protección catÓdica de estructuras de concreto armado expuestas en ambiente marino

José Adán Uribe Burgueño1, Jesús Manuel Bernal Camacho1, Edgar Omar Burgueño Sánchez1, Ana Paulina Alfaro Rodríguez2

1Facultad de Ingeniería y Tecnología de Mazatlán, Universidad Autónoma de Sinaloa

2Facultad de Informática Mazatlán, Universidad Autónoma de Sinaloa

Resumen

Las estructuras de concreto armado ubicadas en ambiente marino enfrentan un alto riesgo de corrosión debido a la presencia de cloruros que penetran el concreto y desactivan la capa pasivante que protege al acero de refuerzo. Este proceso puede ocasionar pérdida de sección en el acero, fisuración del concreto y, eventualmente, fallas estructurales. Una estrategia efectiva para mitigar este deterioro es la protección catódica mediante ánodos de sacrificio. Dicho método consiste en instalar ánodos más reactivos que el acero como aleaciones de zinc, magnesio o aluminio que se conectan eléctricamente al refuerzo y se corroerán en su lugar. Al hacerlo, el acero se convierte en el electrodo catódico del sistema, deteniendo así su proceso de oxidación. Este tipo de protección se puede utilizar en estructuras de concreto armado nuevas, es decir, que desde su proceso de construcción pueden ser incluidas siempre y cuando las ubicaciones de los ánodos estén bien situadas de acuerdo su ficha técnica, o también en estructuras en el cual se encuentren en un proceso de rehabilitación (estructura construida). Actualmente la ciudad de Mazatlán, Sinaloa experimenta un gran auge inmobiliario y de infraestructura a través de sus 22 kilómetros de costa convirtiéndolo así, en una de las ciudades costeras de México más importantes del sector inmobiliario. Teniendo en cuenta lo anterior, la protección catódica que incluye los ánodos de sacrificio es una solución muy confiable para extender la vida útil de las estructuras de concreto armado manteniendo una buena relación costo-beneficio a mediano y largo plazo.

**Palabras clave**: Acero de refuerzo, ánodos de sacrificio, concreto armado, corrosión.

Abstract

Concrete reinforcement structures located in marine environments face a high risk of corrosion due to the presence of chlorides that penetrate the concrete and deactivate the passivating layer that protects the reinforcing steel. This process can cause loss of sections in the steel, concrete cracking, and eventually structural failure. An effective strategy to mitigate this deterioration is cathodic protection using sacrificial anodes. This method involves installing anodes that are more reactive than steel, such as zinc, magnesium, or aluminum alloys. These anodes are electrically connected to the reinforcement of concrete. In this way, the steel becomes the cathodic electrode of the system, thus preventing its oxidation process. This type of protection can be used in new reinforced concrete structure; it can be included from the construction process if the anode locations are properly positioned according to their technical specifications. In addition, this protection method can be used in structures undergoing rehabilitation (as-built structures). The city of Mazatlán, Sinaloa, is currently experiencing a significant real estate and infrastructure boom along its 22 kilometers of coastline, making it one of Mexico's most important coastal cities in the real estate sector. Given this, cathodic protection, which includes sacrificial anodes, is a highly reliable solution for extending the lifespan of reinforced concrete structures while maintaining a good cost-benefit ratio in the medium and long term.

Keywords: Corrosion, reinforced concrete, reinforcing steel, sacrificial anodes.

# INTRODUCCIÓN

La corrosión del acero de refuerzo se ha establecido como el factor predominante que causa el deterioro prematuro generalizado de las construcciones de concreto armado en todo el mundo, especialmente de las estructuras ubicadas en el entorno marino costero, lo que lleva al fallo de las estructuras. Como resultado, los costos de reparación constituyen actualmente una parte importante del gasto actual en infraestructura existente. El control de calidad, el mantenimiento y la planificación para la restauración de estas estructuras requieren inspecciones no destructivas y técnicas de monitoreo que detecten la corrosión en una etapa temprana [1], [2]. Entre las diferentes alternativas existentes para reducir la degradación de estructuras de concreto armado debido a la corrosión del acero de refuerzo, se destaca la protección catódica del acero de refuerzo mediante el uso de ánodos de sacrificio. De acuerdo con las conclusiones de algunos investigadores, los ánodos de sacrificio otorgan una prolongación apreciable de la vida útil. Se ha afirmado que estos ánodos proporcionan una protección localizada eficaz contra la corrosión en estructuras de concreto armado con presencia de cloruros y altas concentraciones de dióxido de carbono en el ambiente [3], [4].

En el caso particular de la ciudad de Mazatlán, Sinaloa, es posible identificar que el ambiente predominante en la región costera es altamente agresivo para la gran cantidad de proyectos e infraestructura construidos en concreto armado durante los últimos años. Los principales parámetros que contribuyen en la aceleración de los procesos de corrosión consisten en una alta humedad relativa, altas concentraciones de sal en el ambiente y elevadas temperaturas. Teniendo en cuenta lo anterior, resulta pertinente la implementación de un sistema de ánodos de sacrificio en los proyectos donde la inversión sea significativa para justificar el costo de inversión del sistema. Sus principales alcances positivos consisten en:

* Prolongar la vida útil de las estructuras.
* Reducir costos de reparación futura en más de 50%.
* Preservar la integridad estructural y funcionalidad de los edificios.
* Cumplir con normativas internacionales de durabilidad.

La implementación de un sistema de protección catódica con ánodos de sacrificio y llevar consigo un sistema de monitoreo y control será efectiva para proteger la vida útil de estas estructuras.

# METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la presente investigación se estableció un enfoque descriptivo correlacional, con el objetivo de analizar la relación existente entre la implementación de la protección catódica de una estructura de acero y el uso de ánodos de sacrificio. De esta manera se podrá exponer de forma clara y concisa el uso de una técnica valida y garantizada ante la degradación de estructuras de concreto armado. Para lo anterior, fue necesario llevar a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica relacionada a los métodos de protección frente a la corrosión en estructuras de concreto armado, posteriormente se seleccionó una estructura que estuviera expuesta al ambiente marino y que contara con la información de planos estructurales disponibles. Una vez seleccionada, se determinó el uso del tipo de ánodo de sacrificio y se llevó a cabo el análisis de la densidad de acero y para identificar la cantidad de ánodos que se utilizarían. Por último, se realizó un esquema del sembrado de los ánodos de sacrificio necesarios para dar cobertura y la protección catódica debida a la estructura. Las fases de la labor investigativa se muestran en el siguiente esquema metodológico (*Figura 1*).

*Figura 1. Esquema metodológico de la secuencia de investigación*

# AMBIENTES DE EXPOSICIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO EN LA COSTA

El principal proceso de degradación del concreto armado en ambiente marino es la corrosión del acero de refuerzo por la acción de los cloruros del agua del mar. El cálculo de la vida útil de una estructura de concreto armado en ambiente marino debe contabilizar el periodo de iniciación (tiempo que tardan los cloruros en alcanzar el nivel de las armaduras y despasivarlas) y el periodo de propagación (tiempo que tarda en producirse la fisuración del recubrimiento) de la corrosión. El periodo de iniciación depende de la velocidad de penetración de los cloruros en el concreto, función de su calidad. El periodo de propagación depende de la disponibilidad de oxígeno en el interior del concreto, controlado por el tipo de ambiente en el que se encuentra, así como por la propia calidad del concreto, en términos de permeabilidad al oxígeno y resistividad.

En las construcciones de concreto armado expuestas al ambiente marino, la duración tanto del periodo de iniciación como del de propagación, y consecuentemente el riesgo de corrosión, está condicionado por el tipo de ambiente marino en el que se encuentra la estructura. El ambiente marino presenta diversos grados de agresividad para las estructuras de concreto armado, que se subdividen en tres zonas (*Figura 2*):

* **Zona sumergida:** la situada por debajo del nivel mínimo de bajamar.
* **Zona de marea:** es la zona de carrera de mareas.
* **Diagrama

  El contenido generado por IA puede ser incorrecto.Zona aérea:** situada por encima del nivel de pleamar y con influencia desde la zona de salpicadura hasta 5 km de zona atmosférica de la línea costera.

*Figura 2. Riesgo de corrosión en ambientes marinos*

En cada una de las zonas se pueden identificar diferentes tipos de agresión. En la zona atmosférica, se producen procesos de corrosión del acero de refuerzo debido a la acción de los iones cloruros y, en algunos casos, también se pueden producir daños en el concreto debido a las heladas. En la zona de salpicaduras, además de la corrosión y del daño por heladas, se producen procesos de agresión física de abrasión generados por el desgaste de la superficie del concreto, debido a la erosión del oleaje. En la zona de carrera de mareas, hay que sumar a todos los efectos anteriores el ataque químico al concreto por la presencia de sales agresivas y el ataque biológico causado por microorganismos. En la zona sumergida, la corrosión de las armaduras queda inhibida debido a la ausencia de oxígeno. Por lo tanto, los efectos de mayor importancia en esta zona son los debidos a la agresión química y biológica al concreto (*Tabla 1*).

*Tabla 1. Tipos de agresión que pueden producirse en zonas de exposición en ambiente marino*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Tipo de agresión** | **Zona de exposición** | | | | |
| Atmosférica | Salpicaduras | Mareas | Sumergida | Fondo marino |
| Corrosión activada por cloruros | \* | \* | \* |  |  |
| Fisuración por hielo-deshielo | \* | \* | \* |  |  |
| Erosión por abrasión |  | \* | \* |  |  |
| Ataque químico al concreto |  |  | \* | \* | \* |
| Crecimientos biológicos |  |  | \* | \* | \* |

### **Mecanismo de corrosión**

En la costa, la situación que más frecuentemente desencadena la corrosión es la presencia de cloruros. Éstos pueden ingresar al concreto por adición durante su fabricación por medio del uso de aditivos o de agua y agregados previamente contaminados; o también por medio de la acción del aerosol marino; en donde la velocidad y dirección del viento predominante juega un papel importante. Los cloruros del exterior suelen penetrar por fuerzas de succión capilar o por difusión; por lo general ocurre por la combinación de ambos mecanismos, e incluso, de otros. Se ha estudiado el nivel necesario de los cloruros en el concreto para que se rompa la capa pasivante, y se ha encontrado que ese valor depende de muy variados factores (como el tipo de cemento, las condiciones de curado, la relación agua/cemento, etc., que son los mismos factores que definen la mayoría de las propiedades mecánicas y la calidad del material). El intervalo del nivel de cloruros iniciadores de la corrosión se puede considerar entre 0,2 y 2,0 kg/m3 de concreto, de acuerdo con investigaciones realizadas en diversos lugares del mundo en los últimos 30 años [5].

La corrosión del acero es un proceso electroquímico que implica la eliminación progresiva de átomos de hierro (Fe) del acero que se corroe y se incrusta en el concreto. Dicho proceso genera moléculas de óxido, lo que provoca el agrietamiento de la cubierta y un mayor deterioro del concreto. El óxido es un subproducto químico del proceso de corrosión y a menudo se acumula en lugares distintos a donde se produce la corrosión del hierro metálico [6]. La corrosión en el concreto reforzado se puede definir como la oxidación destructiva de materiales metálicos en un medio específico. La corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales (*Figura 3*):

* Un ánodo, donde ocurre la oxidación.
* Un cátodo, donde ocurre la reducción.
* Un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones.
* Un electrolito; en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso.

Diagrama

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura 3. Elemento de celda de corrosión

Los factores desencadenantes de la corrosión en estructuras de concreto armado serían aquellos capaces de imponer la transición del estado pasivo al activo. La corrosión del acero embebido en el concreto queda limitada a unos cuantos casos especiales. Estos casos especiales se presentan cuando algún factor de corrosión, o combinación de factores, provocan la transición del estado pasivo al activo. Aquellos factores de corrosión que no son capaces de desencadenar el proceso, pero que condicionan la peligrosidad de este, haciendo que se desarrolle a velocidad apreciable, son los denominados factores condicionantes, que pueden ser acelerantes o retardadores del ataque. Los más importantes de los factores acelerantes son el oxígeno y el agua (oferta de electrólito). Los factores retardadores más significativos son los inhibidores de la corrosión. Por lo general, con disponibilidades crecientes de agua y oxígeno se incrementa el ataque, mientras que los aditivos inhibidores lo reducen, a veces sustancialmente [9].

### **3.2 Alternativas de protección del acero de refuerzo ante la corrosión**

La protección del acero de refuerzo contra la corrosión se logra mediante un enfoque multifacético que incluye el diseño adecuado del concreto, el uso de aditivos, la correcta colocación y curado del mismo, y la aplicación de recubrimientos especiales. Las medidas clave son crear un concreto de baja permeabilidad para evitar la entrada de agua y cloruros, mantener un pH alto en el concreto para pasivar el acero, y proteger la superficie con recubrimientos protectores o sistemas de protección catódica. De las anteriores, se destacan las medidas de protección directa, las cuales generan condiciones específicas sobre el acero de refuerzo al momento de ser atacados por agentes agresivos que puedan generar corrosión:

**Protección superficial:** Aplicar recubrimientos protectores directamente sobre el acero de refuerzo, como es el caso de pinturas o recubrimientos epóxicos especiales. La galvanización por inmersión en caliente o la aplicación de recubrimientos metálicos (como zinc o aluminio) también son opciones efectivas.

**Protección catódica:** Utilizar sistemas de protección catódica, que suministran una corriente de protección para prevenir la corrosión. Esta técnica es especialmente útil en combinación con morteros de reparación de baja resistividad en estructuras deterioradas.

Cabe destacar que la protección superficial es un método que debe llevarse a cabo previo al colocado del elemento estructural, por lo que no se puede considerar como una medida de reparación o prevención una vez que la estructura ha sido construida. En cambio, la protección catódica, debido a sus principios de implementación es posible se utilizada en estructuras vigentes que se desean proteger o prevenir ante la corrosión del ambiente.

### **3.3 Protección catódica**

La Protección Catódica se logra haciendo fluir una corriente catódica a través de la interfaz metal-electrolito, proveyendo así una cantidad suficiente de electrones para favorecer la reacción de reducción sin que la reacción anódica de disolución metálica aporte ningún electrón. El flujo de electrones puede lograrse por alguno de los dos siguientes métodos: imprimiendo una corriente en la estructura a proteger mediante el uso de un rectificador, método conocido como protección catódica por corriente impresa; o conectando eléctricamente a la estructura un metal más anódico, formando así una celda galvánica donde el ánodo se sacrificará para proteger al cátodo. Éste último método se conoce como protección catódica por ánodos de sacrificio [7], [8]. En ésta, se coloca una pieza de aleaciones de zinc, de magnesio y aluminio, que se van a corroer en lugar de la pieza que se quiere proteger; la reacción química entre el ambiente y la pieza sacrificada impide la reacción entre el ambiente y la pieza útil. En medio acuoso, basta con atornillar el ánodo de sacrificio a la pieza que se debe proteger. Al aire, hay que recubrir totalmente la pieza; es el principio de la galvanización.

### Protección Catódica por ánodos de sacrificio

La protección por ánodos de sacrificio [9] implica la conexión eléctrica entre el refuerzo y un material más activo que el acero, el cual actuaría como ánodo. Se han empleado ánodos de magnesio, aluminio, zinc y sus aleaciones, ya que tienen un potencial muy negativo que protege a la varilla de acero, tienen poca tendencia a la polarización, y además presentan una corrosión uniforme. En los últimos años se ha incrementado la investigación en el uso de ánodos de sacrificio para la protección catódica de la armadura en estructuras de concreto armado, debido principalmente a la simplicidad de su aplicación y el bajo mantenimiento que este sistema requiere. La diferencia de potencial entre el metal anódico y la estructura a proteger es de bajo valor, por lo que este sistema se usa para pequeños requerimientos de corriente, y en medios de baja resistividad (*Figura 4*).

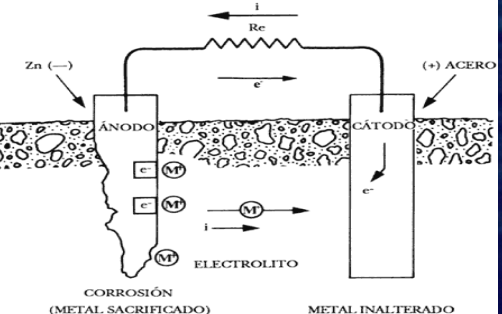


Figura 4. Esquema de protección catódica por ánodo de sacrificio

Los principales tipos de ánodos de sacrificio para concreto armado son de zinc, aluminio y magnesio. La elección depende del ambiente: el magnesio es ideal para agua dulce y suelos de alta resistividad, el zinc es mejor para agua salada, y el aluminio ofrece un buen rendimiento en ambas (agua salada y salobre) y tiene una mayor vida útil. Características de los principales tipos de ánodos de sacrificio (*Figura 5*):

**Ánodos de magnesio:** Tienen el potencial eléctrico más negativo, lo que los hace muy efectivos en ambientes de agua dulce y/o suelos con alta resistividad.

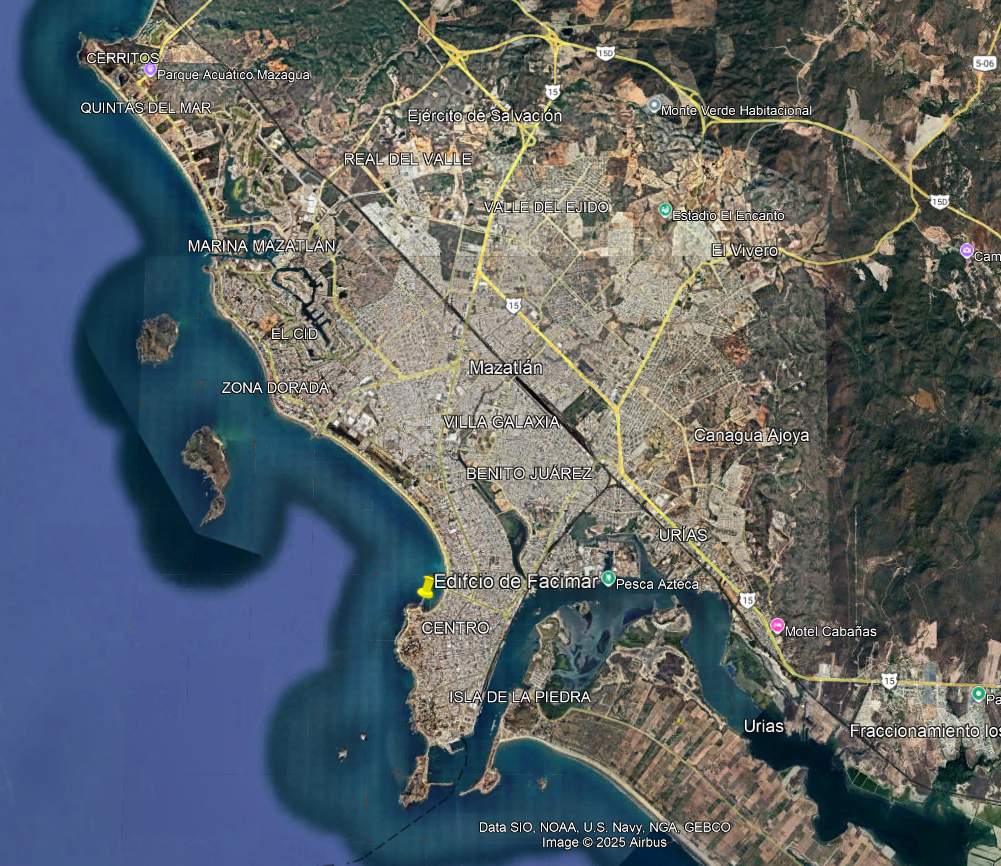
**Ánodos de zinc:** Se han usado tradicionalmente, especialmente en ambientes marinos (agua salada), donde son eficaces pero su rendimiento puede ser limitado en agua dulce.

**Ánodos de aluminio:** Proporcionan una protección adecuada en ambientes de agua salada y salobre. Son más ligeros y suelen tener una vida útil más larga que los de zinc.

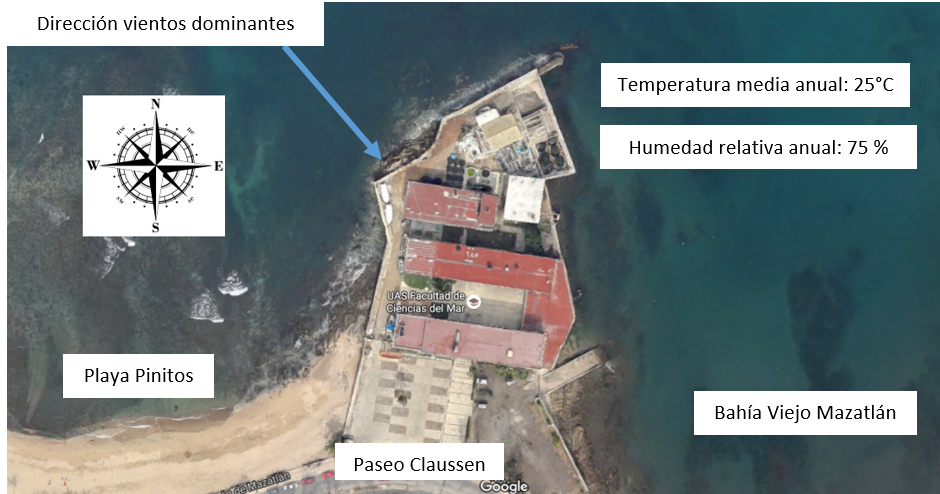
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | Protección contra corrosión en concreto | Tecnosagot |
| Figura 5. Diferentes prototipos de ánodos de sacrificio | | |

# IMPLEMENTACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO EN ESTRUCTURA DE CONCRETO ARMADO LOCALIZADA EN MAZATLÁN, SINALOA

El presente proyecto se llevará a cabo en una de las estructuras del edificio de la Facultad de Ciencias del Mar (FACIMAR). Se ubica en el litoral del municipio de Mazatlán en la parte sur del estado de Sinaloa, entre los meridianos 105°45’ 23” y 106°30’ 31” al oeste del meridiano de Greenwich y entre los paralelos 23°04’ 25” y 23°50’ 22” de latitud norte. La temperatura media anual es de 25°C, con una precipitación promedio de 740mm (*Figuras 6 y 7*).



*Figura 6. Macro localización de la zona de estudio*



*Figura 7****.*** *Micro localización de la zona de estudio*

Los vientos dominantes son en dirección noroeste con velocidad promedio de cinco metros por segundo. Por su ubicación el municipio es susceptible de ser afectado por perturbaciones tropicales y las edificaciones se ven sometidas a procesos de deterioro generados por las condiciones del medio ambiente marino. Entre los meses de mayo a noviembre pueden presentarse ventarrones peligrosos conocidos con el nombre de chubascos. Estos chubascos generalmente duran de 2 a 4 horas y soplan de cualquier cuadrante con fuerza de 6 a 8 nudos acompañados de fuertes aguaceros, truenos y relámpagos, así como de un rápido encrespamiento del mar. La presencia de fuertes vientos propicia el traslado de la brisa marina a distancias significativas respecto a la línea de costa, lo cual implica un riesgo importante para cualquier construcción en concreto armado que se localice en este entorno. Mediante un estudio preliminar (*Figura 8*), se llevó a cabo un dictamen estructural en 4 módulos de la Facultad de Ciencias del Mar (FACIMAR).

Imagen que contiene firmar, tabla, calle, camioneta

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.*Figura 8. Localización de módulos de FACIMAR*

El módulo 3 presentaba un numero significativos de patologías relacionadas con la presencia de altas concentraciones de cloruros, destacando entre estas la corrosión del acero de refuerzo que generó un aumento de volumen del refuerzo para dar paso presiones internas incapaces de ser absorbidas por el recubrimiento de concreto. Lo anterior, genera desprendimiento de la capa externa de concreto, dejando sin protección la varilla y eliminando la capa pasivante del acero (*Figuras 9 y 10)*.



******

*Figura 9. Módulo 3 localizado en área colindante a la zona agresiva (costa)*

*Figura 10.*E*dificación nueva perteneciente al Módulo 3*

El ataque de corrosión en el módulo 3 era notorio y el acero de refuerzo estaba perdiendo resistencia, lo cual derivó en la necesidad de reemplazar el edificio del módulo 3. Actualmente el edificio nuevo del módulo 3 el cual se desarrolla en 3 niveles, manifiesta rasgos de presencia de corrosión. Dicha condición es una muestra de la alta agresividad que representa el ambiente marino para una estructura de concreto armado.

Tomando en cuenta la importancia del edificio, su alto costo de construcción y las ventajas que la protección catódica mediante el uso de ánodos de sacrificio representa, se considera pertinente su implementación en dicha estructura.

### **Descripción de la estructura (losa de azotea nuevo edificio 3)**

La implementación de los ánodos de sacrificio se propondrá únicamente en la losa de azotea (*Figura 11*):

Diagrama, Dibujo de ingeniería

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

*Figura 11. Plano estructural de losa de azotea de Módulo 3*

Para nuestro proyecto se utilizarán ánodos de la marca comercial Sika®, la cual cumple con los estándares necesarios según su ficha técnica ya que en entornos agresivos (costa), los índices de corrosión son elevados (*Tabla 2*).

*Tabla 2. Criterios de diseño de los ánodos de sacrificio*Interfaz de usuario gráfica, Texto, Aplicación

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Para poder aplicar los ánodos se necesita conocer la cantidad que se aplicarán en el acero de la losa. Las siguientes pautas de espaciado de ánodos se basan en lograr la densidad de corriente mínima para la categoría de riesgo de corrosión adecuada 20 años después de la instalación. En condiciones más cálidas o exigentes (como entornos marinos), se recomiendan los ánodos Sika® Galvashield® XPX para lograr una vida útil del ánodo de 20 años. Cada espaciamiento de cada ánodo de sacrificio se tomará en cuenta de acuerdo con la superficie de acero/superficie de concreto. Al igual que con todos los sistemas de protección catódica, la vida útil depende de una serie de factores que incluyen la densidad del acero de refuerzo, la conductividad del concreto, la concentración de cloruro, la humedad y el espaciado del ánodo (*Tabla 3*).

*Tabla 3. Espaciamiento del ánodo de acuerdo con la densidad de acero, para un riesgo de corrosión extremadamente alto (contenido de cloruro >1,5%)*

Imagen que contiene Tabla

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

### **Procedimiento para el cálculo de distribución de ánodos de sacrificio en losa de azotea**

A partir de la planta estructural de azotea mostrada en la *Figura 10,* se ubicaron las trabes identificándose a T2, T4, T5 y T6. Posterior a esto se implementó el procedimiento para conocer la relación del área del acero/área del concreto para aplicar los ánodos. Es importante destacar que para este procedimiento el elemento estructural se analiza únicamente en la zona que queda expuesta a la intemperie, para el caso de las trabes será el acero colocado en el lecho superior. Dicho acero debe considerar el acero longitudinal (varilla de refuerzo) y acero transversal (estribos). A continuación, se muestra la sección transversal de las diferentes trabes (*Figura 12*).



**

*Figura 12. Detalles constructivos de trabes de azotea*

*Azul: acero longitudinal y Verde: acero transversal*

Ejemplo de cálculo de la separación de los ánodos de acuerdo con su densidad de acero para Trabe T-5.



Ejemplo de cálculo de la separación de los ánodos de acuerdo con su densidad de acero de Losa 1



*.*



# RESULTADOS

Después de haber calculado la relación Área de acero (Aa) / Área de concreto (Ac) la Trabe T6 es la única en la cual su relación Aa/Ac es menor al 0,3 por lo tanto la distribución de ánodos de sacrificio sería de 625 milímetros de distancia en toda la longitud de las trabes. Mientras que las Trabes T5, T4 y T2, mantienen una relación en el intervalo del 0,31 al 0,60, su distancia de ánodo a ánodo sería de 425 milímetros en lo largo de toda la longitud. En cuanto al cálculo de losas, las 3 se mantienen en una proporción menor al 0,3, por lo tanto, su distribución sería de una retícula de 625 milímetros de distancia (*Figura 13*).



*Figura 13. Sembrado de ánodos de sacrificio en trabe y losas de acuerdo con cálculos realizados*

# CONCLUSIONES

El uso de los ánodos de sacrificio en la zona de alto índice de corrosión como la de ambiente marino es una solución óptima para prevalecer la vida útil de las estructuras. La distancia entre ánodos atiende a la densidad de acero que se encuentra en la estructura, lo cual se puede interpretar que, en estructuras con fuertes armados de acero, la separación de los ánodos de sacrificio será menor que en una estructura con armado de acero con densidades de acero menores.

Los ánodos de sacrificio dan una solución eficaz y práctica para la protección catódica de estructuras de concreto armado expuestas a ambientes marinos, donde la corrosión es especialmente agresiva debido a la presencia de sales, humedad y brisa marina. Su funcionamiento, basado en la transferencia del proceso de oxidación hacia un metal más activo (como el zinc, el magnesio o el aluminio), permite prolongar significativamente la vida útil de las estructuras expuestas.

La implementación de este sistema requiere una correcta selección del material del ánodo, su tamaño, ubicación y mantenimiento periódico para garantizar una protección continua y uniforme. En conclusión, el uso de ánodos de sacrificio en el ambiente marino es una estrategia fundamental dentro de las construcciones expuestas a la corrosión, que combina la eficiencia para preservar la integridad estructural y reducir costos de reparación y reemplazo a largo plazo.

referencias

1. Rajendran, V. & Murugesan, R. “Performance of the sacrificial galvanic anodes in rehabilitation of marine structure at Port Blair, Andaman and Nichobar Islands, India” *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, pp 1-11, 2011.
2. Donadio, M., Capacho, J., & Santander, L. (2023). Total corrosion management. Documentary analysis. Revista ALCONPAT, 13(2), 235–253. Obtenido de: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.690>
3. Dhurgham, M, Ehab, R & Hilal, A. “Cathodic protection systems: approaches and open challenges”, Nexo Revista Cientifica, pp. 956-957, 2023.
4. Troconis de Rincón, O., Torres Acosta, A., Sagüés, A., Martínez Madrid, Miguel. “Galvanic Anodes for Reinforced Concrete Structures: A Review”, *Corrosion Engineering Section,* pp. 1-9, 2018
5. Rómel G., Solís Carcaño, Éric Iván Moreno, Pedro Castro Borges, “Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera”, pp. 13-18, 2005.
6. López Celis, R., Pérez Quiroz, J. T., Torres Acosta, A. A. Martínez Madrid, M., Martínez Molina, W., Ariza Aguilar, L. E., Zamudio Cíntora, E., Genescá Llongueras, J. & Valdez Salas, B. “Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México”, Secretaría de Comunicaciones y Transportes; Instituto Mexicano del Transporte, pp. 1-257, 2006.
7. Lezama, R., Santamaría, J. M., Lagunes, E. G. y Grajeda, R. M. (2024). Análisis del estado de conservación y propuestas preventivas-correctivas de edificaciones ubicadas en la línea costera mexicana. UVserva, (18), 90-116.González Fernández J. “Control de la corrosión. Estudio y medida por técnicas electroquímicas.” Consejo Superior de Técnicas Electroquímicas, pp 23-24, 1989.
8. González, F., & Miranda, J. “Corrosión en las estructuras de concreto armado: fundamentos, medida, diagnosis y prevención”. *CSIC*. ISBN: 9788400086053. Madrid, España, p. 414, 2007.

[9] ISO 12696:2022, Protección catódica del acero en el hormigón.