

Diseño de pavimento rígido con sustitución de agregados por arena sílica Design of rigid pavement with aggregates substitution by silica sand

Yael Villagran-Vázquez ^a, Alejandro González-de-la-Fuente ^{a,*}, Valeria Volpi-León ^a, Sara E. Vital-Hernández ^a
Luis A. Hernández-Acosta ^a, Luis D. López-León ^a

^a Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El problema abordado en esta investigación es la degradación acelerada de los pavimentos flexibles que son habituales en las comunidades del estado de Hidalgo. Debido a factores como el clima, el tránsito y la falta de mantenimiento, muchos de ellos se encuentran en mal estado, lo que afecta negativamente la accesibilidad y la calidad de vida de las personas que transitan con regularidad por la zona. En esta investigación se considera como alternativa para este tipo de vialidades el uso de concreto hidráulico con arena sílica como sustituto parcial de los agregados tradicionales con el objetivo de mejorar la resistencia a la compresión y reducir la formación de grietas. Los resultados obtenidos no solo ofrecen una solución específica para el deterioro de pavimentos, sino que también constituyen un aporte al conocimiento del diseño de pavimentos de concreto al demostrar que la inclusión de arena sílica puede reducir los costos de mantenimiento de las vialidades en contextos análogos. Además, se aporta una metodología replicable para futuras investigaciones en otras regiones con desafíos similares.

Palabras Clave: Pavimentos, Diseño de concreto, Arena sílica.

Abstract

The problem addressed in this research is the accelerated degradation of flexible pavements that are common in communities in Hidalgo state. Due to factors such as climate, traffic, and lack of maintenance, many are in poor condition, negatively affecting accessibility and the quality of life of people who regularly travel through the area. This research considers using hydraulic concrete with silica sand as an alternative for this type of road as a partial substitute for traditional aggregates to improve compressive strength and reduce the formation of cracks. The results not only offer a specific solution for pavement deterioration but also contribute to the knowledge of concrete pavement design by demonstrating that the inclusion of silica sand can reduce road maintenance costs in analogous contexts. In addition, a replicable methodology is provided for future research in other regions with similar challenges.

Keywords: Pavements, Concrete design, Silica sand.

1. Introducción

El diseño de pavimentos rígidos es esencial para la infraestructura vial, ya que contribuye a la conectividad y proporciona una superficie de rodadura resistente y uniforme, tal como lo destacan (Cones *et al.*, 2023). En el campo de la ingeniería civil, se ha identificado la incorporación de aditivos en el concreto hidráulico como una estrategia efectiva para optimizar las propiedades mecánicas y funcionales de los pavimentos rígidos (Ospino *et al.*, 2017).

El desgaste prematuro de los pavimentos, causado por el tránsito constante de vehículos pesados y las condiciones

climáticas adversas, ha afectado significativamente la movilidad y ha limitado el potencial turístico de distintas regiones en México. Este problema específico evidencia la necesidad de explorar alternativas que mejoren la durabilidad de los pavimentos. Esta problemática refleja un desafío general en el campo del diseño de pavimentos de concreto, lo que sugiere que los resultados de esta investigación podrían tener implicaciones más allá de este país.

La arena sílica, reconocida por sus propiedades de refuerzo, se presenta como una opción prometedora para mejorar las características de los pavimentos rígidos. Si bien ha sido ampliamente utilizada en otras aplicaciones como morteros y

*Autor para la correspondencia: alejandro_gonzalez@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: vi429504@uaeh.edu.mx (Yael Villagran-Vázquez), alejandro_gonzalez@uaeh.edu.mx (Alejandro González-de-la-Fuente), volpi@uaeh.edu.mx (Valeria Volpi-León), vi351973@uaeh.edu.mx (Sara Elsy Vital-Hernández), he358055@uaeh.edu.mx (Luis Ángel Hernández-Acosta), luis_lopez@uaeh.edu.mx (Luis Dairim López-León).

cementos (Ortiz et al., 2021; Guerrini et al., 2016), su empleo en pavimentos rígidos es una alternativa novedosa que puede incrementar la resistencia a la compresión y flexión del concreto, reducir la fisuración y mejorar la durabilidad (Joamir, 2016).

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el impacto de la incorporación de concentraciones del 5%, 10% y 15% de arena sílica como aditivo en el diseño de mezcla de concreto hidráulico. Se llevaron a cabo pruebas mecánicas a los especímenes para validar la eficiencia de esta propuesta. El alcance de esta investigación no solo busca proporcionar una solución al problema de México, sino también contribuir al conocimiento general sobre el diseño y durabilidad de pavimentos de concreto hidráulico.

Este trabajo presenta en la primera sección la revisión del estado del arte correspondiente a innovaciones en concretos hidráulicos. En la sección de materiales y métodos se abordan los materiales y metodología para concretos hidráulicos. La sección de resultados presenta las pruebas de laboratorio realizadas a los especímenes propuestos. Finalmente, la última sección aborda las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

2. Estado del Arte

El uso de concreto hidráulico en la construcción de pavimentos rígidos ha sido una alternativa frecuente debido a su durabilidad, capacidad de carga y vida útil prolongada (Delatte, 2014). Avances recientes están explorando nuevas formas de mejorar el desempeño del concreto hidráulico en pavimentos rígidos. Esto incluye el desarrollo de concretos más sostenibles, con menor huella de carbono, y con la integración de tecnologías inteligentes para mejorar características como resistencia mecánica y al agrietamiento, trabajabilidad y durabilidad del pavimento (Silva et al., 2024). El diseño de pavimentos rígidos ha avanzado con el uso de modelos más sofisticados para determinar el análisis de esfuerzos y deformaciones y el desempeño del pavimento bajo diversas condiciones de carga y ambientales (Delatte, 2014).

En México, el uso del concreto se popularizó entre 1950 y 1960. Este desarrollo surgió por la necesidad de mejorar la infraestructura vial del país, por la evolución de tecnologías de construcción y la disponibilidad de nuevos materiales (Tey, 2007). Desde 1970, instituciones como el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) y Cementos Mexicanos (Cemex) comenzaron a realizar investigaciones más profundas sobre el comportamiento del concreto hidráulico en pavimentos, centrándose en aspectos como la durabilidad, resistencia a la fatiga y el diseño de mezclas óptimas para las condiciones climáticas y de carga específicas de México (Salazar, 2015). A partir de los años 1990, la innovación se centró en el uso de aditivos y fibras, así como técnicas avanzadas para mejorar la calidad del concreto.

Actualmente, se han implementado diversas innovaciones en la composición del concreto hidráulico en pavimentos rígidos, con un enfoque en la mejora continua de sus propiedades. Diversos investigadores y empresas han contribuido al desarrollo de estas tecnologías. Destacan los esfuerzos de instituciones como IMCYC y las aportaciones de investigadores como Gómez y Hernández en 1995, quienes introdujeron el uso de aditivos para mejorar la durabilidad del concreto en pavimentos (Reinerio et al., 2020). En particular,

se ha puesto especial énfasis en el uso de aditivos como aceleradores, retardadores, plastificantes y superplastificantes, que juegan un papel fundamental en la mejora de las propiedades del concreto, permitiendo su adaptación a una variedad de necesidades, tanto a nivel global como en México (Sánchez et al., 2016).

Entre las innovaciones recientes, se encuentra la utilización de cenizas volantes, un subproducto industrial que se ha integrado en la mezcla de concreto como material inerte, con resultados positivos en la mejora de la resistencia y durabilidad del concreto (Jaramillo et al., 2022). Esta tendencia ha sido respaldada por diversas investigaciones que han demostrado la capacidad de las cenizas volantes para mejorar las propiedades mecánicas del concreto, haciéndolo más resistente a las condiciones adversas (Pérez, 2021).

Asimismo, la adición de fibra de acero al concreto se presenta como otra estrategia eficaz para mejorar la resistencia y durabilidad de los pavimentos rígidos. La fibra de acero puede ser integrada en diversas etapas del proceso constructivo, ya sea en la fase de diseño, ejecución o curación (Moreira et al., 2018). En el ámbito de la innovación, se han desarrollado cementos especializados con el objetivo de elevar la resistencia y durabilidad de los pavimentos rígidos. Entre ellos, destacan los cementos de fraguado lento, diseñados para mitigar la formación de grietas (Rocha, 2021).

Mediante investigaciones y evaluaciones de materiales alternativos para pavimentos rígidos se ha encontrado que el fosfoyeso marroquí, un coproducto de la industria química que puede ser utilizado en la construcción de carreteras (Espinoza et al., 2017). Asimismo, la fibra de coco es una alternativa que permite la mejora de la resistencia a compresión ya que diversos estudios han demostrado que la adición de fibra de coco en pavimentos rígidos ha conducido a un aumento en la resistencia mecánica del concreto; por ejemplo, un porcentaje óptimo de 0.25% de fibra de coco mostró mejores resultados en la resistencia a compresión (Salazar et al., 2023).

A su vez, la incorporación de fibra de coco en el concreto también ha demostrado un incremento en la resistencia a flexión, lo que contribuye a la mejora de las propiedades mecánicas durabilidad y rendimiento del pavimento rígido (Chávez, 2024), (Martínez et al., 2023).

El uso de ceniza de cáscara de arroz como sustituto parcial del cemento en pavimentos rígidos ha demostrado mejoras en la resistencia mecánica del pavimento. (Vásquez et al., 2023). De igual manera, esta ceniza puede ser utilizada como estabilizante para la subrasante del pavimento rígido, mejorando su capacidad portante y resistencia mecánica. (Muñoz et al., 2023). Finalmente, el uso de la cascara también sirve como complemento en pavimentos rígidos reduciendo los costos de construcción, ya que se trata de un residuo agrícola que puede ser obtenido a bajo costo. (Jiménez et al., 2019).

Este tipo de materiales en el concreto para pavimentos rígidos han permitido mejorar la resistencia, durabilidad y eficiencia de las vialidades, lo que a su vez contribuye al desarrollo de pavimentos rígidos más sostenibles y resistentes. (Rojas et al., 2021).

El uso de arena sílica para modificar y mejorar las propiedades mecánicas del concreto se ha estudiado en diversos trabajos. Por ejemplo, (Krishna et al, 2019) estudian la mezcla de arena sílica y arena de río para mejorar la resistencia a la compresión y elasticidad de cementos para pavimentos rígidos. En (Sivakumar et al, 2019) se utiliza una

mezcla de biomasa vegetal y arena sílica para mejorar las propiedades del cemento Portland. Otra mezcla de agregados basados en desperdicio de hule, polvo de vidrio y arena sílica se analiza en (Ramdani et al, 2019) para mejorar la flexibilidad del concreto. Una investigación para mejorar las propiedades anticorrosivas del concreto utilizando arena sílica y sílice pirógena se desarrolla en (Zhu et al, 2018). Otro trabajo que se enfoca en mejorar la durabilidad del concreto se presenta en (Binici et al, 2018), donde se analiza una mezcla de arena sílica, polvo de mármol de desecho y basalto como agregados finos. Estos trabajos son un ejemplo de que la aplicación de arena sílica para mejorar las propiedades mecánicas del concreto es un campo de investigación activo.

En relación con el tema central del presente artículo se han realizado y están en curso varios estudios sobre el uso de arena sílica para modificar las diferentes propiedades mecánicas del concreto, con un enfoque particular en la resistencia máxima a compresión, lo cual es crucial para la viabilidad y sostenibilidad de las infraestructuras viales como el estudio acerca de parámetros de resistencia al corte (Jorge *et al.*, 2020).

3. Materiales y Métodos

3.1. Arena sílica

El compuesto en cuestión es el resultado de la combinación de sílice con oxígeno (Jauregui, 2022). Se trata de un material de cuarzo que se origina a partir de rocas de diversos tipos, sometidas a procesos de intemperismo y erosión para su refinamiento (Figura 1) (Manuel et al., 2020; Secretaría de Economía, 2014). Su composición química está dominada por el dióxido de silicio (SiO_2), lo que la convierte en uno de los minerales más abundantes en la Tierra. La arena sílica se distingue por su dureza y su resistencia a altas temperaturas, lo que la hace excepcionalmente adecuada para aplicaciones que requieren durabilidad frente al calor y la abrasión.



Figura 1: Arena sílica utilizada como aditivo en la mezcla de concreto hidráulico.

Además de sus destacadas características físicas, la arena sílica se distingue por su granulometría uniforme, lo que facilita su manipulación y optimiza su uso en procesos industriales. Su versatilidad y amplia disponibilidad la convierten en un componente esencial en la fabricación de una amplia gama de productos y materiales en diversas industrias.

3.2. Concreto hidráulico

El concreto hidráulico, al ser una mezcla compuesta por conglomerante, agregados pétreos y, en ocasiones, aditivos, presenta una vida útil de entre 20 y 30 años, lo que lo convierte en un material ideal para diversas aplicaciones en la construcción vial y estructural (Goytia, 2018; Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2004). Entre sus principales beneficios se destaca su resistencia a las presiones generadas por el tráfico, incluyendo fuerzas de arranque, frenado y circulación.

En cuanto al espesor, los pavimentos rígidos requieren menos grosor que los pavimentos flexibles para cumplir con las exigencias del tráfico, gracias a su mayor capacidad para distribuir las cargas sobre la base y subbase (Figura 2). Esto implica que, aunque las capas subyacentes deben estar adecuadamente preparadas, los pavimentos rígidos dependen menos de la calidad de las terracerías en comparación con los pavimentos flexibles. Además, los pavimentos rígidos sobresalen por su alta resistencia a deformaciones permanentes y su durabilidad frente a derrames de combustibles y aceites vehiculares. Su capacidad para resistir los efectos del clima, incluidas las altas temperaturas, ayuda a mantener su integridad estructural con mínimas deformaciones a lo largo del tiempo, garantizando así una vida útil prolongada (Sandoval et al., 2021).

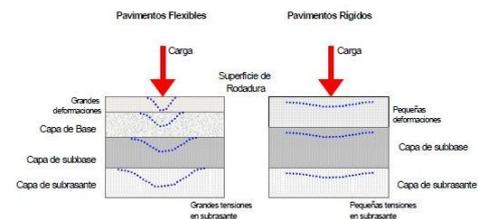


Figura 2: Comparativa de capacidad de distribuir las cargas en un pavimento flexible y rígido.

3.3. Prueba de resistencia a la compresión de concreto hidráulico

La prueba de resistencia a la compresión es un procedimiento estándar fundamental en la evaluación de la calidad del concreto, conforme a la norma N-CMT-2-02-005/04 establecida por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte en México (2006). El objetivo principal de este ensayo es determinar la capacidad del concreto para soportar fuerzas compresivas antes de experimentar fallas o deformaciones irreversibles. A través de esta prueba, se obtienen datos cruciales que permiten validar la idoneidad del concreto para diversas aplicaciones estructurales. El proceso de evaluación comienza con la preparación de muestras de concreto que son sometidas a condiciones controladas de curado. Posteriormente, estas muestras se colocan en una máquina de prueba de compresión (Figura 3), donde se aplican cargas progresivas hasta que el material alcanza su punto de falla. La resistencia máxima a la compresión se calcula a partir de la carga máxima soportada por las muestras antes de romperse. Este método proporciona una medida precisa de la capacidad del concreto para resistir cargas en estructuras,

garantizando así su rendimiento y seguridad en aplicaciones prácticas (Rincón et al., 2020).



Figura 3: Máquina de prueba de compresión.

3.4. Diseño de la mezcla de concreto

Se realizó la clasificación de partículas en los agregados pétreos finos mediante el método de cribado, conforme a la norma N-CMT-4-06-0001/19 de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (Figura 4). Para este proceso, se utilizaron tamices con las siguientes aperturas: N° 200, 100, 50, 30, 16, 8 y 4 (Figura 5). De manera similar, el mismo método se aplicó a los agregados gruesos, utilizando tamices de N° 1", ¾", ½", 3/8" y ¼". Los resultados obtenidos indicaron una calidad adecuada en los tamaños de las partículas presentes (Tablas 1 y 2). A continuación, se detalla el proceso de tronado de los especímenes (Figuras 6 y 7).



Figura 4: Agregados finos obtenidos después del cribado.



Figura 5: Tamices empleados para la clasificación de agregados pétreos.



Figura 6: Integración de materiales para la elaboración de los especímenes.



Figura 7: Preparación previa antes de tronado.

Tabla 1: Pesos retenidos en tamices de agregados finos

Tamiz	Agregados Finos			Suma	%	Retención total de la muestra
	1° Muestra	2° Muestra	3° Muestra			
Más N° 200	0.001	0.001	0.001	0.003	0.039	0.006
N° 200	0.001	0.001	0.002	0.004	0.053	0.008
N° 100	0.030	0.050	0.020	0.100	1.315	0.210
N° 50	0.220	0.200	0.130	0.550	7.230	1.157
N° 30	0.350	0.370	0.420	1.140	14.986	2.398
N° 16	0.530	0.540	0.530	1.600	21.033	3.365
N° 8	1.160	1.280	1.340	3.780	49.691	7.951
N° 4	0.120	0.150	0.160	0.430	5.653	0.904
Total	2.412	2.592	2.603	7.607	100	16.00

Tabla 2: Pesos retenidos en tamices de agregados gruesos

Tamiz	Agregados Gruesos			Suma de muestra	Muestra proporcional de 16 kg
	1° Muestra	2° Muestra	%		
1"	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
¾"	0.090	0.820	14.174	0.910	2.268
½"	0.330	0.360	10.748	0.690	1.720
3/8"	0.310	0.300	9.502	0.610	1.520
¼"	1.360	1.280	41.121	2.640	6.579
Menos de ¼"	0.730	0.840	24.455	1.570	3.913
Total	2.820	3.600	100	6.420	16.000

Una vez obtenido el peso específico de los agregados pétreos en estado seco, se determinaron las cantidades de materiales pétreos, agua y aditivos para el diseño de un concreto con una resistencia de $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$, conforme a la normativa M-MMP-2-02-055/06 de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2006). Esta normativa proviene del reglamento relativo a las especificaciones y métodos de prueba para materiales de construcción en proyectos de infraestructura vial y de transporte en México, y busca determinar la capacidad del concreto para resistir fuerzas compresivas antes de experimentar fallas o deformaciones irreversibles. La evaluación proporciona datos cruciales que permiten validar la idoneidad del concreto para diversas aplicaciones estructurales.

Con el fin de asegurar la calidad del concreto, se realizó la prueba de revenimiento según la normativa M-MMP-2-02-056/06 de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte. La consistencia de la mezcla fue óptima para su propósito, alcanzando un revenimiento de 9.5 cm.

Se elaboraron 36 especímenes: 9 de control (blancos), 9 con un 5% de sustitución de agregado fino por arena sílica, 9 con un 10% y 9 con un 15%. La dosificación utilizada para cada mezcla se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3: Dosificación de la mezcla concreto control

Material	Material necesario por cilindro (kg)
Arena (Agregado Fino)	3.346 kg
Grava (Agregado Grueso)	2.25 kg
Cemento	5.293 kg
Agua	1.95 L

4. Resultados

Los especímenes fueron sometidos a pruebas de resistencia a la compresión bajo la normativa N-CMT-2-02-005/04 de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2004). Los ensayos se efectuaron en diferentes tiempos, tres especímenes de 0, 5, 10 y 15% de arena sílica se probaron a los 7 días como se observa en las Figura 8 en donde se muestra cómo se presentaron fallas cónicas, la misma cantidad se sometió a los 14 días para lo cual el tipo de falla que presentaron fue de columna y cónica (Figura 9). Análogamente, se probaron a los 28 días donde alcanzaron su resistencia máxima y para este último ensayo las fallas que se presentaron fueron por rotura explosiva y cónica. (Figura 10).

En algunos casos, las fallas observadas no correspondieron claramente a los tipos definidos, lo que pudo deberse a variaciones en la homogeneidad del material, el proceso artesanal o en las condiciones de prueba. Sin embargo, se implementaron criterios específicos para evaluar y categorizar estas fallas según su apariencia dominante, asegurando la consistencia en la interpretación de los resultados. Los promedios obtenidos en las pruebas mecánicas indicaron un incremento significativo en la resistencia a la compresión de los especímenes con mayor porcentaje de arena sílica, particularmente en aquellos con una sustitución del 15% de agregados finos (Tabla 4)



Figura 8: Comparativa entre especímenes tronados con 5, 10, 15% de sustituto de arena sílica a los 7 días de fraguado.



Figura 9: Comparativa entre especímenes tronados con 5, 10, 15% de sustituto de arena sílica a los 14 días de fraguado.



Figura 10: Comparativa entre especímenes tronados con 5, 10, 15% de sustituto de arena sílica a los 28 días de fraguado.

Tabla 4: Resistencia a la compresión de los cilindros

Especímen	Datos			Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
	Diámetro promedio (mm)	Altura (mm)	Peso (gr)	
<i>Cilindros de concreto hidráulico</i>				
1	150.05	300.03	11710	203.04
2	150.39	303.06	11480	209.12
3	150.05	300.01	11730	210.70
<i>Cilindros de concreto hidráulico con aditivo del 5% de arenas sílicas</i>				
1	149.96	299.80	11350	227.66
2	149.90	300.05	11320	253.49
3	149.83	300.50	11300	239.35
<i>Cilindros de concreto hidráulico con aditivo del 10% de arenas sílicas</i>				
1	150.07	299.90	11430	278.79
2	149.87	299.90	11360	265.58
3	149.97	300.00	11470	260.16
<i>Cilindros de concreto hidráulico con aditivo del 15% de arenas sílicas</i>				
1	149.98	300.02	11350	280.93
2	150.05	299.97	11480	276.44
3	150.00	300.40	11290	277.02
3	150.00	300.40	11290	277.02

Aunque algunas fallas no definidas podrían haber alterado la respuesta de ciertos especímenes, se verificó que estas no afectaron de manera significativa los promedios generales. Este resultado refuerza la hipótesis de que la inclusión de arena sílica mejora la resistencia a la compresión y puede reducir la formación de grietas, especialmente en los especímenes con mayor sustitución (Figura 11).

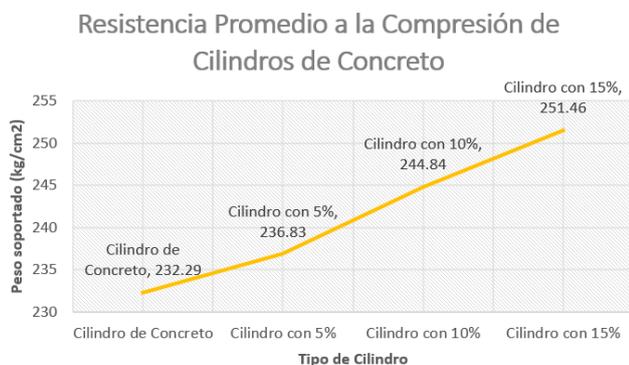


Figura 11: Resistencia promedio a la compresión de cilindros de concreto.

5. Discusión

A pesar la variabilidad observada en los resultados de resistencia a la compresión de los especímenes, la mejora en la resistencia es consistente en aquellos especímenes donde se ha sustituido parcialmente los agregados por arena sílica. Esta variabilidad puede ser atribuida a factores inherentes al proceso de elaboración artesanal, como la homogeneidad en la mezcla y las condiciones de curado. Es importante destacar que no todas las lecturas obtenidas de los ensayos estuvieron asociadas a fallas bien definidas. Sin embargo, este tipo de fallas no comprometió significativamente la metodología utilizada, dado que las lecturas anómalas fueron identificadas

y tratadas conforme a estándares establecidos, lo que permitió que los resultados globales reflejaran tendencias consistentes. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran un aumento significativo en la resistencia a la compresión a medida que se incrementa el porcentaje de arena sílica en la mezcla, lo cual se refleja en la Figura 11. Este comportamiento indica la adaptabilidad del material para su aplicación en vialidades de concreto hidráulico, sugiriendo que la incorporación de arena sílica no solo mejora la resistencia mecánica del concreto, sino que también tiene un impacto positivo en su durabilidad.

Respecto a la posibilidad de obtener resultados confiables a pesar de las fallas no definidas, es fundamental señalar que la metodología fue robusta, permitiendo que se identificaran y corrigieran las anomalías. Esto asegura que los resultados obtenidos, aunque sujetos a variabilidad, sean representativos y puedan ser justificados en términos de su aplicación práctica en ingeniería civil.

Los resultados de resistencia máxima a la compresión obtenidos en este estudio permiten inferir un aumento en la durabilidad del concreto. Un concreto con mayor resistencia a la compresión es más eficiente en la prevención de la formación de micro fisuras bajo cargas de servicio, lo cual reduce la permeabilidad y, en consecuencia, la penetración de agentes como cloruros y sulfatos, principales responsables del deterioro del concreto.

De manera cuantitativa, este estudio sugiere que el incremento en la resistencia a la compresión se correlaciona con una mayor densidad del material, lo que a su vez se traduce en una disminución de su porosidad y, por ende, en una mayor durabilidad. La relación entre resistencia a la compresión y durabilidad es una variable crítica en la evaluación del desempeño del concreto, especialmente en aplicaciones expuestas a condiciones ambientales.

El método empleado para evaluar la resistencia a la compresión se basa en la sustitución parcial de los agregados tradicionales por arena sílica, lo cual ha mostrado ser un enfoque efectivo para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Las principales variables involucradas en este proceso incluyen el porcentaje de sustitución de agregados, la homogeneidad de la mezcla, y las condiciones de curado.

Sin embargo, es importante señalar que las limitaciones del estudio incluyen la posible variabilidad introducida por el proceso de fabricación artesanal de los especímenes, así como la extrapolación de estos resultados de laboratorio a aplicaciones en condiciones de campo.

En cuanto a la reflexión sobre estos hallazgos, es importante considerar que, si bien los resultados son prometedores y sugieren que la sustitución de agregados por arena sílica puede aumentar la durabilidad del concreto, estos deben ser validados a través de estudios adicionales en condiciones reales de exposición y a lo largo de períodos de tiempo más prolongados.

Autores como Neville (2011) sugieren que el aumento en la resistencia a la compresión, logrado a través de la optimización de los materiales constituyentes, está directamente relacionado con una mejora en la durabilidad del concreto frente a agentes. Esto coincide con los resultados presentados en este estudio, reforzando la idea de que la mejora en las propiedades mecánicas del concreto es un factor clave para asegurar su longevidad en aplicaciones estructurales.

Es esencial continuar investigando la relación entre resistencia a la compresión y durabilidad, explorando no solo

los efectos de la sustitución de agregados, sino también otros aspectos como la calidad del curado y la interacción del concreto con su entorno. Este enfoque integral permitirá desarrollar concretos más duraderos y sostenibles, capaces de resistir las demandas crecientes de las infraestructuras modernas.

Conclusiones

Este artículo ha desarrollado una propuesta innovadora para mejorar la resistencia mecánica de pavimentos rígidos mediante la implementación de arena sílica como sustituto parcial de los agregados tradicionales en mezclas de concreto. La investigación se centró específicamente en evaluar el impacto de la arena sílica en la resistencia a la compresión del concreto, demostrando resultados positivos, ya que la inclusión de arena sílica incrementa significativamente esta resistencia.

La mayor resistencia a la compresión obtenida con la inclusión de arena sílica no solo optimiza el desempeño estructural de los pavimentos rígidos, sino que también ofrece beneficios importantes en la ingeniería civil y la construcción. Estos beneficios incluyen una mayor durabilidad y capacidad de carga en las estructuras de concreto, lo cual se traduce en una vida útil más prolongada y en una reducción de costos de mantenimiento. Además, en el contexto de la construcción de vialidades y pavimentos, esto contribuye a la mejora de las condiciones óptimas de las vías, asegurando la seguridad y funcionalidad en el transporte de personas y bienes.

Como trabajo futuro, se propone estudiar la durabilidad del pavimento con inclusión de arena sílica como sustituto de agregados pétreos, a través de pruebas mecánicas como resistencia a la tensión y cortante, a la fatiga y pruebas con cargas cíclicas.

Referencias

- Binici, H., & Aksogan, O. (2018). Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate. *Journal of Building Engineering*, 19, 109-121.
- Cones, & Rossmery. (2023). Diseño estructural de pavimento rígido para infraestructura vial - Comunidad Pomacocha - Junin - 2021. Universidad Peruana Los Andes.
- Delatte, N. J. (2014). *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance*. CRC Press.
- Espinoza, L., & Gabriel, R. (2017). Determinación de la influencia de las características químicas de los agregados reciclados de concreto como llenante en concretos hidráulicos y asfálticos. Universidad del Norte.
- Goytia, O. (2018). Características del concreto hidráulico. Ricasa.
- Guerrini, G., Hornero, R., & Crespo, R. (2016). Uso de cementos fotocatalíticos para vías urbanas con altos volúmenes de tránsito. *Semanticscholar*.
- Guillermo, H. O., Muñoz, Z. C., Quepuy, J. D., Otoyá, D. S., & Pérez, S. M. (2023). Resistencia a la compresión de hormigones reforzados con fibra de polipropileno. *Paideia XXI*.
- Higuera-Sandoval, C. H., & Hernández-Rojas, D. A. (2021). Aplicación de elementos finitos para el chequeo de losas de concreto hidráulico. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (2015). Guía de Diseño de Pavimentos de Concreto.
- Jaimes, J. A., Reyes, C., & Machado, C. A. (2020). Parámetros de resistencia al corte para interfases de arena-concreto: propuesta de investigación. *Philosophy*.
- Jauregui, L. (2022). Arena sílica: ¿Qué es y para qué sirve? *Filtrashop*.
- Llamo, R. E., Ramírez, W. R., & Pérez, S. P. (2020). Uso de aditivos adherentes en el diseño de mezclas asfálticas en caliente: una revisión. *Redalyc*.
- Miranda, M. A., Garrido, B. M., & Estévez, R. M. (2020). Características de la arena sílica de Alvarado, Veracruz, México, como material para barreras reactivas permeables, para la remediación de acuíferos contaminados con lixiviados de basureros no controlados. *Enfoque UTE Revista*.
- Muñoz Perez, S. B. (2021). El uso del aditivo mineral como modificador de las propiedades mecánicas en el concreto: una revisión. *Métodos y Materiales*.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Prentice Hall.
- Ortiz, D. V., & Hernández Zaragoza, J. B. (2021). Uso de agregado de pavimento asfáltico reciclado para un pavimento rígido. *Ingeniería Investigación y Tecnología*.
- Ospino Carbonell, R. H., Tinoco Bueno, C. D., & Crespo Tovar, D. A. (2017). Análisis de daño por causa del envejecimiento y auscultación en estructuras de pavimentos flexibles en las ciudades de Santa Marta y Barraquilla entre los años 2012-2017. Universidad Cooperativa de Colombia.
- Rafael Romaldo Chávez, A. E. (2024). Adición de ceniza de eucalipto y fibra de coco para optimizar las propiedades del concreto. *Ciencia Latina Revista Multidisciplinar*.
- Ramdani, S., Guettala, A., Benmalek, M. L., & Aguiar, J. B. (2019). Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder. *Journal of Building Engineering*, 21, 302-311.
- Ramos, H. (2021). ABC de los agregados. *360enconcreto*.
- Rincón, R. A., & Lasprilla, O. A. (2020). Curva relación agua cemento vs. resistencia a la compresión, para agregados del río Guayuriba, tamaños nominales de 1", ¾" y ½". Universidad Cooperativa de Colombia.
- Rocha Argote, F. (2021). Tiempo de fraguado y consistencia normal del cemento Portland IP-30 con agregados de esferas de poliestireno. *Ciencia Latina Revista Multidisciplinar*.
- Salazar, A. (2015). Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos. *IMCYC*.
- Salazar, M., Martínez, J. D., Cardoso, V. R., & Góngora, I. A. (2023). Evaluación de la resistencia al corte de un suelo con refuerzo de fibra de coco. *Contemporanea*.
- Sánchez, A., & Jiménez, M. P. (2019). Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico. *SEMANTIC SCHOLAR*.
- Sandoval, C. H., & Rojas, D. H. (2021). Aplicación de elementos finitos para el chequeo de losas de concreto hidráulico. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2004). Características de los materiales. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2006). Norma M-MMP-2-02-055/06: Prueba de resistencia a la compresión del concreto.
- Suárez, A. F., & Jaramillo, J. C. (2022). Producción de hormigón verde a partir de ceniza de cascarilla de arroz y residuos de vidrio como sustitutos del cemento.
- Silva, A. P., & Paredes, N. M. (2024). Propuesta comparativa de las propiedades mecánicas entre un pavimento rígido tradicional y uno adicionando fibras metálicas (Bachelor's thesis, Guayaquil: ULVR, 2024).
- Silva, J. H. (2016). Influência da adição de sílica ativa sobre a resistência mecânica e a tenacidade à fratura de concretos de cimento Portland para utilização em pavimentos rígidos rodoviários. *Physics*.
- Sivakumar, N., & Ananthi, G. B. G. (2024). Characterisation of domestically discarded vegetable waste biomass ash and silica sand mixed with ordinary Portland cement concrete. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15.
- Tey, A. (2007). *Innovaciones en la Tecnología del Concreto en México*. Revista Ingeniería Civil, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Vásquez, L. F., Valla, L. G., Tirado, V. J., & Peñaherrera, C. P. (2023). Analysis of the Modulus of Static Elasticity of Concrete Made with Recycled Materials.
- Zhu, N., Jin, F., Kong, X., Xu, Y., Zhou, J., Wang, B., & Wu, H. (2018). Interface and anti-corrosion properties of sea-sand concrete with fumed silica. *Construction and Building Materials*, 188, 1085-1091.