

Anahi Santiago
Bautista

**Mejoramiento de propiedades mecánicas en concreto con
micro-materiales como rellenadores y polímeros sintéticos
como refuerzo para pavimentos rígidos.**

2025



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**Mejoramiento de propiedades mecánicas en concreto
con micro-materiales como rellenadores y polímeros
sintéticos como refuerzo para pavimentos rígidos.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestra en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Anahi Santiago Bautista

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Querétaro, Qro., a 31 de octubre de 2025

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad.

Mejoramiento de propiedades mecánicas en concreto con micro-materiales
como rellenadores y polímeros sintéticos como refuerzo
para pavimentos rígidos

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestra en Ingeniería de Vías de Terrestres y Movilidad

Presenta:
Anahi Santiago Bautista

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Presidente

_____ Firma

Dr. Ricardo Montoya Zamora
Secretario

_____ Firma

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Vocal

_____ Firma

Dra. Teresa López Lara
Suplente

_____ Firma

M.C. Gerardo Medellín Aguilar
Suplente

_____ Firma

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
31 de octubre de 2025

RESUMEN

Esta investigación aborda el impacto ambiental del concreto convencional y propone el uso de micro-materiales (filler de basalto) y polímeros sintéticos (FibraFest) para mejorar sus propiedades mecánicas en pavimentos rígidos. La hipótesis plantea que estas adiciones pueden incrementar al menos un 10% la resistencia del concreto respecto a una mezcla convencional.

Se diseñaron cinco mezclas: una de referencia, una con polímero, y tres con sustitución parcial de cemento (25%, 30% y 35%). Se elaboraron cilindros de 10x20 cm y se evaluaron a compresión a los 3, 7, 14, 28 y 90 días.

Los resultados muestran que la mezcla con polímero mejoró la resistencia a edades tempranas. Las mezclas con filler tuvieron un desarrollo más lento, pero la mezcla con 30% de reemplazo alcanzó valores cercanos a la referencia a los 90 días.

Se concluye que el uso de polímeros mejora la resistencia temprana, mientras que los micro-materiales permiten reducir el uso de cemento sin comprometer significativamente la resistencia a largo plazo. La combinación óptima fue la mezcla con 30% de filler, por su balance entre desempeño y sostenibilidad.

Palabras clave: Micro-materiales, Pavimento rígido, Polímeros, Rellenadores.

SUMMARY

This research addresses the environmental impact of conventional concrete and proposes the use of micro-materials (basalt filler) and synthetic polymers (FibraFest) to improve its mechanical properties for rigid pavements. The hypothesis suggests that these additions can increase concrete strength by at least 10% compared to a conventional mix.

Five mixtures were designed: a reference mix, one with polymer, and three with partial cement replacement (25%, 30%, and 35%). Cylindrical specimens (10x20 cm) were prepared and tested for compressive strength at 3, 7, 14, 28, and 90 days.

Results show that the polymer-enhanced mix improved early-age strength. Mixes with basalt filler showed slower strength development, but the 30% replacement mix reached values close to the reference at 90 days.

It is concluded that polymers enhance early-age strength, while micro-materials help reduce cement use without significantly compromising long-term performance. The optimal combination was the mix with 30% filler, offering a good balance between performance and sustainability.

Keywords: Micro-materials, Rigid pavement, Polymers, Fillers.

DEDICATORIA

A mi madre, Amalia Bautista Santiago y hermanas, Diana Santiago Bautista y
Rosa Bautista Hernández.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT)** por el apoyo brindado a través de la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado. Su respaldo ha sido fundamental para el desarrollo de este proyecto de investigación.

A la **Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ)**, por ser la institución que me ha formado académicamente durante esta etapa, y por proporcionarme las herramientas, conocimientos y espacios necesarios para llevar a cabo este trabajo.

Expreso mi gratitud a mis profesores, asesores y compañeros del programa de Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad, quienes contribuyeron con sus enseñanzas, sugerencias y apoyo durante este proceso académico, a mi director de tesis, Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza y todos los integrantes del Sínodo, al Dr. Ricardo Montoya Zamora como coordinador de la maestría y por siempre contar con su apoyo.

Asimismo, agradezco a todas las personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, colaboraron en la realización de esta investigación, tanto en el desarrollo experimental como en el análisis de resultados.

Finalmente, gracias a mi familia, amigos y seres queridos por su constante apoyo, paciencia y motivación a lo largo de esta etapa de formación.

| Tabla de Contenido | Pág. |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 8 |
| 1.1 GENERALIDADES | 8 |
| 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA | 9 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN..... | 10 |
| 1.4 HIPÓTESIS | 10 |
| 1.5 OBJETIVOS | 10 |
| 1.5.1 <i>Objetivo General</i> | 10 |
| 1.5.2 <i>Objetivos Particulares</i> | 10 |
| 2. ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES..... | 11 |
| 2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS..... | 11 |
| 2.1.1 <i>Pavimentos flexibles</i> | 11 |
| 2.1.2 <i>Pavimentos rígidos</i> | 13 |
| 2.2 CONCRETO HIDRÁULICO..... | 16 |
| 2.2.1 <i>Cemento</i> | 18 |
| 2.3 POLIMEROS..... | 24 |
| 2.3.1 <i>Polímeros en el concreto</i> | 26 |
| 2.4 MICRO-MATERIALES..... | 32 |
| 2.4.1 <i>Micro-materiales en el concreto</i> | 34 |
| 2.5 EFECTO DE SOBRE CARGA EN LOS PAVIMENTOS..... | 39 |
| 2.5.1 <i>Deformaciones en los pavimentos rígidos</i> | 42 |
| 3. METODOLOGÍA | 46 |
| 3.1 BÚSQUEDA Y RECOLECCIÓN DE MATERIALES..... | 47 |
| 3.1.1 <i>Agregados pétreos</i> | 47 |
| 3.1.2 <i>Cemento y agua</i> | 47 |
| 3.1.3 <i>Polímero</i> | 48 |
| 3.1.4 <i>Micro-materiales</i> | 48 |
| 3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES | 48 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.2.1 | <i>Agregados pétreos</i> | 48 |
| 3.2.2 | <i>Cemento y agua</i> | 49 |
| 3.2.3 | <i>Polímero</i> | 49 |
| 3.2.4 | <i>Micro-materiales</i> | 50 |
| 3.3 | DISEÑO DE MEZCLAS Y PROPORCIONAMIENTOS | 50 |
| 3.4 | ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES | 51 |
| 3.5 | DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE ENSAYES | 52 |
| 3.5.1 | <i>Resistencia a la compresión</i> | 52 |
| 3.5.2 | <i>Resistencia a la tensión</i> | 54 |
| 3.6 | ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 55 |
| 4. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 57 |
| 4.1 | SELECCIÓN DE MATERIALES..... | 57 |
| 4.1.1 | <i>Agregados pétreos</i> | 57 |
| 4.1.2 | <i>Cemento y agua</i> | 58 |
| 4.1.3 | <i>Polímero</i> | 58 |
| 4.1.4 | <i>Micro-materiales</i> | 60 |
| 4.1.5 | <i>CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES</i> | 61 |
| 4.2 | DISEÑO DE LA MEZCLA..... | 64 |
| 4.3 | ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES | 67 |
| 4.4 | PROPIEDADES MECÁNICAS..... | 70 |
| 4.4.1 | <i>Resistencia a la compresión</i> | 70 |
| 4.4.2 | <i>Resistencia a la tensión</i> | 73 |
| 4.5 | DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS | 74 |
| 5. | CONCLUSIONES | 77 |
| 6. | FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN | 78 |
| 7. | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 82 |

TABLA DE ILUSTRACIONES

Pág.

| | |
|---|----|
| <i>Figura 2.2.1.1.-Producción y consumo de cemento en México.....</i> | 22 |
| <i>Figura 2.2.1.2.-Principales indicadores de la industria del cemento en México (Periodo 2005-2015)..</i> | 23 |
| <i>Figura 3.1.- Diagrama de Flujo de la Metodología.</i> | 47 |
| <i>Figura 4.1.1.1. Vista general de la trituradora GAP ‘La Luz’”</i> | 57 |
| <i>Figura 4.1.2.1. Imagen Comercial de cemento seleccionado.....</i> | 58 |
| <i>Figura 4.1.3.1. Micro fibra de polipropileno-Imagen comercial.....</i> | 59 |
| <i>Figura 4.1.4.1. Imagen del micro-material antes y después del triturado en la máquina de Desgaste de los Ángeles.</i> | 60 |
| <i>Figura 4.2.1.1. CURVA GRANULOMÉTRICA (Arena)</i> | 62 |
| <i>Figura 4.2.1.2. CURVA GRANULOMÉTRICA (Grava)</i> | 63 |
| <i>Figura 4.3.1. Materiales utilizados para la elaboración de los cilindros</i> | 67 |
| <i>Figura 4.3.2. Pesaje de componentes para los diferentes tipos de mezclas</i> | 69 |
| <i>Figura 4.3.3. Proceso de mezcla de los materiales con el polímero FIBRAFEST.</i> | 70 |
| <i>Figura 4.4.1.1. Gráfica comparativa de la Resistencia a la Compresión vs. Días de Curado.</i> | 72 |
| <i>Figura 4.4.2.1. Gráfica comparativa de la Resistencia a la Tensión vs. Días de Curado.</i> | 74 |

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

| | |
|---|----|
| <i>Tabla 4.1.5.1.1. Granulometría de agregados pétreos (Arena) M-MMP-2-02-020/18</i> | 61 |
| <i>Tabla 4.2.1.2. Granulometría de agregados pétreos (Grava) M-MMP-2-02-020/18.....</i> | 62 |
| <i>Tabla 4.3.1. Propiedades físicas de los agregados.....</i> | 65 |
| <i>Tabla 4.3.2. Datos Generales del diseño.....</i> | 65 |
| <i>Tabla 4.3.3. Datos Generales del Cemento.....</i> | 65 |
| <i>Tabla 4.3.4. Composición en % de cada tipo mezcla</i> | 66 |
| <i>Tabla 4.3.5. Modelo experimental con el número de especímenes por mezcla y edad.</i> | 69 |
| <i>Tabla 4.4.1.1. Resultados de resistencia a compresión (MPa) por mezcla y edad.....</i> | 71 |
| <i>Tabla 4.4.2.1. Resultados de resistencia a tensión (MPa) por mezcla y edad.</i> | 73 |
| <i>Tabla 4.5.1 Desempeño del Filler de Basalto frente a Otros Materiales de relleno en concretos.....</i> | 75 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

La industria de la construcción y los materiales de construcción buscan formas de reducir su impacto ambiental, y una de las áreas clave de enfoque ha sido el desarrollo de materiales de construcción más ecológicos, especialmente en relación con el cemento.

El cemento es un componente fundamental en la construcción, pero su producción tradicional genera una gran cantidad de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) debido al proceso de calcinación del carbonato de calcio en el cemento Portland, que es el tipo de cemento más comúnmente utilizado. Para abordar este problema, se han desarrollado varios tipos de materiales ecológicos a base de cemento, que buscan reducir la huella de carbono de la construcción.

Estos materiales suelen incorporar adiciones minerales o materiales cementosos suplementarios que reemplazan parcial o totalmente a los aglutinantes de cemento ordinarios, como el cemento Portland.

De acuerdo con las investigaciones realizadas por Rashwan et al. (2019), “La reducción del impacto ambiental del sector de la construcción y los materiales de construcción ha ganado interés en los últimos años, dando lugar a varios tipos de materiales ecológicos a base de cemento que utilizan diferentes tipos de adiciones minerales (materiales cementosos suplementarios o relleno) que sustituyen a los aglutinantes de cemento ordinarios”.

Según (Quezada, p. 1, 2018, citado por Surichaqui et al. 2021), definen al pavimento rígido como “una estructura compuesta por una losa de concreto, la cual se apoya sobre una capa de material granular seleccionado y compactado llamado sub-base, lo importante es que la losa de concreto tenga un apoyo suficientemente

uniforme y estable”, este mismo autor menciona que con la incorporación de fibras de Polietileno Tereftalato (PET) a la concreta mejora las propiedades mecánicas del mismo, aumentando su ductilidad, lo cual mejora la calidad de la obra aumentando su vida útil controlando la figuración.

Por su parte, Rostami et al. (2022), “mencionan que la incorporación de fibras en la matriz cementosa puede mejorar eficazmente la resistencia a la tracción y mitigar el agrietamiento en edades tempranas y que las fibras poliméricas (PF) como material de refuerzo pueden proporcionar efectos de anclaje debido a las deformaciones, la ductilidad y la facilidad de dispersión”.

La incorporación de fibras en la matriz cementosa es una técnica comúnmente utilizada para mejorar las propiedades del concreto y mitigar problemas como la formación de grietas, especialmente durante las etapas tempranas de fraguado y endurecimiento. Las fibras actúan como refuerzo en el concreto y pueden ofrecer beneficios significativos, como mejorar la resistencia a la tracción y la capacidad de controlar el agrietamiento.

Las fibras poliméricas (PF) se han destacado como un tipo de refuerzo que muestra propiedades particulares beneficiosas para el concreto. Estas fibras se fabrican con materiales poliméricos, lo que les otorga propiedades específicas que pueden mejorar el comportamiento del concreto y con las investigaciones realizadas por Carrillo y Silva-Páramo (2016b) confirmaron que, “el concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) se ha convertido en una solución para mejorar el desempeño del concreto y optimizar los sistemas constructivos”.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los pavimentos rígidos, como el hormigón, pueden experimentar varios tipos de deterioro debido a factores como el tráfico, el clima y el tiempo.

Los pavimentos rígidos, son una opción común en la construcción de carreteras y otras infraestructuras viales debido a su durabilidad y resistencia. Sin embargo, a lo largo del tiempo, estos pavimentos pueden experimentar diversos tipos de deterioro debido a factores como el tráfico pesado, las condiciones climáticas adversas y el uso prolongado. Estos deterioros pueden comprometer la integridad estructural del pavimento y afectar la seguridad y la comodidad de los usuarios de la carretera.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Briceño et al. (2019), Wang et al. (2018b) y Carrillo et al. (2016) proponen:

- Que se elaboren cinco especímenes para cada tipo de **mezcla y proporción**.
- **El uso del filler basáltico (FB) puede ser el más adecuado como material de relleno.**
- Se sugiere realizar más investigaciones sobre **diferentes proporciones** como relleno.

1.4 HIPÓTESIS

Los micro-materiales y polímeros en combinaciones y colocaciones adecuadas mejoran las propiedades mecánicas de un concreto rígido en un mínimo del 10%, contra el diseño de concreto convencional.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Mejorar las propiedades mecánicas a tensión y compresión del concreto, para pavimentos rígidos mediante la adición de micro-materiales y polímeros sintéticos.

1.5.2 Objetivos Particulares

Integración de micro material compatible con el cemento Portland, asegurando la calidad y características de los materiales que pide la normativa mexicana para el diseño de mezclas de concreto.

Evaluación de polímero sintético para mejorar las propiedades mecánicas del concreto a tensión y compresión.

2. ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES

2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

2.1.1 Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles constituyen una estructura vial compuesta por múltiples capas diseñadas para distribuir las cargas vehiculares de manera gradual hacia el suelo subyacente. Estos pavimentos están conformados principalmente por una capa de rodadura bituminosa apoyada sobre capas de base y subbase granulares (Huang, 2021). Su comportamiento mecánico está caracterizado por la deflexión elástica que experimentan bajo cargas, lo que les confiere el nombre de "flexibles".

Según Mallick y El-Korchi (2018), la estructura típica de un pavimento flexible consta de:

1. Capa de rodadura asfáltica (7-15 cm)
2. Base granular (10-30 cm)
3. Subbase granular (10-30 cm)
4. Subrasante (suelo natural compactado)

La investigación de Papagiannakis y Masad (2017) demuestra que el comportamiento del pavimento flexible está gobernado por las propiedades

viscoelásticas del conglomerante bituminoso, cuyo módulo resiliente varía significativamente con la temperatura y la frecuencia de carga. Estas variaciones afectan directamente la respuesta estructural del pavimento y su durabilidad a largo plazo.

Un aspecto crucial en el diseño de pavimentos flexibles es la caracterización de la fatiga bajo cargas repetidas, como señala Tarefder et al. (2019) en su estudio sobre el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas sometidas a ciclos de carga. Sus resultados demuestran que la acumulación de microgrietas en la matriz bituminosa conduce eventualmente a la desintegración progresiva del material.

Las innovaciones recientes en pavimentos flexibles incluyen la incorporación de modificadores poliméricos, como documenta Zhu et al. (2022) en su análisis sobre el efecto de SBS (estireno-butadieno-estireno) en el comportamiento reológico de ligantes asfálticos. Los resultados revelaron mejoras significativas en la resistencia a la deformación permanente y agrietamiento por fatiga.

Por otro lado, Chen et al. (2023) investigaron el uso de nanomateriales como aditivos en mezclas asfálticas, evidenciando que la incorporación de nano-arcillas en proporciones de 2-4% puede incrementar la rigidez del asfalto a altas temperaturas sin comprometer su flexibilidad a bajas temperaturas, reduciendo así la susceptibilidad térmica del pavimento.

Las principales ventajas de los pavimentos flexibles, según lo establecido por Bianchini et al. (2020), incluyen:

- Menor costo inicial en comparación con pavimentos rígidos
- Construcción y rehabilitación más rápida
- Posibilidad de apertura inmediata al tráfico tras reparaciones
- Mejor comportamiento en terrenos con asentamientos diferenciales

Sin embargo, las investigaciones de Ahmed et al. (2021) documentan también sus principales limitaciones:

- Menor vida útil (típicamente 10-15 años)
- Mayor frecuencia de mantenimiento
- Susceptibilidad a daños por derrame de combustibles y lubricantes
- Menor resistencia a cargas concentradas

2.1.2 Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos están constituidos fundamentalmente por una losa de concreto hidráulico colocada sobre una capa de base granular o estabilizada, que se apoya directamente sobre la subrasante. La característica distintiva de estos pavimentos es su elevada rigidez en comparación con los pavimentos flexibles, lo que resulta en una distribución más amplia de las cargas aplicadas (Delatte, 2018).

De acuerdo con Riffel (2020), la estructura típica de un pavimento rígido incluye:

1. Losa de concreto hidráulico (15-30 cm)
2. Base granular o estabilizada (10-15 cm)
3. Subrasante (suelo natural compactado)

El comportamiento estructural de los pavimentos rígidos está determinado principalmente por la resistencia a flexión del concreto, como lo demuestra el trabajo de Taylor et al. (2019). Sus investigaciones revelan que las tensiones críticas en la losa se producen en los bordes y esquinas debido a las cargas de tráfico y los efectos ambientales, siendo el alabeo térmico un fenómeno particularmente relevante.

Según las investigaciones de Khazanovich y Gotlif (2020), el módulo elástico del concreto en pavimentos rígidos suele oscilar entre 20,000 y 30,000 MPa, un valor significativamente superior al de los materiales bituminosos utilizados en pavimentos flexibles. Esta elevada rigidez permite una mejor distribución de las cargas verticales, reduciendo las tensiones transmitidas a las capas inferiores.

Un aspecto fundamental en el diseño de pavimentos rígidos es el análisis de las juntas. Como señala Roesler et al. (2019), estas discontinuidades estructurales son necesarias para controlar la fisuración por contracción del concreto, pero constituyen también puntos vulnerables donde pueden desarrollarse deterioros como escalonamientos y bombeo. El mecanismo de transferencia de carga a través de las juntas ha sido investigado extensamente por Buch et al. (2021), quienes demostraron la efectividad de dispositivos como pasadores y barras de unión para mantener la continuidad estructural del pavimento.

El comportamiento a largo plazo de los pavimentos rígidos ha sido documentado por Ram et al. (2022) mediante el seguimiento de secciones experimentales durante más de 25 años. Sus hallazgos confirman la excelente durabilidad de estos sistemas bajo tráfico pesado, siempre que se garantice un adecuado control de calidad durante la construcción y un mantenimiento apropiado de las juntas.

Las innovaciones recientes en el campo de los pavimentos rígidos incluyen el desarrollo de concretos de alto desempeño, como detallan Li y Kwan (2018) en su investigación sobre concretos de ultra-alta resistencia para aplicaciones viales. Estos materiales alcanzan resistencias a compresión superiores a 100 MPa mediante la optimización de la microestructura y la incorporación de adiciones minerales y fibras de refuerzo.

Atahan et al. (2021) han explorado también el uso de materiales reciclados en pavimentos rígidos, demostrando la viabilidad de incorporar hasta un 30% de agregados provenientes de concreto demolido sin comprometer significativamente

las propiedades mecánicas del pavimento. Esta línea de investigación representa una contribución importante hacia la sostenibilidad de la infraestructura vial.

Las principales ventajas de los pavimentos rígidos, según lo documentado por Vandenbossche y Sachs (2019), incluyen:

- Mayor vida útil (20-40 años)
- Menor deformación bajo cargas estáticas
- Menor costo de mantenimiento a largo plazo
- Mayor reflectividad, reduciendo el efecto de isla de calor

Por otro lado, López-Carrasquillo y Hwang (2020) señalan como principales desventajas:

- Mayor costo inicial de construcción
- Mayor tiempo necesario para la puesta en servicio
- Mayor complejidad en reparaciones y rehabilitación
- Menor confort de rodadura en ciertos casos

Entre las tipologías específicas de pavimentos rígidos, Muzenski et al. (2022) destacan:

- **Pavimentos de concreto simple con juntas (JPCP):** Consisten en losas de concreto sin refuerzo continuo, separadas por juntas transversales cada 4-6 metros, con transferencia de carga mediante pasadores (dovelas).
- **Pavimentos de concreto reforzado con juntas (JRCP):** Incorporan mallas de acero para controlar la fisuración, permitiendo un mayor espaciamiento entre juntas (9-12 metros).

- **Pavimentos de concreto continuamente reforzado (CRCP):** Utilizan una cuantía elevada de acero longitudinal (0.6-0.7% de la sección transversal) para distribuir la fisuración en numerosas grietas de pequeña abertura, eliminando la necesidad de juntas transversales.
- **Pavimentos de concreto pretensado:** Emplean cables pretensados para introducir compresión en el concreto, reduciendo o eliminando las tensiones de tracción bajo carga.

2.2 CONCRETO HIDRÁULICO

El concreto hidráulico es un material compuesto producto de la mezcla de cemento, agregados (finos y gruesos), agua y, opcionalmente, aditivos químicos y adiciones minerales. Su importancia en la construcción de pavimentos rígidos es fundamental, ya que sus propiedades determinan directamente el comportamiento estructural y la durabilidad del pavimento (Mehta y Monteiro, 2021).

De acuerdo con Neville (2019), la matriz del concreto está formada por la pasta de cemento endurecida, que actúa como aglutinante entre los agregados. Esta matriz representa aproximadamente el 25-40% del volumen total y es la responsable de las propiedades cohesivas del material.

Las investigaciones de Kumar y Monteiro (2023) han demostrado que la microestructura del concreto está caracterizada por tres fases principales:

1. La pasta de cemento endurecida
2. Los agregados
3. La zona de transición interfacial (ITZ) entre ambos

La ITZ, según documentan en su estudio microscópico, constituye el eslabón más débil en la estructura del concreto, con mayor porosidad y microfisuras que el resto

de la matriz, lo que influye significativamente en las propiedades mecánicas del material compuesto.

Las propiedades mecánicas fundamentales del concreto para pavimentos rígidos incluyen la resistencia a compresión, resistencia a flexión, módulo de elasticidad y coeficiente de expansión térmica. Según Han y Zhang (2020), la resistencia a compresión del concreto para pavimentos suele especificarse entre 28 y 35 MPa a 28 días, mientras que la resistencia a flexión (módulo de ruptura) debe alcanzar al menos 4.5 MPa.

Una propiedad crítica para el desempeño de los pavimentos rígidos es la resistencia a la fatiga del concreto. Como señalan Lee y López (2022), el paso repetido de vehículos pesados genera ciclos de tensiones que pueden provocar la iniciación y propagación de fisuras, incluso cuando los niveles de carga individuales son inferiores a la resistencia estática del material. Sus investigaciones experimentales muestran que el concreto puede fallar después de aproximadamente 10^6 ciclos cuando la tensión aplicada es del 55% de su resistencia estática.

Otro aspecto relevante es la contracción del concreto, fenómeno estudiado extensamente por Zhang et al. (2019). Sus resultados indican que la contracción por secado puede alcanzar valores de 400 a 800 μstrain en pavimentos, generando tensiones de tracción que, si no se controlan adecuadamente mediante juntas o refuerzo, conducen inevitablemente a la fisuración prematura.

La durabilidad del concreto en pavimentos está influenciada por diversos factores ambientales y operacionales. Según Peterson et al. (2021), los principales mecanismos de deterioro incluyen:

- Reacción álcali-agregado (RAA)
- Ataque por sulfatos

- Ciclos de congelamiento-descongelamiento
- Carbonatación
- Corrosión del refuerzo (en pavimentos armados)

El desarrollo de concretos de alto desempeño para pavimentos ha sido objeto de intensa investigación en las últimas décadas. Los trabajos de Wang y Li (2020) documentan avances significativos mediante el uso de nanosílice y metacaolín como adiciones minerales, logrando incrementos de hasta un 30% en la resistencia a compresión y una reducción considerable de la permeabilidad, factor clave para la durabilidad.

Con respecto a la sostenibilidad, Juenger et al. (2019) han explorado la utilización de materiales cementantes suplementarios como cenizas volantes, escorias de alto horno y humo de sílice en concretos para pavimentos. Sus estudios demuestran que estas adiciones permiten reducir el contenido de cemento Portland, disminuyendo la huella de carbono del material sin comprometer sus propiedades mecánicas a largo plazo.

2.2.1 Cemento

El cemento Portland es el conglomerante hidráulico más utilizado en la fabricación de concreto para pavimentos rígidos. Se obtiene mediante la molienda fina del clínker, un producto de la cocción hasta fusión parcial de una mezcla de caliza y arcilla, con la adición de yeso como regulador de fraguado (Scrivener et al., 2018).

Según la clasificación establecida por la ASTM C150 (American Society for Testing and Materials, 2020), existen cinco tipos principales de cemento Portland:

- Tipo I: Cemento de uso general
- Tipo II: Moderada resistencia a los sulfatos

- Tipo III: Alta resistencia inicial
- Tipo IV: Bajo calor de hidratación
- Tipo V: Alta resistencia a los sulfatos

Para aplicaciones en pavimentos, Kosmatka y Wilson (2021) recomiendan el uso de cementos Tipo I o Tipo II, mientras que el Tipo III puede ser apropiado cuando se requiere una apertura rápida al tráfico.

La composición química del cemento Portland está dominada por cuatro fases principales, como documentan Taylor y Scrivener (2022):

1. Silicato tricálcico (C_3S): 50-70%
2. Silicato bicálcico (C_2S): 15-30%
3. Aluminato tricálcico (C_3A): 5-10%
4. Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF): 5-15%

Las reacciones de hidratación de estas fases han sido estudiadas en detalle por Bullard et al. (2019), quienes describen la formación de silicato de calcio hidratado (C-S-H) como el principal producto responsable del desarrollo de resistencia, junto con hidróxido de calcio (portlandita), etringita y monosulfoaluminato cálcico.

De acuerdo con las investigaciones de Scrivener y Snellings (2020), la microestructura del cemento hidratado evoluciona continuamente con el tiempo. Durante las primeras horas, la pasta experimenta un proceso de rigidización conocido como fraguado, seguido por un endurecimiento progresivo debido a la densificación de la matriz. Este proceso puede continuar durante años, aunque con una tasa decreciente.

Un aspecto crítico en el uso de cemento Portland para pavimentos es el calor de hidratación, como señalan Ballim y Graham (2018). Sus estudios térmicos demuestran que en elementos masivos como los pavimentos, la elevación de temperatura puede alcanzar 50-60°C en el núcleo, generando gradientes térmicos que inducen tensiones de tracción en la superficie. Este fenómeno es particularmente relevante en losas de gran espesor (>25 cm).

La finura del cemento, caracterizada típicamente por la superficie específica Blaine, influye significativamente en la velocidad de hidratación y desarrollo de resistencia. Según Thomas et al. (2022), los cementos para pavimentos suelen tener una finura entre 300 y 400 m²/kg, representando un compromiso entre el desarrollo de resistencia temprana y el control del calor de hidratación.

Las especificaciones para cemento Portland en aplicaciones de pavimentos han evolucionado hacia criterios de desempeño, como documentan Tennis et al. (2019). Los requisitos modernos incluyen no solo la resistencia a compresión, sino también parámetros como la retracción autógena, la trabajabilidad y la compatibilidad con aditivos químicos.

Las innovaciones recientes en la química del cemento incluyen el desarrollo de aditivos modificadores de la hidratación. Li et al. (2023) han investigado el uso de nanopartículas de CaCO₃ como sitios de nucleación que aceleran la hidratación temprana sin incrementar significativamente el calor generado, lo que resulta especialmente beneficioso para la construcción de pavimentos en climas fríos.

Otro avance significativo es el desarrollo de cementos belíticos, como reportan Staněk y Sulovský (2020). Estos cementos contienen mayor proporción de C₂S y menor de C₃S que los cementos Portland convencionales, lo que resulta en un menor calor de hidratación y mayor durabilidad a largo plazo, características deseables para pavimentos de alto tráfico.

La importancia del cemento Portland en las propiedades finales del concreto para pavimentos ha sido cuantificada por Wang et al. (2019), quienes mediante un análisis estadístico de más de 500 mezclas determinaron que las variaciones en las características del cemento explican aproximadamente el 40% de la variabilidad en la resistencia y durabilidad del concreto, subrayando la necesidad de un control riguroso de este componente.

La industria del cemento en México ha experimentado cambios significativos a lo largo de los años, desde su auge durante la época de industrialización por relleno de importaciones hasta reajustes más recientes mediante adquisiciones y fusiones. Actualmente, seis empresas dominan el mercado nacional, con Cemex a la cabeza. A pesar de su importancia, hay poca investigación formal sobre la industria. Este trabajo se enfoca en analizar los determinantes del crecimiento de la industria, considerando tanto factores externos como la competencia internacional y las importaciones, como factores internos como la inversión y el empleo. Se asume que el crecimiento de la industria de la construcción es el principal impulsor del aumento de la producción de cemento en el mercado interno. El documento consta de cinco secciones que abordan aspectos teóricos, tendencias, metodología, resultados y conclusiones. Se hipotetiza que la creciente presencia de importaciones y la eliminación de aranceles han impactado la producción, mientras que el crecimiento interno de la industria de la construcción es el principal impulsor del aumento de la producción de cemento en el mercado interno. La industria cementera mexicana desempeña un papel crucial en la industria de la construcción, con un mercado oligopólico dominado por unas pocas empresas clave. Este dominio propicia prácticas de colusión que manipulan el mercado (Pozas, 1999). La concentración de empresas en esta industria ha llevado a estrategias de fusiones y adquisiciones para controlar el mercado, lo que ha beneficiado a las grandes empresas transnacionales del cemento (Corrales, 2006; Kang y Sakai, 2000). La competencia se intensifica especialmente en proyectos de infraestructura como puentes y edificios, donde la demanda de cemento es alta (Ghemawat y Thomas, 2005). Esta concentración de

mercado otorga a las empresas la capacidad de manipular los precios (De la Garza y Arteaga, 2012).

A lo largo de los años, la industria cementera ha mantenido una producción estable, controlada por seis empresas con alrededor de 34 a 37 plantas y 30 mil puntos de venta en todo el país, generando 86 mil empleos directos. Sin embargo, su contribución al PIB se mantiene en torno al 1% (datos de 2005 a 2015). A pesar de un aumento en la producción de cemento nacional, el consumo per cápita ha disminuido de 384.1 kilos por habitante en 2005 a 375.5 kilos por habitante en 2015. La crisis financiera de 2008 tuvo un impacto significativo, con un repunte en el consumo per cápita en 2009 debido a la recuperación económica, seguido de una caída relacionada con el bajo crecimiento económico posterior a la crisis, especialmente influenciado por la economía de Estados Unidos construcción sigue siendo un factor clave.

| <i>Año</i> | <i>Número de plantas a/</i> | <i>Capacidad utilizada promedio (%)</i> | <i>Producción cemento (millones de ton.)</i> | <i>Tasa de crecimiento, producción (%)</i> | <i>Consumo per cápita (kilos por hab.)</i> | <i>Valor de la producción (mill. de pesos de 2008)</i> |
|------------|-----------------------------|---|--|--|--|--|
| 2005 | 37 | 84.1 | 39.7 | | 384.1 | 59828.2 |
| 2006 | 37 | 86.3 | 42.7 | 7.7 | 413.7 | 63316.9 |
| 2007 | 35 | 85.7 | 43.4 | 1.6 | 420.5 | 62352.0 |
| 2008 | 35 | 85.8 | 42.3 | -2.6 | 409.5 | 59816.2 |
| 2009 | 35 | 85.0 | 40.9 | -3.2 | 396.3 | 58186.5 |
| 2010 | 35 | 83.3 | 39.2 | -4.2 | 349.2 | 56034.8 |
| 2011 | 35 | 84.2 | 40.6 | 3.6 | 361.6 | 55201.2 |
| 2012 | 34 | 83.9 | 41.6 | 2.5 | 370.5 | 56229.2 |
| 2013 | 35 | 80.6 | 39.8 | -4.3 | 354.6 | 57189.8 |
| 2014 | 34 | 82.2 | 41.9 | 5.3 | 373.3 | 60026.8 |
| 2015 | 34 | 84.3 | 44.9 | 7.0 | 375.5 | 64047.4 |

Figura 2.2.1.1.-Producción y consumo de cemento en México.

Fuente: EAIM, Scian 2002.

| <i>Año</i> | <i>Producción total (millones de tons.)</i> | <i>Portland (%)</i> | <i>Blanco (%)</i> | <i>Mortero (%)</i> | <i>Personal ocupado</i> | <i>Inversión fija bruta (millones de pesos)</i> |
|------------|---|---------------------|-------------------|--------------------|-----------------------------|---|
| 2005 | 39.7 | 90.7 | 2.0 | 7.4 | 92943 | 1394.6 |
| 2006 | 42.7 | 84.2 | 2.0 | 7.4 | 93668 | 3026.0 |
| 2007 | 43.4 | 82.8 | 2.0 | 7.8 | 93960 | 2348.4 |
| 2008 | 42.3 | 85.1 | 1.9 | 8.2 | 92237 | 3206.7 |
| 2009 | 40.9 | 87.9 | 1.6 | 8.4 | 84708 | 1202.6 |
| 2010 | 39.2 | 91.8 | 1.8 | 6.7 | 84105 | 1816.4 |
| 2011 | 40.6 | 88.6 | 1.9 | 8.7 | 87471 | 1065.2 |
| 2012 | 41.6 | 86.5 | 2.1 | 9.1 | 87967 | 4478.6 |
| 2013 | 39.8 | 90.4 | 2.4 | 9.0 | 87382 | 1852.8 |
| 2014 | 41.9 | 85.8 | 2.7 | 9.0 | 86022 | 4365.3 |
| 2015 | 44.9 | 80.2 | 2.0 | 9.3 | 86802 | 4278.0 |

Figura 2.2.1.2.-Principales indicadores de la industria del cemento en México (Periodo 2005-2015).

Fuente: EAIM, Scian 2002.

En resumen, los modelos analizados muestran que el crecimiento de la producción de cemento en México no está relacionado con factores internos de la industria, como cambios en el empleo o la inversión fija, sino que responde principalmente a la demanda de exportaciones y se ve afectado negativamente por la competencia extranjera. Aunque las exportaciones y la competencia extranjera representan una proporción baja en la producción total de cemento, su impacto en el crecimiento es limitado. La relación negativa con la producción de cemento sugiere que la industria tiene pocos incentivos para permitir mayores volúmenes de importaciones, dado su carácter oligopólico, lo que podría favorecer acuerdos de fijación de precios o cantidades para evitar la entrada de competidores y aumentar los beneficios.

La incorporación de una variable que mide el efecto de la actividad económica nacional revela una fuerte relación entre la producción física de la economía y la

producción de cemento, lo que sugiere una estrecha vinculación entre la industria cementera y el comportamiento económico del país.

En conclusión, la presencia de competencia externa en México impacta negativamente en el crecimiento de la industria cementera, confirmando que su principal fuente de crecimiento es el mercado interno. Esto respalda la estructura oligopólica de las empresas en la industria, que favorece la coordinación de la toma de decisiones.

2.3 POLIMEROS

Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión de unidades repetitivas denominadas monómeros mediante enlaces covalentes. Su estructura molecular puede ser lineal, ramificada o reticulada, lo que determina en gran medida sus propiedades físicas y mecánicas (Sperling, 2020).

De acuerdo con la clasificación propuesta por Billmeyer (2019), los polímeros se dividen en tres categorías principales:

1. Termoplásticos: Pueden fundirse y solidificarse repetidamente mediante calentamiento y enfriamiento, sin cambios químicos significativos. Ejemplos incluyen polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y policloruro de vinilo (PVC).
2. Termoestables: Experimentan una reacción química irreversible durante su procesamiento, formando una estructura tridimensional que no puede fundirse nuevamente. Ejemplos incluyen resinas epoxi, poliuretanos y fenol-formaldehído.
3. Elastómeros: Poseen alta elasticidad, permitiendo grandes deformaciones recuperables. Ejemplos incluyen caucho natural, estireno-butadieno (SBR) y poliisopreno.

Las propiedades mecánicas de los polímeros están fuertemente influenciadas por su estructura molecular, como han demostrado Ward y Hadley (2022) mediante ensayos de tracción, compresión y fluencia en diversos materiales poliméricos. Sus resultados revelan comportamientos viscoelásticos complejos, con respuestas mecánicas dependientes del tiempo y la temperatura.

Desde una perspectiva microestructural, Strobl (2018) ha documentado mediante técnicas de difracción de rayos X y microscopía electrónica la naturaleza semicristalina de muchos polímeros, con regiones ordenadas (cristalitos) dispersas en una matriz amorfá. Esta morfología afecta directamente propiedades como la rigidez, tenacidad y resistencia química.

Un aspecto crucial para las aplicaciones en ingeniería civil es la durabilidad de los polímeros frente a factores ambientales. Según las investigaciones de Andrade et al. (2021), los principales mecanismos de degradación incluyen:

- Fotodegradación por radiación UV
- Oxidación térmica
- Hidrólisis
- Biodegradación
- Degradación mecánica

La caracterización reológica de los polímeros es fundamental para predecir su comportamiento bajo las condiciones de servicio. Como señalan Dealy y Larson (2020), la viscoelasticidad lineal puede describirse mediante modelos constitutivos como Maxwell generalizado o Kelvin-Voigt, pero las aplicaciones en pavimentos suelen involucrar grandes deformaciones que requieren formulaciones no lineales más complejas.

Con respecto a las tendencias recientes en ciencia de polímeros, Matyjaszewski (2019) destaca los avances en polimerización controlada, que permiten sintetizar materiales con arquitecturas moleculares precisas y distribuciones de peso molecular estrechas. Estas técnicas han facilitado el desarrollo de copolímeros en bloque con propiedades específicas para aplicaciones en modificación de concreto.

2.3.1 Polímeros en el concreto

La incorporación de polímeros en el concreto representa una estrategia efectiva para modificar sus propiedades físicas y mecánicas, aumentando significativamente su desempeño en aplicaciones de pavimentos. Según la clasificación establecida por Ohama (2019), los concretos modificados con polímeros se dividen en tres categorías principales:

1. Concreto Modificado con Polímeros (PCC - Polymer-Modified Concrete): Se obtiene mediante la adición de polímeros o monómeros al concreto fresco durante el mezclado.
2. Concreto Impregnado con Polímeros (PIC - Polymer-Impregnated Concrete): Consiste en concreto endurecido que posteriormente es impregnado con monómeros que polimerizan in situ.
3. Concreto de Polímero (PC - Polymer Concrete): Utiliza una resina polimérica como único aglutinante, sin cemento hidráulico.

Para aplicaciones en pavimentos rígidos, el PCC es la tipología más utilizada debido a su facilidad de producción y mejor relación costo-beneficio, como señalan Fowler y Tia (2020) en su revisión exhaustiva sobre modificación polimérica de concretos para infraestructura vial.

Entre los polímeros más empleados como modificadores del concreto, destacan:

- Látex de Estireno-Butadieno (SBR): Ha sido objeto de extensas investigaciones por parte de Yang et al. (2022), quienes documentan mejoras significativas en la adherencia matriz-agregado, reducción de la permeabilidad y aumento de la resistencia a flexión en proporciones óptimas de 10-15% respecto al peso de cemento.
- Acetato de Polivinilo (PVA): Los estudios de Kim y Robertson (2021) demuestran su efectividad para incrementar la resistencia a la abrasión y reducir la contracción por secado, propiedades particularmente relevantes para la durabilidad de los pavimentos.
- Resinas Acrílicas: Las investigaciones de Chen et al. (2020) sobre concretos modificados con emulsiones acrílicas revelan una mejora sustancial en la resistencia a ciclos de congelamiento-descongelamiento y al ataque químico, atribuible a la formación de películas impermeables en los poros capilares.
- Resinas Epoxi: Zhang y Qian (2023) han documentado que la adición de epoxi en proporciones de 5-8% incrementa significativamente la resistencia a tracción y la tenacidad del concreto, permitiendo reducir el espesor de las losas para pavimentos de alto tráfico.

El mecanismo de modificación polimérica ha sido estudiado en detalle por Beeldens et al. (2019) mediante técnicas avanzadas de microscopía. Sus hallazgos revelan la formación de una co-matriz polimérica entrelazada con los productos de hidratación del cemento, creando un sistema compuesto con propiedades sinérgicas. Esta microestructura se caracteriza por:

1. Formación de películas poliméricas que sellan los poros capilares
2. Encapsulación de los productos de hidratación del cemento
3. Mejora de la adherencia en las interfaces pasta-agregado

4. Reducción de la microfisuración en la zona de transición interfacial

Las propiedades mecánicas de los concretos modificados con polímeros han sido ampliamente investigadas por Giustozzi (2021), quien reporta incrementos de hasta 40% en la resistencia a flexión y 60% en la tenacidad para formulaciones optimizadas con látex SBR. Este comportamiento mejorado se atribuye principalmente al efecto puente de las películas poliméricas, que restringen la propagación de microfisuras bajo carga.

La durabilidad de los pavimentos de concreto modificado con polímeros ha sido documentada por Yun et al. (2020) mediante el seguimiento de secciones experimentales durante 15 años. Sus resultados confirman una reducción significativa en la incidencia de agrietamiento y descascaramiento, así como una mayor resistencia a la penetración de cloruros y carbonatación, en comparación con pavimentos convencionales.

En relación con la resistencia a la fatiga, característica crítica para pavimentos sometidos a cargas cíclicas, Cao et al. (2022) han demostrado mediante ensayos de flexión cíclica que los concretos modificados con 12% de SBR pueden soportar aproximadamente el doble de ciclos antes del fallo que los concretos convencionales, cuando se someten al mismo nivel de tensión.

Un aspecto relevante para la aplicación práctica es la trabajabilidad de las mezclas. Según Batrakov y Kramar (2019), la adición de polímeros modifica significativamente las propiedades reológicas del concreto fresco, generalmente aumentando la cohesión y reduciendo la segregación, lo que favorece la calidad de la superficie de rodadura en pavimentos.

Las investigaciones recientes de Sadrmomtazi et al. (2023) han explorado el uso de nanopolímeros como modificadores, alcanzando mejoras significativas en las propiedades mecánicas con dosificaciones notablemente inferiores a las requeridas

con polímeros convencionales. Sus resultados con nano-látex de estireno-acrílico en proporciones de solo 1-2% evidencian un incremento de 25% en la resistencia a flexión y una reducción de 40% en la permeabilidad al agua.

La sostenibilidad de los concretos modificados con polímeros ha sido abordada por Khater y Abd El Gawaad (2021), quienes han investigado el uso de polímeros reciclados y biopolímeros como alternativas a los productos petroquímicos. Sus estudios con acetato de celulosa y quitosano muestran resultados prometedores, aunque las propiedades mecánicas aún no alcanzan los niveles obtenidos con polímeros sintéticos convencionales.

En el contexto específico de los pavimentos rígidos, Wang y Taylor (2022) han optimizado formulaciones de concreto modificado con SBR para maximizar la resistencia al deslizamiento y reducir el ruido de rodadura. Sus diseños incorporan 8% de látex y agregados seleccionados por su textura superficial, logrando un equilibrio óptimo entre durabilidad y confort para los usuarios de la vía.

Boada y Reyes 2013, estudiaron el comportamiento de una mezcla de concreto con una resistencia a la compresión de MR-3.5MPa para pavimento con la adición de fibras plásticas.

El estudio utilizó tres tipos de fibras plásticas: polipropileno, caucho y bolsas de leche, en porcentajes del 0.5%, 1.0% y 1.5%, los cuales fueron determinados basándose en estudios previos y en los criterios de los autores. El artículo proporciona las cantidades de materiales utilizados en la Tabla 2, que incluye agua, cemento, agregado grueso, agregado fino, EUCON 37, ACCELGUARD HE, y diferentes tipos y porcentajes de fibras.

El estudio llevó a cabo pruebas estáticas y dinámicas en laboratorio. En las pruebas estáticas, se fabricaron tres especímenes cilíndricos para pruebas de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, y tres vigas para pruebas de resistencia a la

flexión, de acuerdo con las normas INVIA y ASTM. La adición de fibras y plastificante a la mezcla resultó en una reducción del 16.67% en la resistencia a la compresión solo para las fibras de polipropileno, mientras que las otras fibras fueron controladas por el plastificante, lo que resultó en un asentamiento de 3". La resistencia a la compresión del concreto sin aditivos de fibra fue mayor que la de las muestras con aditivos a los 14 días.

Las pruebas dinámicas se realizaron con los porcentajes óptimos para cada fibra, que fueron del 1% para las fibras de polipropileno y bolsa de leche, y del 0.7% para las fibras de caucho. Se midieron el módulo dinámico y la resistencia estática para cada tipo de fibra. Los resultados mostraron que el módulo dinámico y la resistencia estática disminuyeron para las muestras con aditivos de fibra, excepto para el 1.5% de bolsas de leche, que fue mayor que la muestra de control. El número de especímenes ($n=3$) para las pruebas también afectó los valores bajos del módulo, lo que resultó en una mayor dispersión y variabilidad de los resultados.

El estudio concluyó que los porcentajes óptimos fueron del 1% para las fibras de polipropileno y bolsa de leche, y del 0.7% para las fibras de caucho, ya que la resistencia a la flexión fue la propiedad con mayor ganancia, la cual prevaleció sobre las otras pruebas y tuvo el mejor comportamiento con respecto a la muestra de control. Las pruebas dinámicas mostraron que las fibras de polipropileno tuvieron una mayor flexibilidad y durabilidad con el tiempo que las otras fibras, y las fibras de bolsas de leche tuvieron el mejor comportamiento en términos de fatiga, proporcionando una mayor admisibilidad en la base del pavimento.

El estudio del comportamiento a la fatiga realizado en el artículo utilizó una mezcla de concreto MR-3.5MPa para pavimento con la adición de fibras plásticas.

El estudio "Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas" analizó el comportamiento de una mezcla

de concreto para pavimento con la adición de fibras plásticas. El estudio utilizó tres tipos de fibras plásticas: polipropileno, bolsas de leche y caucho, en porcentajes del 0.5%, 1.0% y 1.5%.

Los resultados mostraron que el módulo dinámico y la resistencia estática disminuyeron para las muestras con aditivos de fibra, excepto para el 1.5% de bolsas de leche, que fue mayor que la muestra de control. El número de especímenes ($n=3$) para las pruebas también afectó los bajos valores del módulo, lo que resultó en una mayor dispersión y variabilidad de los resultados.

El estudio concluyó que los porcentajes óptimos fueron del 1% para las fibras de polipropileno y bolsas de leche, y del 0.7% para las fibras de caucho, ya que la resistencia a la flexión fue la propiedad con la mayor ganancia, que prevaleció sobre las otras pruebas y tuvo el mejor comportamiento con respecto a la muestra de control. Las pruebas dinámicas mostraron que las fibras de polipropileno tenían una mayor flexibilidad y durabilidad a lo largo del tiempo que las otras fibras, y las fibras de bolsas de leche tuvieron el mejor comportamiento en términos de fatiga, proporcionando una mayor admisibilidad en la base del pavimento.

El estudio destaca la importancia de continuar investigando y desarrollando nuevas tecnologías en el uso de estos materiales, así como promover su uso en el sector de la construcción, con el fin de reducir el impacto en el medio ambiente y promover el uso de materiales sostenibles.

El estudio "Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas" analizó el comportamiento de una mezcla de concreto para pavimento con la adición de fibras plásticas. El estudio utilizó fibras industriales (polipropileno) y fibras reciclables (bolsas de leche y caucho) en porcentajes óptimos de adición a un concreto y aplicó modelos empíricos de fatiga para un posterior análisis y diseño de un pavimento rígido.

Los resultados mostraron que la adición de fibras de polipropileno redujo significativamente el espesor del pavimento, especialmente en tráfico bajo y suelo con módulo elástico por encima de 50 MPa. Las otras adiciones de fibras también proporcionaron una mayor relación beneficio-costo, que fue proporcional a la reducción en el espesor. El estudio concluyó que los porcentajes óptimos fueron del 1% para las fibras de polipropileno y bolsas de leche, y del 0.7% para las fibras de caucho, ya que la resistencia a la flexión fue la propiedad con la mayor ganancia, que prevaleció sobre las otras pruebas y tuvo el mejor comportamiento con respecto a la muestra de control. Las pruebas dinámicas mostraron que las fibras de polipropileno tenían una mayor flexibilidad y durabilidad a lo largo del tiempo que las otras fibras, y las fibras de bolsas de leche tuvieron el mejor comportamiento en términos de fatiga, proporcionando una mayor admisibilidad en la base del pavimento.

El estudio resalta la importancia de continuar investigando y desarrollando nuevas tecnologías en el uso de estos materiales, así como promover su uso en el sector de la construcción, con el fin de reducir el impacto en el medio ambiente y promover el uso de materiales sostenibles.

2.4 MICRO-MATERIALES

Los micro-materiales representan una categoría de materiales cuyas dimensiones características se encuentran en la escala micrométrica (1-100 μm). Su incorporación en materiales de construcción ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas décadas, impulsada por los avances en nanotecnología y ciencia de materiales (Sanchez y Sobolev, 2018).

Según la clasificación propuesta por Shah et al. (2020), los micro-materiales utilizados en la industria de la construcción pueden categorizarse en:

1. Micro-partículas inorgánicas: Incluyen microsílice (humo de sílice), micro-alúmina, micro-carbonato de calcio y microesferas cerámicas.
2. Micro-fibras: Comprenden fibras metálicas, poliméricas, de carbono y naturales con diámetros micrométricos.
3. Micro-cápsulas: Contenedores microscópicos que encapsulan agentes funcionales como aditivos de curado interno, inhibidores de corrosión o materiales de cambio de fase.

La caracterización microestructural de estos materiales ha avanzado significativamente con el desarrollo de técnicas como la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la tomografía computarizada de rayos X. Las investigaciones de Mondal et al. (2021) utilizando estas técnicas han revelado la morfología compleja y la distribución tridimensional de micro-materiales en matrices cementicias, información crucial para comprender sus mecanismos de acción.

Desde una perspectiva físico-química, la elevada relación superficie/volumen de los micro-materiales resulta en una mayor reactividad superficial, como han demostrado Li y Kwan (2022) mediante estudios de adsorción y calorimetría isotérmica. Esta característica explica su pronunciado efecto sobre la cinética de hidratación del cemento y las propiedades reológicas de las mezclas frescas.

Un aspecto fundamental para la aplicación efectiva de micro-materiales es su dispersión homogénea en la matriz. Las investigaciones de Konsta-Gdoutos et al. (2019) demuestran que la aglomeración puede comprometer severamente las propiedades mecánicas del compuesto, siendo necesario optimizar los procedimientos de mezclado y, frecuentemente, utilizar agentes dispersantes específicos.

Con respecto a la sostenibilidad, Juenger y Siddique (2020) han documentado el potencial de micro-materiales derivados de residuos industriales, como cenizas volantes ultrafinas y escorias micronizadas, que permiten valorizar subproductos mientras se mejoran las propiedades del concreto, contribuyendo a la economía circular en la industria de la construcción.

Las tendencias recientes en este campo incluyen el desarrollo de micro-materiales multifuncionales, como reportan Flores-Vivian et al. (2022), quienes han sintetizado micro-partículas de sílice funcionalizadas con compuestos orgánicos para proporcionar simultáneamente actividad puzolánica y propiedades hidrofóbicas al concreto.

2.4.1 Micro-materiales en el concreto

La incorporación de micro-materiales en el concreto representa una estrategia efectiva para modificar sus propiedades en estado fresco y endurecido, optimizando su desempeño para aplicaciones específicas como pavimentos rígidos. De acuerdo con Kawashima et al. (2021), estos materiales pueden actuar mediante diversos mecanismos:

1. Efecto filler: Rellenando los espacios entre partículas de cemento y agregados, aumentando la densidad del empaquetamiento.
2. Actividad puzolánica: Reaccionando con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento para formar productos cementantes adicionales.
3. Núcleos de cristalización: Proporcionando sitios preferenciales para la nucleación y crecimiento de productos de hidratación, acelerando el desarrollo de resistencia.
4. Refuerzo mecánico: Restringiendo la propagación de microfisuras y redistribuyendo tensiones localizadas.

Entre los micro-materiales más estudiados para aplicaciones en concreto, el humo de sílice (microsílice) ha recibido especial atención. Según las investigaciones de Khan y Siddique (2020), este subproducto de la industria metalúrgica, con partículas esféricas de 0.1-1 μm y contenido de SiO_2 superior al 85%, puede incrementar la resistencia a compresión del concreto en hasta un 25% cuando se utiliza en proporciones óptimas (7-10% del peso del cemento).

El mecanismo de acción de la microsílice ha sido estudiado en detalle por Lothenbach et al. (2022) mediante análisis termogravimétrico y difracción de rayos X. Sus resultados confirman una rápida reacción puzolánica que consume hidróxido de calcio y genera silicato cálcico hidratado (C-S-H) adicional, con una relación Ca/Si más baja que el C-S-H formado por la hidratación directa del cemento. Esta modificación de la microestructura resulta en un refinamiento de la red porosa y un incremento significativo de la durabilidad.

Las cenizas volantes ultrafinas, obtenidas mediante molienda o clasificación de cenizas convencionales, representan otra categoría importante de micro-materiales. De acuerdo con Ahmaruzzaman y Gupta (2019), estas partículas con tamaños típicos de 1-10 μm exhiben una actividad puzolánica superior a las cenizas tradicionales debido a su mayor superficie específica, contribuyendo significativamente a la resistencia a largo plazo y a la impermeabilidad del concreto.

Un avance significativo en el campo de los micro-materiales ha sido el desarrollo de metacaolín de alta reactividad, como documentan Rashad y Zeedan (2021). Este material, producido mediante la calcinación controlada de arcillas caoliníticas a temperaturas de 650-800°C y posterior micronización, presenta una estructura amorfa altamente reactiva que combina actividad puzolánica con un efecto filler pronunciado. Sus investigaciones demuestran mejoras sustanciales en la resistencia química del concreto, particularmente frente al ataque por sulfatos y la reacción álcali-agregado.

Las micro-cápsulas representan una innovación más reciente en el campo de los materiales cementantes. Zhang y Wang (2020) han desarrollado micro-cápsulas poliméricas con diámetros de 5-50 μm conteniendo agentes de curado interno, que se liberan progresivamente durante el endurecimiento del concreto. Esta tecnología ha demostrado ser particularmente efectiva para mitigar la retracción autógena en concretos de alto desempeño con bajas relaciones agua/cemento, característica deseable en pavimentos sujetos a intenso tráfico.

Con respecto a las micro-fibras, Mohammed et al. (2021) han investigado el comportamiento de micro-fibras metálicas con longitudes de 6-13 mm y diámetros de 80-200 μm . Sus resultados experimentales muestran incrementos significativos en la tenacidad y resistencia residual post-fisuración del concreto, lo que permite un control más efectivo del agrietamiento y una mayor capacidad para redistribuir tensiones bajo cargas dinámicas.

La adición combinada de diferentes tipos de micro-materiales ha sido explorada por Li et al. (2023), quienes reportan efectos sinérgicos cuando se utilizan simultáneamente microsílice y nano-CaCO₃. La microsílice proporciona actividad puzolánica y efecto filler, mientras que las nanopartículas de carbonato cálcico aceleran la hidratación temprana del cemento, resultando en un desarrollo de resistencia mejorado tanto a corto como a largo plazo.

Para aplicaciones específicas en pavimentos rígidos, Nagrockienė et al. (2019) han optimizado formulaciones con micro-esferas cerámicas huecas (10-100 μm), logrando una reducción significativa de la densidad del concreto sin comprometer sus propiedades mecánicas. Esta modificación reduce el peso propio de la estructura y mejora el aislamiento térmico, característica especialmente relevante para pavimentos en climas extremos.

Un aspecto crítico para la implementación práctica de micro-materiales es su compatibilidad con aditivos químicos convencionales. Las investigaciones de Marchon et al. (2022) demuestran que la elevada superficie específica de los micro-materiales puede adsorber significativamente los aditivos superplastificantes, comprometiendo la fluidez de la mezcla. Sus estudios proporcionan guías para ajustar las dosificaciones de aditivos en función de la naturaleza y contenido de los micro-materiales utilizados.

La durabilidad de los concretos modificados con micro-materiales ha sido documentada por Shekarchi et al. (2020) mediante ensayos acelerados de penetración de cloruros y carbonatación. Sus resultados confirman una reducción de hasta un 80% en los coeficientes de difusión para formulaciones optimizadas con 8% de microsílice y 2% de nano-alúmina, lo que sugiere una vida útil potencialmente más larga para los pavimentos construidos con estos materiales.

En el contexto de la sostenibilidad, Gao et al. (2021) han explorado el uso de micro-materiales derivados de residuos agroindustriales, como ceniza de cáscara de arroz micronizada y ceniza de bagazo de caña, obteniendo resultados comparables a los de microsílice comercial cuando se optimizan los procesos de preparación. Esta línea de investigación representa una contribución importante a la reducción de la huella ambiental de los pavimentos de concreto. La posibilidad de utilizar cenizas volantes, un subproducto de la combustión de carbón, como adición al concreto en la región de Puno y Perú. El uso de cenizas volantes en el concreto puede mejorar su calidad al aumentar su resistencia, durabilidad y trabajabilidad. Además, el uso de cenizas volantes en el concreto puede ayudar a reducir su impacto ambiental al disminuir la cantidad de desechos enviados a los vertederos. El documento también menciona que las cenizas volantes son un subproducto problemático que debe ser eliminado por las centrales eléctricas para evitar la contaminación ambiental. Sugiere que es necesario desarrollar nuevos métodos para reciclar las cenizas

volantes y explorar sus posibles aplicaciones en diversas industrias, incluyendo la construcción, cerámica y catálisis.

Durante esta investigación también se señalan que hay dos tipos principales de cenizas volantes, Clase F y Clase C, que difieren en su composición química y propiedades. Las cenizas volantes Clase F generalmente se producen por la combustión de carbones bituminosos y antracita y tienen un bajo contenido de calcio, mientras que las cenizas volantes Clase C se producen por la combustión de carbones sub-bituminosos y tienen un mayor contenido de calcio y propiedades cementicias. Se discute el uso de cenizas volantes en el concreto y sus efectos en las propiedades del concreto, incluyendo su resistencia a la compresión y contracción. Señala que la cantidad óptima de cenizas volantes para agregar al concreto depende de las propiedades deseadas del concreto y del tipo específico de cenizas volantes utilizadas. El documento también proporciona información sobre la prueba y estandarización del concreto con cenizas volantes.

Se encontró que la cantidad óptima de cenizas volantes para agregar al concreto es del 5% en peso, lo que puede aumentar la resistencia a la compresión del concreto hasta en un 20% (Duran H. & Rivera T., 2007). Otro estudio encontró que el uso de cenizas volantes en el concreto puede reducir su contracción hasta en un 50% (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

En dicha investigación se destacan los posibles beneficios de utilizar cenizas volantes en el concreto, incluyendo una mejor calidad, menor impacto ambiental e incremento en la durabilidad. También se enfatiza la necesidad de desarrollar nuevos métodos para reciclar las cenizas volantes y explorar sus posibles aplicaciones en diversas industrias.

Sánchez et. al 2021, en su investigación ofrecen una revisión sistemática del uso de cenizas y fibras para la elaboración de concreto ecológico. El estudio identificó

el uso de cenizas como cáscara de arroz, bagazo de caña de azúcar, ceniza volante, y fibras como corteza de plátano, aserrín, acero, vidrio, polipropileno, caucho y caucho granulado.

Como resultados se encontraron que las cenizas y las fibras influyen en la resistencia del concreto, que va desde 231 hasta 700 kg/cm². El uso de cenizas y fibras en la elaboración de concreto ecológico es una alternativa viable que permite reducir el impacto en el medio ambiente, así como también reducir el consumo de recursos y energía

Llegaron a la conclusión de que el uso de cenizas y fibras en la elaboración de concreto ecológico es una alternativa prometedora que contribuye a la sostenibilidad del sector de la construcción, reduciendo el impacto en el medio ambiente y promoviendo el uso de materiales sostenibles.

Según el artículo "Cenizas y fibras utilizadas en la elaboración de concreto ecológico: una revisión de la literatura", se menciona que las cenizas y fibras influyen en la resistencia del concreto en un rango que va desde 231 hasta 700 kg/cm². Sin embargo, el artículo no proporciona un porcentaje específico de cenizas y fibras utilizadas en la elaboración del concreto.

2.5 EFECTO DE SOBRECARGA EN LOS PAVIMENTOS

El efecto de sobrecarga en pavimentos rígidos constituye un fenómeno complejo que involucra la respuesta estructural del sistema ante solicitudes que exceden las cargas de diseño. Según las investigaciones de Huang y Wang (2022), estas sobrecargas pueden ser estáticas (vehículos estacionados con peso excesivo), dinámicas (impacto de vehículos en movimiento) o cíclicas (paso repetido de vehículos con cargas superiores a las permitidas).

De acuerdo con el análisis estadístico realizado por Zhang et al. (2021) sobre datos de estaciones de pesaje en movimiento en redes viales de diversos países, aproximadamente un 15-20% de los vehículos pesados circulan con sobrecargas que exceden en más de un 10% los límites legales. Esta situación representa un desafío significativo para la integridad estructural de los pavimentos y justifica la necesidad de desarrollar materiales más resistentes y durables.

El comportamiento mecánico de los pavimentos rígidos bajo sobrecarga ha sido estudiado extensamente mediante métodos analíticos, numéricos y experimentales. Loannides y Khazanovich (2019) han desarrollado modelos basados en la teoría de placas de Westergaard, incorporando condiciones de borde realistas y considerando la no linealidad geométrica para analizar deflexiones y tensiones bajo cargas extremas. Sus resultados demuestran que las tensiones máximas no aumentan proporcionalmente con la carga aplicada debido a la redistribución de esfuerzos en la losa.

La modelización mediante elementos finitos ha permitido avances significativos en la comprensión de este fenómeno. Los trabajos de Davids y Mahoney (2020) utilizando modelos tridimensionales no lineales han revelado la importancia de la interacción entre losas adyacentes y el papel crítico de los dispositivos de transferencia de carga cuando se producen sobrecargas. Sus simulaciones demuestran que las dovelas pueden experimentar plastificación localizada bajo cargas extremas, comprometiendo la capacidad de transferencia en ciclos posteriores.

Desde una perspectiva experimental, Kim et al. (2023) han realizado ensayos a escala real en pistas de prueba sometidas a cargas controladas de hasta 250 kN (aproximadamente 2.5 veces la carga legal estándar). Sus mediciones de deflexiones, deformaciones y progresión de daños proporcionan datos valiosos para

la validación de modelos teóricos y el desarrollo de criterios de diseño más robustos frente a sobrecargas.

Un aspecto crítico relacionado con las sobrecargas es la fatiga del concreto. Según las investigaciones de Shi et al. (2019), el daño por fatiga se acelera exponencialmente cuando las tensiones inducidas superan cierto umbral crítico, típicamente del orden del 55-60% de la resistencia estática a flexión. Sus ensayos en vigas de concreto reforzado con fibras demuestran que la adición de 0.5-1.0% en volumen de macrofibras metálicas puede incrementar la vida a fatiga hasta en un orden de magnitud bajo condiciones de sobrecarga moderada.

La respuesta viscoelástica de la subrasante juega también un papel importante en el comportamiento del pavimento bajo sobrecargas, como demuestran los estudios de Tutumluer y Al-Qadi (2021). Sus investigaciones experimentales revelan que la aplicación de cargas elevadas puede inducir deformaciones permanentes en el suelo de apoyo, resultando en la pérdida parcial de contacto con la losa y la consecuente formación de vacíos que comprometen el soporte uniforme, factor crítico para el desempeño a largo plazo.

Las técnicas avanzadas de instrumentación desarrolladas por Ceylan et al. (2022) han permitido monitorizar en tiempo real la respuesta de pavimentos en servicio sometidos a eventos de sobrecarga. Utilizando galgas extensométricas embebidas, acelerómetros y transductores de presión, han documentado la evolución de tensiones, deflexiones y presiones de poro durante el paso de vehículos con sobrepeso, proporcionando información valiosa para la calibración de modelos predictivos.

Con respecto a las estrategias de mitigación, Bordelon y Roesler (2020) han investigado el uso de refuerzo distribuido mediante fibras sintéticas y metálicas como medio para incrementar la resiliencia del pavimento frente a sobrecargas

ocasionales. Sus resultados demuestran que la incorporación de 4-6 kg/m³ de macrofibras sintéticas puede reducir significativamente la propagación de fisuras y mantener la integridad estructural tras eventos de sobrecarga que causarían daños irreversibles en concretos convencionales.

Los estudios económicos realizados por Prozzi y Hong (2019) cuantifican el impacto financiero de las sobrecargas en la vida útil de los pavimentos. Mediante análisis de ciclo de vida, demuestran que un incremento del 20% en las cargas por eje puede reducir la vida útil del pavimento hasta en un 50%, con un consiguiente aumento en los costos de mantenimiento y rehabilitación que supera ampliamente los beneficios económicos derivados del transporte con sobrepeso.

2.5.1 Deformaciones en los pavimentos rígidos

Las deformaciones en pavimentos rígidos representan una respuesta estructural crítica ante la aplicación de cargas y efectos ambientales, con implicaciones directas para la funcionalidad y durabilidad del sistema. Según la clasificación propuesta por Vandebossche et al. (2020), estas deformaciones pueden categorizarse en:

1. Deformaciones elásticas: Recuperables tras la remoción de la carga, están gobernadas por el módulo de elasticidad del concreto y la configuración estructural del pavimento.
2. Deformaciones viscoelásticas: Parcialmente recuperables, dependen del tiempo de aplicación de la carga y las propiedades reológicas del material.
3. Deformaciones plásticas: Permanentes, ocurren cuando las tensiones aplicadas superan cierto umbral o bajo cargas cíclicas prolongadas.

4. Deformaciones de origen térmico: Causadas por gradientes de temperatura a través del espesor de la losa o por expansión/contracción uniforme debida a cambios estacionales.

Las deformaciones elásticas bajo cargas de tráfico han sido estudiadas extensamente por Darestani et al. (2022) mediante modelización numérica validada con mediciones *in situ*. Sus resultados muestran que la deflexión máxima en pavimentos rígidos bien diseñados raramente excede 0.5 mm bajo cargas estándar por eje, con una recuperación casi completa tras el paso del vehículo. Sin embargo, la repetición de millones de ciclos de carga puede inducir una fatiga microestructural que incrementa progresivamente la componente permanente de la deformación.

Un fenómeno particularmente relevante es el alabeo térmico, documentado en las investigaciones de Nam et al. (2021). Utilizando extensómetros de cuerda vibrante embebidos a diferentes profundidades en lasas experimentales, han cuantificado curvaturas de hasta 0.05 mm/m causadas por gradientes térmicos diurnos de 15°C entre la superficie y la base de la losa. Estas deformaciones impuestas generan tensiones que pueden superar el 40% de la resistencia a flexión del concreto, contribuyendo significativamente al agrietamiento prematuro cuando se combinan con cargas de tráfico.

La instrumentación avanzada desarrollada por Wang y Wang (2023) ha permitido distinguir entre distintos mecanismos de deformación en pavimentos en servicio. Mediante el uso de extensómetros de fibra óptica distribuida, han documentado patrones complejos que incluyen:

- Deflexiones instantáneas bajo cargas móviles
- Recuperación viscoelástica tras el paso de vehículos
- Deformaciones cíclicas diarias por variaciones térmicas

- Deformaciones estacionales por cambios de temperatura y humedad
- Deformaciones permanentes acumulativas a lo largo del tiempo

Un aspecto crítico es la respuesta en las juntas y bordes de las losas, zonas donde se concentran las tensiones y se producen las mayores deformaciones. Las investigaciones experimentales de Rao y Roesler (2019) demuestran que la eficiencia en la transferencia de carga puede deteriorarse progresivamente bajo tráfico intenso, resultando en deformaciones diferenciales que comprometen la calidad de rodadura y aceleran el deterioro estructural del pavimento.

El papel de los dispositivos de transferencia de carga ha sido cuantificado por Khazanovich y Gotlif (2022), quienes mediante análisis paramétricos han establecido correlaciones entre el diámetro y espaciamiento de las dovelas, las propiedades del concreto y la magnitud de las deformaciones en juntas bajo diferentes condiciones de carga. Sus resultados proporcionan criterios de diseño optimizados para minimizar deformaciones diferenciales sin incurrir en costos excesivos.

Las deformaciones permanentes acumulativas, aunque relativamente pequeñas en magnitud absoluta, pueden tener consecuencias significativas para la funcionalidad del pavimento. Según los estudios de Buch y Jahangirnejad (2021), realizados con perfilómetros láser sobre secciones experimentales durante 10 años, estas deformaciones pueden resultar en irregularidades superficiales con longitudes de onda de 3-15 m que afectan negativamente el confort de rodadura y la seguridad a altas velocidades.

El efecto de los materiales constituyentes en las deformaciones ha sido investigado por Tikalsky et al. (2020), quienes han caracterizado concretos con diferentes tipos de agregados y adiciones minerales. Sus resultados demuestran que el coeficiente de expansión térmica del concreto, controlado principalmente por la naturaleza

mineralógica del agregado grueso, influye decisivamente en la magnitud de las deformaciones de origen térmico, con variaciones de hasta un 30% entre formulas con agregados silíceos y calcáreos.

La incorporación de fibras como refuerzo distribuido ha demostrado ser una estrategia efectiva para controlar las deformaciones en pavimentos rígidos. Las investigaciones de Bordelon et al. (2023) con concretos reforzados con diferentes tipos y dosificaciones de fibras revelan una reducción significativa en la apertura de fisuras bajo cargas y un mejor mantenimiento de la transferencia de carga a través de grietas, resultando en menores deflexiones y mayor vida útil.

Las deformaciones diferidas por fluencia (creep) del concreto, aunque menos evidentes que las respuestas inmediatas a cargas, pueden contribuir significativamente a la deformación total a largo plazo. Según los estudios experimentales de Zhang y Li (2020), la componente de fluencia puede representar hasta un 40% de la deformación total tras 5 años bajo tensiones sostenidas equivalentes al 20-30% de la resistencia a compresión, nivel típico en pavimentos con tráfico pesado frecuente.

Desde una perspectiva de diseño, la predicción y control de deformaciones ha evolucionado significativamente con la implementación de métodos mecanicistas-empíricos. Los trabajos de Lytton et al. (2021) han integrado modelos constitutivos avanzados que consideran la viscoelasticidad del concreto y la no linealidad de los materiales de soporte, permitiendo estimaciones más precisas de la evolución de deformaciones a lo largo de la vida útil del pavimento.

Los avances recientes en materiales para pavimentos rígidos han ampliado las posibilidades de control de deformaciones. Wu et al. (2022) han desarrollado concretos con coeficientes de expansión térmica reducidos mediante la incorporación de agregados ligeros saturados que proporcionan curado interno y

compensan parcialmente las contracciones por secado. Esta innovación resulta particularmente efectiva para minimizar el alabeo y las tensiones asociadas en pavimentos de gran superficie.

En el contexto de los pavimentos de concreto reforzado continuamente (CRCP), las investigaciones de Won et al. (2020) han documentado patrones característicos de microfisuración controlada que permiten acomodar las deformaciones impuestas sin comprometer la integridad estructural. Sus mediciones en secciones instrumentadas demuestran aperturas de fisura inferiores a 0.5 mm, con espaciamientos de 1-2 m, cuando se utiliza una cuantía óptima de acero longitudinal (0.6-0.7%).

Para la implementación práctica, Shao et al. (2023) han desarrollado sensores embebidos de bajo costo basados en tecnología MEMS (Sistemas Micro-Electromecánicos) que permiten monitorizar en tiempo real las deformaciones en puntos críticos del pavimento. Esta tecnología facilita la detección temprana de comportamientos anómalos y la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo antes de que las deformaciones evolucionen hacia daños estructurales significativos.

3. METODOLOGÍA

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo con el que se pretende trabajar en esta investigación, se dividió en 6 pasos que a continuación se explicaran detalladamente.



Figura 3.1.- Diagrama de Flujo de la Metodología.

3.1 BÚSQUEDA Y RECOLECCIÓN DE MATERIALES

3.1.1 Agregados pétreos

Se realizará una búsqueda de los materiales disponibles en la zona donde se pretende trabajar el proyecto y su accesibilidad.

La metodología para la selección de los agregados pétreos se basa en las especificaciones establecidas en la norma NMX-C-111-ONNCCE vigente "Industria de la construcción - Agregados para concreto hidráulico - Especificaciones y métodos de ensayo". Se consideran los parámetros fundamentales como la granulometría, forma, textura, contenido de sustancias perjudiciales y propiedades físicas, buscando materiales que cumplan con los requisitos de calidad establecidos por la normativa mexicana para el tipo de concreto a diseñar.

3.1.2 Cemento y agua

Se consideraron diferentes tipos de cemento conforme a la norma NMX-C-414-ONNCCE "Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Especificaciones y métodos de prueba", evaluando las opciones disponibles según los requerimientos del proyecto. Para el agua de mezclado, se establecieron los criterios de selección

basados en la norma NMX-C-122-ONNCCE "Industria de la construcción - Agua para concreto - Especificaciones", priorizando fuentes que cumplieran con los parámetros de calidad requeridos.

3.1.3 Polímero

Se evaluaron diversos aditivos poliméricos modificadores conforme a la norma NMX-C-255-ONNCCE "Industria de la construcción - Aditivos para concreto - Especificaciones y métodos de ensayo". La selección se enfocó en identificar productos que pudieran mejorar las propiedades reológicas del concreto en estado fresco y contribuir a la durabilidad del concreto endurecido, de acuerdo con los requisitos de desempeño establecidos para el proyecto.

3.1.4 Micro-materiales

Se consideraron diversos materiales cementantes suplementarios conforme a las normas mexicanas aplicables, como la NMX-C-146-ONNCCE "Industria de la construcción - Aditivos minerales para concreto - Ceniza volante - Especificaciones y métodos de ensayo" y NMX-C-396-ONNCCE "Industria de la construcción - Aditivos para concreto - Humo de sílice - Especificaciones y métodos de ensayo". Se evaluaron diferentes opciones disponibles con el objetivo de identificar aquellos que pudieran optimizar las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto según los requerimientos específicos del proyecto.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

3.2.1 Agregados pétreos

La caracterización de los agregados pétreos se realizó mediante los siguientes ensayos normalizados:

- Análisis granulométrico según la norma NMX-C-077-ONNCCE, determinando la distribución de tamaños de partículas y su conformidad con los límites establecidos.
- Densidad y absorción de agua conforme a las normas NMX-C-164-ONNCCE para agregado grueso y NMX-C-165-ONNCCE para agregado fino.
- Masa volumétrica suelta, según la norma NMX-C-073-ONNCCE.
- Contenido de humedad de acuerdo con la norma NMX-C-166-ONNCCE.

Los resultados obtenidos verificaron el cumplimiento de los requisitos establecidos en la normativa mexicana para la fabricación de concreto hidráulico de calidad.

3.2.2 Cemento y agua

Para el cemento se realizó la selección de acuerdo a la conformidad según la norma NMX-C-414-ONNCCE, incluyendo:

- Determinación de finura por el método de permeabilidad al aire (Blaine) según NMX-C-056-ONNCCE.
- Tiempos de fraguado mediante la aguja de Vicat de acuerdo con la norma NMX-C-059-ONNCCE.
- Resistencia a la compresión de morteros según NMX-C-061-ONNCCE.
- Densidad del cemento conforme a la norma NMX-C-152-ONNCCE.

El agua utilizada fue seleccionada según los requerimientos de prueba establecidos en la norma NMX-C-122-ONNCCE.

3.2.3 Polímero

Se evaluaron teóricamente diversos aditivos poliméricos modificadores conforme a la norma NMX-C-255-ONNCCE "Industria de la construcción - Aditivos para concreto - Especificaciones y métodos de ensayo". La selección se enfocó en identificar productos que pudieran mejorar las propiedades reológicas del concreto en estado fresco y contribuir a la durabilidad del concreto endurecido, de acuerdo con los requisitos de desempeño establecidos para el proyecto.

3.2.4 Micro-materiales

Los materiales cementantes suplementarios se caracterizan según las normas aplicables:

- Para las adiciones puzolánicas: determinación de finura, densidad, composición química y actividad puzolánica conforme a las normas correspondientes.
- Para otros micro-materiales: análisis de superficie específica, densidad y composición química según las normas aplicables.

Estas propiedades se documentan para su consideración en el diseño de las mezclas de concreto.

3.3 DISEÑO DE MEZCLAS Y PROPORCIONAMIENTOS

La metodología para el diseño de mezclas de concreto se basa en el procedimiento del American Concrete Institute (ACI 211.1) "Práctica estándar para la selección de proporciones para concreto normal, pesado y masivo", adaptada a las condiciones y materiales disponibles en México, considerando además las recomendaciones del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).

El procedimiento general incluye:

1. Selección del revestimiento de acuerdo con el tipo de elemento estructural y las condiciones de colocación.
2. Determinación del tamaño máximo del agregado en función de las dimensiones de los elementos y la separación del refuerzo.
3. Estimación del contenido de agua de mezclado y contenido de aire.
4. Selección de la relación agua/cemento (a/c) con base en los requisitos de resistencia y durabilidad.
5. Cálculo del contenido de cemento.
6. Estimación del contenido de agregado grueso.
7. Cálculo del contenido de agregado fino por el método de volúmenes absolutos.
8. Ajuste por humedad de los agregados.
9. Determinación de las dosificaciones de aditivos y adiciones.

La metodología contempla el diseño de diversas mezclas con diferentes relaciones agua/cemento para evaluar su desempeño y seleccionar la proporción óptima que cumpla con los requisitos especificados.

3.4 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

La metodología para la elaboración de especímenes se fundamenta en los procedimientos establecidos en la norma NMX-C-159-ONNCCE "Industria de la construcción - Concreto - Elaboración y curado de especímenes de ensayo". El proceso general comprende:

1. Mezclado del concreto: Siguiendo los procedimientos establecidos en la norma NMX-C-085-ONNCCE.
2. Fabricación de especímenes: Se contempla la elaboración de especímenes cilíndricos para ensayos de resistencia a compresión, vigas para ensayos de resistencia a flexión y otros especímenes según los requerimientos del proyecto.
3. Compactación: Mediante los métodos establecidos en la norma NMX-C-159-ONNCCE, aplicando el procedimiento adecuado según el tipo de espécimen.
4. Curado: Los especímenes son desmoldados después del tiempo establecido y sometidos a curado estándar conforme a la norma NMX-C-148-ONNCCE, hasta la edad de ensayo correspondiente.

La metodología establece la elaboración de especímenes para ser ensayados a diferentes edades, siguiendo un plan.

3.5 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE ENSAYES

3.5.1 Resistencia a la compresión

Para la determinación de la resistencia a la compresión, la metodología se basa en la norma NMX-C-083-ONNCCE "Industria de la construcción - Concreto - Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes - Método de ensayo". El procedimiento general contempla:

1. Preparación de los especímenes: Los especímenes son retirados de la cámara de curado a las edades de ensayo establecidas y se preparan sus superficies mediante el método más adecuado según las normas aplicables.

2. Equipo de ensayo: Se establece el uso de equipo calibrado de acuerdo con la normativa vigente, con capacidad adecuada para los niveles de resistencia esperados.
3. Procedimiento de ensayo:
 - o Colocación adecuada del espécimen en la máquina de ensayo.
 - o Aplicación de carga conforme a los parámetros establecidos en la norma.
 - o Registro de la carga máxima y cálculo de la resistencia.
 - o Documentación del tipo de falla presentada.
4. Análisis de resultados: La metodología contempla el análisis de los datos obtenidos, incluyendo:
 - o Determinación de resistencias promedio a diferentes edades.
 - o Análisis estadístico básico de los resultados.
 - o Evaluación del desarrollo de resistencia en el tiempo.
5. Verificación de conformidad: Se establecen criterios para evaluar el cumplimiento de los requisitos de resistencia especificados, según los lineamientos de la normativa mexicana.

Este enfoque metodológico permite evaluar de manera objetiva el comportamiento mecánico de las mezclas diseñadas y seleccionar las proporciones que mejor se ajusten a los requerimientos estructurales del proyecto.

3.5.2 Resistencia a la tensión

La metodología para la determinación de la resistencia a la tensión del concreto se fundamenta en la norma NMX-C-163-ONNCCE "Industria de la construcción - Concreto - Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto". El procedimiento general incluye:

Preparación de los especímenes: Los especímenes cilíndricos son retirados de la cámara de curado a las edades de ensayo establecidas y se acondicionan conforme a los requerimientos de la norma.

Equipo de ensayo: Se contempla el uso de una máquina de ensayo calibrada según la normativa vigente, con dispositivos especiales para aplicar la carga a lo largo del diámetro del cilindro.

Procedimiento de ensayo:

- Colocación del espécimen en posición horizontal entre las placas de la máquina.
- Instalación de las tiras de apoyo a lo largo del plano de carga.
- Aplicación de la carga a una velocidad constante dentro del rango especificado por la norma.
- Registro de la carga máxima soportada por el espécimen.
- Cálculo de la resistencia a la tensión por compresión diametral mediante la fórmula establecida en la norma.
- Análisis de resultados: La metodología establece el procesamiento de los datos obtenidos para:

- Determinar la resistencia a tensión promedio a diferentes edades.
- Realizar análisis estadístico básico.
- Establecer relaciones entre la resistencia a tensión y la resistencia a compresión.
- Evaluación de resultados: Se definen criterios para valorar los resultados de resistencia a tensión en función de los requisitos del proyecto y los valores típicos esperados según el tipo de concreto.

Este enfoque metodológico permite evaluar de manera objetiva el comportamiento mecánico de las mezclas diseñadas y seleccionar las proporciones que mejor se ajusten a los requerimientos estructurales del proyecto.

3.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La metodología para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos contempla los siguientes aspectos:

- a) Análisis comparativo de mezclas: Se establece un procedimiento para la comparación sistemática de las diferentes mezclas diseñadas, considerando:
 - Desarrollo de resistencia mecánica a diferentes edades.
 - Relación entre resistencia a compresión y resistencia a tensión.
 - Efecto de la relación agua/cemento sobre las propiedades mecánicas.
 - Influencia de los aditivos y adiciones en el comportamiento del concreto.
- b) Correlaciones y modelos predictivos: La metodología contempla el establecimiento de correlaciones entre:
 - Resistencia a edades tempranas y resistencia a 28 días.

- Relación agua/cemento y resistencia a compresión.
 - Dosificación de materiales y propiedades del concreto.
- c) Análisis estadístico: Se definen los métodos estadísticos aplicables para:
- Determinación de la resistencia característica del concreto.
 - Evaluación de la variabilidad de resultados.
 - Análisis de confiabilidad de los diseños de mezcla.
 - Verificación del cumplimiento de especificaciones.
- d) Optimización de mezclas: Se establece un procedimiento para la selección de la mezcla óptima considerando:
- Cumplimiento de requisitos de resistencia y durabilidad.
 - Eficiencia en el uso de materiales.
 - Comportamiento en estado fresco y facilidad de colocación.
 - Aspectos económicos y de sostenibilidad.
- e) Interpretación normativa: La metodología incorpora los criterios establecidos en la normativa mexicana para:
- Verificación de conformidad con las especificaciones del proyecto.
 - Determinación de la aceptación o rechazo de las mezclas.
 - Evaluación del control de calidad del concreto.
- f) Documentación de resultados: Se define un sistema para la documentación adecuada de:

- Propiedades de los materiales utilizados.
- Diseños de mezclas evaluados.
- Resultados de ensayos y análisis estadísticos.
- Conclusiones y recomendaciones.

El análisis e interpretación sistemática de los resultados permite la selección fundamentada de la mezcla de concreto que mejor se adapte a los requerimientos del proyecto, optimizando el uso de los materiales disponibles y asegurando el cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 SELECCIÓN DE MATERIALES

4.1.1 Agregados pétreos

Para esta investigación se evaluaron dos fuentes de agregados: el banco "La Loma" y la trituradora GAP "La Luz", las ubicaciones de dichos bancos se muestran en la Figura 4.1.1.1., ambas ubicadas en el estado de Querétaro. Tras una revisión de sus características físicas, disponibilidad y accesibilidad, se seleccionó finalmente la trituradora GAP "La Luz", debido a la calidad constante de sus materiales y su capacidad de producción.



Figura 4.1.1.1. Vista general de la trituradora GAP 'La Luz'
Fuente: Elaboración propia

La elección se basó en la Norma NMX-C-111-ONNCCE-2018, que establece los requisitos de calidad para los agregados pétreos utilizados en concreto. Los agregados gruesos y finos seleccionados cumplieron con los criterios de granulometría, forma y limpieza.

4.1.2 Cemento y agua

De los distintos tipos de cemento disponibles en el mercado mexicano conforme a la NMX-C-414-ONNCCE, se seleccionó el cemento CPC 30R Extra de la marca CEMEX en la figura 4.1.2.1, se muestra la imagen comercial del producto. Se tomo en cuenta su alta resistencia inicial, lo cual fue favorable para evaluar el desarrollo temprano de resistencia en las mezclas. Este tipo de cemento es ampliamente utilizado en pavimentos rígidos y elementos estructurales por su versatilidad y desempeño hidráulico.



Figura 4.1.2.1. Imagen Comercial de cemento seleccionado

Fuente: CEMEX

El agua utilizada fue potable, libre de contaminantes y cumpliendo con la NMX-C-122-ONNCCE, lo cual garantiza que no afecte los procesos de hidratación del cemento.

4.1.3 Polímero

El polímero seleccionado fue FibraFest, un aditivo en forma de fibras sintéticas diseñado para el refuerzo del concreto, su imagen comercial la podemos observar

en la figura 4.1.3.1., Su elección se justificó por sus propiedades para controlar el agrietamiento por contracción plástica y mejorar el comportamiento post-fisuración. De acuerdo con la ficha técnica del fabricante, FibraFest contribuye a mejorar la durabilidad y la tenacidad del concreto, características deseables en pavimentos expuestos a ciclos de carga repetitivos.



Figura 4.1.3.1. Micro fibra de polipropileno-Imagen comercial

Fuente: FESTER México

Características:

- Está compuesta por microfibras de polipropileno 100 % virgen, presentadas como multifilamentos dispersos mediante aditivos, lo que les permite distribuirse eficazmente dentro de mezclas de concreto y mortero como refuerzo secundario.
- Cumple con la norma ASTM C-1116, utilizada para fibras en concretos y morteros.
- Disminuye grietas causadas por contracción plástica en estado fresco y por temperatura en el estado endurecido.
- Reducción de permeabilidad, sangrado y segregación.
- Aumento de resistencia al impacto.

- Es fácil de incorporar, ya sea en obra o en planta, y no genera “pelusa” en superficies acabadas.
- Disponible en bolsas de 100 g o 600 g. 100 g equivale aproximadamente a un saco de cemento de 50 kg. 600 g alcanzan para 1 m³ de concreto.

4.1.4 Micro-materiales

Para mejorar la compacidad de la matriz cementante, se utilizó como micro-material el basalto triturado proveniente del mismo banco de agregados. Este material se trabajó para obtener partículas que pasaran completamente por la malla #200 (0.075 mm), empleando el equipo de desgaste de Los Ángeles como método de reducción granulométrica, en la figura 4.1.4.1. se muestra el resultado obtenido y el equipo utilizado.



Figura 4.1.4.1. Imagen del micro-material antes y después del triturado en la máquina de Desgaste de los Ángeles.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

4.1.5.1 Agregados pétreos

Se realizaron ensayos de caracterización conforme a la NMX-C-111-ONNCCE-2018, incluyendo granulometría, peso específico, absorción y contenido de humedad.

Tabla 4.1.5.1.1. Granulometría de agregados pétreos (Arena) M-MMP-2-02-020/18

Fuente: Elaboración propia

| Malla | | Retenido (g) | % Retenido | % Acumulado | % Pasa | Lim % Pasa | |
|---------|---------|-----------------|------------|-----------------------------------|--------|------------|-------|
| mm | in | Obtenido | | | | Inf | Sup |
| 9.50 | 3/8" | 0.0 | 0 | 0 | 100 | 100.0 | 100.0 |
| 4.75 | No.4 | 68.8 | 3 | 3 | 97 | 95 | 100 |
| 2.36 | No.8 | 430.8 | 17 | 20 | 80 | 80 | 100 |
| 1.18 | No.16 | 507.2 | 21 | 41 | 59 | 50 | 85 |
| 0.6 | No. 30 | 484.3 | 20 | 60 | 40 | 25 | 60 |
| 0.300 | No. 50 | 486.6 | 20 | 80 | 20 | 10 | 30 |
| 0.150 | No. 100 | 324.3 | 13 | 93 | 7 | 2 | 10 |
| charola | | 169.2 | 7 | M. F. OBTENIDO (entre 2.3 y 3.10) | | | |
| Suma: | | 2471.2 | 100 | 2.97 | | | |

La figura 4.2.1.1. muestra la curva granulométrica de una arena, donde se grafica el porcentaje retenido acumulado (tabla 4.2.1.1.) contra el tamaño de partícula expresado en mallas (desde 3/8" hasta No. 100). Su curva está bien distribuida entre los límites, lo que sugiere una granulometría continua y adecuada, sin saltos abruptos, lo cual es favorable para una buena trabajabilidad, la arena no es excesivamente fina ni demasiado gruesa, tiene una buena distribución de tamaños que favorecerá una menor demanda de agua y es apta para usarse como agregado fino en mezclas de concreto, lo que indica que cumple con los requisitos de gradación.

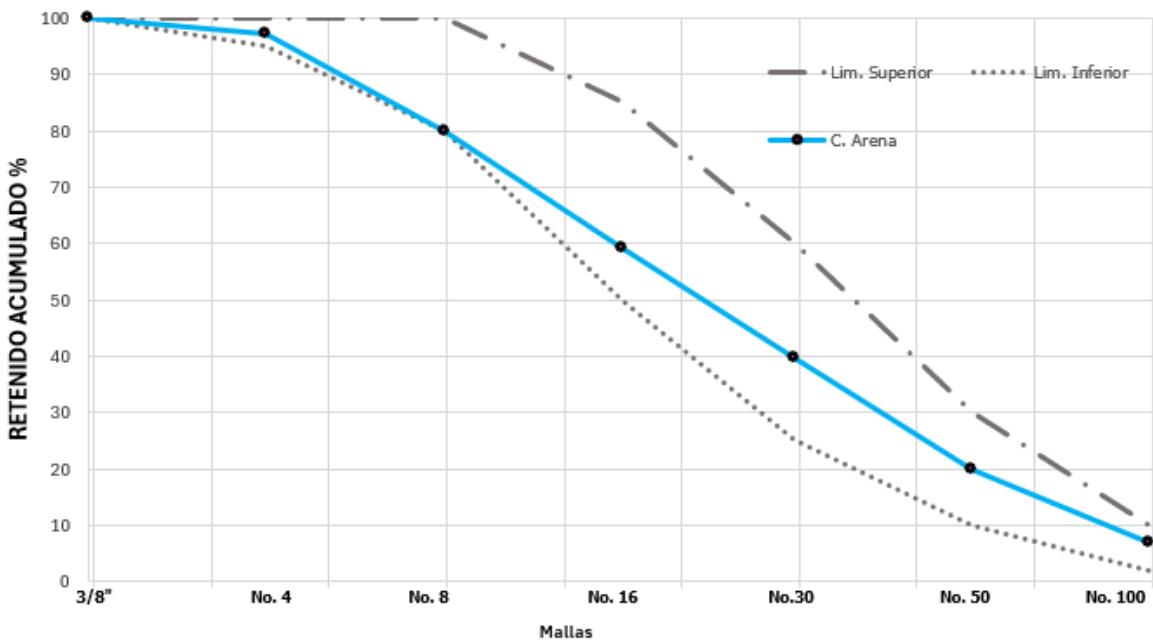


Figura 4.2.1.1. CURVA GRANULOMÉTRICA (Arena)
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2.1.2. Granulometría de agregados pétreos (Grava) M-MMP-2-02-020/18

Fuente: Elaboración propia

| Malla | | Retenido (g) | % Retenido | % Acumulado | % Pasa | Lim % Pasa | |
|------------|--------|--------------|------------|-------------|--------|------------|-----|
| mm | in | Obtenido | | | | Inf | Sup |
| 37.50 | 1 1/2" | 0.0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 25.00 | 1" | 179.3 | 3 | 3 | 97 | 90 | 100 |
| 19.00 | 3/4" | 3113.2 | 46 | 49 | 51 | 20 | 55 |
| 12.50 | 1/2" | 2966.9 | 44 | 93 | 7 | 0 | 10 |
| 9.50 | 3/8" | 341.8 | 5 | 99 | 1 | 0 | 5 |
| 4.75 | No.4 | 93.7 | 1 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Pasa No. 8 | | 0.9 | 0 | | | | |
| Suma: | | 6695.8 | 100 | | | | |

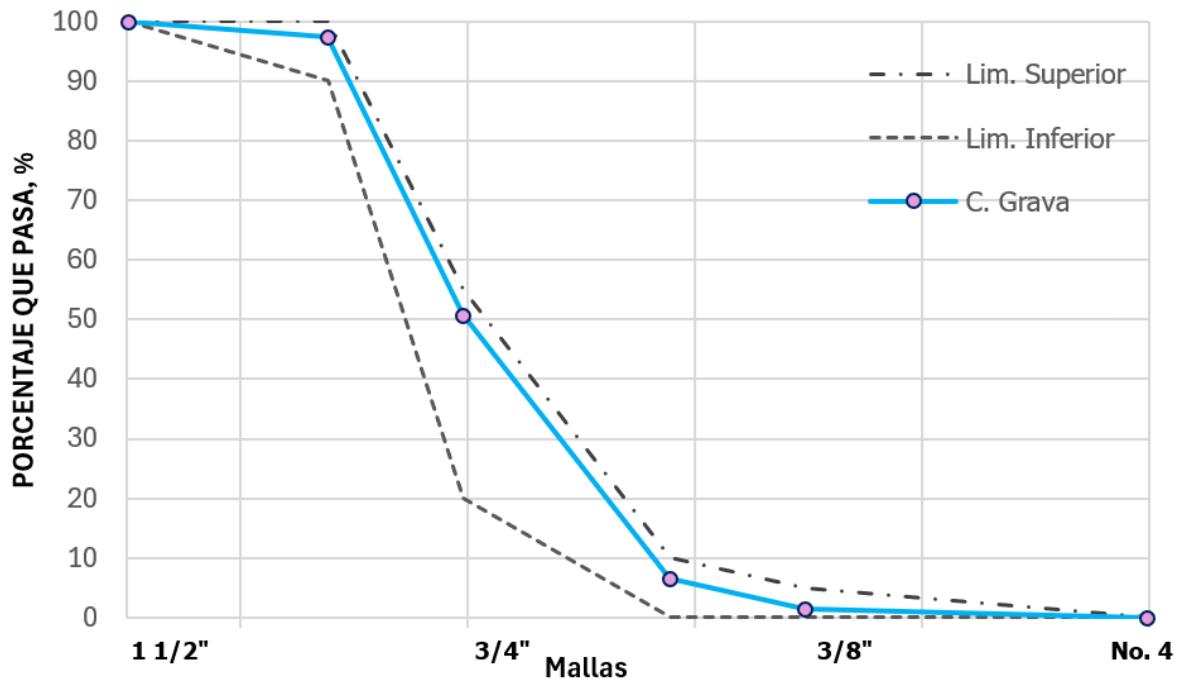


Figura 4.2.1.2. CURVA GRANULOMÉTRICA (Grava)

Fuente: Elaboración propia

Esta figura 4.2.1.2 presenta la curva granulométrica del agregado grueso (grava), donde se muestra el porcentaje que pasa (%) en función del tamaño de partícula (mallas desde $1 \frac{1}{2}$ " hasta No. 4), comparada con los límites superior e inferior establecidos en la normativa utilizada, dichos porcentajes se muestran en la tabla 4.2.1.2. La grava representada por la curva azul (C. Grava) se encuentra dentro de los límites granulométricos especificados, lo que indica que es un agregado bien gradado y apto para su uso en concreto estructural.

La curva está contenida entre los límites normativos, sin desviaciones abruptas, la gradación es continua, sin huecos significativos, lo que favorece una mejor compactación.

La forma de la curva sugiere que se trata de un agregado triturado, posiblemente bien graduado (no uniforme).

4.2 DISEÑO DE LA MEZCLA

El diseño de la mezcla de concreto se realizó con base en el método propuesto **por el American Concrete Institute (ACI)**, adoptado en México mediante la norma **NMX-C-155-ONNCCE-2018**, considerando como resistencia objetivo una **f'c de 28 MPa** a los 28 días. Esta resistencia fue seleccionada como base de referencia para evaluar el efecto de las modificaciones por adición de polímero y reemplazo parcial de cemento con micro-materiales.

El procedimiento de diseño incluyó los siguientes pasos:

1. Selección del revestimiento de acuerdo con el tipo de elemento estructural y las condiciones de colocación.
2. Determinación del tamaño máximo del agregado en función de las dimensiones de los elementos y la separación del refuerzo.
3. Estimación del contenido de agua de mezclado y contenido de aire.
4. Selección de la relación agua/cemento (a/c) con base en los requisitos de resistencia y durabilidad.
5. Cálculo del contenido de cemento.
6. Estimación del contenido de agregado grueso.
7. Cálculo del contenido de agregado fino por el método de volúmenes absolutos.
8. Ajuste por humedad de los agregados.

9. Determinación de las dosificaciones de aditivos y adiciones.

Tabla 4.3.1. Propiedades físicas de los agregados
Fuente: Elaboración propia

| | FINO | GRUESO |
|--|-------------|---------------|
| Densidad aparente (kg/m3) | 2707 | 2665 |
| Peso unitario seco compactado (kg/m3) | 1710 | 1506 |
| Humedad natural (%) | 1 | 1 |
| Absorción (%) | 2 | 1.87 |
| Módulo de finura | 2.97 | - |
| Tamaño nominal máximo (mm) | - | 19 |

Tabla 4.3.2. Datos Generales del diseño

Fuente: Elaboración propia

| Tipo de construcción | Pavimento | |
|---------------------------------|------------------|--------|
| Resistencia del concreto | 28 | Mpa |
| Peso Específico del agua | 1000 | kg/cm3 |

Tabla 4.3.3. Datos Generales del Cemento

Fuente: Elaboración propia

| Tipo | CPC 30R | |
|------------------------|----------------|-------|
| Peso por bulto | 25 | Kg |
| Peso específico | 3150 | kg/m3 |

Se diseñaron 5 mezclas con diferentes relaciones agua/cemento (a/c): para evaluar su desempeño y seleccionar la proporción óptima, en la tabla 4.3.4., se presenta un resumen de los componentes de las mezclas:

- Mezcla 1 – Referencia: Conformada únicamente por los materiales tradicionales (cemento CPC 30R Extra, agregados y agua) sin adiciones ni reemplazos.
- Mezcla 2 – Referencia + Polímero: Misma dosificación que la mezcla 1, pero con la incorporación del polímero FibraFest como refuerzo estructural.

- Mezcla 3 – Relleno del 25% de cemento: Con la misma base que mezcla 2, pero sustituyendo el 25% del contenido de cemento por filler de basalto triturado, más la adición del polímero.
- Mezcla 4 – Relleno del 30% de cemento: Igual que la anterior, con 30% de reemplazo del cemento.
- Mezcla 5 – Relleno del 35% de cemento: Igual que la anterior, con 35% de reemplazo del cemento. Estas proporciones permitieron estudiar el comportamiento del concreto con distintos grados de relleno de cemento y la influencia del polímero como refuerzo.

Tabla 4.3.4. Composición en % de cada tipo mezcla

Fuente: Elaboración propia

| TIPO DE MEZCLA | COMPOSICIÓN | | | | | | TOTAL (%) |
|----------------|-------------|-----------|----------------|----------|----------------------|--------------|-----------|
| | CEMENTO (%) | ARENA (%) | GRAVA 3/4" (%) | AGUA (%) | FILLER BASÁLTICO (%) | POLIMERO (%) | |
| Referencia | 16.7 | 32.8 | 43.5 | 7.0 | --- | --- | 100.0 |
| Referencia 2 | 16.7 | 32.8 | 43.5 | 7.0 | --- | 0.033 | 100.0 |
| Relleno 25% | 12.5 | 32.8 | 43.5 | 7.0 | 4.2 | 0.025 | 100.0 |
| Relleno 30% | 11.7 | 32.8 | 43.5 | 7.0 | 5.0 | 0.023 | 100.0 |
| Relleno 35% | 10.8 | 32.8 | 43.5 | 7.0 | 5.8 | 0.022 | 100.0 |

Se seleccionaron estos porcentajes (25, 30 y 35) principalmente por los trabajos ya realizados, diversos investigadores se centraron en un 5% hasta un 25 %, dichos porcentajes se pueden observar en la tabla 4.5.1., por lo que se tomó la decisión de aumentar los %, para lograr una mayor explotación al filler como un relleno cementante.

La relación a/c fue la misma para cada mezcla, manteniéndose constante el volumen total de pasta. Se procuró que todas las mezclas tuvieran una consistencia similar, evaluada mediante el ensayo de revenimiento conforme a la NMX-C-156-ONNCCE.

El propósito principal fue observar el impacto del polímero y del relleno progresivo de cemento con micro-materiales sobre las propiedades mecánicas a distintas edades de curado (3, 7, 14, 28 y 90 días), lo que permite evaluar la evolución en el desarrollo de la resistencia a compresión y proyectar su comportamiento a largo plazo.

4.3 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

Se fabricaron cilindros de concreto de 10x20 cm conforme a la NMX-C-123-ONNCCE para evaluar la resistencia a la compresión. Cada mezcla fue curada en cinco diferentes edades: **3, 7, 14, 28 y 90** días.

La elaboración de especímenes se realizó con el control adecuado en la mezcla, colocación en moldes, compactación por vibración y curado bajo condiciones estándar, los materiales utilizados los podemos observar en la figura 4.3.1.

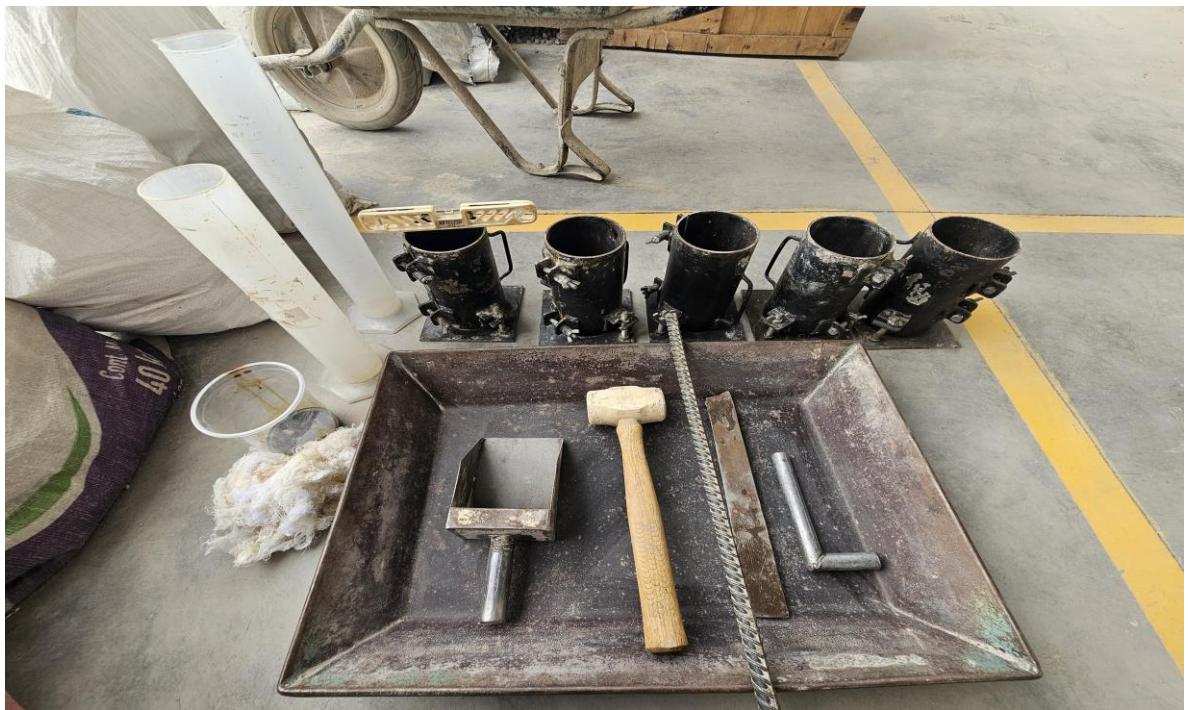


Figura 4.3.1. Materiales utilizados para la elaboración de los cilindros

Fuente: Elaboración propia

La elaboración de los especímenes se llevó a cabo en condiciones controladas dentro del laboratorio de materiales, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma NMX-C-123-ONNCCE-2018, que establece el procedimiento para la fabricación (Figura 4.3.3.) y curado de especímenes cilíndricos de concreto.

Para cada una de las cinco mezclas diseñadas, se fabricaron especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura (10x20 cm). Esta dimensión fue seleccionada por ser una medida estándar que permite obtener resultados confiables en el ensayo de compresión, además de facilitar el manejo y curado de los mismos.

Por cada mezcla y edad de curado se prepararon al menos tres especímenes, lo que garantiza una base estadística mínima para el análisis de los resultados. Las edades de curado seleccionadas fueron:

- 3 días: para evaluar el desarrollo inicial de la resistencia, relevante en obras donde se requiere apertura temprana al tránsito o desencofrado rápido.
- 7 días: etapa de fraguado medio donde ya se alcanza entre 65-75% de la resistencia final en mezclas convencionales.
- 14 días: seguimiento de la curva de ganancia de resistencia.
- 28 días: valor normativo de referencia para evaluar el cumplimiento de la resistencia especificada.
- 90 días: para observar el comportamiento a largo plazo y determinar el efecto de los micro-materiales en la resistencia final.

La compactación del concreto en los moldes se realizó en tres capas, cada una sometida a 25 golpes con varilla metálica de 16 mm de diámetro conforme a la NMX-

C-123. Posteriormente, los cilindros fueron cubiertos con plástico para evitar evaporación y almacenados en condiciones de laboratorio durante 24 horas.

Después del desencofrado, los especímenes fueron curados por inmersión en agua a temperatura controlada ($20 \pm 2 ^\circ\text{C}$) hasta la fecha de ensayo correspondiente. Esta práctica es fundamental para asegurar un adecuado proceso de hidratación del cemento y garantizar la validez de los resultados.



Figura 4.3.2. Pesaje de componentes para los diferentes tipos de mezclas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.3.5. Modelo experimental con el número de especímenes por mezcla y edad.

Fuente: Elaboración propia

| Días de curado / # de Especímenes | Mezclas | | | | | Total |
|-----------------------------------|------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| | Referencia | Referencia 2 | Relleno 25% | Relleno 30% | Relleno 35% | |
| 90 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 50 |
| 28 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 50 |
| 14 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 50 |
| 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 50 |
| 3 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 50 |
| TOTAL | | | | | | 250 |



Figura 4.3.3. Proceso de mezcla de los materiales con el polímero FIBRAFEST.

Fuente: Elaboración propia

Para garantizar una distribución homogénea de las fibras sintéticas FibraFest dentro de la mezcla de concreto, se siguió un procedimiento controlado de incorporación y mezclado. Las fibras se añadieron como último paso, se mezclaron primeramente los agregados, cemento, (filler basáltico) y el agua, lo que favoreció su dispersión inicial y evitó la formación de aglomerados. Posteriormente, se continuó con el mezclado por un tiempo adicional de 3 a 5 minutos, asegurando que los filamentos quedaran uniformemente distribuidos en toda la matriz cementicia. La verificación visual durante el mezclado confirmó la ausencia de acumulaciones de fibras y la presencia de una distribución uniforme, condición necesaria para que el refuerzo actúe de manera efectiva en el control de fisuración y el aumento de la tenacidad del material.

4.4 PROPIEDADES MECÁNICAS

4.4.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se determinó mediante el ensayo de compresión axial en especímenes cilíndricos de 10x20 cm conforme a la norma NMX-C-083-ONNCCE-2018. Las pruebas se realizaron en una prensa hidráulica calibrada, aplicando la carga a una velocidad constante hasta la falla del espécimen.

Se ensayaron cinco cilindros por cada mezcla y edad de curado (3, 7, 14, 28 y 90 días), calculando el valor promedio y la desviación estándar para cada conjunto de datos. Esta metodología permitió observar la evolución del desarrollo de resistencia en función del tiempo y el efecto de los materiales modificados en comparación con la mezcla de referencia.

Los resultados obtenidos muestran una clara influencia del reemplazo parcial de cemento por filler de basalto, así como la participación del polímero FibraFest en el desarrollo temprano y tardío de la resistencia. Se espera que las gráficas de tendencia y tablas que se presentan a continuación evidencien el comportamiento progresivo de cada mezcla frente a la resistencia objetivo (28 MPa a los 28 días).

Tabla 4.4.1.1. Resultados de resistencia a compresión (MPa) por mezcla y edad.

Fuente: Elaboración propia

| Especimen / Prom. Resistencia a la Compresión (Mpa) | 3 DIAS DE CURADO | 7 DIAS DE CURADO | 14 DIAS DE CURADO | 28 DIAS DE CURADO | 90 DIAS DE CURADO |
|---|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Referencia | 16.32 | 21.12 | 23.64 | 28.53 | 30.93 |
| Referencia 2 | 18.35 | 22.14 | 25.32 | 30.88 | 33.41 |
| Relleno 25% | 14.30 | 18.09 | 20.08 | 24.59 | 27.87 |
| Relleno 30% | 13.16 | 16.34 | 19.22 | 23.14 | 27.13 |
| Relleno 35% | 12.48 | 15.57 | 18.10 | 21.20 | 26.23 |

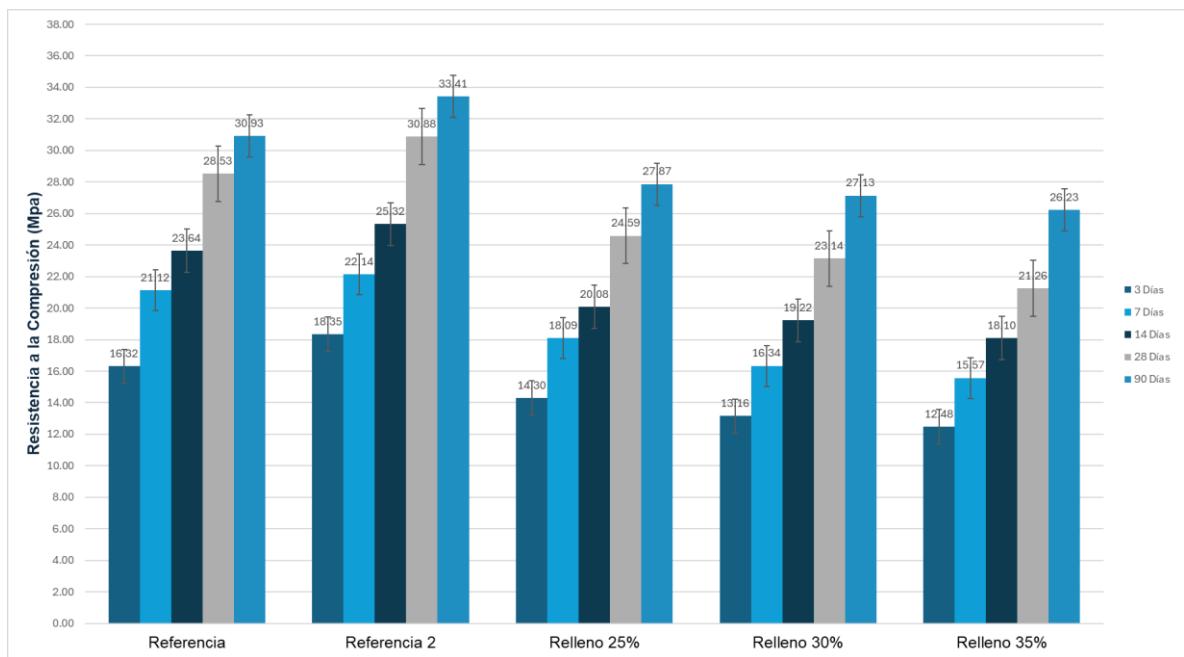


Figura 4.4.1.1. Gráfica comparativa de la Resistencia a la Compresión vs. Días de Curado.

Fuente: Elaboración propia

De la figura 4.4.1.1., podemos obtener las siguientes conclusiones parciales:

Referencia 1: Buen comportamiento; 30.93 MPa a 90 días.

Referencia 2: Mejor rendimiento general; 33.41 MPa a 90 días.

Relleno 25%: Resistencia aceptable; 27.87 MPa a 90 días.

Relleno 30%: Se acerca mucho al 25% en edad final; 27.13 MPa a 90 días.

Relleno 35%: Afecta negativamente; 26.23 MPa a 90 días.

4.4.2 Resistencia a la tensión

La resistencia a la tensión indirecta se determinó mediante el ensayo brasileño, según lo establecido en la norma NMX-C-191-ONNCCE-2018, que consiste en aplicar una carga diametral al cilindro hasta su rotura. Esta prueba permite estimar la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tracción, que, aunque menores que los de compresión, son determinantes en el comportamiento estructural y en la fisuración del material.

Se utilizó un procedimiento similar al de compresión, evaluando cinco especímenes por mezcla a los 28 y 90 días de curado, ya que estas edades son más representativas para la evaluación del desempeño a tracción. El objetivo fue determinar si el uso del FibraFest y la incorporación de micro-rellenos afectaban positiva o negativamente la resistencia a tracción del concreto.

Los resultados obtenidos se expresan en megapascales (MPa) y se comparan entre sí para identificar patrones de mejora o pérdida de desempeño en relación con la mezcla de referencia.

Tabla 4.4.2.1. Resultados de resistencia a tensión (MPa) por mezcla y edad.

Fuente: Elaboración propia

| Especimen / Resistencia a la Tensión Diametal (Mpa) | 3 DIAS DE CURADO | 7 DIAS DE CURADO | 14 DIAS DE CURADO | 28 DIAS DE CURADO | 90 DIAS DE CURADO |
|---|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Referencia | 1.52 | 2.23 | 2.45 | 3.56 | 3.66 |
| Referencia 2 | 1.62 | 2.34 | 2.58 | 3.72 | 3.78 |
| Relleno 25% | 1.39 | 1.81 | 1.86 | 2.44 | 3.55 |
| Relleno 30% | 1.36 | 1.75 | 1.84 | 2.33 | 3.52 |
| Relleno 35% | 1.37 | 1.44 | 1.75 | 2.18 | 3.47 |

De la figura 4.4.2.1., podemos obtener las siguientes conclusiones parciales:

Referencia: Desarrollo estable; 3.66 MPa a 90 días.

Referencia 2: Crecimiento constante; 3.78 MPa a 90 días.

Relleno 25%: Mejor desempeño; 3.55 MPa a 90 días.

Relleno 30%: Resistencia final ligeramente menor (3.52 MPa).

Relleno 35%: Lenta ganancia inicial; buen crecimiento a 90 días (3.47 MPa)

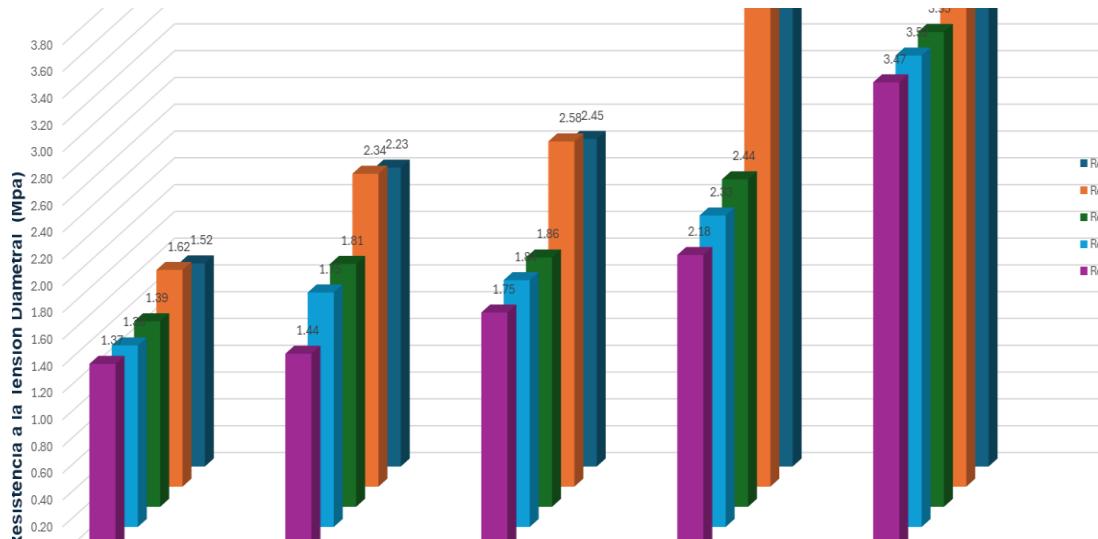


Figura 4.4.2.1. Gráfica comparativa de la Resistencia a la Tensión vs. Días de Curado.

Fuente: Elaboración propia

4.5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados experimentales obtenidos permiten establecer un análisis integral del comportamiento mecánico del concreto modificado. En primer lugar, se observa que la Mezcla 2, que incluye únicamente el polímero FibraFest, presentó un incremento moderado en la resistencia a compresión a edades tempranas (3 y 7 días), lo cual sugiere una posible aceleración del proceso de hidratación o una mejora en la microestructura del concreto debido a la acción de refuerzo del polímero.

En contraste, las mezclas con relleno parcial de cemento (Mezclas 3, 4 y 5) mostraron una reducción inicial de la resistencia a edades cortas (3 y 7 días), atribuible a la menor cantidad de cemento disponible para la hidratación en etapas

tempranas. Sin embargo, a partir de los 28 días, especialmente en la Mezcla 3 (con 25% de relleno), se observa una recuperación progresiva de la resistencia, alcanzando valores cercanos o incluso superiores a la mezcla de referencia en algunos casos. Esto indica que el filler de basalto comienza a participar activamente en el proceso de compactación microestructural y posiblemente en reacciones puzolánicas tardías.

En el caso de la resistencia a tracción, las mezclas modificadas con polímero y filler presentaron un comportamiento favorable, ya que el polímero parece actuar como un puente de transferencia de tensiones, reduciendo la propagación de microfisuras. Particularmente, la mezcla 2 y la mezcla 3 mostraron los mayores valores de resistencia a tracción indirecta, lo cual sugiere una sinergia positiva entre el polímero y el filler en términos de ductilidad y cohesión del concreto.

En general, los resultados sugieren que el uso combinado de micro-materiales como relleno (basalto triturado) y polímeros sintéticos (FibraFest) puede mejorar el comportamiento mecánico del concreto, siempre que se mantenga un equilibrio adecuado en las proporciones. El relleno del cemento en un 25% representa un valor óptimo en esta investigación, ya que permite reducir el contenido de clínker y, por lo tanto, la huella de carbono del material, sin comprometer significativamente su desempeño estructural.

La tabla 4.5.1. muestra una comparación entre los resultados obtenidos en la investigación actual que utiliza **filler de basalto como material de relleno**, y diversos estudios previos que emplean materiales alternativos como ceniza volante, escoria, polvo de piedra caliza, humo de sílice, entre otros. Se analizan los porcentajes de relleno de cemento, la resistencia a compresión y tensión a 28 días, así como los comentarios comparativos sobre el desempeño de cada material.

Tabla 4.5.1 Desempeño del Filler de Basalto frente a Otros Materiales de relleno en concretos

Fuente: Elaboración propia

| Estudio / Mezcla | Material | % Sustitución/Relleno | Resistencia a Compresión (28 días) | Resistencia a Tensión (28 días) | Comentario Comparativo |
|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---|
| Resultados de la investigación actual | Filler de basalto | 25% | 80–84% | >90% | Buen comportamiento general. Similar a ceniza volante y polvo de basalto. |
| | | 30% | 74–78% | >90% | Ligera caída en compresión, pero tensión se mantiene. |
| | | 35% | 70–73% | >90% | Disminución clara en compresión. Tensión aún aceptable. |
| Malhotra y Mehta (2005) | Ceniza volante clase F | 25–35% | 80–85% | 85–90% | Similar comportamiento a 25%. |
| Siddique (2004) | Ceniza volante clase F | 40–50% | 70–75% | — | Menor resistencia inicial, mejora a largo plazo por puzolanidad. |
| Özbay et al. (2016) | Escoria de alto horno | 30–50% | 85–95% | 90–100% | Mejor desempeño global que el filler basáltico. |
| Bonavetti et al. (2003) | Polvo de piedra caliza | 10–20% | 90–95% | — | Mejor retención con sustituciones menores. |
| Uysal y Yilmaz (2011) | Polvo de basalto | 15–25% | 82–88% | 88–92% | Resultados similares a la mezcla con 25–30%. |
| Binici et al. (2008) | Polvo de basalto | 10–30% | 85–90% (28 días) 90–95% (90 días) | — | La mezcla presenta menor ganancia a largo plazo. |
| Paiva et al. (2012) | Metacaolin | 10–20% | 100–110% | 105–115% | Mucho mejor que el filler basáltico, gracias a su alta puzolanidad. |
| Mazloom et al. (2004) | Humo de sílice | 5–15% | 110–125% | — | Claramente superior por su finura y reactividad. |

El filler de basalto mostró un comportamiento aceptable hasta el 25% de relleno, manteniendo más del 80% de la resistencia a compresión y >98% en tensión, comparable con ceniza volante y polvo de basalto.

Al aumentar el relleno al 30% y 35%, se observó una disminución progresiva en la resistencia a compresión (74–78% y 70–73%, respectivamente), aunque la resistencia a tensión se mantuvo elevada (>98%), lo que indica una posible mejora en ductilidad.

Materiales como escoria de alto horno, metacaolín y humo de sílice superan significativamente al filler de basalto en términos de resistencia, debido a su alta reactividad puzolánica.

A pesar de que el filler de basalto no alcanza el nivel de desempeño de materiales como el humo de sílice o metacaolín, representa una opción viable hasta el 25% de relleno por su disponibilidad local y costo reducido.

Esta comparación destaca la importancia de seleccionar el material de reemplazo considerando no solo la resistencia mecánica, sino también su impacto económico, ambiental y disponibilidad regional.

5. CONCLUSIONES

Viabilidad técnica confirmada: El filler basáltico demuestra ser un relleno técnicamente viable para el cemento en porcentajes de hasta 35%, aunque con una reducción gradual de resistencia a compresión proporcional al porcentaje de relleno.

Balance óptimo: El relleno del 25% de cemento por filler basáltico ofrece el mejor equilibrio entre sostenibilidad y desempeño mecánico, manteniendo aproximadamente el 84% de la resistencia a compresión y el 94% de la resistencia a tensión diametral a los 90 días.

Comportamiento diferenciado entre resistencias: El impacto en la resistencia a tensión diametral es notablemente menor que en la resistencia a compresión, lo que sugiere que el filler basáltico podría tener efectos beneficiosos en la microestructura del concreto, particularmente en la zona de transición interfacial.

Desarrollo de resistencia a largo plazo: El concreto con filler basáltico continúa ganando resistencia hasta los 90 días, pero a un ritmo ligeramente inferior a las mezclas de referencia, indicando una hidratación más lenta y posiblemente una actividad puzolánica limitada.

Potencial ecológico y económico: La posibilidad de reducir hasta un 35% del contenido de cemento mientras se mantienen propiedades mecánicas aceptables representa una oportunidad significativa para reducir la huella de carbono y los costos de producción del concreto.

De acuerdo con los resultados experimentales, la incorporación de FibraFest en la mezcla de concreto generó un incremento moderado en la resistencia a la compresión respecto a la mezcla de referencia; sin embargo, el módulo de rotura evidenció un aumento más significativo, lo que indica una mayor capacidad de absorción de esfuerzos de tracción indirecta. Las gráficas comparativas muestran que, tras el agrietamiento inicial, el concreto con fibras conservó una mayor capacidad portante y presentó una menor apertura de fisuras, contribuyendo así a una mayor tenacidad y ductilidad. Este comportamiento se traduce en un mejor desempeño ante cargas repetidas y condiciones de servicio, incrementando potencialmente la durabilidad del pavimento rígido.

6. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con los análisis realizados durante la estancia en la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, estos fueron únicamente teóricos, dado que el país, carece de Basalto, junto con el grupo de Procesos Fisicoquímicos de dicha Universidad se llegaron a conclusiones que de acuerdo a la composición química del basalto funcione, debería de añadirse un activador químico para que este funcione como un cementante, por eso se recomiendan las siguientes líneas de investigación.

- Investigación en Optimización de Finura y Modelado Predictivo**

Propuesta de investigación: Desarrollar un modelo predictivo que correlacione la finura del filler basáltico con sus propiedades mecánicas. Se propone investigar el rango óptimo de finura (200-800 m²/kg) utilizando diferentes técnicas de molienda (bolas, rodillos, etc.) y evaluar su impacto en la reactividad puzolánica a través de calorimetría isotérmica y análisis de imagen.

Líneas de investigación específicas:

- Establecer correlaciones entre distribución granulométrica y cinética de hidratación
- Investigar el efecto de la forma de partícula (factor de forma, rugosidad superficial) en la reactividad
- Desarrollar algoritmos de optimización multiobjetivo que balanceen costo energético de molienda vs. beneficios en propiedades mecánicas
- Evaluar técnicas de clasificación neumática para obtener fracciones de finura específicas y estudiar sus efectos sinérgicos

Desarrollo de Sistemas de Activación Inteligente

Propuesta de investigación: Crear sistemas de activación química adaptativa que respondan a las condiciones ambientales y de curado del concreto. Se propone investigar activadores híbridos que combinen compuestos alcalinos tradicionales (NaOH , Na_2SiO_3) con nano-materiales catalíticos y activadores orgánicos para maximizar la reactividad del filler basáltico bajo diferentes escenarios de temperatura y humedad.

Líneas de investigación específicas:

- Desarrollar activadores encapsulados que liberen compuestos reactivos de manera controlada en el tiempo
- Investigar el uso de nano-sílice funcionalizada como activador dual (químico y físico)
- Estudiar sistemas de activación por microondas para acelerar selectivamente las reacciones puzolánicas

Caracterización Microestructural y Técnicas In-Situ

Propuesta de investigación: Implementar técnicas de caracterización microestructural que permitan monitorear la evolución de la microestructura del concreto con filler basáltico desde el mezclado hasta la madurez. Se propone combinar tomografía de rayos X in-situ, espectroscopia Raman confocal y microscopía de fuerza atómica para crear mapas tridimensionales dinámicos de la interfaz pasta-filler.

Líneas de investigación específicas:

- Desarrollar protocolos de micro-tomografía computarizada para estudiar la evolución porosa en tiempo real
- Implementar espectroscopia de impedancia electroquímica para monitorear la formación de productos de hidratación
- Investigar técnicas de nano-indentación in-situ para evaluar la evolución de propiedades mecánicas locales

Ingeniería de Superficies Avanzada y Funcionalización

Propuesta de investigación: Desarrollar técnicas de modificación superficial del filler basáltico mediante plasma, tratamientos láser y funcionalización química selectiva para crear interfaces "inteligentes" que optimicen la adherencia pasta-agregado y proporcionen funcionalidades adicionales (auto-reparación, sensores integrados, propiedades antimicrobianas).

Líneas de investigación específicas:

- Investigar tratamientos con plasma atmosférico para activar grupos funcionales específicos en la superficie del basalto

- Desarrollar recubrimientos nano-estructurados que mejoren la compatibilidad química con diferentes tipos de cemento
- Estudiar la incorporación de nano-partículas magnéticas en la superficie del filler para aplicaciones de monitoreo estructural

Investigación en Sostenibilidad y Economía Circular

Propuesta de investigación adicional: Desarrollar marcos de evaluación de ciclo de vida específicos para el filler basáltico que consideren su origen (residuos de canteras vs. material virgen), procesamiento y beneficios ambientales en aplicaciones de concreto. Se propone investigar sinergias con otros materiales de desecho y crear indicadores de sostenibilidad específicos para materiales suplementarios.

Líneas de investigación específicas:

- Cuantificar la huella de carbono neta considerando beneficios de durabilidad extendida
- Investigar el potencial de carbonatación acelerada del filer basáltico para captura de CO₂
- Desarrollar métricas de circularidad específicas para materiales pétreos en construcción
- Evaluar impactos en biodiversidad y recursos hídricos asociados con la extracción y procesamiento del basalto.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ahmaruzzaman, M., & Gupta, V. K. (2019). Ultrafine fly ash: Characteristics, uses, and related environmental issues. *Journal of Environmental Management*, 240, 279-300.
- Ahmed, H. U., Farid, M. S., & Amin, M. N. (2021). Performance evaluation of asphalt pavements under extreme climate conditions: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126163.
- American Society for Testing and Materials. (2020). ASTM C150/C150M-20 Standard Specification for Portland Cement. ASTM International.
- Andrade, A. L., Bomgardner, M., & Southerton, D. (2021). Plastics in the environment: Novel research approaches and insights. *Environmental Science & Technology*, 55(12), 7717-7721.
- ASTM C109/C109M - 02. (2002). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.
- ASTM C150-07. (2007). Historical Standard: Especificación Normalizada para Cemento Portland.
- ASTM C33/C33M-16. (2016). Standard Specification for Concrete Aggregates.
- ASTM C39/C39M-01. (2001). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM C535-03. (2003). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- ASTM C666/666M-03. (2003). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.

- ASTM C979/C979M - 16. (2016). Standard specification for pigments for integrally colored concrete.
- ASTM-C125-13. (2013). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.
- Atahan, H. N., Oktar, O. N., & Taşdemir, M. A. (2021). Effects of recycled concrete aggregate properties on the performance of concrete for rigid pavements. *Construction and Building Materials*, 302, 124217.
- Ballim, Y., & Graham, P. C. (2018). Early-age heat evolution characteristics of South African cements in relation to clinker chemistry and implications for temperature development in large concrete elements. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 60(4), 2-9.
- Batrakov, V. G., & Kramar, L. Y. (2019). Influence of polymer modifiers on rheological properties of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 224, 238-244.
- Beeldens, A., Van Gemert, D., & Schorn, H. (2019). Microstructure of polymer-modified concrete: Microscopy and modeling. *Materials and Structures*, 52(4), 73.
- Belem Vásquez, Salvador Corrales, INDUSTRIA DEL CEMENTO EN MÉXICO: ANÁLISIS DE SUS DETERMINANTES, Problemas del Desarrollo, Volume 48, Issue 188, 2017, Pages 113-138, ISSN 0301-7036,<https://doi.org/10.1016/j.rpd.2017.01.006>.
- Bianchini, A., Gonzalez, C. R., & Bell, H. P. (2020). Comparative life-cycle assessment of flexible and rigid pavements: A case study. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(5), 547-557.

Billmeyer, F. W. (2019). Textbook of polymer science (5th ed.). John Wiley & Sons.

Bordelon, A. C., & Roesler, J. R. (2020). Design of fiber-reinforced concrete overlays and pavements. In M. C. Tang (Ed.), High Performance Fiber Reinforced Concrete (pp. 235-258). Woodhead Publishing.

Bordelon, A. C., Titus-Glover, L., & Roesler, J. R. (2023). Field performance evaluation of fiber-reinforced concrete pavements. *Transportation Research Record*, 2677(5), 56-68.

Briceño, J., González, Briceño, G., & Castellanos, B. (2019). Comparación del desprendimiento de material en pavimentos rígidos reforzados con malla electrosoldada.

ResearchGate.https://www.researchgate.net/publication/335277662_Comparacion_del_desprendimiento_de_material_en_pavimentos_rigidos_reforzados_con_malla_electrosoldada_o_fibras_Comparison_of_the_material_shedding_in_rigid_pavements_reinforced_with_electro-welded_mesh

Buch, N., & Jahangirnejad, S. (2021). Long-term performance of rigid pavements containing different load transfer systems. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147(1), 04020075.

Buch, N., Vongchusiri, K., & Meeker, W. (2021). Effectiveness of alternative load transfer devices in jointed plain concrete pavements. *Transportation Research Record*, 2775(1), 128-137.

Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, J. S., Scrivener, K. L., & Thomas, J. J. (2019). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 124, 105841.

Campoy-Bencomo, N. A., Alegría, O. C., Rojas, E., Gaxiola-Camacho, J. R., Millán-Almaraz, J. R., & De La Rosa-Hernández, D. (2021). Análisis Esfuerzo-deformación de concreto reforzado con fibras metálicas y polímeros. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 22(1), 1-11. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.1.007>

Cao, P., Feng, Y., & Huang, X. (2022). Fatigue behavior of plain and SBR latex-modified concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(6), 04022095.

Carrillo, J., & Silva-Páramo, D. (2016b). Ensayos a flexión de losas de concreto sobre terreno reforzadas con fibras de acero. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 17(3), 317-330. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.07.003>

Carrillo, J., Aperador, W., & González, G. (2013). Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 14(3), 435-450. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(13\)72256-x](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(13)72256-x)

Carrillo, J., Silva, D., & Martha, S. (2016). Desempeño de losas de concreto sobre terreno reforzadas con malla electrosoldada o fibras de acero. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.11.009>

CEMEX, C. (2020). *Concretos Mexicanos* S.A. Obtenido de Concretos Mexicanos S.A.: <https://www.cemexmexico.com/>

Ceylan, H., Kim, S., & Gopalakrishnan, K. (2022). Instrumentation and field monitoring of highway pavement systems for assessment of overload damage. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15(2), 222-235.

- Chen, J., Wang, H., & Li, L. (2020). Durability of concrete pavements modified with acrylic polymer emulsions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), 04020087.
- Chen, X., Liu, J., & Li, M. (2023). Enhanced thermal stability of asphalt binders using nanoclays: Mechanical and rheological evaluations. *Construction and Building Materials*, 369, 130379.
- Contreras, A., Tirado, C. E. M., Palacios, L. A. M., & Chura, A. O. (2023). Ciclo de vida del pavimento orientado a su agrietamiento y mantenimiento. *Revista de investigación científica y tecnológica Llamkasun*, 4(1), 33-39. <https://doi.org/10.47797/llamkasun.v4i1.117>
- Darestani, M. Y., Thambiratnam, D. P., & Nataatmadja, A. (2022). Response of concrete pavements under moving vehicular loads. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 148(1), 04021093.
- Davids, W. G., & Mahoney, J. P. (2020). Three-dimensional finite element analysis of doweled joints subjected to axle loads. *Transportation Research Record*, 2767(1), 33-42.
- Dealy, J. M., & Larson, R. G. (2020). *Structure and rheology of molten polymers: From structure to flow behavior and back again* (2nd ed.). Hanser Publications.
- Delatte, N. J. (2018). *Concrete pavement design, construction, and performance* (3rd ed.). CRC Press.
- Flores-Vivian, I., Pradoto, R. G. K., & Moini, M. (2022). The synthesis and application of functionalized silica particles in cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 127, 104389.

- Fowler, D. W., & Tia, M. (2020). State of the art of concrete overlays, particularly polymer-modified concrete overlays, for bridge decks. *ACI Materials Journal*, 117(5), 283-294.
- Gao, P., Lu, X., Lin, H., Li, X., & Hou, J. (2021). Valorization of agricultural waste for sustainable cementitious materials: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105825.
- Gartner, E., & Sui, T. (2018). Alternative cement Clinkers. *Cement and Concrete Research*, 114, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.002>
- Giustozzi, F. (2021). Mechanics of polymer-modified cement-based materials: A review. *Construction and Building Materials*, 294, 123631.
- Han, J., & Zhang, X. (2020). Development and applications of high performance concrete for highway pavements. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 14(1), 1-10.
- Heikal, M., El-Didamony, H., & Morsy, M. (2000). Limestone-filled pozzolanic cement. *Cement and Concrete Research*, 30(11), 1827-1834. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00402-6](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00402-6)
- Huang, Y. H. (2021). *Pavement analysis and design* (3rd ed.). Pearson Education.
- Huang, Y., & Wang, L. (2022). Mechanical analysis of rigid pavements under overloading: A combined numerical and experimental study. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(10), 3598-3611.
- Huaquisto Cáceres, S. ., & Belizario Quispe, G. . (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento.

Revista De Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research, 20(2), 225-234. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.366>

Juenger, M. C. G., & Siddique, R. (2020). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 139, 106170.

Juenger, M. C. G., Snellings, R., & Bernal, S. A. (2019). Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, 122, 257-273.

Kang, S. T., Lee, B. Y., Kim, J., & Kim, S. S. (2011). The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2450-2457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.057>

Kawashima, S., Hou, P., & Shah, S. P. (2021). Modification of cement-based materials with micro- and nano-particles. *Cement and Concrete Composites*, 115, 103859.

Khan, M. I., & Siddique, R. (2020). Silica fume: A remarkable material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 254, 119781.

Khater, H. M., & Abd El Gawaad, H. A. (2021). Eco-friendly concrete alternatives using biopolymer instead of traditional cement. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00656.

Khazanovich, L., & Gotlif, A. (2020). Computational mechanics of concrete pavements under combined traffic and environmental loadings. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), 04020078.

- Khazanovich, L., & Gotlif, A. (2022). Optimization of dowel bar design for concrete pavements. *Transportation Research Record*, 2676(5), 156-167.
- Kim, D. J., Park, S. H., & Ryu, G. S. (2023). Accelerated pavement testing on rigid pavements under extreme overloading conditions. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(6), 2231-2243.
- Kim, J. H., & Robertson, R. E. (2021). Mechanical properties of polyvinyl acetate-modified cement mortars with redispersible polymer powder. *ACI Materials Journal*, 118(2), 131-141.
- Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., & Shah, S. P. (2019). Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. *Cement and Concrete Research*, 124, 105787.
- Kosmatka, S. H., & Wilson, M. L. (2021). *Design and control of concrete mixtures* (17th ed.). Portland Cement Association.
- Kumar, R., & Monteiro, P. J. M. (2023). Advanced characterization techniques for the examination of the interfacial transition zone in cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 165, 107034.
- Lee, M. K., & López, M. M. (2022). Fatigue behavior of concrete for rigid pavements under varied stress ratios and loading frequencies. *Construction and Building Materials*, 317, 125936.
- Li, G., & Kwan, A. K. H. (2018). Ultra-high performance concrete for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 167, 704-716.
- Li, G., & Kwan, A. K. H. (2022). Surface chemistry of micro- and nano-particles in cementitious systems. *Cement and Concrete Research*, 153, 106703.

- Li, L. G., Lin, C. J., Chen, G. M., Kwan, A. K. H., & Jiang, T. (2023). Synergistic effects of micro-silica and nano-calcium carbonate on properties of high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 371, 130432.
- Li, X., Wang, Z., Jiao, L., Sun, Y., & Shah, S. P. (2023). Effects of CaCO_3 nanoparticles on cement hydration and strength development. *Cement and Concrete Research*, 163, 107013.
- Loannides, A. M., & Khazanovich, L. (2019). Analytical solutions for concrete slab responses under critical loading conditions. *Journal of Engineering Mechanics*, 145(10), 04019080.
- López-Carrasquillo, V., & Hwang, S. (2020). Comparative analysis of mechanical properties and construction costs of rigid pavements. *Infrastructures*, 5(12), 108.
- Lothenbach, B., Durdzinski, P., & De Weerdt, K. (2022). Thermogravimetric analysis in cement chemistry. In A. B. Ribeiro & E. Zornoza (Eds.), *Non-destructive techniques for the evaluation of structures and infrastructure* (pp. 89-114). CRC Press.
- Lytton, R. L., Lou, J., & Luo, X. (2021). Mechanistic-empirical design for rigid pavements considering climate effects. *Transportation Research Record*, 2675(12), 227-241.
- Mallick, R. B., & El-Korchi, T. (2018). *Pavement engineering: Principles and practice* (3rd ed.). CRC Press.
- Marchon, D., Mantellato, S., Eberhardt, A. B., & Flatt, R. J. (2022). Adsorption of superplasticizers on fine particles: Impact on cement hydration and concrete rheology. *Cement and Concrete Research*, 156, 106784.

- Matyjaszewski, K. (2019). Advanced methods in controlled/living radical polymerization. *Progress in Polymer Science*, 94, 26-55.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2021). Concrete: Microstructure, properties, and materials (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mohammed, A., Rafiq, S., & Sihag, P. (2021). Micro steel fiber reinforced concrete for enhanced mechanical and durability properties: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 308, 125066.
- Mondal, P., Shah, S. P., & Marks, L. D. (2021). Three-dimensional characterization of cementitious materials using X-ray micro-computed tomography. *Journal of Microscopy*,
- N-CMT-2-02-002/02 (SCT). (2002). Características de los materiales - Materiales para estructuras - Materiales para concreto hidráulico - Calidad de Agregados Pétreos para Concreto Hidráulico.
- N-CMT-2-02-003/02 (SCT). (2002). Características de los materiales - Materiales para estructuras - Materiales para concreto hidráulico - Calidad del Agua para Concreto Hidráulico .
- NMX-C-030-ONNCCE-2004. (2004). Industria de la construcción - Agregados - Muestreo.
- NMX-C-061-ONNCE-2010. (2010). Industria de la construcción - Cementos hidráulicos - Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos .

NMX-C-170-ONNCCE-1997. (1997). Industria de la Construcción – Agregados – Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo al Tamaño Requerido para los ensayos.

NMX-C-403-ONNCCE-1999. (1999). Industria de la construcción concreto hidráulico para uso estructural.

NMX-C-414-ONNCCE-2014. (2014). Industria de la construcción - Cementos hidráulicos - Especificaciones y métodos de prueba.

Rashwan, M. A., Lasheen, E. S. R., & Shalaby, B. N. (2019). Incorporation of metagabbro as cement replacement in cement-based materials: a role of mafic minerals on the physico-mechanical and durability properties. *Construction and Building Materials*, 210, 256-268. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.191>

Rostami, R., J, K. A., & Almeida, F. C. (2022). Effect of superabsorbent polymers on microstructure and strength of blended cements mortars reinforced by polymeric fibre. *Cement*, 9, 100041. <https://doi.org/10.1016/j.cement.2022.100041>

Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2002). M-MMP-4-006/02. Métodos de muestreo y prueba de materiales - Materiales para pavimentos - Materiales pétreos para mezclas asfálticas - Desgaste Mediante la Prueba de Los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. México.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2004). M-MMP-2-02-058/04. Métodos de muestreo y prueba de materiales - Materiales para estructuras - Materiales para concreto hidráulico - Resistencia a la compresión simple de cilindros de concreto. México.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2006). M-MMP-2-02-055/06 (SCT). Métodos de muestreo y prueba de materiales - Materiales para estructuras - Materiales para concreto hidráulico - Muestreo de Concreto Hidráulico. México.

Singh, S., Ransinchung, G.D. & Kumar, P. (2017). An economical processing technique to improve RAP inclusive concrete properties. Construction and Building Material, vol. 148, 734-747. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.030>

Song, P., & Hwang, S. Y. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. Construction and Building Materials, 18(9), 669-673. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>

Steiner, S., Proske, T., Winnefeld, F., & Lothenbach, B. (2022). Effect of limestone fillers on CO₂ and water vapour diffusion in carbonated concrete. Cement, 8, 100027. <https://doi.org/10.1016/j.cement.2022.100027>

Surichaqui, F., Quispe, H., Taipe, R., & Quispe, H. M. (2021). Adición de la fibra de polietileno tereftalato en pavimento rígido en la provincia de Angaraes – Huancavelica. Revista Científica Ciencias Ingenieriles, 1(1), 02-12. <https://doi.org/10.54943/ricci.v1i1.181>

Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., Jia, H., & Ou, Z. (2018b). A review on use of limestone powder in cement-based materials: mechanism, hydration and microstructures. Construction and Building Materials, 181, 659-672. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075>

Wang, Y., & Suraneni, P. (2023). Thermal activation of inert basaltic materials to create supplementary cementitious materials. *Cement*, 13, 100082.<https://doi.org/10.1016/j.cement.2023.100082>

Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Poppe, A., & Taerwe, L. (2007). Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 29(2), 94-102.<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.09.003>