

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.  
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2026,  
Volumen 10, Número 2.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v10i2](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i2)

**RESISTENCIA A CLORUROS EN CONCRETO CON  
SUSTITUCIÓN PARCIAL DE AGREGADO FINO POR  
ARENA SÍLICA**

**CHLORIDE RESISTANCE IN CONCRETE WITH PARTIAL  
REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE BY SILICA SAND**

**Sara Elsy Vital Hernández**

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo – México

**Luis Ángel Hernández Acosta**

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo – México

**Luis Daimir López León**

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo - México

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v10i2.23542](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i2.23542)

## Resistencia a cloruros en concreto con sustitución parcial de agregado fino por arena sílica

Sara Elsy Vital Hernández<sup>1</sup>

[vi351973@uaeh.edu.mx](mailto:vi351973@uaeh.edu.mx)

<https://orcid.org/0009-0005-0383-7820>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
México

Luis Ángel Hernández Acosta

[he358055@uaeh.edu.mx](mailto:he358055@uaeh.edu.mx)

<https://orcid.org/0009-0002-9707-1587>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
México

Luis Daimir López León

[luis\\_lope@uaeh.edu.mx](mailto:luis_lope@uaeh.edu.mx)

<https://orcid.org/0000-0001-5871-7707>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
México

### RESUMEN

La corrosión del acero de refuerzo inducida por la penetración de iones cloruro es una de las principales causas de deterioro en estructuras de concreto armado expuestas a ambientes agresivos. En este estudio se evalúa la influencia de la sustitución parcial del agregado fino por arena sílica (AS) en la resistencia a la penetración de cloruros del concreto hidráulico. Se diseñaron mezclas con contenidos de AS del 5 %, 10 % y 15 %, con el objetivo de analizar su efecto en la compacidad de la matriz cementante y la durabilidad del material. La caracterización de materiales se realizó mediante análisis físico y granulométrico, y el diseño de mezclas conforme a ACI 211.1. La elaboración y curado de especímenes se efectuó según NMX-C-156-ONNCCE/2010, mientras que la resistencia a la compresión se evaluó conforme a NMX-C-155-ONNCCE/2014. La resistencia a la penetración de cloruros se determinó mediante exposición acelerada en cámara de niebla salina conforme a ASTM B117. Los resultados indican que la incorporación de arena sílica mejora la densificación de la matriz cementante, reduciendo la permeabilidad y la difusión de cloruros. La mezcla con 10 % de AS presentó el mejor desempeño en términos de resistencia mecánica y durabilidad.

**Palabras Clave:** concreto armado, resistencia a la corrosión, arena de sílica, cloruros, durabilidad

---

<sup>1</sup> Autor Principal

Correspondencia: [vi351973@uaeh.edu.mx](mailto:vi351973@uaeh.edu.mx)

# Chloride resistance in concrete with partial replacement of fine aggregate by silica sand

## ABSTRACT

Corrosion of reinforcing steel induced by chloride ion penetration is one of the main causes of deterioration in reinforced concrete structures exposed to aggressive environments. This study evaluates the influence of partial replacement of fine aggregate with silica sand (SS) on the resistance to chloride penetration of hydraulic concrete. Concrete mixtures were designed with 5%, 10%, and 15% silica sand to analyze their effect on the compactness of the cementitious matrix and material durability. Materials were characterized through physical and granulometric analysis, and mix design was carried out according to ACI 211.1. Specimen preparation and curing followed NMX-C-156-ONNCCE/2010, while compressive strength was evaluated in accordance with NMX-C-155-ONNCCE/2014. Resistance to chloride penetration was assessed through accelerated exposure in a salt spray chamber following ASTM B117. Results indicate that silica sand incorporation enhances matrix densification, reducing permeability and chloride diffusion. The mixture with 10% silica sand showed the best overall performance in terms of mechanical strength and durability.

**Keywords:** Reinforced concrete, corrosion resistance, silica sand, chlorides, durability

*Artículo recibido: 15 febrero 2025*

*Aceptado para publicación: 15 marzo 2026*



## INTRODUCCIÓN

El concreto hidráulico es uno de los materiales más utilizados en la construcción moderna debido a su elevada resistencia mecánica, durabilidad y capacidad de adaptarse a diversas configuraciones estructurales. (Sánchez de Guzmán, 2001). Estas características han favorecido su aplicación en infraestructura vial, edificaciones y obras civiles de gran escala. En muchas aplicaciones estructurales, el concreto se emplea en conjunto con acero de refuerzo para conformar el concreto armado, material compuesto en el que el concreto resiste principalmente esfuerzos de compresión mientras que el acero absorbe las tensiones, generando un sistema estructural eficiente. Sin embargo, el desempeño a largo plazo de estas estructuras depende en gran medida de su durabilidad y de la capacidad del concreto para limitar la penetración de agentes agresivos presentes en el ambiente (Villao Vera, 2021).

Entre los principales mecanismos de deterioro del concreto armado destaca la penetración de iones de cloruro, especialmente en estructuras expuestas a aerosoles salinos (Guerra Mera, Puig Martínez, Castañeda Valdés, & Banque Campozano, 2023). Estos iones pueden difundirse a través de la red porosa del concreto hasta alcanzar el acero de refuerzo, provocando la desestabilización de la capa pasiva que lo protege e iniciando el proceso de corrosión (Villao Vera, 2021). Como consecuencia de este proceso electroquímico, se generan compuestos de óxido que inducen presiones internas en el concreto circundante, lo que favorece la aparición de fisuras, el desprendimiento del recubrimiento y el deterioro progresivo del elemento estructural (Garcés Terradillos, Climent, Ángel, Carmona, & Sánchez Rojas, 2021). Este fenómeno representa uno de los problemas más relevantes para la durabilidad de la infraestructura, debido a que incrementa significativamente los costos de mantenimiento y rehabilitación.

Por otro lado, la velocidad de penetración de los cloruros se encuentra estrechamente relacionada con la microestructura del concreto, particularmente con la porosidad, la conectividad de los poros capilares y la relación agua-cemento utilizada en el diseño de la mezcla. Una matriz más densa reduce la difusión de agentes agresivos y mejora la durabilidad del material (Flores Huamán & Noriega Guzmán, 2024). Por esta razón, la incorporación de adiciones minerales se ha consolidado como una estrategia para optimizar las propiedades del concreto y disminuir su permeabilidad (Omen-Bolaños, 2021).

Dentro de estas alternativas, la arena sílica destaca por su elevada pureza de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y



su granulometría fina, características que permiten que actúe como un relleno microestructural dentro de la matriz cementicia, contribuyendo a reducir la conectividad de los poros capilares y limitar la difusión de iones cloruro (Castañeda, y otros, 2021). No obstante, aún existe la necesidad de evaluar de manera sistemática la influencia de la incorporación de arena sílica sobre la permeabilidad del concreto bajo condiciones que simulen ambientes agresivos reales.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la influencia de la incorporación de arena sílica en proporciones de 5%, 10% y 15% en la mezcla de concreto hidráulico, analizando los cambios que dicha adición genera en su permeabilidad cuando el material es expuesto a un ambiente salino mediante aspersión controlada, con el fin de determinar su influencia en la resistencia a la penetración de cloruros y aportar información técnica para el diseño de mezclas de concreto con mayor durabilidad en ambientes corrosivos.

## **METODOLOGÍA**

### **Caracterización Físico-Química de los Materiales**

#### **Arena Sílica (AS) como Refinador Microestructural**

La arena sílica (AS) empleada en este estudio se define como un compuesto inorgánico derivado de la combinación de silicio y oxígeno, cristalizado predominantemente en forma de cuarzo. Este material es producto de procesos geológicos de intemperismo y erosión, seguidos de técnicas industriales de refinación que garantizan una alta pureza química (Moraño Rodríguez, Guillén Viñas, Martínez Alarcón, Martínez Alarcón, & Díaz Hospital, 2011). Su constitución principal es el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), un mineral cuya dureza y estabilidad térmica resultan fundamentales en aplicaciones que enfrentan esfuerzos de abrasión y ciclos térmicos severos (Giménez & Diaz, 2024).

Desde una perspectiva reológica, la AS destaca por su distribución granulométrica uniforme. Esta característica es crítica para la optimización del empaquetamiento granular en la matriz cementicia, permitiendo que las partículas más finas ocupen los vacíos intersticiales entre los agregados convencionales, actuando, así como un filler físico que mejora la densidad del material (Lora-Urías, Alvarado-Fierro, Soto-Grijalva, & Hernández-Zamora, 2025).

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



### **Concreto Hidráulico y Criterios de Durabilidad**

El concreto hidráulico se concibió como un sistema compuesto multifásico (aglomerante, agregados y agua). La elección de un pavimento rígido sobre alternativas flexibles se fundamenta en su módulo de elasticidad superior, lo que garantiza una distribución de presiones más eficiente hacia las capas inferiores de la estructura vial. Esta capacidad de disipación de carga minimiza la dependencia del sistema respecto a la calidad de las terracerías y previene deformaciones permanentes por efectos de tráfico pesado, frenado y circulación constante (Loza Delgado & Machacca Ccalloquispe, 2022). Asimismo, la baja permeabilidad intrínseca de estas mezclas resulta vital para resistir la degradación por derrames de hidrocarburos y la exposición a gradientes térmicos elevados (Ortiz Lozano, Aguado de Cea, Zermeño de León, & Alonso Farrera, 2007).

### **Análisis granulométrico de los agregados**

Previo a la preparación de la mezcla, los materiales pétreos finos y gruesos se clasificaron mediante análisis granulométrico por cribado, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma N-CMT-4-06-0001/19, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, con el propósito de determinar la distribución del tamaño de las partículas presentes en los materiales y verificar su idoneidad para su utilización en la mezcla de concreto. Para el agregado fino se utilizaron los tamices No. 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200 (Figura 2 y 3), mediante los cuales se determinó el porcentaje del material retenido en cada uno de ellos (Tabla 1).

Este procedimiento permitió evaluar la distribución de tamaños de partículas y asegurar que el agregado presentara una gradación adecuada para contribuir a la compacidad y estabilidad de la mezcla de concreto.



Figura 2. Proceso de tamizado para el análisis granulométrico de agregados finos.  
Fuente: elaboración propia.



Figura 3. Tamices utilizados para la clasificación de agregados finos.  
Fuente: elaboración propia.

**Tabla 1.** Resultados del análisis granulométrico del agregado fino

Agregados Finos					
Tamiz	1° Muestra	2° Muestra	3° Muestra	Suma	Porcentaje de retención total
	(Kg)				
> 200	0.001	0.001	0.001	0.003	0.037
#200	0.001	0.001	0.001	0.003	0.037
#100	0.021	0.430	0.390	0.841	10.489
#50	0.228	0.233	0.229	0.690	8.606
#30	0.325	0.351	0.377	1.053	13.133
#16	0.497	0.502	0.511	1.510	18.833

#8	1.155	1.186	1.174	3.515	43.839
#4	0.113	0.140	0.150	0.403	5.026
Total	2.341	2.844	2.833	8.018	100

De manera similar, el agregado grueso fue sometido al mismo procedimiento de tamizado, utilizando los tamices No. 1", ¾", ½", 3/8" y ¼" (Figura 4), con el objetivo de determinar la distribución de tamaños de partícula del material (Tabla 2).



*Figura 4. Proceso de tamizado para el análisis granulométrico de agregados gruesos.  
Fuente: elaboración propia.*

**Tabla 2.** Resultados del análisis granulométrico del agregado grueso

<b>Agregados Gruesos</b>					
<b>Tamiz</b>	<b>1° Muestra</b>	<b>2° Muestra</b>	<b>3° Muestra</b>	<b>Suma</b>	<b>Porcentaje de retención total</b>
	<b>(Kg)</b>				
1"	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
¾"	0.780	0.811	0.796	2.387	22.290

1/2"	0.358	0.330	0.345	1.033	9.646
3/8"	0.315	0.318	0.300	0.933	8.712
1/4"	1.279	1.357	1.290	3.926	36.661
<1/4"	0.843	0.840	0.747	2.430	22.691
Total	3.575	3.656	3.478	10.709	100

### Diseño de la Mezcla de Concreto

Se realizó el diseño de una mezcla de concreto convencional con una resistencia a la compresión específica de un  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ , empleando cemento Portland Tipo I, material de uso común para la construcción de pavimentos y elementos estructurales de concreto hidráulico. La dosificación de la mezcla se determinó conforme a los lineamientos establecidos en la norma NMX-C-155-ONNCCE/2014, considerando las características de los agregados y la resistencia de diseño requerida.

Como parte de la metodología experimental, se incorporó arena sílica como adición al agregado fino, evaluando contenidos del 5%, 10% y 15% en proporción al peso del agregado fino. Esta adición se implementó con el propósito de analizar su influencia en el comportamiento del concreto hidráulico, particularmente en su resistencia a la compresión y en la penetración de agentes salinos.

Con base en estos criterios se establecieron las proporciones correspondientes de cemento, agregado fino, agregado grueso y agua para la preparación del concreto (Tabla 3). Dicha mezcla fue elaborada con el propósito de obtener 24 especímenes cilíndricos de concreto, distribuidos en cuatro grupos: 8 especímenes correspondientes a la mezcla control (0 % de adición de arena sílica), 8 con 5 %, 8 con 10 % y 8 con 15 % de adición de arena sílica, porcentajes calculados con respecto al peso del agregado fino. De los cuales, 12 especímenes fueron destinados a la prueba de resistencia a la compresión, mientras que los 12 restantes se utilizaron para evaluar el comportamiento del acero de refuerzo en concreto expuesto a ambientes salinos mediante aspersión.

**Tabla 3.** Proporciones de materiales para la elaboración de cilindros de concreto

<b>Dosificaciones de concreto hidráulico</b>
<b>Cantidad</b>

<b>Materiales</b>	<b>1 cilindro</b>	<b>Resistencia a la compresión (12 cilindros)</b>	<b>Penetración de agentes salinos (12 cilindros)</b>
Cemento (kg)	0.847	10.164	10.164
Agregado fino (kg)	0.535	6.420	6.420
Agregado grueso (kg)	0.360	4.320	4.320
Agua (lts)	0.312	3.744	3.744

#### **Pruebas de calidad del concreto fresco**

Se realizó el ensayo de revenimiento conforme a lo establecido en la norma N-CMT.2-02-005/04, emitida por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, la cual define el procedimiento para determinar la consistencia del concreto en estado fresco mediante el Cono de Abrahams, así como los criterios para su evaluación. La prueba se ejecutó inmediatamente después del mezclado, a fin de asegurar que las mediciones correspondieran a condiciones representativas del material (Figura 5).

**Figura 5.** Proceso de prueba de revenimiento



Fuente: elaboración propia.

Como procedimiento, se colocó el molde troncocónico sobre una superficie rígida, nivelada y no absorbente, procedimiento a su llenado en tres capas de igual volumen, de las cuales, cada capa fue consolidada mediante 25 penetraciones uniformemente distribuidas en la sección transversal. Una vez enrasada la superficie superior, el molde se retiró verticalmente, evitando alteraciones en el asentamiento natural del espécimen.

El revenimiento registrado fue de 9.1 cm, de acuerdo con la tabla de valores nominales establecida con norma, este resultado corresponde a una consistencia media, compatible con el diseño de mezcla propuesto, y evidencia una adecuada relación entre fluidez y cohesión, sin indicios de segregación o exudación durante el ensayo.

### **Prueba de Resistencia a la Compresión**

La validación mecánica de los especímenes se realizó mediante la prueba de resistencia a la compresión axial siguiendo la norma N-CMT-2-02-005/04. El procedimiento incluyó un periodo de curado bajo condiciones higrotérmicas controladas para maximizar la hidratación de los especímenes. Tras completar el periodo de curado estándar de 7, 15 y 28 días respectivamente, los especímenes fueron retirados para su preparación superficial. Con el fin de garantizar una distribución de carga uniforme y evitar fluctuaciones de los resultados, se procedió al encabezado o nivelación de las caras paralelas mediante almohadillas de neopreno siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C617. Este paso es crítico para asegurar que el esfuerzo de compresión se aplique de manera perpendicular al eje longitudinal del cilindro. Posteriormente, los cilindros fueron ensayados en una prensa hidráulica universal aplicando una carga constante.

La medición de la carga máxima antes de la falla estructural proporcionó el dato de esfuerzo último, permitiendo comparar la eficiencia mecánica de la arena sílica frente al concreto convencional. Este ensayo es el indicador principal de la idoneidad del material para resistir las sollicitaciones mecánicas reales en infraestructura civil y vial.

### **Configuración de los Especímenes de Concreto Armado**

Con el fin de reproducir el comportamiento de un elemento de concreto armado en condiciones reales de servicio, se fabricaron 12 especímenes cilíndricos con una barra de acero de refuerzo embebida de 3/4" (19.1 mm) de diámetro (Figura 6, 7, 8 y 9). La barra fue colocada longitudinalmente de manera

concéntrica respecto al eje del cilindro, garantizando un recubrimiento uniforme en todo su perímetro. Los especímenes se distribuyeron en cuatro grupos experimentales correspondientes a sustituciones parciales de arena natural por arena sílica en proporciones de 0%, 5%, 10% y 15%, con tres especímenes por cada dosificación. Esta configuración permitió evaluar comparativamente la influencia del contenido de arena sílica en el comportamiento electroquímico del acero embebido bajo condiciones de exposición a cloruros.

*Figura 6. Especimen de concreto armado (0% de arena sílica). Fuente: elaboración propia.*



*Figura 7. Especimen de concreto armado (5% de arena sílica). Fuente: elaboración propia.*



*Figura 8. Especimen de concreto armado (10% de arena sílica). Fuente: elaboración propia.*



*Figura 9. Especimen de concreto armado (15% de arena sílica). Fuente: elaboración propia.*

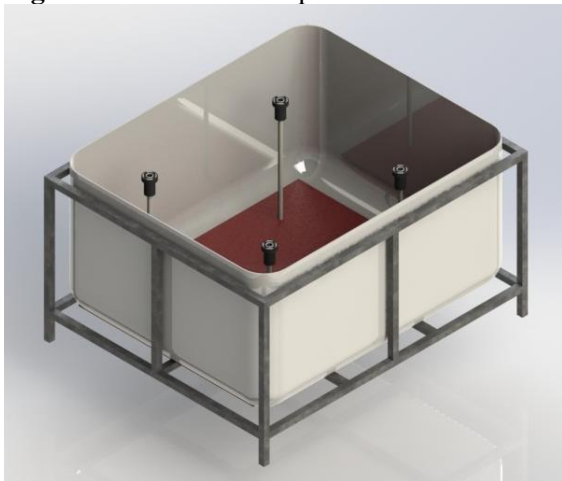
### **Ensayo de exposición acelerada a ambientes salinos por aspersión**

Los especímenes fueron sometidos a un proceso de exposición acelerada bajo los lineamientos de la norma ASTM B117 de ASTM Internacional, la cual establece el método para la generación controlada de niebla salina con fines de corrosión en materiales metálicos (Figura 10), la exposición se realizó

mediante aspersión periódica de solución salina sobre la superficie de los cilindros de concreto armado, manteniendo condiciones constantes de humectación durante un período de 45 días. Este procedimiento permitió simular un ambiente con presencia continua de cloruros, favoreciendo su ingreso a través del recubrimiento de concreto hasta alcanzar la interfase acero-concreto.

La acción sostenida del agente agresivo promovió la acumulación progresiva de iones cloruro en la matriz cementicia, generando condiciones propicias para la despasivación del acero de refuerzo. De esta manera, se aceleró el proceso de corrosión y se hizo posible evaluar comparativamente el desempeño de las mezclas con diferentes porcentajes de arena sílica bajo condiciones representativas de ambiente marino.

**Figura 10.** Cámara de aspersión salina



### **Monitoreo de Potenciales de Media Celda**

La probabilidad de corrosión del acero de refuerzo se evaluó mediante la técnica de Potencial de Media Celda, siguiendo los lineamientos de la normativa ASTM C876. El sistema de medición consistió en un electrodo de referencia de Cobre/Sulfato de Cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) conectado a un voltímetro de alta impedancia, cerrando el circuito eléctrico con el acero de refuerzo expuesto en un extremo del espécimen.

### **Interpretación de la Termodinámica de Corrosión**

El protocolo de medición se realizó de forma sistemática para registrar la evolución del potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) a lo largo del tiempo de exposición (45 días). La importancia de este ensayo radica en su capacidad para identificar el momento exacto en que la concentración de agentes agresivos en la interfaz acero-concreto es suficiente para desestabilizar la capa protectora de óxido (capa pasivante).

Los datos obtenidos se categorizaron según los umbrales de la norma ASTM C876, donde los valores más negativos que -350 mV (para electrodo Cu/CuSO<sub>4</sub>) indican una probabilidad de corrosión superior al 90%. Al contrastar los potenciales entre los diferentes grupos (0%, 5%, 10% y 15% de AS), se pudo determinar la eficacia de la arena de sílica como una barrera física que retrasa la transición del acero de un estado pasivo a uno activo, prolongando así el periodo de iniciación de la corrosión.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación mecánica se realizó empleando una prensa hidráulica universal con capacidad de 2000 kN, calibrada bajo estándares internacionales. El procedimiento se rigió por la normativa N-CMT-2-02-005/04. Cada espécimen se colocó concéntricamente en el bloque de carga inferior, aplicando una tasa de carga continua y controlada hasta alcanzar la falla estructural.

El promedio de los resultados obtenidos de los tres cilindros por cada grupo (0%, 5%, 10% y 15% de AS) constituyó el valor representativo para la discusión de la eficiencia mecánica de la arena sílica (Tabla 4).

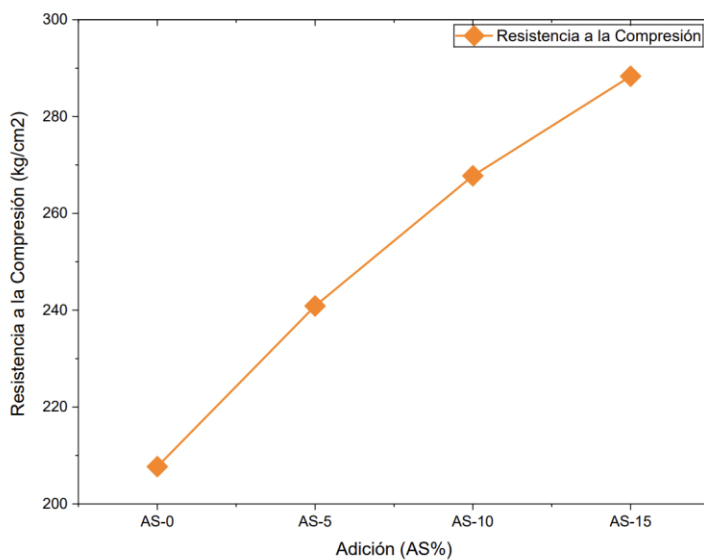
**Tabla 4.** Resistencia a la compresión de los cilindros

<b>Datos</b>					
<b>Adición (AS)</b>	<b>Espécimen</b>	<b>Diámetro promedio (mm)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Peso (gr)</b>	<b>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>AS-0</b>	1	150.23	300.01	11690.80	204.32
	2	150.06	301.56	11560.36	207.95
	3	149.90	302.89	11652.14	210.80
<b>AS-5</b>	1	150.20	299.06	11250.63	228.10
	2	150.92	300.01	11269.14	252.90
	3	151.20	300.89	11356.12	241.62
<b>AS-10</b>	1	150.70	304.56	11560.41	280.12
	2	149.60	302.45	11324.26	263.40

	3	149.80	300.05	11456.31	259.80
<b>AS-15</b>	1	149.90	300.04	11423.01	285.45
	2	150.01	300.56	11352.09	293.87
	3	150.02	300.46	11341.23	285.69

Como se observa en los datos recabados, la mayor parte de los tipos de mezclas modificadas superaron la resistencia de diseño establecida ( $250 \text{ kg/cm}^2$ ). El grupo AS-10 y AS-15 exhibieron los desempeños más altos, alcanzando más de  $280 \text{ kg/cm}^2$ , lo que representa un aumento del 12% en comparación con la mezcla convencional (Figura 11).

**Figura 11.** Representación de Resistencia a la compresión con la adición del porcentaje de AS



Fuente: elaboración propia.

Este incremento se atribuye a la optimización del empaquetamiento granular; las partículas finas de sílice actúan como selladores en la matriz cementante, promoviendo una estructura más densa y reduciendo la zona de transición interfacial entre el agregado y la pasta.

La inspección post-fractura de los especímenes indicó fallas predominantemente de Tipo 1 (Cono y Partidura) y Tipo 3 (Cono y Corte) de acuerdo con la norma ASTM C39. La morfología de las fracturas en todos los grupos de AS mostró superficies de ruptura muy uniformes y correcta (Figura 12), lo que corrobora una mayor cohesión interna de la matriz gracias al refinamiento microestructural aportado por

la sílice.

Figura 12. Comparativa de tronado entre especímenes AS-5, AS-10 y AS-15 a los 28 días



Fuente: elaboración propia.

En cuanto al desempeño mecánico, se observó que la sustitución del 10 % de arena sílica (AS) representa el punto óptimo de comportamiento. Incrementar este porcentaje hasta 15 % no generó mejoras adicionales; por el contrario, se evidenció una estabilización e incluso una ligera disminución en la resistencia a la compresión en comparación con la dosificación al 10 %. Este comportamiento puede atribuirse al incremento en la demanda de agua de la mezcla, asociado a la elevada superficie específica de la arena sílica. Un exceso de finos, sin un ajuste adecuado de la relación agua/cemento, puede favorecer el aumento de la porosidad o la formación de aglomeraciones, generando zonas de debilidad estructural. Desde el punto de vista de la durabilidad, estos resultados sugieren que la incorporación de AS en el diseño de mezclas para pavimentos rígidos puede contribuir a reducir los mecanismos de deterioro, validando la optimización granulométrica como una estrategia clave para mejorar la vida útil de la infraestructura.

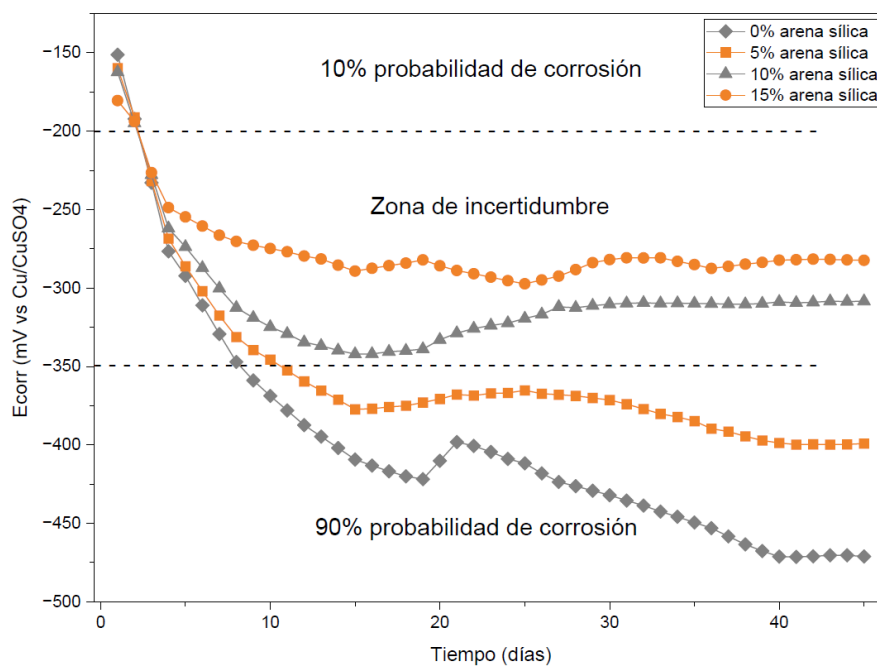
Por otra parte, el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo, evaluado mediante el potencial de media celda ( $E_{corr}$ ), mostró variaciones significativas en función del porcentaje de sustitución con arena sílica y del tiempo de exposición al ambiente salino. Durante los primeros días, todos los especímenes presentaron una disminución progresiva del potencial, asociada al ingreso inicial de iones cloruro a través del recubrimiento de concreto.

El espécimen sin adición de arena sílica (0 %) registró la caída más acelerada hacia valores negativos,

alcanzando el rango de alta probabilidad de corrosión según ASTM C876, lo que evidencia una menor capacidad de la matriz convencional para retardar la penetración de agentes agresivos.

En contraste, las mezclas con 5 %, 10 % y 15 % de AS presentaron una evolución más gradual del potencial. En particular, los especímenes con mayores porcentajes de sustitución permanecieron durante más tiempo en la zona de incertidumbre, indicando un retraso en la transición del acero desde un estado pasivo hacia uno activo (Figura 13).

Figura 13. Potenciales de corrosión para las muestras al 0%, 5%, 10% y 15



Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Los resultados de la presente investigación demuestran que la sustitución parcial del agregado fino por arena sílica (AS) constituye una estrategia viable para mejorar la durabilidad del concreto armado frente a ambientes con presencia de cloruros. El monitoreo electroquímico mediante potenciales de media celda (ASTM C876) evidenció que la incorporación de AS retrasa el proceso de despasivación del acero de refuerzo, prolongando el periodo de iniciación de la corrosión en comparación con el concreto convencional. Este comportamiento confirma que la arena sílica actúa como un refinador microestructural que limita la penetración de agentes agresivos.

Desde el punto de vista mecánico, se identificó que un contenido del 10 % de AS representa la dosificación óptima, al maximizar la resistencia a la compresión ( $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ ) y mejorar la

compacidad de la matriz cementante. Este efecto se atribuye al mecanismo de relleno (filler) y a la reducción de la conectividad de los poros capilares. En contraste, un contenido del 15 % no genera beneficios proporcionales, lo que sugiere la existencia de un umbral asociado al exceso de finos y a la demanda de agua de la mezcla.

En conjunto, los resultados confirman que la incorporación de arena sílica (AS) reduce la permeabilidad y la difusión de cloruros, contribuyendo a prolongar la vida útil de los elementos de concreto. Su aplicación en pavimentos rígidos representa una alternativa técnicamente eficiente para mejorar el desempeño frente a ambientes salinos, disminuir costos de mantenimiento y avanzar hacia soluciones constructivas más durables y sostenibles.

## REFERENCIAS

American Society for Testing and Materials. (21 de 09 de 2022). ASTM C876-15. *Método de prueba estándar para el potencial de corrosión del acero de refuerzo sin recubrimiento en el hormigón.*

Obtenido de [https://store-astm-org.translate.googleusercontent.com/translate/c0876-15.html?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://store-astm-org.translate.googleusercontent.com/translate/c0876-15.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)

American Society for Testing and Materials. (22 de 12 de 2025). Procedimiento estándar para el funcionamiento de aparatos de nebulización de sal. Obtenido de [https://store-astm-org.translate.googleusercontent.com/translate/b0117-19.html?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://store-astm-org.translate.googleusercontent.com/translate/b0117-19.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)

Castañeda, A., Valdés, C., Viña, J., Verdecia, U., Corvo, F., & Marrero, R. (2021). Comparación de la penetración de iones cloruro en los pilotes de hormigón armado de la Terminal de Cruceros en la bahía de la Habana, Cuba. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Abel-Castaneda/publication/355333797\\_Comparacion\\_de\\_la\\_penetracion\\_de\\_iones\\_cloruro\\_en\\_los\\_pilotes\\_de\\_hormigon\\_armado\\_de\\_la\\_Terminal\\_de\\_Cruceros\\_enla\\_bahia\\_de\\_la\\_Habana\\_Cuba/links/617ab08ca767a03c14c1f787/Comparacion-d](https://www.researchgate.net/profile/Abel-Castaneda/publication/355333797_Comparacion_de_la_penetracion_de_iones_cloruro_en_los_pilotes_de_hormigon_armado_de_la_Terminal_de_Cruceros_enla_bahia_de_la_Habana_Cuba/links/617ab08ca767a03c14c1f787/Comparacion-d)

Catro, P., & Castro Borges, P. (1995). Corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV.*

Corral, H. R., Arredondo, R. C., Almaral, S. J., & Gómez, S. P. (2013). Influencia de la relación agua/cemento en la resistencia a la compresión y la porosidad del concreto. *Revista de Ingeniería Civil.*



- Flores Huamán, J., & Noriega Guzmán, G. (20 de 12 de 2024). INFLUENCIA DE LA RELACIÓN AGUA / CEMENTO EN LA POROSIDAD, IQUITOS -2024. Iquitos, Perú. Obtenido de <https://repositorio.ucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/9da49e3b-cae5-425d-8692-16762a81f231/content>
- Garcés Terradillos, P., Climent, M., Ángel, Carmona, J., & Sánchez Rojas, M. (01 de 01 de 2021). Extension of the useful life of reinforced concrete structures exposed to marine environments through the application of electrochemical techniques. (48-60), 11(1). Revista ALCONPAT. doi:<https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.518>
- Giménez, A., & Diaz, L. (2024). Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de bloques de concreto elaborados con sustitución parcial del agregado por arena y polvo de sílice. 25, 2, 46-58. Revista Gaceta Técnica. Obtenido de [https://www.redalyc.org/journal/5703/570378253003/html/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.redalyc.org/journal/5703/570378253003/html/?utm_source=chatgpt.com)
- Goytia, R. (2018). Análisis de vida útil en pavimentos rígidos bajo condiciones de carga pesada. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Guerra Mera, J., Puig Martínez, R., Castañeda Valdés, A., & Banque Campozano, B. (10 de 01 de 2023). Estado del arte sobre durabilidad de estructuras de hormigón armado en perfiles costeros. Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología E Investigación. Obtenido de <https://journalingeniar.journalgestar.org/index.php/ingeniar/article/view/103>
- Lora-Urías, C., Alvarado-Fierro, O., Soto-Grijalva, A., & Hernández-Zamora, R. (12 de 2025). Caracterización de los componentes mineralógicos de gravas y arenas con influencia en la reacción álcali-sílice, utilizando barras de mortero. 38-45. Revista Ingeniería y Tecnología UAS.
- Loza Delgado, S., & Machacca Ccalloquispe, R. S. (2022). Estudio de la influencia del tipo de cemento y granulometrías de agregado fino y grueso en las propiedades físicas y mecánicas de pavimento de concreto hidráulico poroso en la ciudad de Arequipa. Huancayo: Universidad Continental.
- Moraño Rodríguez, A., Guillén Viñas, J., Martínez Alarcón, J., Martínez Alarcón, M., & Díaz Hospital, J. (2011). El caolín y la arena sílicea como materiales de construcción. 374-439. Quito, Ecuador: IX Jornadas Iberoamericanas de materiales de Construcción. doi:<https://orcid.org/0000-0002-4410-7155>

- Neville. (2012). *Properties of Concrete* (5a ed.). Person India.
- Omen Bolaños, J. (2021). Uso de adiciones de materiales para la mejora de la durabilidad del concreto reforzado frente a cloruros. Informe de la Construcción.
- Omen-Bolaños, J. (2021). Durabilidad del concreto hidráulico y materiales cementantes suplementarios. Universidad Nacional Autónoma de México.
- ONNCCE – Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (25 de 20 de 2010). NMX-C-156-ONNCCE-2010. *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-CONCRETO HIDRAULICO-DETERMINACION DEL REVENIMIENTO EN EL CONCRETO FRESCO (ESTA NORMA CANCELA A LA NMX-C-156-1997-ONNCCE)*. Obtenido de <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-c-156-onnce-2010/>
- ONNCCE – Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (07 de 11 de 2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO HIDRÁULICO-DOSIFICADO EN MASA ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO (CANCELA A LA NMX-C-155-ONNCCE-2004 Y A LA NMX -C-403-ONNCCE-1999)*. Obtenido de <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-c-155-onnce-2014/>
- Ortiz Lozano, J. A., Aguado de Cea, A., Zermeño de León, M. E., & Alonso Farrera, F. A. (08 de 2007). Influencia de la temperatura ambiental en las propiedades del concreto hidráulico. *II*, 2, 13-20. Mérida, Yucatán, México: Ingeniería. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/467/46711202.pdf>
- Salgado Burgos, M. (2016). Evaluación del desempeño mecánico de mezclas cementicias con adiciones de arena sílica. (Tesis de Maestría).
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Santafé de Bogota, Colombia: Bhandar Editores.
- Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2004). *Calidad del Concreto Hidráulico*. 12: 15. Obtenido de <https://normas.imt.mx/storage/normativa/N-CMT-2-02-005-04.pdf>
- Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2019). *Calidad de Agregados para Carpetas de Concreto Hidráulico*. Obtenido de <https://normas.imt.mx/storage/normativa/N-CMT-4-06-001-19.pdf>

- Standar Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. (2004). *Proporcionamiento de mezclas. ACI 211.1*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- Susunaga Miranda, M. A., Estéves Garrido, B. M., & Susunaga Estévez, A. (2020). Características de arena sílica como material de construcción sostenible. *Journal of Applied Engineering*.
- The Editors of Encyclopedia Britannica. (2025). *Britannica*. Obtenido de <https://www.britannica.com/technology/reinforced-concrete>
- Villagran-Vázquez, Y., Gonáles de la Fuente, A., Volpi-León, V., Vital-Hernández, S. E., & Acosta-Hernández, L. A. (2024). Diseño de pavimento rígido con sustitución de agregados por arena sílica. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*. doi:<https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial3.13470>
- Villao Vera, R. (30 de 10 de 2021). Actualidad de las técnicas de análisis de corrosión en estructuras de concreto reforzado. 1-10. *E-IDEA Journal of Engineering Science*. doi:<https://doi.org/10.53734/esci.vol3.id210>

