

Efecto de nanopartículas híbridas SiO₂-SiC en la resistencia mecánica del concreto

Effect of hybrid SiO₂-SiC nanoparticles on the mechanical properties of concrete

S. Hernández Hidalgo^a, I. E. Castañeda Robles^a, A. L. López León^b, L. D. López León^{a,*}

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

^b Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. del Charro No.450 Nte. Col. Partido Romero, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Resumen

Este estudio evalúa el efecto de nanopartículas híbridas de óxido de silicio y carburo de silicio (SiO₂-SiC) como aditivo parcial del cemento Portland compuesto en mezclas de concreto. Las nanopartículas fueron sintetizadas mediante el método Sol-Gel e incorporadas en proporciones de 10, 20 y 30 mL por cada 500 g de cemento. Se elaboraron especímenes cilíndricos y se realizaron ensayos de compresión y tracción indirecta conforme a las normas ASTM C39 y C496, tras 28 días de curado. Los resultados mostraron incrementos de hasta 11.0% en compresión (máximo: 218.30 kg/cm²) y 22.88% en tracción (máximo: 15.52 kg/cm²) respecto a la mezcla de referencia. La dosificación de 20 mL presentó el mejor desempeño, atribuible a una microestructura más densa y homogénea. Las micrografías confirmaron una menor propagación de fisuras. Se concluye que el uso de SiO₂-SiC mejora las propiedades mecánicas del concreto sin comprometer su trabajabilidad, representando una alternativa viable para sistemas estructurales más eficientes.

Palabras Clave:

Nanopartículas híbridas, Concreto, Resistencia mecánica, Zona interfacial, Aditivo.

Abstract

This study evaluates the effect of hybrid silicon dioxide and silicon carbide (SiO₂-SiC) nanoparticles as a partial cement replacement in concrete mixtures. The nanoparticles were synthesized via the Sol-Gel method and incorporated in dosages of 10, 20, and 30 mL per 500 g of Portland composite cement. Cylindrical specimens (7.5 × 15 cm) were prepared, and compressive and indirect tensile strength tests were performed in accordance with ASTM C39 and C496 standards after 28 days of curing. Results showed increases of up to 11.0% in compressive strength (maximum: 218.30 kg/cm²) and 22.88% in tensile strength (maximum: 15.52 kg/cm²) compared to the reference mixture. The 20 mL dosage yielded the best performance, attributed to a denser and more homogeneous microstructure. Microscopic analysis confirmed reduced crack propagation in modified mixtures. It is concluded that the incorporation of SiO₂-SiC nanoparticles enhances the mechanical performance of concrete without compromising workability, offering a promising strategy for more efficient structural applications.

Keywords:

Hybrid nanoparticles, Concrete, Mechanical strength, Interfacial zone, Admixture.

1. Introducción

La innovación en materiales de construcción ha sido un pilar fundamental en el desarrollo de la ingeniería civil, impulsando la búsqueda de concretos con mayor resistencia, durabilidad y sostenibilidad. Dentro de este contexto, la nanotecnología ha emergido como una estrategia clave para optimizar las propiedades del concreto, permitiendo la manipulación de su microestructura a nivel atómico y molecular (Bao et al., 2023). La incorporación de nanopartículas en la composición del concreto ha demostrado efectos significativos en la resistencia mecánica, la reducción de porosidad y el comportamiento frente a agentes agresivos del medioambiente (Cwirzen & Penttala, 2021).

A pesar de ser el material de construcción más utilizado a nivel mundial, el concreto convencional aún enfrenta desafíos estructurales que limitan su desempeño en diversas aplicaciones. La microfisuración interna, la retracción durante el fraguado y la

presencia de una zona de transición interfacial débil entre la pasta de cemento y los agregados son factores que afectan negativamente su resistencia y durabilidad (Gao et al., 2023). Estas deficiencias han motivado la investigación en nuevos enfoques para mejorar la cohesión y compactación de la estructura del concreto, lo que ha llevado al desarrollo de concretos modificados con nano-aditivos capaces de reforzar su comportamiento mecánico (Kim, 2019).

La utilización de nanopartículas en concreto ha evolucionado significativamente en los últimos años, destacándose aquellas basadas en óxidos metálicos como el nano-óxido de titanio (TiO₂), nano-óxido de aluminio (Al₂O₃) y nano-óxido de hierro (Fe₂O₃), así como el nano-óxido de silicio (SiO₂), que ha mostrado resultados prometedores en la mejora de la resistencia a la compresión y la reducción de la permeabilidad (Deng et al., 2021). En particular, el nano-óxido de silicio (SiO₂) ha sido ampliamente estudiado debido a su alta

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

Correo electrónico: he439994@uaeh.edu.mx (Serafín Hernández-Hidalgo), ivan_castaneda@uaeh.edu.mx (Ivan Erick Castañeda-Robles), abraham.lopez@uaej.mx (Abraham Leonel López-León), luis_lopez@uaeh.edu.mx (Luis Daimir López-León)

reactividad puzolánica y su capacidad para interactuar con los productos de hidratación del cemento, promoviendo la formación de un gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) más denso y homogéneo (Li et al., 2022).

Si bien el uso de nano-óxido de silicio ha demostrado beneficios sustanciales en el desempeño del concreto, la combinación con otros nanomateriales puede potenciar aún más sus propiedades. En este sentido, las nanopartículas híbridas de óxido de silicio y carburo de silicio (SiO₂-SiC) representan una alternativa innovadora para la optimización de la microestructura del concreto (Siamardi, 2022).

El carburo de silicio (SiC) es un material cerámico conocido por su alta dureza, estabilidad térmica y resistencia mecánica excepcional (Deng et al., 2021). Su inclusión en la composición del concreto permite reforzar la estructura interna del concreto, reduciendo la propagación de fisuras y mejorando la adhesión entre los agregados y la pasta de cemento (Gao et al., 2023). Además, el SiC presenta alta resistencia química, lo que lo hace ideal para aplicaciones en ambientes altamente agresivos, como estructuras expuestas a agua de mar o entornos industriales con alta presencia de sulfatos (Li et al., 2022).

La combinación de SiO₂ y SiC en forma de nanopartículas híbridas no solo permite mejorar la resistencia mecánica del concreto, sino que también puede optimizar su trabajabilidad y compatibilidad con aditivos químicos (Ghiasvand et al., 2022). Investigaciones recientes han señalado que la síntesis de estas nanopartículas a través del método Sol-Gel proporciona un control preciso sobre el tamaño y distribución de partículas, asegurando una integración homogénea dentro de la matriz cementante (Mehta & Monteiro, 2020).

Dado el potencial de las nanopartículas híbridas de SiO₂-SiC en la optimización del concreto, esta investigación tiene como objetivo analizar el impacto de su incorporación en la resistencia mecánica del material. Para ello, se compararán las propiedades mecánicas de un concreto modificado con nanopartículas híbridas frente a un concreto convencional.

2. Desarrollo Experimental

2.1. Síntesis de nanopartículas híbridas de óxido de silicio y carburo de silicio (SiO₂-SiC)

La síntesis de nanopartículas híbridas de óxido de silicio y carburo de silicio (SiO₂-SiC) se llevó a cabo mediante el método Sol-Gel, técnica utilizada debido a su capacidad para producir nanopartículas con un tamaño controlado y una alta dispersión en la matriz cementante (Deng et al., 2021; Li et al., 2022). Este método permite la formación de nanopartículas con una estructura homogénea y una interacción óptima entre ambas fases, garantizando una adecuada compatibilidad con la pasta de cemento (Mehta & Monteiro, 2020).

2.1.1 Materiales utilizados en la síntesis

Los reactivos utilizados para la obtención de las nanopartículas híbridas SiO₂-SiC fueron los siguientes:

- Precursor de sílice: Tetraetil ortosilicato (TEOS, Si(OC₂H₅)₄), de alta pureza (>99%).
- Fuente de carburo de silicio (SiC): Nanopartículas de SiC (<50 nm), previamente funcionalizadas.
- Solventes: Etanol absoluto (C₂H₅OH) como medio de dispersión y agua destilada para la hidrólisis.
- Catalizador: Ácido acético (CH₃COOH) o amoníaco (NH₃) para controlar la condensación del gel de sílice.

- Agente dispersante: Poli(etilenglicol) (PEG-400), utilizado para mejorar la estabilidad coloidal de las nanopartículas.

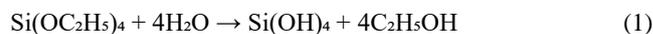
2.1.2 Síntesis nanopartículas híbridas SiO₂-SiC

El procedimiento de síntesis de las nanopartículas híbridas SiO₂-SiC se llevó a cabo en varias etapas, siguiendo la metodología reportada por Gao et al. (2023) y adaptaciones basadas en estudios recientes sobre la combinación de óxidos y carburos en cementantes (Deng et al., 2021).

- Preparación de la solución precursora de sílice.
 - a) Se mezclaron 10 mL de TEOS con 50 mL de etanol y 10 mL de agua destilada en un reactor químico bajo agitación continua a 500 rpm.
 - b) Se añadió 0.5 mL de ácido acético o NH₃ como catalizador para inducir la hidrólisis del TEOS y favorecer la formación de sílice coloidal.
 - c) La mezcla se dejó reaccionar a temperatura ambiente durante 30 minutos, asegurando la dispersión homogénea de la sílice.
- Incorporación y dispersión de nanopartículas de SiC.
 - a) En un vaso de precipitado separado, se dispersaron 0.5% - 3% en peso de nanopartículas de SiC en 30 mL de etanol.
 - b) Se aplicó ultrasonido (40 kHz, 15 min) para desaglomerar las partículas de SiC y lograr una suspensión uniforme.
 - c) La dispersión de SiC se incorporó lentamente en la solución precursora de TEOS, manteniendo una agitación constante para evitar la sedimentación.
- Polimerización y formación del gel híbrido.
 - a) La mezcla se agitó durante 12-24 horas para garantizar la completa polimerización y formación del gel híbrido.
 - b) Se dejó reposar el gel en un medio controlado hasta alcanzar la maduración adecuada.
- Secado y calcinación.
 - a) El gel obtenido se secó a 80°C durante 24 horas para eliminar los solventes residuales.
 - b) Posteriormente, se realizó un tratamiento térmico en un horno tubular a 500-900°C, con una rampa de calentamiento de 5°C/min, en atmósfera de nitrógeno o aire seco, con el objetivo de estabilizar la estructura híbrida.

2.1.3 Mecanismo de reacción

- Hidrólisis del TEOS:



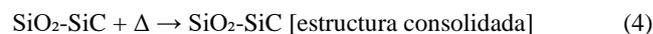
- Condensación y formación de sílice coloidal:



- Incorporación de SiC y formación de enlaces:



- Tratamiento térmico y estabilización estructural:



2.2. Elaboración de especímenes de concreto

Una vez definida la composición de la mezcla, se procedió a la elaboración de los especímenes de concreto, asegurando que el proceso de fabricación cumpliera con los protocolos estandarizados para garantizar la reproducibilidad y fiabilidad de los resultados experimentales. La correcta preparación de las muestras es fundamental para evaluar de manera precisa la influencia de las nanopartículas híbridas de óxido de silicio y carburo de silicio (SiO₂-SiC) en las propiedades mecánicas del concreto.

El diseño de la mezcla se estableció con base en un concreto de media sollicitación, correspondiente a una resistencia de 200 kg/cm² (\approx 20 MPa), una especificación comúnmente utilizada en la construcción de edificaciones de baja altura y elementos no estructurales (ACI 211.1-91, 2002). La mezcla de concreto fue diseñada mediante el método del peso unitario, de acuerdo con la norma ACI 211.1-91, titulada "Práctica Estándar para Seleccionar el Proporcionamiento de Concreto de Peso Normal, Pesado y Masivo". Este método empírico-mecanicista permite un control preciso de los materiales, proporcionando mezclas con alta reproducibilidad y compatibilidad con distintos tipos de aditivos y modificadores de la matriz cementante.

2.2.1. Diseño de mezcla

El diseño de la mezcla se llevó a cabo considerando parámetros específicos para garantizar la adecuada proporción de materiales. Para este propósito, se empleó el software de código abierto Concrete Mix Design (2025), el cual permitió optimizar la dosificación de los componentes con base en criterios de desempeño mecánico y trabajabilidad. Los parámetros utilizados en el diseño de la mezcla se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Diseño de mezcla de concreto

Valores	Parámetro de la mezcla
75 máximo 25 mínimo	Revenimiento (mm)
19	Tamaño máximo agregado (mm)
205	Cantidad de agua de mezcla (kg/m ³) de acuerdo con el tamaño máximo de agregado
2	Porcentaje de aire en mezcla sin entrada de aire
0.69	Relación agua cemento
2.8	Módulo de finura agregado fino
1.5	Porcentaje de absorción de agregado grueso
5	Porcentaje de absorción de agregado fino

Como se mencionó previamente, se fabricaron especímenes cilíndricos con dimensiones específicas para la evaluación de sus propiedades mecánicas. Para el ensayo de compresión, se moldearon cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, mientras que para la prueba de tracción indirecta (ensayo brasileño), se utilizaron especímenes de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Ambos tipos de muestras fueron elaborados por triplicado para cada una de las condiciones estudiadas, garantizando la reproducibilidad y fiabilidad de los resultados.

Las nanopartículas híbridas de óxido de silicio y carburo de silicio (SiO₂-SiC) fueron incorporadas como sustituto parcial del cemento Portland compuesto, en proporciones de 10 mL, 20 mL y 30 mL por cada 500 g de cemento. Esta relación se extrapoló al volumen total de cemento por metro cúbico, ajustando proporcionalmente el contenido de cemento en cada mezcla para

evaluar el impacto real del reemplazo en las propiedades mecánicas del concreto. La tabla 2.2 muestra la dosificación detallada de cada sistema, incluyendo la cantidad de agua, agregados, cemento y nanopartículas utilizadas. Esta metodología permite analizar con mayor claridad el ahorro de cemento y el efecto del aditivo en la compactación de la matriz cementante, así como su influencia en la resistencia mecánica.

Tabla 2.2: Dosificación de concreto con nanopartículas (SiO₂-SiC), relación A/C=0.69.

Sistema	Agua Kg/m ³	Cemento Kg/m ³	Agregado grueso Kg/m ³	Agregado fino Kg/m ³	Nanopartículas SiO ₂ -SiC (L/m ³)
0 mL	260.2	297.10	1054	788.9	0
10 mL	260.2	291.16	1054	788.9	5.94
20 mL	260.2	285.22	1054	788.9	11.88
30 mL	260.2	274.27	1054	788.9	17.82

Se emplearon agregados fino y grueso naturales, ambos procedentes del banco de materiales ubicado en Zempoala, Hidalgo. Según estudios geológicos de la región, estos materiales están compuestos predominantemente por rocas ígneas intrusivas de tipo andesita y basalto, lo cual favorece buenas propiedades mecánicas en el concreto, como resistencia al desgaste y a la compresión (Lugo-Hubp et al., 1993). Ambos agregados fueron utilizados en estado seco, cumpliendo con los requisitos granulométricos establecidos por la norma ASTM C33/C33M. Tanto el agregado fino como el grueso fueron seleccionados conforme a los requisitos de gradación establecidos en la norma ASTM C33/C33M-19 para su aplicación en concreto estructural. Aunque no se presentan las curvas granulométricas en este estudio, se verificó que ambos materiales se ajustaran a los límites especificados para garantizar la uniformidad de la mezcla.

Se utilizó cemento Portland compuesto tipo CPC 30R conforme a la norma NMX-C-414-ONNCCCE-2021, el cual contiene adiciones minerales como puzolana y escoria granulada de alto horno. Este tipo de cemento fue seleccionado por su amplio uso en obras estructurales en México, su buena resistencia a corto plazo y su compatibilidad con aditivos minerales y nanopartículas.

2.3. Procedimiento para elaboración de la mezcla

El procedimiento de elaboración de la mezcla se realizó siguiendo las especificaciones establecidas en la Norma Mexicana NMX-C-159-ONNCCCE (2004), garantizando la adecuada proporción y distribución de los materiales. A continuación, se describe el procedimiento detallado:

- Se pesaron y midieron los materiales de acuerdo con el diseño de mezcla previamente establecido, asegurando precisión en las proporciones de cemento, agregados, agua y nanopartículas híbridas SiO₂-SiC.
- Para las mezclas con incorporación de nanopartículas híbridas, las soluciones de SiO₂-SiC (10 mL, 20 mL y 30 mL por cada 500 g de cemento reemplazado) fueron previamente dispersadas en el agua de amasado mediante ultrasonido (40 kHz por 15 minutos), asegurando una distribución homogénea y evitando la aglomeración de partículas. En el caso de la mezcla de referencia (sin nanopartículas), se utilizó únicamente agua potable conforme a ASTM C1602.
- Los agregados gruesos y finos (grava y arena) fueron dispuestos sobre una superficie de acero limpia y seca, formando una capa uniforme para facilitar su homogeneización.

- Se realizó una premezcla en seco durante 30 segundos para garantizar la correcta integración de los agregados.
- Se añadió el cemento Portland a la mezcla de agregados y se homogeneizó el material durante 60 segundos, asegurando una distribución uniforme del aglutinante.
- En el caso de las mezclas modificadas, se verificó la correcta interacción del cemento con las nanopartículas de SiO₂-SiC incorporadas en el agua.
- Adición del agua con nanopartículas y mezclado final:
- Se realizó la adición progresiva del agua en el centro de la mezcla seca, siguiendo la técnica del "volcán", permitiendo una incorporación gradual desde el exterior hacia el interior.
- De manera gradual, se incorporó el agua a la mezcla seca, mezclando con palas desde el exterior hacia el interior, en la región donde se añadió el agua, hasta alcanzar una consistencia homogénea.
- Finalmente, el contenido de la mezcla se vertió siguiendo el procedimiento especificado para la elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.

2.4. Curado de los cilindros de concreto

El adecuado curado de los cilindros de concreto es un factor clave para garantizar el desarrollo óptimo de sus propiedades mecánicas y su durabilidad a largo plazo. Para ello, se implementaron técnicas de curado que aseguran un ambiente controlado, minimizando la evaporación prematura del agua y favoreciendo la hidratación del cemento. Estas medidas permiten optimizar el proceso de endurecimiento y reducir la aparición de defectos estructurales.

Siguiendo las recomendaciones de la normativa ASTM C31/C31M (2001), las muestras de concreto fueron desmoldadas después de un período mínimo de 24 horas tras su colocación. Posteriormente, se sumergieron de manera inmediata en agua a una temperatura controlada de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, conforme a lo estipulado en ASTM C192/C192M (2014).

El curado se prolongó durante un período de 28 días, asegurando que las condiciones de hidratación se mantuvieran constantes y que el desarrollo de la resistencia del concreto se produjera de manera uniforme. Este procedimiento cumple con los requisitos establecidos en la normativa ASTM C192/C192M (2014) y garantiza la adecuada evolución de las propiedades mecánicas del material antes de la realización de los ensayos correspondientes.

2.5. Ensayo de compresión de los especímenes de concreto

El ensayo de compresión de los especímenes de concreto se realizó siguiendo las directrices establecidas en la normativa (ASTM C39/C39M, 2018). Este procedimiento permite evaluar la capacidad del material para resistir cargas axiales y es fundamental para determinar el comportamiento mecánico del concreto modificado con nanopartículas híbridas de óxido de silicio y carburo de silicio (SiO₂-SiC) en comparación con un concreto convencional.

2.6. Ensayo de resistencia a la tracción indirecta (Ensayo brasileño)

Para evaluar la resistencia a la tracción indirecta de los especímenes de concreto, se llevó a cabo el ensayo brasileño, utilizando una celda de carga especialmente diseñada para este procedimiento (ver Figura 2.1). La prueba se realizó conforme a

las especificaciones de la normativa ASTM C496/C496M (2017), la cual establece los criterios para la determinación de la resistencia a la tracción mediante la aplicación de una carga diametral en especímenes cilíndricos. Este método permite evaluar la cohesión interna del concreto y la calidad de la zona de transición interfacial entre los agregados y la matriz cementante, factores clave en la durabilidad del material.



Figura 2.1: Celda brasileña para ensayo de tracción indirecta

3. Resultados y discusión

3.1. Influencia de las nanopartículas híbridas de SiO₂-SiC en las propiedades mecánicas del concreto

La incorporación de nanopartículas híbridas de óxido de silicio y carburo de silicio (SiO₂-SiC) en diferentes dosificaciones mostró un impacto positivo en las propiedades mecánicas del concreto. Se evaluaron tres niveles de adición (10 mL, 20 mL y 30 mL por cada 500 g de cemento sustituido), evidenciando mejoras significativas en la resistencia a la compresión y a la tracción indirecta en comparación con el concreto sin nanopartículas.

Los resultados obtenidos sugieren que la incorporación de nanopartículas híbridas optimiza la compactación de la composición del concreto, reduce la porosidad y mejora la cohesión interna del material, lo que se traduce en un incremento en su resistencia mecánica (Signorini et al., 2019). A continuación, se presentan los datos obtenidos en los ensayos de compresión y tracción indirecta.

3.2. Resistencia a la compresión

Los ensayos de compresión demostraron que la incorporación de nanopartículas híbridas de SiO₂-SiC generó un incremento progresivo en la resistencia del concreto (ver figura 3.2). En comparación con la mezcla de referencia, se registraron mejoras en un rango de 6% a 11%, lo que evidencia un impacto positivo en la capacidad de carga del material.

Las pruebas de compresión fueron realizadas utilizando una prensa hidráulica marca Controls (figura 3.1), modelo 50-C43C04, diseñada para la evaluación de la resistencia de cilindros de concreto, garantizando precisión en la aplicación de la carga y cumplimiento con las especificaciones de la normativa (ASTM C39/C39M, 2018).



Figura 3.1: Ensayo de compresión

El concreto sin adición de nanopartículas presentó una resistencia promedio de 196.66 kg/cm² en los tres ensayos realizados, mientras que la mezcla con 30 mL de nanopartículas híbridas alcanzó un valor máximo promedio de 218.30 kg/cm², confirmando una mejora significativa en el desempeño mecánico del concreto. Este incremento sugiere que la adición de SiO₂-SiC contribuye a la densificación de la composición del concreto, optimizando la adhesión entre los agregados y reduciendo la porosidad del material, factores clave en la mejora de su resistencia estructural (Zhuang & Chen, 2019).

La incorporación de nanopartículas híbridas de SiO₂-SiC produjo un incremento promedio en la resistencia a la compresión de 6.3%, 10.25% y 11.00% para las dosificaciones de 10 mL, 20 mL y 30 mL, respectivamente, en comparación con la mezcla de referencia. Estos resultados reflejan la influencia positiva de las nanopartículas en la mejora del desempeño estructural del concreto.

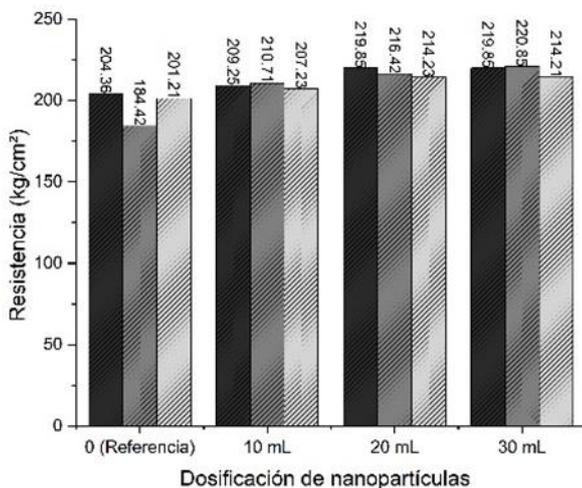


Figura 3.2: Resistencia a la compresión de los distintos sistemas

3.2 Resistencia a la tracción indirecta

Los resultados del ensayo brasileño mostraron que la incorporación de nanopartículas híbridas de óxido de silicio y carburo de silicio (SiO₂-SiC) influyó positivamente en la resistencia a la tracción indirecta del concreto (figura 3.3). Se registraron incrementos del 17.39%, 22.77% y 22.73% para las dosificaciones de 10 mL, 20 mL y 30 mL respectivamente, en comparación con la mezcla de referencia (12.63 kg/cm²). Esta mejora evidencia una mayor cohesión de la matriz cementante y una estructura interna más uniforme, derivadas de la incorporación del aditivo nanométrico (Du et al., 2014). Para la ejecución de las pruebas, se empleó una celda brasileña acoplada a la prensa hidráulica marca Controls, modelo 50-C43C04, lo que

permitió aplicar la carga diametral con precisión, conforme a los lineamientos de la norma (ASTM C496/C496M, 2017).



Figura 3.2: Ensayo de tracción indirecta

El concreto sin nanopartículas presentó una resistencia promedio de 12.63 kg/cm², mientras que la mezcla con 20 mL de nanopartículas alcanzó un valor promedio de 15.49 kg/cm², representando la mejor respuesta en términos de resistencia a la tracción indirecta. En contraste, la dosificación de 30 mL mostró un valor promedio de 15.52 kg/cm², lo que indica que a partir de esta concentración el efecto de mejora comienza a estabilizarse, lo que sugiere que, a partir de esta concentración, el efecto comienza a estabilizarse (ver figura 3.3).

Estudios previos han demostrado que la incorporación de nanopartículas de SiO₂ en la matriz cementante reduce la porosidad en esta zona y promueve la formación de una microestructura más densa y homogénea (Nazari & Riahi, 2011; Sikora et al., 2022).

Estudios realizados por Gao et al. (2023) han evidenciado que las nanopartículas de sílice pueden actuar como núcleos de nucleación, promoviendo la hidratación del cemento y aumentando la formación de gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) en la matriz cementante. Este fenómeno contribuye a una distribución más uniforme de las tensiones internas, retrasando el inicio y propagación de fisuras en el concreto sometido a esfuerzos de tracción (Orakzai, 2021).

El contenido de carbono presente en las nanopartículas de carburo de silicio (SiC) puede influir en el desempeño mecánico del concreto. Estudios previos sugieren que las nanopartículas que contienen carbono presentan alta estabilidad química, mejoran la resistencia a la microfisuración y actúan como centros de nucleación durante la hidratación (Orakzai, 2021; Zhan et al., 2020). Este efecto puede atribuirse a la interacción superficial del SiC con los productos de hidratación del cemento, favoreciendo una microestructura más densa y una mejor transmisión de esfuerzos dentro del material.

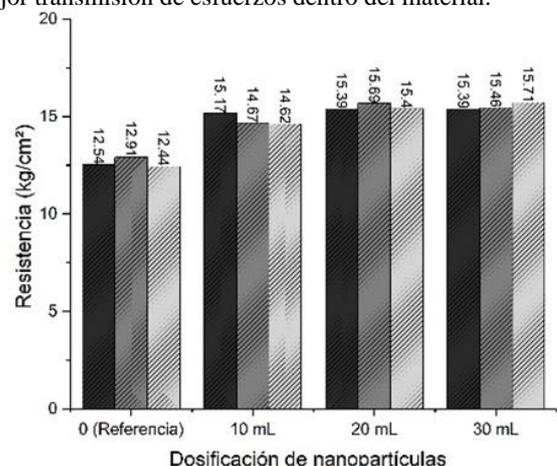


Figura 3.3: Resistencia a la tracción de los distintos sistemas

Durante los ensayos a compresión se observó un patrón de fractura cónico axial, característico de la ruptura frágil del concreto. En los ensayos de tracción indirecta, la fractura siguió una línea diametral definida (ver figura 3.2), como lo establece el mecanismo típico de falla descrito en ASTM C496/C496M para este tipo de carga.

Visualmente, los especímenes sometidos a compresión presentaron fisuras verticales predominantes a lo largo del eje de carga, así como fractura cónica en la parte superior e inferior de los cilindros, características típicas del concreto bajo carga axial, de acuerdo con la norma ASTM C39.

Por otro lado, los especímenes evaluados en tracción indirecta mediante el método brasileño mostraron una separación diametral limpia, siguiendo el plano de aplicación de carga, tal como se describe en la norma ASTM C496. Estos modos de fractura concuerdan con los comportamientos esperados para concretos de consistencia media con adecuada compactación y desarrollo de adherencia interna.

3.4. Micrografías de ruptura de concretos ensayados mecánicamente

Al analizar las micrografías de fractura obtenidas tras los ensayos de compresión en los distintos sistemas estudiados, se observaron diferencias notables en la microestructura de los especímenes modificados con nanopartículas híbridas de SiO₂-SiC en comparación con el sistema de referencia (ver Figura 3.4). En la muestra sin nanopartículas, la superficie de fractura muestra zonas irregulares con presencia evidente de fisuras interfaciales entre la matriz cementante y los agregados.

En contraste, la micrografía de los concretos con 10 mL y 20 mL de nanopartículas híbridas revelaron una ruptura más compacta y cohesionada, con menor propagación de microgrietas en la matriz, así como una interfaz pasta-agregado más homogénea (Goyal, 2017). Este comportamiento podría estar relacionado con la acción de las nanopartículas como materiales de relleno a escala nanométrica, reduciendo la porosidad y actuando como sitios de nucleación para la formación adicional de gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), lo cual mejora la resistencia estructural del concreto (Li et al., 2021; Gao et al., 2023).

Particularmente, en el sistema con 20 mL, las fracturas presentaron una textura más densa, con una distribución más uniforme de las zonas de falla, lo que puede estar asociado a una redistribución más eficiente de los esfuerzos internos y una mejor integración de la matriz cementante con los agregados (Nazari & Riahi, 2011; Cwirzen & Penttala, 2021). En cambio, en el sistema con 30 mL, aunque la microestructura se mantiene relativamente compacta, se observó una ligera reaparición de fracturas interfaciales, lo cual podría estar relacionado con una posible aglomeración de nanopartículas, fenómeno reportado en dosis elevadas que reduce su capacidad de refuerzo al generar puntos de concentración de tensiones (Hou et al., 2013; Kim, 2019).

Estos resultados muestran que existe una dosificación óptima de nanopartículas híbridas que maximiza su efecto benéfico en la microestructura del concreto (Duru et al., 2019). Sin embargo, dosis excesivas pueden alterar el equilibrio entre dispersión y aglomeración, comprometiendo la resistencia mecánica del material.

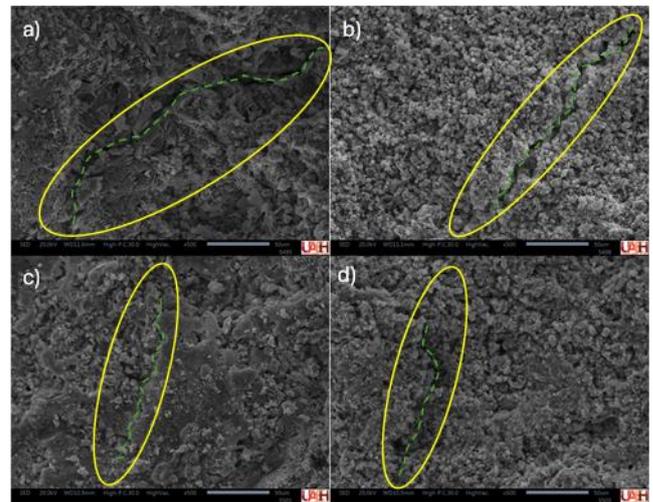


Figura 3.4: Micrografías de fractura del concreto tras compresión: a) sin nanopartículas, b) con 10 mL, c) 20 mL, d) 30 mL de nanopartículas híbridas.

En conjunto, el análisis de micrografías evidencia que la mejora en la resistencia a la compresión observada en los ensayos mecánicos está directamente vinculada con la modificación de la microestructura interna del concreto inducida por la presencia de nanopartículas híbridas de SiO₂-SiC (Zhan et al., 2020). Esto subraya la importancia de una adecuada selección y dosificación de estos aditivos para optimizar tanto el comportamiento estructural como la durabilidad del concreto (Morsy et al., 2010).

4. Conclusiones

Los resultados experimentales evidenciaron un incremento en la resistencia a la compresión y a la tracción indirecta en comparación con la mezcla de referencia. Las dosificaciones de 10 mL, 20 mL y 30 mL de nanopartículas por cada 500 g de cemento reemplazado produjeron aumentos progresivos en la resistencia mecánica, alcanzando una mejora de hasta el 11.00% en compresión y 22.88% en tracción indirecta. Este comportamiento está asociado a una mayor densificación de la matriz del concreto y a una integración más eficaz entre los componentes internos del material.

Aunque el sistema con 30 mL de nanopartículas mostró los valores más altos de resistencia a la compresión, el incremento respecto al sistema de 20 mL fue marginal, sugiriendo una saturación en la eficiencia del refuerzo. La dosificación de 20 mL representa el punto óptimo, logrando el mayor equilibrio entre mejora estructural, dispersión de las nanopartículas y economía de materiales.

Las micrografías de fractura revelaron que las mezclas con 10 mL y 20 mL de nanopartículas presentaron una ruptura más compacta y uniforme, con menor propagación de microgrietas y mejor cohesión entre los agregados y la matriz cementante. En contraste, la mezcla con 30 mL evidenció zonas de fractura interfacial más pronunciadas, posiblemente debido a la aglomeración parcial de nanopartículas, fenómeno que puede afectar negativamente la distribución de tensiones internas.

El control en el tamaño de partícula y la estabilidad coloidal logrados durante la síntesis permitieron su adecuada dispersión en la mezcla, evitando la formación de conglomerados y asegurando una integración homogénea en la matriz del concreto.

El uso de nanopartículas híbridas de SiO₂-SiC representa una estrategia viable para el desarrollo de concretos de mayor rendimiento estructural. Con base en los resultados obtenidos,

la dosificación de 20 mL por cada 500 g de cemento mostró el comportamiento más eficiente en términos de resistencia mecánica, lo que sugiere que esta proporción es la más adecuada entre las evaluadas. No obstante, el estrecho margen de diferencia con la dosificación de 30 mL indica que podrían existir proporciones intermedias con igual o mejor desempeño. Esta tecnología tiene el potencial de ser aplicada en elementos estructurales donde se requiere alta resistencia mecánica y durabilidad. La incorporación de nanopartículas híbridas de SiO₂-SiC permite sustituir parcialmente el contenido de cemento, logrando mantener o incluso mejorar el desempeño mecánico del concreto. Esta sustitución, aunque en pequeñas proporciones, contribuye a la reducción del consumo de cemento Portland compuesto, lo cual aporta beneficios en términos de sostenibilidad ambiental.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés que haya influido, directa o indirectamente, en los resultados obtenidos o en la interpretación de los datos presentados en este estudio.

Referencias

- ASTM C192/C192M, (2014). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C31/C31M, (2001). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C39/C39M, (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C496/C496M, (2017). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bao, J., Zheng, R., Zhang, P., Cui, Y., Xue, S., Song, Q., Ma, Y., (2023). Thermal resistance, water absorption and microstructure of high-strength self-compacting lightweight aggregate concrete (HSSC-LWAC) after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials* 365, 130071. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130071
- Cwirzen, A., Penttala, V., (2021). Influence of nano-silica on the properties of high-performance concrete. *Construction and Building Materials* 304, 124699. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124699
- Deng, X., Wang, L., Zhang, Y., (2021). Effect of silicon carbide nanoparticles on cement-based materials: A review. *Journal of Materials Science* 56, 1245–1263. DOI: 10.1007/s10853-020-05319-8
- Du, H., Du, S., Liu, X., (2014). Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and Building Materials* 73, 705–712. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.007
- Duru, I. P., Ozugurlu, E., Arda, L., (2019). Size effect on magnetic properties of Zn_{0.95-x}Mg_xNi_{0.05}O nanoparticles by Monte Carlo simulation. *Ceramics International* 45(5), 5259–5265. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.11.065
- Gao, H., Li, Y., Zhang, R., (2023). Enhanced mechanical and durability properties of concrete with hybrid nano-SiO₂/SiC particles. *Cement and Concrete Composites* 142, 105894. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105894
- García-Taengua, E., Campoy, M., Reig, L., (2021). Advances in concrete technology: Nano-additives and high-performance materials. *Materials Today Advances* 10, 100175. DOI: 10.1016/j.mtadv.2021.100175
- Ghiasvand, H., Bastami, M., Farokhzad, R., (2022). Enhancing the internal curing process of self-compacting concrete containing lightweight aggregate and chemical additives. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 26(16), 8414–8432. DOI: 10.1080/19648189.2021.1925417
- Goyal, R. K., (2017). *Nanomaterials and nanocomposites: synthesis, properties, characterization techniques, and applications*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kim, H., (2019). Effect of nano-silica on hydration and microstructure of cementitious materials. *Construction and Building Materials* 225, 564–577. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.015
- Li, Y., Wang, L., Gao, H., (2022). Pozzolanic activity and microstructure enhancement of nano-SiO₂ in cement-based materials. *Journal of Building Engineering* 45, 103595. DOI: 10.1016/j.job.2021.103595
- Lugo-Hubp, J., Siebe, C., Rodríguez-Elizarrarás, S., & Capra, L. (1993). *Mapa de peligros del volcán La Malinche y áreas circundantes*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M., (2020). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education, New York.
- Morsy, M. S., Alsayed, S. H., Aqel, M., (2010). Effect of nano-clay on mechanical properties and microstructure of ordinary Portland cement mortar. *International Journal of Civil & Environmental Engineering* IJCEE-IJENS 10(01), 23–27.
- Nazari, A., Riahi, S., (2011). The effect of TiO₂ nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete. *Materials Science and Engineering: A* 528, 756–763. DOI: 10.1016/j.msea.2010.09.074
- Orakzai, M. A., (2021). Hybrid effect of nano-alumina and nano-titanium dioxide on mechanical properties of concrete. *Case Studies in Construction Materials* 14, e00483. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00483
- Siamardi, K., (2022). Optimization of fresh and hardened properties of structural lightweight self-compacting concrete mix design using response surface methodology. *Construction and Building Materials* 317, 125928. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125928
- Signorini, C., Sola, A., Nobili, A., Siligardi, C., (2019). Lime-cement textile reinforced mortar (TRM) with modified interphase. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials* 17(1), 2280800019827823. DOI: 10.1177/2280800019827823
- Sikora, P., Elrahman, M., Stephan, D., (2022). Nano-engineered cementitious materials: A review. *Journal of Building Engineering* 52, 104275. DOI: 10.1016/j.job.2022.104275
- Zhan, P. M., He, Z. H., Ma, Z. M., Liang, C. F., Zhang, X. X., Abreham, A. A., Shi, J. Y., (2020). Utilization of nano-metakaolin in concrete: A review. *Journal of Building Engineering* 30, 101259. DOI: 10.1016/j.job.2020.101259