



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Dr. Ignacio Rodríguez Iturbe - Zuliano ilustre
Ingeniero civil, hidrólogo profesor universitario,
doctor honoris causa de la Universidad del Zulia,
ciudadano ejemplar con numerosos premios nacionales e internacionales.

Evaluación de los Daños por Corrosión de una Estructura de Concreto Armado Expuesta a un Ambiente Costero-Industrial

Adonis Xavier Camacaro Vásquez, Luis Fernando Picón Mercado*, Miguel Antonio Sánchez Gómez, Oladis T. de Rincón , Valentina Millano González 

Centro de Estudios de Corrosión, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia,
Maracaibo 4001, Zulia, Venezuela.

*Autor de correspondencia: piconluis1996@gmail.com

<https://doi.org/10.22209/rt.v46a15>

Recepción: 20 de septiembre de 2023 | Aceptación: 11 de diciembre de 2023 | Publicación: 13 de diciembre de 2023

Resumen

El estudio de la corrosión de la armadura cobra vital importancia en la predicción de la vida útil de las estructuras; disciplina que se ha desarrollado recientemente a partir de diversos modelos matemáticos aplicados hasta ahora en pocas estructuras en servicio. Este trabajo presenta la evaluación de los daños por corrosión de una estructura de concreto armado expuesta a condiciones ambientales costero-industriales, ubicada en un complejo petroquímico y su relación en la predicción de la vida útil de la estructura, mediante programas ejecutados en la aplicación MATLAB 2021. Para ello, se llevó a cabo un estudio detallado de los elementos estructurales de interés y del ambiente de exposición. El procedimiento experimental consideró la inspección visual de los elementos para el registro del tipo de daños y extensión presente, seguido del levantamiento electroquímico (potencial y velocidad de corrosión) y de la extracción de núcleos testigos de concreto, con los cuales se llevaron a cabo ensayos fisicoquímicos. Estos resultados permitieron realizar una evaluación completa del problema, definiéndose la naturaleza y origen de los daños por corrosión. Finalmente, se estimó el tiempo de vida útil, el cual varió en función del contenido de cloruros y ubicación de los elementos en la estructura.

Palabras clave: cloruro; concreto; corrosión; durabilidad; vida útil.

Evaluation of Corrosion Damage of a Reinforced Concrete Structure Exposed to a Coastal-Industrial Environment

Abstract

Corrosion studies in reinforced concrete structures becomes vitally important in predicting the useful life of structures, a discipline that has been recently developed from various mathematical models applied until now in few structures in service. This work presents the evaluation of corrosion damage of a reinforced concrete structure exposed to coastal-industrial environmental conditions, located in a petrochemical complex and its relationship in the prediction of the useful life of the structure through programs executed in the MATLAB 2021 application. To this end, a detailed study of the structural elements of interest and the exhibition environment was carried out. The experimental procedure considered the visual inspection of the elements to record the type of damage and extent present, followed by the electrochemical survey (corrosion potential and velocity) and the extraction of concrete witness cores, with which physicochemical tests were carried out. These results allowed a complete evaluation of the problem, defining the nature and origin of the corrosion damage. Finally, the useful life time was estimated, which varied depending on the chloride content and location of the elements in the structure.

Keywords: chloride; concrete; corrosion; durability; useful life.

Avaliação do Dano por Corrosão de uma Estrutura de Concreto Armado Exposta a um Ambiente Costeiro-Industrial

Resumo

Estudos de corrosão em estruturas de concreto armado tornam-se vitais para prever a vida útil das estruturas, uma disciplina que foi recentemente desenvolvida a partir de vários modelos matemáticos aplicados até agora em poucas estruturas em serviço. Este trabalho apresenta a avaliação do dano por corrosão de uma estrutura de concreto armado exposta a condições ambientais costeiro-industriais, localizada em um complexo petroquímico, e sua relação na previsão da vida útil da estrutura por meio de programas executados no aplicativo MATLAB 2021. Para isso, foi realizado um estudo detalhado dos elementos estruturais de interesse e do ambiente de exposição. O procedimento experimental considerou a inspeção visual dos elementos para registrar o tipo de dano e sua extensão, seguido pela pesquisa eletroquímica (potencial e velocidade de corrosão) e pela extração de testemunhos de concreto, nos quais foram realizados testes físico-químicos. Esses resultados permitiram uma avaliação completa do problema, definindo a natureza e origem do dano por corrosão. Finalmente, o tempo de vida útil foi estimado, variando conforme o teor de cloreto e a localização dos elementos na estrutura.

Palavras-chave: cloreto; concreto; corrosão; durabilidade; vida útil.

Introducción

El concreto armado es uno de los materiales de construcción más usados hoy en día, debido a su durabilidad y facilidad de uso en comparación con otros materiales para la construcción de estructuras con diversos usos. El concreto está conformado por la mezcla de cemento, agregado fino, agregado grueso, aditivos y agua, presentando una excelente resistencia a la compresión, mientras que el acero como armadura de refuerzo aporta la resistencia a la tracción para dichas estructuras. El concreto es un material cerámico heterogéneo, que posee el rol del recubrimiento y barrera separando las barras de acero del ambiente, pero su estructura conformada por una red de poros juega un papel importante en el paso de los agentes externos hasta las barras, pudiendo permitir el inicio del proceso de corrosión. Es por ello que, diferentes agentes que se encuentran en el ambiente hacen susceptible a la corrosión el acero en concreto, entre los cuales se encuentra el ion cloruro, principal causa de la corrosión de las barras de refuerzo. La corrosión inducida por el ion cloruro es una problemática que afecta la durabilidad de las estructuras de concreto armado, principalmente para las construcciones erigidas sobre el litoral o costas marinas, caso particular de los complejos petroquímicos, debido a la formación de productos de corrosión expansivos, disminuyendo la adherencia del acero con el concreto, generando con ello el agrietamiento y finalmente la exposición de la armadura y dando por finalizado la vida útil (Duffó y Farina, 2019; Poursae, 2016).

Uno de los mayores desafíos para los estudios estructurales es determinar la magnitud del ataque corrosivo en las edificaciones, a fin de intervenir en su reparación (Andrade, 2020). Inicialmente, el diagrama de Tuutti permite correlacionar la magnitud del daño por corrosión y la durabilidad general de las estructuras (Tuutti, 1982). Este representa la magnitud del ataque corrosivo en función del tiempo, considerando un período de iniciación y otro de propagación; el primero correspondiente al tiempo requerido para que el, o los agentes agresivos, penetren el recubrimiento (concreto) hasta alcanzar la superficie metálica del acero y con ello la ruptura de la capa protectora del mismo y la propagación del daño. En función a esto, en este trabajo se presenta la evaluación de la durabilidad de la estructura de concreto armado expuesta a un medio costero-industrial, a través de los daños por corrosión presentes, los agentes agresivos involucrados y su relación con la estimación del tiempo de iniciación del proceso corrosivo, a través de programas en la aplicación MATLAB.

Materiales y Métodos

Muestra y población

La población estuvo conformada por una estructura de concreto armado expuesta a un ambiente marino-industrial, construido para soportar líneas de tuberías en una planta de metanol, identificada según su uso como *Pipe Rack* (PR). Dicho edificio es uno de dos, construidos ambos en 1994 con parámetros similares de diseño estructural. El edificio evaluado en este estudio, identificado como *Pipe Rack 2* (PR-2), presenta daños por corrosión de interés, mientras que el *Pipe Rack 1* (PR-1) no evidenció daños aparentes y se consideró una estructura

de referencia. La estructura evaluada (PR-2) está conformada por un sistema de pórticos con vigas longitudinales (VL), orientados en la dirección sur-norte (S-N), y vigas transversales (VT), orientadas de oeste a este, con distancias variables entre columnas, creando un esqueleto estructural tridimensional de tres niveles. En la Figura 1 se muestra un plano general en vista superior de la estructura en su tercer nivel, donde los pórticos longitudinales (S-N) en los planos están designados como “X” (pórtico oeste) y “W” (pórtico este). Los pórticos transversales (E-O) están numerados desde el eje 16 hasta el eje 36. Esta estructura se divide en: (a) módulo sur, comprendido entre los ejes 16 y 22; (b) módulo central, comprendido entre los ejes 22 y 29; y (c) módulo norte, comprendido entre los ejes 29 y 36.

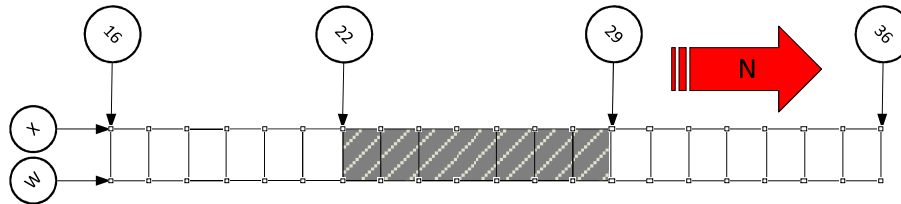


Figura 1. Vista superior de la estructura evaluada (PR-2), en su tercer nivel.

Una de las características observadas en la estructura PR-2 fue que sobre su tercer nivel, entre los pórticos 18 y 35, se encontraba un sistema de enfriamiento conformado por ventiladores de tiro forzado y tiro inducido (Figura 2), erigido desde el tercer nivel con vigas doble T. Este sistema no se encontró sobre el primer edificio (PR-1). Las muestras consistieron en 15 núcleos extraídos de puntos seleccionados de la estructura, con base al análisis del levantamiento de daños y comportamiento electroquímico observado, para zonas con y sin daños aparentes. Adicionalmente, se consideró como parte de la muestra el registro de datos del comportamiento electroquímico y daños por corrosión presentes.

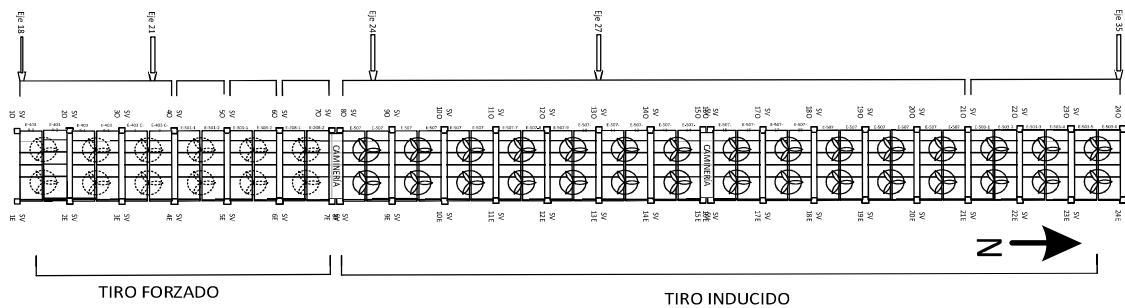


Figura 2. Disposición de los ventiladores de tiro forzado e inducido a lo largo de la estructura PR-2.

Inspección preliminar

En esta etapa se elaboró una ficha de antecedentes de la estructura (tiempo en servicio, función y reparaciones) y se consideró el medio al cual estaba sometida para identificar su agresividad, así como un examen visual para identificar y registrar los tipos de daños y su extensión, como: grietas, zonas fofas, delaminaciones con y sin acero expuesto, entre otras, y así poder determinar la criticidad de los daños presentes (Millano *et al.*, 2011). En la Figura 3 se detalla el código y simbología utilizada para el levantamiento de los daños encontrados.

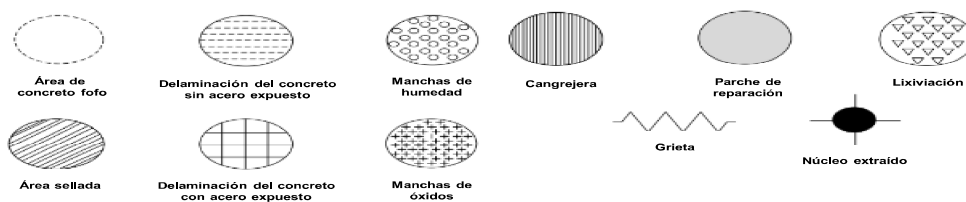




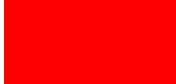


Figura 3. Código y simbología utilizada para el levantamiento de los tipos de daños.

Para los efectos de interpretar y analizar el registro de los daños por corrosión encontrados, se muestra en la Tabla 1 la clasificación establecida en cinco niveles de daños según su riesgo y extensión, en escala cualitativa de referencia, con la finalidad de puntualizar los sitios de mayor riesgo y posibles inicios de las actividades de rehabilitación y reparación.

Tabla 1. Clasificación de los daños por corrosión encontrados.

Nivel de daños	Descripción de daños	Código numérico	Código de colores
Sin daños	Sin daños aparentes visuales	0	
Leve	Humedad, lixiviación, reparaciones, extensión menor al 5 % del elemento	1	
Moderado	Grietas y áreas fofas, de extensión mayor al 10 % del elemento, sumado a los daños del nivel anterior	2	
Severo	Grietas, áreas fofas, delaminación del concreto y acero expuesto, de extensión mayor al 15 % del elemento, sumado a los daños del nivel leve	3	
Muy severo	Grietas, áreas fofas, delaminación del concreto y acero expuesto, de extensión mayor al 25 % del elemento, sumado a los daños del nivel leve	4	

Medición de potenciales de corrosión

Los potenciales electroquímicos por corrosión de la armadura embebida en el concreto, se realizaron utilizando un electrodo de referencia Cu/CuSO₄ saturado, siguiendo la técnica de medición según la norma ASTM C876-87 (1987), con lo cual se obtuvo un mapa de líneas isopotenciales de la superficie evaluada en la estructura, con la finalidad de establecer el área de cambio de potencial.

Medición de velocidades de corrosión

Para determinar la velocidad a la cual la armadura pierde sección por corrosión, se preseleccionaron áreas según criterios establecidos en el levantamiento de daños, seguido de la perforación para hacer contacto con la armadura y finalmente se situó el sensor (GECOR) sobre la superficie del concreto. Los valores de velocidad entre 0,1 - 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ correspondieron a velocidad de corrosión activa que producen óxidos expansivos y entre 10 - 20 años pueden producir el agrietamiento del recubrimiento, mientras que para valores de 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ el agrietamiento se producirá en tan solo 1 - 2 años (Feliú *et al.*, 1996).

Extracción de núcleos

Las dimensiones de los núcleos (2 y 3 pulgadas) se escogieron en función del tipo de ensayo a realizar y sin comprometer la estructura evaluada. Los núcleos fueron almacenados e identificados adecuadamente, para su posterior procesamiento y análisis de los ensayos de carbonatación, perfil de cloruros, resistencia mecánica, porosidad total y sulfatos (Rincón *et al.*, 1997; Castro Luque *et al.*, 2008).

Perfil de concentración de cloruros

La determinación del perfil de concentración del ion cloruro se efectuó siguiendo el método ASTM D-1411 (2001) y se expresó referido al peso de cemento en el concreto. El contenido de cloruros se representó gráficamente con respecto a la profundidad de la muestra, Xi, con el fin de evaluar el perfil de penetración de los cloruros hacia el interior de la estructura y compararlo con el valor límite permisible (4000 mgCl⁻/kg cemento) (Rincón *et al.*, 1997).

Estimación de vida útil

Para la estimación de la vida útil de la estructura se evaluó el perfil de concentración del ion cloruro en cada uno de los núcleos extraídos, utilizando dos programas dentro de la aplicación MATLAB 2021. A partir de

los perfiles se determinó la concentración superficial (Cs) en los núcleos evaluados con el primer programa, haciendo uso de regresión por mínimos cuadrados, así como el valor del coeficiente de difusión (Dreal) de la estructura, tomando en cuenta la edad de la misma; este programa fue nombrado como CsyD.m. Con estos valores iniciales de Cs y Dreal se procedió a ingresarlos en el segundo programa, nombrado SoftwareVB.m. Este resuelve la ecuación diferencial de la segunda ley de Fick, con coeficiente de difusión variable para la concentración de cloruros, de acuerdo al modelo de Hall, empleando el método de volúmenes finitos, con el fin de predecir la evolución en el tiempo del perfil del ion cloruro, asignando un valor de tiempo a cada una de las curvas generadas, diferencial de tiempo para cada curva (Dt), y conociendo la profundidad del acero de refuerzo se estima el tiempo de iniciación de la corrosión en la armadura (TICA) (Araujo *et al.*, 2005).

Resultados y Discusión

En la Figura 4 se muestra un levantamiento de daños típico para dos elementos (vigas) de la estructura evaluada. Uno de ellos revela daños leves (Figura 4a), solo pequeñas áreas fofas y manchas de humedad, mientras que el otro elemento (Figura 4b) evidencia áreas con concreto desprendido y acero expuesto, en nivel severo.

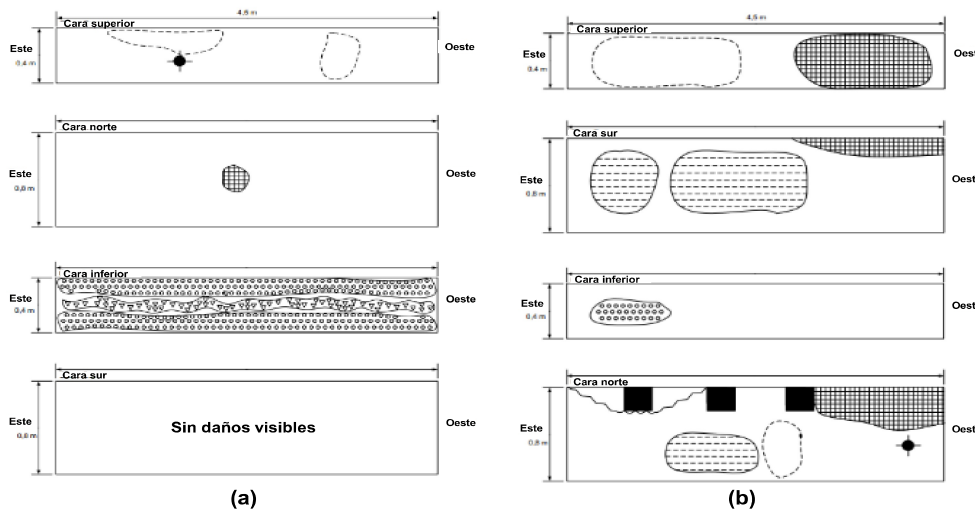


Figura 4. Levantamiento de daños de la viga transversal eje 21 lado oeste (LO) nivel 3 (a) y levantamiento de daños para la viga transversal eje 27 lado oeste en su nivel 3 (b).

En la Tabla 2 se incluye el resumen y análisis del levantamiento de daños en los elementos de concreto armado seleccionados en este estudio. En este se aprecia la ubicación de daños preferentemente en los ejes centrales, desde el eje 19 al 34, correspondientes a los ejes que soportan el sistema de enfriamiento por ventiladores. El nivel de daño se atenúa conforme se alejan los elementos del sistema de enfriamiento; es decir, el porcentaje mayor de daños severos se aprecian en el 3^{er} nivel y van disminuyendo progresivamente hasta el 1^{er} nivel, y del mismo modo alejándose hacia el norte o sur del área central que soporta el sistema de enfriamiento. De esta manera, las variables operacionales asociadas al sistema de enfriamiento, cobran importancia en el origen de la causa de falla.

Tabla 2. Levantamiento general de daños para los elementos seleccionados en los 3 niveles.

Niveleje	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1 ^{ero}	0	0	0	2	2	1	1	1	1	1	3	2	1	1	2	2	1	2	1	0	0
2 ^{do}	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	2	2	3	3	1	1	0	0
3 ^{ero}	0	0	0	4	2	2	4	2	4	1	4	4	4	4	0	1	0	1	4	0	0

El perfil de la concentración de cloruros obtenido de cada uno de los núcleos extraídos de las distintas ubicaciones de la estructura, así como el del núcleo extraído de la viga transversal en el eje 1 de la estructura de

referencia (PR-1), se presentan en la Figura 5. Las concentraciones de cloruros encontradas fueron elevadas y en muchos casos superiores al umbral de cloruros de riesgo por corrosión (4000 mgCl/kg cemento) (Rincón *et al.*, 1997), incluso a profundidades mayores al espesor de recubrimiento de la armadura, suficientes para iniciar, propagar y mantener un proceso de corrosión activo del acero en estructuras de concreto armado.

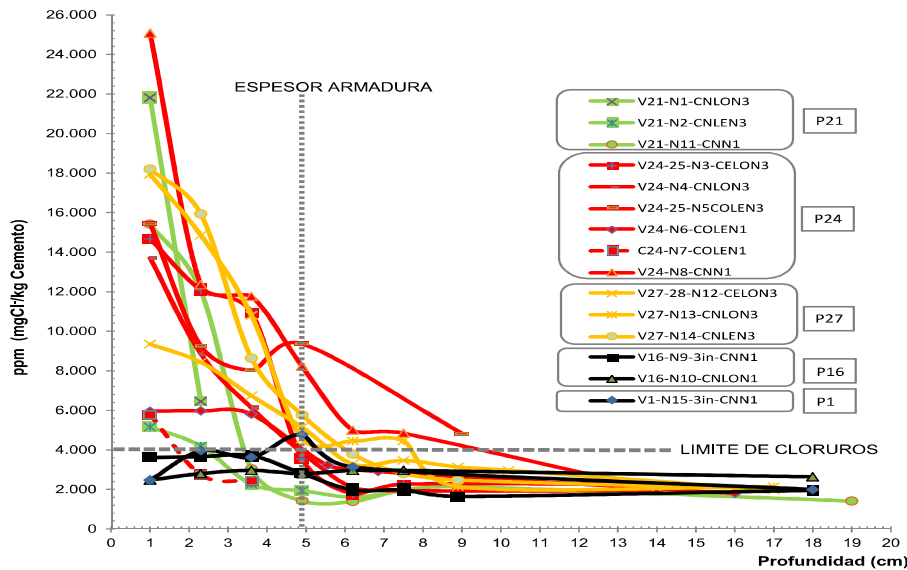


Figura 5. Perfil de concentración de cloruros obtenido para todos los núcleos extraídos de la estructura de concreto armado.

Con respecto al TICA, en la Figura 6 se muestran las estimaciones para tres núcleos extraídos de vigas transversales con notables diferencias en su levantamiento de daños, perteneciendo el núcleo 9 a una viga sin daños aparentes y los núcleos 4 y 5 a vigas con daños severos. Para identificar el TICA, es necesario encontrar la intersección entre la línea de concentración del ion cloruro en el umbral de riesgo (4000 ppm) y una de las curvas Dt justo en la zona resaltada como “armadura”. Nótese que para el núcleo 9 cada curva representa un tiempo de 10 años (Dt); por lo tanto, ese punto de intersección se encuentra a los 165 años, aproximadamente. Al restar la edad de la estructura se determina que el tiempo para que inicie el proceso es en 138 años, por lo que la estructura no presenta riesgo de corrosión por el ion cloruro en corto ni mediano plazo, mientras que para el núcleo 5 el TICA fue de 9 años, luego de construida la estructura.

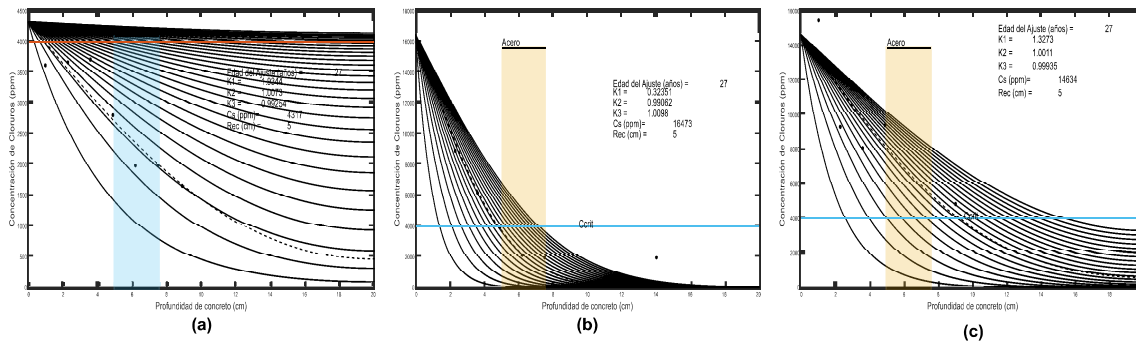


Figura 6. Tiempos de iniciación de la corrosión en la armadura (TICA) obtenidos a partir de los perfiles de cloruros para los núcleos 9 (a), 4 (b) y 5 (c) con un diferencial de tiempo (Dt) igual a 10 años para el primero y 3 años para los últimos dos. Ccrit: concentración crítica, Cs: concentración superficial, Rec: recubrimiento de concreto de la armadura de acero.

En la Tabla 3 se observa un resumen de las predicciones realizadas en cada uno de los núcleos, clasificándolos de acuerdo a su nivel de gravedad en: caso crítico (TI negativo), caso moderado (TI menor a 40 años) y caso sin riesgo (TI mayor a 40 años). De este modo, se encontraron 7 casos críticos, 3 casos moderados y 3 casos sin riesgos. De acuerdo la inspección visual realizada a la estructura y a los ensayos fisicoquímicos

realizados a los núcleos extraídos, se procedió a realizar una evaluación de la durabilidad de la estructura de concreto armado objeto de estudio de la presente investigación.

Tabla 3. Estimación del TICA para cada uno de los núcleos extraídos.

Núcleo	Cs (ppm Cl)	Dreal (cm ² /año)	Cs VB (ppm Cl)	Dreal VB (cm ² /año)	Dt (años)	TICA (años)	Edad (años)	TI (años)
1	40280,3	0,04960	N/A	N/A	N/A	N/A	27	N/A
2	5697,7	0,61896	5717	0,62986	5	67	27	40
3	18933,8	0,38262	18957	0,39026	2	22	27	-5
4	16415,1	0,31452	16473	0,32351	3	30	27	3
5	14609,1	1,31020	14634	1,32730	3	9	27	-18
6	6636,6	2,30349	6651	2,44130	2	21	27	-6
7	7368,3	0,18608	7395	0,18789	20	190	27	163
8	26941,2	0,39469	27054	0,39982	2	15	27	-12
9	4309,8	1,94612	4317	1,93440	10	165	27	138
10	2813,0	18313	N/A	N/A	N/A	N/A	27	N/A
11	21893,2	0,16613	21936	0,17093	5	42	27	15
12	10045,7	1,30255	10012	1,41270	2	14	27	-13
13	21680,7	0,46007	21746	0,46995	2	15	27	-12
14	22719	0,39198	22794	0,39920	2	18	27	-9
15	4114,88	11,44704	4308	8,42150	5	62	27	35

Cs: concentración superficial, Dreal: coeficiente de difusión real, Cs VB: concentración superficial calculada con SoftwareVB.m, Dreal VB: coeficiente de difusión real calculado con SoftwareVB.m, Dt: diferencial de tiempo, valor en años, TICA: tiempo de iniciación de la corrosión en la armadura, Edad: edad de la estructura evaluada, TI: tiempo de iniciación tomando en cuenta la edad de la estructura, N/A: no aplica.

En la Tabla 4 se puede observar cómo coinciden los resultados de las pruebas electroquímicas y fisicoquímicas con las condiciones de las vigas estudiadas. La primera viga transversal de la estructura (VT16) no mostró daños aparentes en el primer nivel y alcanzó un TICA de 138 años, aunque presentando velocidades de corrosión mayores a 0,01 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Estos resultados determinan que la VT16 no presenta un riesgo significativo a sufrir daños por corrosión. Por su parte, la VT1 del PR-1 devolvió un TICA de 62 años a partir de su construcción, en correspondencia al levantamiento sin daño aparente y comportamiento electroquímico sin actividad por corrosión, mientras que los elementos que conforman los pórticos 24 y 27, mostraron niveles de daños por corrosión muy severos, elevados perfiles de concentración de cloruro y valores de TICA más severos de todos los estudiados (-18 años y -5 años, para las vigas longitudinales del pórtico 24). Estos resultados coinciden con los daños severos observados en el levantamiento de daños de las vigas. La viga transversal VT24CNLO exhibió velocidades severas de corrosión (mayores a 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) y un TICA moderado-severo (3 años). Estos pórticos (24 y 27) en su tercer nivel, muestran un estado crítico, elementos que deben ser intervenidos con prioridad para evitar fallas.

Tabla 4. Relación entre el levantamiento de daños, electroquímico y estimación de vida útil de la estructura.

Núcleo	Nomenclatura	TICA (años)	TI (años)	Levantamiento de daños	Potenciales de corrosión (mV)	Velocidad de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
1	VT21CNLEN3	N/A	N/A	2	N/A	0,125-0,529
2	VT21CNLEN3	67	40	2	-174 a 75	0,125-0,529
3	VL24-25-CELO3	22	-5	4	132 a 271	N/A
4	VT24CNLON3	30	3	4	-255 a 47	1,254-1,738
5	VL24-25COLEN3	9	-18	4	N/A	N/A
6	VL24-25-COLEN1	21	-6	1	N/A	0,239-0,731
7	C24COLEN1	190	163	1	N/A	0,509
8	VT24CNN1	15	-12	1	-293 a 120	0,376-3,310
9	VT16CNLON1	165	138	0	24 a 94	0,457-1,738
10	VT16CNLON1	N/A	N/A	0	24 a 94	0,457-1,738
11	VT21CNLEN1	42	15	1	-303 a 90	0,132-8,787
12	VL27-28-CELO3	14	-13	4	N/A	N/A
13	VT27CNLON3	15	-12	4	N/A	N/A
14	VT27CNLEN3	18	-9	4	N/A	N/A
15	VT16CNN1	62	35	0	-294 a -88	0,006-0,027

VT: viga transversal, VL: viga longitudinal, C: columna, LE: lado este, LO: lado oeste, CN: cara norte, CE: cara este, N: nivel, N/A: no aplica.

Conclusiones

Los daños observados en la estructura evaluada (PR-2) se deben a diversos factores y variables con efecto sinérgico entre sí, que han generado los severos niveles de daños por corrosión, entre ellos el ambiente costero-marino, la baja durabilidad del diseño de mezcla utilizado y, como variable determinante, el efecto vibratorio de los elementos giratorios del sistema de enfriamiento sobre la estructura. Los perfiles de concentración de cloruros encontrados fueron correspondientes con el levantamiento de daños y comportamiento electroquímico registrado, evidenciando una preferencia de ataque y concentraciones elevadas de cloruros en los elementos que conforman los ejes ubicados debajo del sistema de enfriamiento, expuestos preferencialmente a la trayectoria del flujo de aire de estos y afectados por el movimiento vibracional de sus componentes. De acuerdo a la estimación del tiempo de vida útil, se determinó que los elementos con un TICA negativo pueden encontrarse no aptos para los requerimientos mecánicos de su diseño, debido a los elevados daños por corrosión presentes.

Referencias Bibliográficas

- Andrade Perdix, C. (2020). Rebar corrosion modelling and deterioration limit state. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, 10(2), 165-179.
- Araujo, C., Morón, O., T. de Rincon, O., Rincón, J., Bueno, V., Rodríguez Montero, J. (2011). Predicción del tiempo de iniciación de la corrosión en armaduras usando volúmenes finitos. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia*, 34(1), 14-21.
- ASTM D-1411. (1999). *Standard test methods for water-soluble chlorides present as admixes in graded aggregate road mixes*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C-876-87. (1987): *Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- Castro Luque, L., Bolognini, H., Herrera, R. I., Rojas, M. A., Anzola de Partidas, E. I. (2008). Evaluación de la corrosión en elementos de concreto armado expuesto al ambiente marino. *Gaceta Técnica de Ingeniería Civil*, 7(1), 33-38.
- Duffó, G. S., Farina, S. B. (2019). Corrosión en estructuras de hormigón armado: un fenómeno bien conocido pero que aún sigue causando considerables daños. *Ciencia e Investigación*, 69(4), 51-65.
- Feliú, S., González, J. A., Andrade, C. (1996). Electrochemical methods for onsite determinations of corrosion rates of rebars. *ASTM Special Technical Publication*, 1276, 107-118.
- Millano, V., Troconis de Rincón, O., Sánchez, M., Fernández, M., Fernández, R., Campos, W., Delgado, S., Guanipa, J., Delgado, J. (2011). Evaluación y criterios de rehabilitación de la estructura de concreto reforzado de una refinería en un medio marino-costero. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, 1(2), 102-117.
- Rincón, O. T., Carruyo, A. R., Andrade, C., Helene, P. R. L., Díaz, I. (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. Rio de Janeiro: Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
- Poursae, A. (2016). *Corrosion steel in concrete structures*. 1st edition. Amsterdam: Elsevier Ltd.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute.



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Volumen 46. Año 2023, Edición continua _____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en diciembre 2023, por el **Fondo Editorial Serbiluz**, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientificaluz.org