

Reparación del puente El Zacatal con Concreto de Ultra Alto Desempeño.

BL. Altamirano, J. Villegas, M. de la O.

Daños por corrosión de las estructuras de concreto en ambientes marinos

Es ampliamente reconocido que la corrosión provocada por los iones de cloruro es una de las principales causas de daño en las estructuras de concreto reforzado en áreas costeras y marinas³. El acero de refuerzo en el concreto está protegido por la alta alcalinidad de los poros de los productos que se forman en el proceso de la hidratación del cemento ($\text{pH} > 13$). Esta alta alcalinidad en los poros mantiene inactivas las barras de refuerzo y regula la velocidad de corrosión gracias a la formación de una capa de óxido de hierro sobre las barras⁴. Sin embargo, cuando los iones de cloruro penetran a través del concreto y alcanzan una concentración crítica, esta capa protectora se destruye. En presencia de oxígeno y humedad, comienza el proceso de corrosión⁵. Factores como la permeabilidad, la calidad y el espesor de la capa de concreto son los que determinan la velocidad de este proceso.



Figura 1. Foto aérea, puente El Zacatal

Antecedentes

Construido en el año de 1994, el puente El Zacatal es considerado el más largo de México (longitud 3861 m y 9 m de ancho). Conecta la península de Atasta con la Isla del Carmen en el suroeste de Ciudad del Carmen Campeche, México¹.

La estructura está conformada por elementos prefabricados, 121 cabezales de concreto, 496 traveses AASTHO tipo IV modificado y 8 traveses cajón, así como 124 losas de concreto postensado².

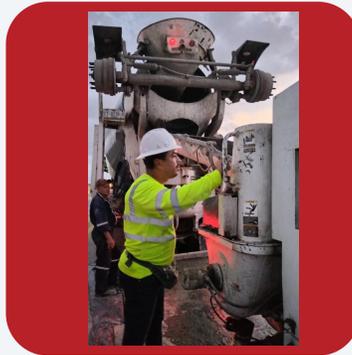
La reparación y restauración de las estructuras de concreto afectadas por la corrosión por cloruro parecen inevitables⁶. El método de reparación elegido debe ser confiable, duradero, económico y causar el menor impacto posible. Además, debe ser estructuralmente eficaz y fácil de implementar⁷. Por esta razón, se propuso la idea de reparar y reforzar estructuras de concreto con Concreto de Ultra Alto Desempeño (CUAD), con o sin refuerzo, para proteger, restaurar o reforzar partes específicas de la estructura en condiciones ambientales severas o bajo cargas mecánicas.



Concreto de Ultra Alto Desempeño (CUAD)

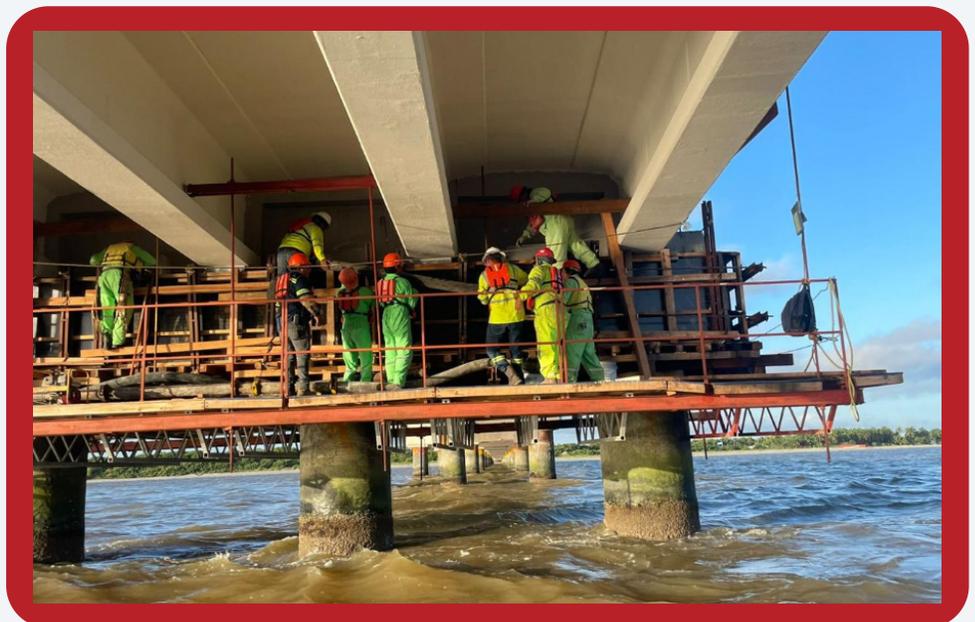
El uso del CUAD como material de reparación es cada vez más común⁸.

La baja permeabilidad, creada por una estructura de poros discontinuos y una microestructura densa, hacen que sustancias destructivas como el agua, iones cloruro, oxígeno, etc., difícilmente entren a la estructura y como consecuencia se limitan las causas potenciales de deterioro⁹. Por lo tanto, el uso del CUAD como material de reparación puede extender la vida útil de las estructuras de concreto y para este caso específico de puentes.



Proyecto

La rehabilitación del puente El Zacatal se llevará a cabo en dos etapas, el proyecto está a cargo del consorcio formado por las constructoras: Grupo Industrial Rubio SA de CV y Grupo Empresarial de Puentes y Estructuras SA de CV con la asesoría técnica de la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) y la empresa SATELSA SA de CV.



Elementos	No. de piezas indicadas en el proyecto
Encamisado de Zapatas	9
Columnas con dado (Encamisado)	16
Columnas sin dado (encamisado)	6
Columnas con travesaño (encamisado)	32
Cabezal tipo 1 (Encamisado)	6
Cabezal tipo 2 (Encamisado)	10
Cabezal tipo 3 (Encamisado)	2
Cabezal tipo 4 (Encamisado)	1
Cabezal tipo 33, 34 y 36 (Encamisado)	3
Cabezal tipo 35 (Encamisado)	1
Total de piezas a colar indicadas en el proyecto:	86
Elementos considerados para verificación:	50

Tabla 1. Elementos para reparar en la primera etapa.

La reparación consiste en el vertido de CUAD en un molde encofrado nombrado encamisado, cimbrado alrededor de los elementos a reparar, ver Figura 2. El cual cuenta con un espesor de 15 cm para cabezales y columnas.

Figura 2. Cimbrado del elemento, formando el encamisado

Especificaciones del CUAD para la reparación

Las especificaciones por durabilidad que están definidas en la Normas mexicanas NTC-CDMX-202310 y NMX-C-530-ONNCCE-2018,11 las cuales fueron utilizadas por la empresa que diseñó el proyecto y a continuación, en la Tabla 2, se mencionan las más importantes a cumplir para el concreto:

Especificaciones del Concreto	
1) Resistencia a la compresión a 24 horas [kgf/cm ²]	500
2) Relación agua material cementante	0.4
3) Resistividad eléctrica saturada a 3 días mínimo [kΩ-cm] ¹²	50
4) Permeabilidad rápida de cloruros a la edad de 3 días [Culombios] ¹³	<1000
5) Temperatura máxima del concreto durante la producción y colocación [°C]	<32
6) Extensibilidad [cm] ¹⁴	74 ± 4
7) Masa volumétrica en estado fresco comprendido [kg/m ³] ¹⁵	2,300 - 2,400
8) Contenido de aire máximo [%] ¹⁶	2.20

Tabla 2. Especificaciones del Concreto.

Debido a que los valores de desempeño por durabilidad como la resistividad eléctrica saturada y permeabilidad rápida de cloruros se deben realizar cuando el concreto alcance edades de 90 días y 56 días, respectivamente, de acuerdo con la Norma mexicana NMX-C-530-ONNCCE-2018,11 SATELSA SA de CV solicitó que estas especificaciones se modifiquen para que las edades coincidan con lo que la Norma solicita.

El diseño de mezcla y el asesoramiento técnico fueron propuestos y han corrido a cargo de las empresas: Element5 Química Aplicada, MOVINCO CHEMICAL e INOVATIE, tomando como referencia los criterios que se establecen en la Norma mexicana NMX-C-530-ONNCCE-2018.11

Los materiales empleados son de los proveedores antes mencionados y se describen a continuación en la Tabla 3:

Nombre	Descripción
e ⁵ PCE SUPER A-Clays SR	Aditivo hiperfluidificante de última generación tolerante a arcillas y alta retención de la consistencia.
e ⁶ Control AIR	Aditivo exclusor de aire.
INO-FUME-950D	Humo de sílice con 93% mínimo de pureza.

Tabla 3. Materiales empleados.

Debido a la ubicación de la planta responsable de la fabricación del CUAD, tiempos de traslado, temperaturas y condiciones de colocación, se requirió por parte de la operación que el concreto contara con una retención de la consistencia mayor a 2 horas sin retardos de fraguado. Los resultados obtenidos en cuanto a las Especificaciones del CUAD se resumen en la Tabla 4, comparando lo especificado en la segunda columna y los valores obtenidos en la tercera columna.

Especificaciones del Concreto	Valores obtenidos	
Resistencia a la compresión a 24 horas [kgf/cm ²]	500	590*
Contenido de aire máximo [%]	2.20	0.95
Resistividad eléctrica saturada a 90 días mínimo [kΩ/cm]	50	60
Permeabilidad rápida de cloruros a la edad de 56 días [Culombios]	<1000	390
Temperatura máxima del concreto durante la producción y colocación [°C]	<32	32.1*
Extensibilidad [cm]	74 ± 4	75*
Masa volumétrica en estado fresco comprendido [kg/m ³]	2,300 - 2,400	2401*
Relación agua material ligante	0.4	0.27*

Tabla 4. Resultados obtenidos de colados.
*Promedio de 10 colados consecutivos.

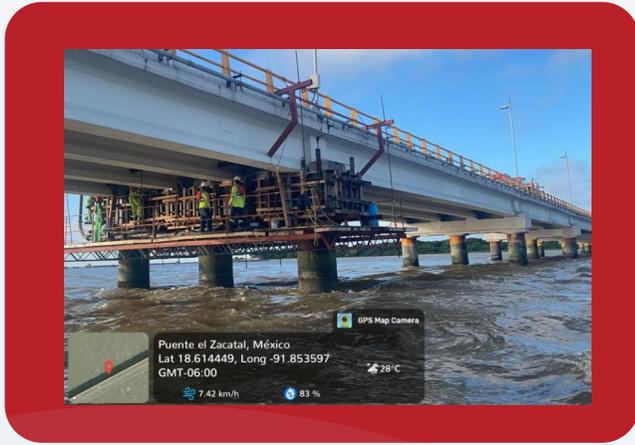


Figura 3. Curado y protección del CUAD

Se ha cuidado el control de calidad de cada uno de los componentes, como son los agregados pétreos de la zona de Escárcega y Tabasco, así como el cemento CPC 40 de la marca Holcim.

Se solicitó a la cementera suministrar un cemento con la característica de tener un bajo contenido de relleno inerte de caliza (RIC), adición que se ha visto que afecta la durabilidad de los concretos y por ello se pidió que su contenido fuera menor a 10%.¹⁷⁻¹⁹

Para verificar esta característica del cemento, se solicitó la especificación que el porcentaje de pérdida por ignición (%PPI) debe de ser $< 5\%$, ya que, controlando esta especificación en el polvo del CPC, se controla el contenido de RIC del cemento con esta relación: $RIC(\%) = 2 (PPI\%)$.

Curado y Protección de CUAD

Para alcanzar un desarrollo óptimo de las propiedades del concreto, se deben cuidar y observar los tiempos de descimbrado de la estructura, estos no deberán exceder de las 24 horas después del colado, de lo contrario pueden presentarse fisuramientos considerables.

Posteriormente se deberá iniciar el curado, cuando la superficie comience a perder su brillo, se aplicará una membrana de curado. Posteriormente se cubrirá la estructura con una película de polietileno para conservar su humedad y evitará que los cloruros del salpique de agua de mar hacia el elemento recién colado penetren desde edades tempranas del concreto, ver Figura 3. Esta protección con la película de polietileno se deberá mantener en su lugar por lo menos 56 días, para que así los contaminantes no ingresen en el material que aún está la adición de microsílca reaccionando para reducir la porosidad del concreto.

Conclusiones

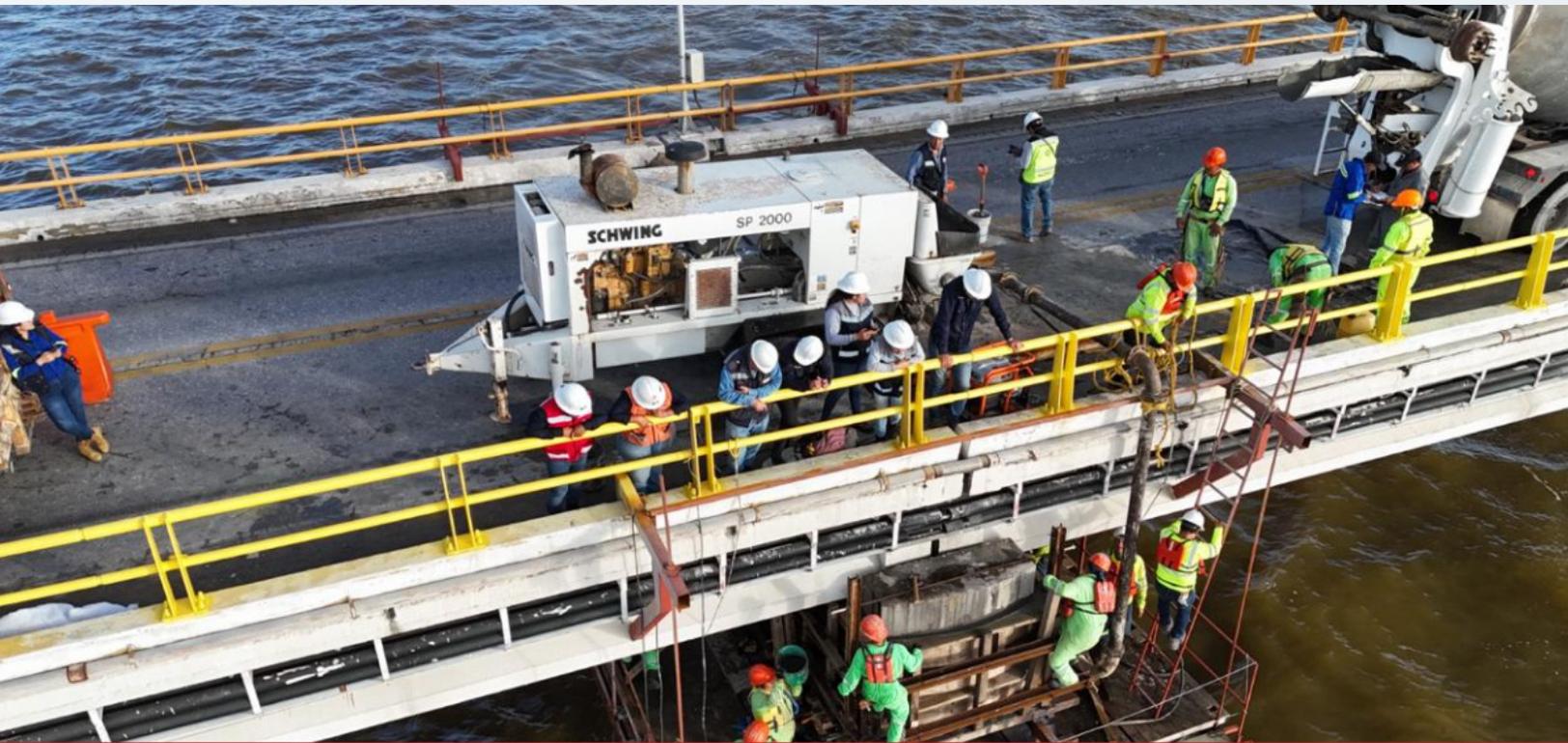
El CUAD diseñado e implementado cumple con los requerimientos tanto de colocación, manejabilidad, bombeabilidad, y retención de la consistencia, al igual que los requerimientos técnicos especificados.

El diseño, la elaboración e implementación de este tipo de concreto requiere de un monitoreo constante y detallado de la calidad de los materiales, incluyendo el tipo de cemento (restringiendo las adiciones de relleno inerte de caliza en éste), rigurosos controles de fabricación de concreto en planta, así como una coordinación y articulación adecuada de todas las partes involucradas. De forma que sea posible garantizar la ejecución exitosa del proyecto. De esta manera se consigue que el producto final cumpla con los requerimientos de extender la vida útil de la estructura.

Referencias

1. Colaboradores de Wikipedia. (2024, 31 agosto). Puente El Zacatal. Wikipedia, la Enciclopedia Libre.
https://es.wikipedia.org/wiki/Puente_El_Zacatal
2. EcuRed. (s. f.). Puente El Zacatal (México) - EcuRed.
[https://www.ecured.cu/Puente_El_Zacatal_\(M%C3%A9xico\)](https://www.ecured.cu/Puente_El_Zacatal_(M%C3%A9xico))

3. Mohamed, H. M., & Benmokrane, B. (2016). Reinforced Concrete Beams with and without FRP Web Reinforcement under Pure Torsion. *Journal Of Bridge Engineering*, 21(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000839](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000839)
4. Farzad, M., Sadeghnejad, A., Rastkar, S., Moshkforoush, A., & Azizinamini, A. (2019). A theoretical analysis of mechanical and durability enhancement of circular reinforced concrete columns repaired with UHPC. *Engineering Structures*, 209, 109928. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109928>
5. Arup, H. (1983). The mechanisms of the protection of steel by concrete. *Society of Chemical Industry*, 151-157.
6. Brühwiler, E., & Denarié, E. (2013). Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. *Structural Engineering International*, 23(4), 450-457. <https://doi.org/10.2749/101686613x13627347100437>
7. Denarié, E., & Brühwiler, E. (2006). Structural Rehabilitations with Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPRFC) / Strukturelle Instandsetzung von Betonbrücken mit Ultra-hochleistungsfähigem Faserfeinkornbeton (UHFB). *Restoration Of Buildings And Monuments*, 12(5-6), 93-108. <https://doi.org/10.1515/rbm-2006-6083>
8. Shekarchi, M., & Li, S. (2024). Experimental Investigation of Using Ultra-High-Performance Concrete Coating for Anti-corrosion Protection of Reinforced Concrete Induced by Chloride Ions. *Journal Of Building Engineering*, 110743. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110743>
9. Khodabandeh, P., Azarhomayun, F., Looney, T., Leggs, M., Volz, J., & Floyd, R. (2022). Durability and corrosion resistance of ultra-high performance concretes for repair. *Construction And Building Materials*, 345, 128238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128238>
10. Normas Técnicas Complementarias (NTC) del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (2023), https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/b3c4f4ff37241d0a93cc6742a8b0bf2f.pdf.
11. NMX-C-530-ONNCCE-2018 Industria de la Construcción - Durabilidad - Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Criterios y Especificaciones.
12. NMX-C-514-ONNCCE-2019 Industria de la Construcción - Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo.
13. ASTM C1202-22e1 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
14. ASTM C1611/C1611M-21 Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete.
15. NMX-C-162-ONNCCE-2014 Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación de la Masa Unitaria, Cálculo del Rendimiento y Contenido de Aire del Concreto Fresco por el Método Gravimétrico.
16. NMX-C-157-ONNCCE-2006 Industria de la Construcción - Concreto - Determinación del Contenido de Aire del Concreto Fresco por el Método de Presión.
17. Torres Acosta, A.A. (2022). "¿Por qué la infraestructura vial de concreto en el país sufre daño en tan pocos años?," *Vías Terrestres*, Número 78, Año 13, julio-agosto, Asociación Mexicana de Vías Terrestres A.C., pp. 23-31.
18. Torres Acosta, A.A., Méndez Páramo, R. y Herrera Sosa, E.S. (2023). "Evidencias en el desarrollo de resistencia a la compresión y contracción plástica de concretos fabricados con cemento portland compuesto (CPC)," *Vías Terrestres*, Número 86, Año 15, noviembre-diciembre, Asociación Mexicana de Vías Terrestres A.C., pp. 13-18.
19. Torres Acosta, A.A., Méndez Páramo, R. y Herrera Sosa, E.S. (2024). "Desempeño de concretos fabricados con cementos portland compuestos, CPC: Evidencias de su durabilidad en ambientes marino, urbano o industrial," *Vías Terrestres*, Número 87, Año 15, enero-febrero, Asociación Mexicana de Vías Terrestres A.C., pp. 9-15.



Agradecimientos:

-Consortio formado por las Constructoras Grupo Industrial Rubio SA de CV y Grupo Empresarial de Puentes y Estructuras SA de CV liderados por el Ing. Gerardo Orozco Bello e Ing. José Luis Molina Aguilar.

-Asesoría técnica del Doctor Andrés Antonio Torres Acosta.

-Por parte del Laboratorio MYC Isla del Carmen. Ing. Francisco Javier Pérez Vidal.

-La SICT a cargo de la Dirección por parte de Ing. Rubén Frías Aldaraca Subdirector de Estudios y Proyectos de la SICT. Ing. Jorge Rafael Guzmán Avalos - Superintendente de Supervisión Externa, Ing. Juan Manuel Ramos López Director General de Supervisión externa, Ing. Abigail Del C. Méndez Ruiz - Jefe de Laboratorio de Supervisión Externa, y al Ing. Andy Aladino Pérez Sonda- Residente de Supervisión SICT.

