importante destacar que no todos los métodos cumplen plenamente con las características de resistencia y trabajabilidad necesarias.

Después de realizar pruebas de resistencia a la compresión, se ha concluido que la incorporación de ceniza volante de escoria con alcalí es el mejor material para el concreto de pavimento rígido, ya que proporciona una resistencia superior a 40 Mpa. Esta incorporación como aditivo representa una alternativa efectiva para abordar la problemática ambiental y mejorar el rendimiento del pavimento.

Todos los métodos deben pasar por un control de calidad para asegurarse de que cumplan con los estándares requeridos, como resistencia, durabilidad, trabajabilidad, entre otros. En caso contrario, no podrían ser implementados.

Además de las mejoras estructurales y la reducción de costos, los métodos modernos también promueven la conservación y el cuidado del medio ambiente. Esto se logra mediante la reutilización de materiales desechados por industrias y el uso de materiales duraderos que evitan la generación de residuos a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. ROBLES SÁENZ RANDOLP JULIÁN BACH SANCHEZ MEDINA, B. y CARLOS, J., 2015. Evaluación de pavimentos rígidos mediante la determinación de correlaciones entre el módulo de rotura a la flexión y la resistencia a la compresión para el Centro Poblado San Cristóbal de Chupán – Huaraz. Universidad Ricardo Palma [en línea], [consulta: 16 mayo 2023]. Disponible en: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/2177>.
- [2]. URBANOS, P., [sin fecha]. NORMA TÉCNICA CE. 010. [en línea], [consulta: 16 mayo 2023]. Disponible en: www.construccion.org/icg@icgmail.org.
- [3]. COTTE, E.H.S., CHUECO, G.M.T. y RAMÍREZ, R.E.E., 2019. Revista Tecnura. Tecnura [en línea], vol. 23, no. 60, [consulta: 16 mayo 2023]. ISSN 2248-7638. DOI 10.14483/22487638.14640. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/14640>.
- [4]. DUARTE, E., EDUARDO, L., CHAVES OSWALDO, L., SALINAS, I. y DIANE, L., 2018. Revista Tecnura. Tecnura [en línea], vol. 22, no. 56, [consulta: 16 mayo 2023]. ISSN 2248-7638. DOI 10.14483/22487638.13761. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/13761>.
- [5]. N°, R.D., 2014. MANTENIMIENTO O CONSERVACIÓN VIAL. [en línea], [consulta: 16 mayo 2023]. Disponible en: www.mtc.gob.pe.
- [6]. Tian, Y., Xiang, P., Liu, S., Ling, J., & Tang, R. (2021). Improving airport runway rigid pavement design using influence surfaces. *Construction and Building Materials*, 284, 122702. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122702>
- [7]. Guzmán Ortiz, D. V., Hernández Zaragoza, J. B., López Lara, T., Horta Rangel, J. M., & Giraldo Posada, D. A. (2021). Uso de agregado de pavimento asfáltico reciclado para un pavimento rígido. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 22(1), 1-11. <https://doi.org/10.22201/FI.25940732E.2021.22.1.005>
- [8]. El peruano - Establecen Límites Máximos Permisibles de emisiones atmosféricas para vehículos automotores - DECRETO SUPREMO - N° 010-2017-MINAM - PODER EJECUTIVO - AMBIENTE. [en línea], [sin fecha]. [consulta: 16 mayo 2023]. Disponible en: <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/establecen-limites-maximos-permisibles-de-emisiones-atmosfer-decreto-supremo-n-010-2017-minam-1592399-2/>.
- [9]. Kitchenham, B., Pretorius, R., Budgen, D., Brereton, O. P., Turner, M., Niazi, M., & Linkman, S. (2010). Systematic literature reviews in software engineering – A tertiary study. *Information and Software Technology*, 52(8), 792-805. <https://doi.org/10.1016/J.INFSOF.2010.03.006>
- [10]. Kitchenham, B., Pretorius, R., Budgen, D., Brereton, O. P., Turner, M., Niazi, M., & Linkman, S. (2010). Systematic literature reviews in software engineering – A tertiary study. *Information and Software Technology*, 52(8), 792-805. <https://doi.org/10.1016/J.INFSOF.2010.03.006>
- [11]. Mehta, Y., Cleary, D., & Ali, A. W. (2017). Field cracking performance of airfield rigid pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4(4), 380-387. <https://doi.org/10.1016/J.JTTE.2017.05.010>
- [12]. Talkeri, A., & Ravi Shankar, A. U. (2022). Alkali activated slag-fly ash concrete incorporating precious slag as fine aggregate for rigid pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(1), 78-92. <https://doi.org/10.1016/J.JTTE.2021.05.001>
- [13]. IJRTE, [sin fecha]. *International Journal of Soft Computing and Engineering*. [en línea],

- [consulta: 16 mayo 2023]. DOI 10.35940/ijrte.B3167.078219. Disponible en: www.ijrte.org.
- [14]. ROJAS, Y.A.P. y LÓPEZ, E.V., 2021. COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE MADE WITH ELECTRIC ARC FURNACE SLAG AND RECYCLED GROUND GLASS AS REPLACEMENT OF COARSE AND FINE AGGREGATE. *Revista Ingeniería de Construcción* [en línea], vol. 36, no. 3, [consulta: 16 mayo 2023]. ISSN 0718-5073. DOI 10.7764/RIC.00007.21. Disponible en: <https://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/1198>.
- [15]. ALHAZMI, H., SHAH, S.A.R. y BASHEER, M.A., 2021. Performance Evaluation of Road Pavement Green Concrete: An Application of Advance Decision-Making Approach before Life Cycle Assessment. *Coatings* 2021, Vol. 11, Page 74 [en línea], vol. 11, no. 1, [consulta: 16 mayo 2023]. ISSN 2079-6412. DOI 10.3390/COATINGS11010074. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-6412/11/1/74/htm>.
- [16]. JOURNAL, S. y JOURNAL, U., [sin fecha]. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. [en línea], [consulta: 16 mayo 2023]. DOI 10.35940/ijitee.L3742.1081219. Disponible en: www.ijitee.org.
- [17]. Journal, S., & Journal, U. (s. f.). *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. <https://doi.org/10.35940/ijrte.C5631.098319>
- [18]. Moustafa, M. A., Ibrahim, A. M. A., Ahmed, H. O., Khodary, F., & Hassanean, Y. A. (2021). Studying the Mechanical Properties of Rigid Pavement Reinforced with Single and Hybrid Fibers. *Civil Engineering and Architecture*, 9(6), 1877-1899. <https://doi.org/10.13189/CEA.2021.090620>
- [19]. ADITYA, C., IRAWAN, D. y SILVIANA, S., 2021. Implementation of marble waste as aggregate material rigid pavement. *EUREKA: Physics and Engineering* [en línea], vol. 2021, no. 4, [consulta: 16 mayo 2023]. ISSN 2461-4262. DOI 10.21303/2461-4262.2021.001932. Disponible en: <http://journal.eu-jr.eu/engineering/article/view/1932>.
- [20]. Ali, B., Yilmaz, E., Sohail Jameel, M., Haroon, W., & Alyousef, R. (2021). Consolidated effect of fiber-reinforcement and concrete strength class on mechanical performance, economy and footprint of concrete for pavement use. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUES.2021.09.005>
- [21]. AL-KHEETAN, M.J., RAHMAN, M.M. y CHAMBERLAIN, D.A., 2019. Moisture evaluation of concrete pavement treated with hydrophobic surface impregnants. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1567917> [en línea], vol. 21, no. 14, [consulta: 16 mayo 2023]. ISSN 1477268X. DOI 10.1080/10298436.2019.1567917. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298436.2019.1567917>.
- [22]. LAU, C.K., CHEGENIZADEH, A., HTUT, T.N.S. y NIKRAZ, H., 2020. Performance of the Steel Fibre Reinforced Rigid Concrete Pavement in Fatigue. *Buildings* 2020, Vol. 10, Page 186 [en línea], vol. 10, no. 10, [consulta: 16 mayo 2023]. ISSN 2075-5309. DOI 10.3390/BUILDINGS10100186. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-5309/10/10/186/htm>.
- [23]. Polo-Mendoza, R., Peñabaena-Niebles, R., Giustozzi, F., & Martinez-Arguelles, G. (2022). Eco-friendly design of Warm mix asphalt (WMA) with recycled concrete aggregate (RCA): A case study from a developing country. *Construction and Building Materials*, 326, 126890. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126890>
- [24]. Smirnova, O., Kharitonov, A., & Belentsov, Y. (2019). Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(4), 407-417. <https://doi.org/10.1016/J.JTTE.2017.12.004>
- [25]. Rejeb, O., Almarzouqi, N., Alhanaee, N., Sinclair, T., Alansari, M., Abdulla, F., Alsalami, M., & Ghenai, C. (2022). Parametric analysis and new performance correlation of the surface conventional rigid pavement

- temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00923. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E00923>
- [26]. Y, C. S., A, M. K., Kumar S, A. M., & N, R. H. (2019). Production of Dry Lean Concrete by Sustainable Materials to Use in Road Sub-Base Layer for Rigid Pavement. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 3, 2277-3878. <https://doi.org/10.35940/ijrte.C3992.098319>
- [27]. Pham, P. N., Tran, T. T. T., Nguyen, P., Truong, T. A., Siddique, R., Liu, Y., & Zhuge, Y. (2023). Rubberized cement-stabilized aggregates: Mechanical performance, thermal properties, and effect on temperature fluctuation in road pavements. *Transportation Geotechnics*, 40, 100982. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2023.100982>
- [28]. KANNUR, B. y CHORE, H.S., 2023. Semi-flowable self-consolidating concrete using industrial wastes for construction of rigid pavements in India: An overview. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* [en línea], vol. 10, no. 2, [consulta: 16 mayo 2023]. ISSN 2095-7564. DOI 10.1016/J.JTTE.2023.01.001. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095756423000314>.
- [29]. Estévez-Cimadevila, J., Martín-Gutiérrez, E., Suárez-Riestra, F., Otero-Chans, D., & Vázquez-Rodríguez, J. A. (2022). Timber-concrete composite structural flooring system. *Journal of Building Engineering*, 49, 104078. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104078>
- [30]. Pérez, P., Agrela, F., Herrador, R., & Ordoñez, J. (2013). Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain. *Construction and Building Materials*, 44, 593-599. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.02.034>