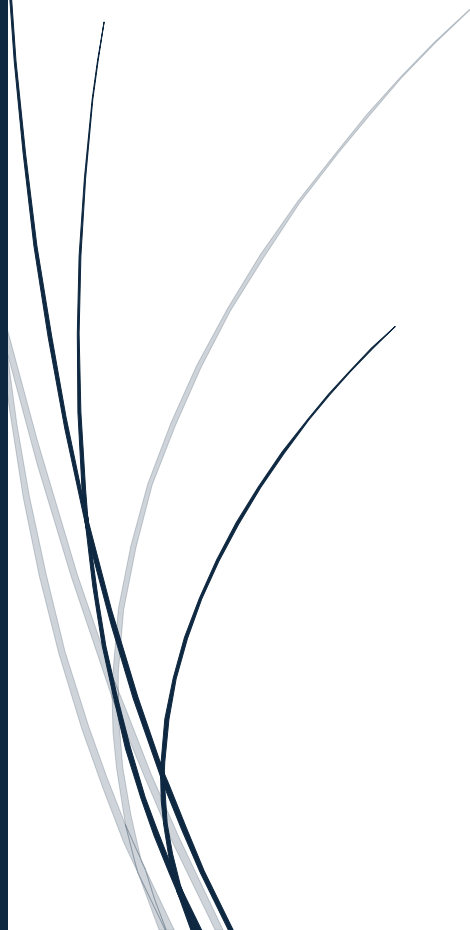




2/8/25

Corrosión Anaeróbica en Pilotes Bajo el Mar: Una Amenaza Silenciosa para la Infraestructura Marítima



Luis Enrique Alvarado Escobedo
ERCO

Contenido

Introducción.....	2
Conceptos básicos de corrosión anaeróbica y biocorrosión.....	3
Corrosión electroquímica y biocorrosión	3
Bacterias sulfato-reductoras (BSR).....	3
Mecanismo general de corrosión anaeróbica	4
Factores que influyen en la corrosión anaeróbica	5
Condiciones ambientales	5
Factores químicos y biológicos	6
Zonas de corrosión en pilotes.....	6
Efectos y consecuencias de la corrosión anaeróbica en pilotes.....	8
Detección e inspección de la corrosión anaeróbica	9
Métodos convencionales	9
Desafíos en la zona de salpicadura y en inspecciones submarinas	9
Desarrollos recientes en Ensayos No Destructivos (END)	9
Estrategias de mitigación y control	11
Selección de materiales y diseño.....	11
Recubrimientos protectores.....	11
Protección catódica.....	12
Inhibidores y biocidas	13
Control de biofouling.....	13
Programas de inspección y mantenimiento	13
Recomendaciones finales y conclusiones	14
Referencias bibliográficas.....	15



Introducción

Los pilotes de acero son elementos fundamentales en la cimentación de muelles, plataformas y obras portuarias. Están sometidos a condiciones ambientales extremas: agua de mar, oxígeno, sales, microorganismos y esfuerzos mecánicos variables. La corrosión es un proceso electroquímico en el que un metal se oxida cuando existe un medio que actúa como electrolito; este fenómeno deteriora la estructura y provoca pérdidas económicas significativas. Cuando se piensa en corrosión se suele asociar con oxígeno y agua (corrosión aeróbica). Sin embargo, **mucho del daño en estructuras marinas se produce en ausencia de oxígeno**, especialmente en zonas sumergidas o con agua estancada[1]. En este entorno anaeróbico proliferan microorganismos capaces de inducir la oxidación del metal liberando compuestos reductores que permiten que la reacción de corrosión continúe[2]. Este documento ofrece una guía detallada sobre la corrosión anaeróbica en pilotes bajo mar, sus mecanismos, factores ambientales, técnicas de detección y medidas de mitigación.



Conceptos básicos de corrosión anaeróbica y biocorrosión

Corrosión electroquímica y biocorrosión

La corrosión comúnmente estudiada es aeróbica: el oxígeno disuelto actúa como agente oxidante y el metal se oxida formando óxidos. En entornos **anaeróbicos**, el oxígeno está ausente o en cantidades muy bajas; sin embargo, la corrosión continúa porque algunos microorganismos suministran el oxidante. La **corrosión influida microbiológicamente** o **MIC (Microbiologically Influenced Corrosion)** se define como un proceso electroquímico en el que microorganismos (bacterias, algas o hongos) inician, facilitan o aceleran el deterioro del metal[3].

Los microorganismos anaeróbicos consumen el hidrógeno disuelto y generan **diferencias de potencial localizadas**, actuando como catalizadores de celdas electroquímicas[4]. Este mecanismo puede aumentar la velocidad de corrosión hasta diez órdenes de magnitud[3]. Entre las bacterias involucradas en la biocorrosión se encuentran las **bacterias sulfato-reductoras (BSR)**, bacterias productoras de ácido, bacterias depositadoras de metales y productoras de exopolímeros[5], siendo las BSR las más relevantes para la corrosión anaeróbica.

Bacterias sulfato-reductoras (BSR)

Las BSR son grupos de microorganismos que utilizan **sulfato como aceptor terminal de electrones** en su cadena de transporte de electrones, reduciéndolo a sulfuro[6]. En entornos anaeróbicos estas bacterias oxidizan compuestos orgánicos o hidrógeno y generan **sulfuro de hidrógeno (H_2S)** como producto de desecho.

En ingeniería, la presencia de BSR puede ocasionar graves problemas: en metales expuestos al agua con sulfato, el metal genera una capa de hidrógeno molecular; las BSR **oxidan este hidrógeno y producen H_2S** , el cual contribuye a la



corrosión[7]. El H_2S también se implica en la corrosión de hormigón (sulfuro biogénico)[8]. Algunas BSR incluso pueden utilizar el hierro metálico como donante de electrones, oxidándolo a hierro ferroso[9].

El H_2S generado reacciona con el hierro del acero formando **sulfuro de hierro (FeS)**, acumulando una capa porosa que debilita la estructura[10]. Esta reacción provoca la pérdida de material, reduce la capacidad de carga del pilote y conduce a fallas prematuras[10].

Mecanismo general de corrosión anaeróbica

1. **Colonización y formación de biopelículas.** Los microorganismos se adhieren a la superficie metálica y desarrollan biopelículas. Este biofilm genera microambientes con bajo oxígeno y modifica la química local.
2. **Utilización de sulfato.** Las BSR usan sulfato como aceptor de electrones y lo reducen a H_2S .
3. **Producción de sulfuro de hidrógeno.** El H_2S reacciona con hierro (Fe) formando sulfuro de hierro (FeS) y liberando hidrógeno. La reacción reduce la sección metálica.
4. **Pérdida de material y picaduras.** La corrosión resultante es localizada (pitting); la pérdida de espesor y la acumulación de FeS debilitan la estructura y generan picaduras profundas[11].
5. **Desprendimiento del recubrimiento.** En zonas salpicadas, la alternancia de humedad/sequedad puede agrietar recubrimientos, permitiendo la entrada de bacterias y agravando la corrosión[12].



Factores que influyen en la corrosión anaeróbica

La tasa y severidad de la corrosión anaeróbica se ven afectadas por factores físicos, químicos y biológicos:

Condiciones ambientales

- **Salinidad.** Una mayor concentración de sales facilita la penetración de iones cloruro y la formación de celdas electroquímicas, acelerando la corrosión[13].
- **Temperatura.** Las temperaturas elevadas incrementan las reacciones electroquímicas y favorecen el crecimiento microbiano, por lo que en aguas tropicales las tasas de corrosión son mayores[14].
- **Oxígeno y humedad.** La presencia de oxígeno disuelto y humedad favorece la corrosión aeróbica en la zona de marea; sin embargo, en la zona sumergida la escasez de oxígeno propicia condiciones anaeróbicas donde proliferan BSR[15].
- **Biofouling.** La acumulación de organismos marinos (algas, moluscos, bacterias) afecta los sistemas de protección catódica y crea microambientes anaerobios; es un factor directo de corrosión microbiológica[16].
- **Presión y profundidad.** El aumento de presión con la profundidad cambia la química del agua y afecta la eficacia de los recubrimientos y la protección catódica[17].
- **Movimiento del agua.** Corrientes, mareas y oleaje erosionan los recubrimientos protectores y exponen el metal subyacente[18].
- **Exposición atmosférica.** La zona por encima del agua está sometida a salinidad del aire, humedad y radiación UV; sin un sistema de protección adecuado, el desgaste se acelera[19].



Factores químicos y biológicos

- **Disponibilidad de sulfato.** El sulfato del agua de mar es el sustrato para las BSR[20]. La concentración de sulfato controla la actividad bacteriana.
- **pH y nutrientes.** Las BSR prosperan en intervalos de pH moderados; concentraciones de carbono, nitrógeno y amoníaco influyen en su crecimiento[21]. La presencia de compuestos orgánicos acelera la corrosión.
- **Temperatura y salinidad.** Además de su efecto físico, influyen en la actividad bacteriana[20].
- **Presencia de oxígeno.** Aunque la corrosión anaeróbica ocurre sin oxígeno, la disponibilidad de oxígeno en la zona de marea puede influir en el inicio de la corrosión y generar zonas mixtas aeróbicas-anaeróbicas[22].
- **Formación de biopelículas.** Las colonias bacterianas forman biopelículas que dificultan su eliminación y crean microambientes ácidos; estas biopelículas actúan como catalizador al incrementar la velocidad de corrosión[23].

Zonas de corrosión en pilotes

En un pilote marino se identifican varias zonas según la disponibilidad de oxígeno y la acción de las olas:

1. **Zona de marea o zona de salpicadura:** está sometida a alternancia de inmersión y exposición al aire. Aquí la corrosión aeróbica predomina y produce óxido superficial[24].
2. **Zona submareal:** permanece sumergida y tiene poco oxígeno; en esta zona prosperan las bacterias sulfato-reductoras y la corrosión anaeróbica es más significativa[25].



3. **Sedimentos:** en mayor profundidad el oxígeno disminuye aún más, intensificando la corrosión anaeróbica[26].
4. **Zonas con incrustaciones biológicas:** las incrustaciones crean microambientes anaeróbicos; las picaduras y la corrosión localizada son comunes[11].



Efectos y consecuencias de la corrosión anaeróbica en pilotes

Los principales daños ocasionados por la corrosión anaeróbica incluyen:

- **Pérdida de material y debilitamiento estructural.** La reacción entre el H_2S y el hierro forma sulfuro de hierro y provoca pérdida de espesor; ello disminuye la sección resistente y reduce la capacidad de carga del pilote[10].
- **Corrosión localizada (pitting).** Las picaduras son profundas y localizadas, agravando el deterioro[11].
- **Fallas estructurales.** La pérdida de material y debilitamiento pueden llevar a fallas en las estructuras, comprometiendo la seguridad de la infraestructura[27].
- **Costos de mantenimiento y reducción de vida útil.** La corrosión anaeróbica requiere inspecciones y reparaciones frecuentes, incrementando los costes de operación y reduciendo la vida útil de los pilotes[27].



Detección e inspección de la corrosión anaeróbica

La detección temprana es crucial para evitar fallas inesperadas.

Métodos convencionales

Los métodos tradicionales incluyen:

- **Inspecciones visuales y mediciones de espesor mediante ultrasonido.** Estas técnicas requieren que el inspector acceda a la zona de salpicadura mediante **rapel o buceo**, lo cual puede ser peligroso[28].
- **Pruebas de densidad de corriente** y corrosiómetros. Permiten estimar la tasa de corrosión pero requieren acceso físico a la estructura.
- **Ensayos electroquímicos** para medir potenciales y corrientes.

Aunque estos métodos son útiles, tienen limitaciones en la precisión y en la capacidad de evaluar áreas difíciles de alcanzar como la zona de salpicadura[29].

Desafíos en la zona de salpicadura y en inspecciones submarinas

La zona de salpicadura es especialmente problemática porque la combinación de agua salada, aire y cambios de humedad genera un entorno muy corrosivo[30]. Muchos defectos se encuentran justo en la interfase aire-agua donde los técnicos no pueden llegar con seguridad; las olas y la fauna marina hacen peligroso el trabajo de buceo[31].

Desarrollos recientes en Ensayos No Destructivos (END)

Para superar estos desafíos se han desarrollado técnicas avanzadas:

- **Mapeo ultrasónico remoto.** Robots submarinos equipados con sensores ultrasónicos se sumergen en la zona de salpicadura y recogen pulsos



reflejados para calcular el grosor de la pared. El movimiento del robot permite generar mapas de distribución de la corrosión en tiempo real[32].

- **Mapeo remoto por corrientes Eddy.** Utiliza corrientes inducidas para evaluar el espesor del material y detectar pérdida de espesor; se combina con robots submarinos para alcanzar zonas antes inaccesibles[33].
- **Vehículos submarinos autónomos (AUV) y vehículos operados a control remoto (ROV).** Estas plataformas pueden realizar inspecciones detalladas y mantenimiento sin exponer a los trabajadores a riesgos[34].
- **Integración de inteligencia artificial (IA).** Los avances en IA y sensores permiten analizar grandes volúmenes de datos de sensores en tiempo real, identificar patrones de deterioro y prever zonas críticas de corrosión[35].



Estrategias de mitigación y control

La corrosión no puede eliminarse por completo, pero puede **mitigarse** mediante un programa combinado de diseño, recubrimientos, protección catódica y mantenimiento.

Selección de materiales y diseño

1. **Elección de aceros y aleaciones resistentes.** Utilizar aceros con mayor contenido de cromo, níquel o cobre que mejoran la resistencia a la corrosión. Aleaciones como el acero inoxidable dúplex tienen mayor resistencia en ambientes marinos.
2. **Diseño para minimizar zonas estancadas.** Reducir cavidades y espacios donde el agua pueda estancarse y crear condiciones anaeróbicas.
3. **Facilitar inspección y mantenimiento.** Incorporar sistemas de acceso y consideraciones de reemplazo de recubrimientos y ánodos.
4. **Encamisado o encapsulado.** Sistemas como Tidal Wrap encapsulan la zona de salpicadura con capas de material sintético, creando una barrera impermeable y permitiendo la inyección de inhibidores o biocidas.

Recubrimientos protectores

Los recubrimientos actúan como barrera entre el metal y el ambiente. El programa ESC group identifica varias opciones:

- **Recubrimiento epoxi de alquitrán de hulla.** Es el recubrimiento más común para tablestacas y pilotes debido a su **bajo coste y alta resistencia al agua de mar, aceite y productos químicos**[\[36\]](#). La preparación de la superficie mediante chorro de arena y la aplicación bajo estándares NACE o SSPC asegura la calidad[\[37\]](#).



- **Recubrimiento epoxi en escamas de vidrio.** Adecuado para ambientes de alta abrasión e impacto; el control de calidad y embalaje garantizan que el recubrimiento llegue en perfectas condiciones[38].
- **Galvanización por inmersión en caliente.** Consiste en recubrir la chapa o el pilote con una **capa de zinc** mediante inmersión en un baño de zinc fundido; es una alternativa a los sistemas de pintura y produce una superficie estética[39].
- **Sistemas de recubrimiento dúplex.** Combinan galvanización en caliente y recubrimiento epoxi para obtener una protección superior[40].

Para que los recubrimientos sean efectivos, es necesario realizar una preparación adecuada de la superficie, aplicar el sistema según las especificaciones del fabricante y revisar periódicamente su integridad.

Protección catódica

La protección catódica complementa a los recubrimientos y es esencial en zonas sumergidas. Consiste en convertir el pilote en un cátodo mediante la conexión de un **ánodo sacrificio** (generalmente de aluminio, magnesio o zinc) que se oxida preferentemente. Este sistema **aumenta la vida útil** y puede reemplazarse más fácilmente que la reaplicación de recubrimientos[41]. En algunos proyectos se utilizan sistemas de corriente impresa que regulan la corriente de protección mediante fuentes externas. Un diseño adecuado requiere estudios de resistividad del agua y cálculos de corriente de protección.



Inhibidores y biocidas

- **Inhibidores de corrosión.** Sustancias químicas que, adicionadas al agua circundante o encapsuladas en recubrimientos, disminuyen la velocidad de corrosión al formar películas protectoras sobre el metal.
- **Biocidas.** Para controlar la población de BSR se emplean biocidas seleccionados que destruyen o inhiben las bacterias. La aplicación controlada evita la recolonización y reduce la generación de H_2S .

Control de biofouling

El biofouling contribuye a la formación de microambientes anaeróbicos y reduce la eficacia de la protección catódica. La limpieza periódica mediante **raspado y lavado a alta presión**, así como el uso de recubrimientos antiincrustantes, ayuda a controlar su desarrollo.

Programas de inspección y mantenimiento

Un programa integral de mantenimiento debe incluir:

- **Inspecciones regulares.** Combinando métodos visuales y técnicas avanzadas como mapeo ultrasónico y eddy current.
- **Monitoreo continuo.** Medición de potenciales y corrientes en sistemas de protección catódica, además de sensores de corrosión para detectar cambios en tiempo real.
- **Plan de reemplazo de recubrimientos y ánodos.** Programar el repintado y la sustitución de ánodos sacrificios en función de las mediciones de deterioro.
- **Evaluación de riesgo.** Utilizar modelos predictivos e inteligencia artificial para estimar la vida útil remanente y priorizar intervenciones.



Recomendaciones finales y conclusiones

La corrosión anaeróbica en pilotes bajo mar es un fenómeno complejo en el que participan reacciones electroquímicas y microorganismos. Las BSR utilizan el sulfato como aceptor de electrones y generan sulfuro de hidrógeno; este sulfuro reacciona con el acero y forma sulfuro de hierro, provocando pérdidas de material y picaduras que pueden comprometer la integridad estructural[10]. Factores ambientales como la salinidad, temperatura, oxígeno/humedad, biofouling y la profundidad modifican la severidad de la corrosión[42].

Mitigar la corrosión anaeróbica requiere un enfoque multidisciplinario: selección de materiales adecuados, diseño que minimice zonas de estancamiento, aplicación de sistemas de recubrimiento de alto desempeño, uso de protección catódica, control de biofouling y planes de mantenimiento e inspección. La tecnología actual ofrece herramientas avanzadas como mapeo ultrasónico remoto, robots submarinos y análisis mediante inteligencia artificial, que mejoran la detección y la gestión de la corrosión[43].

Adoptando estas estrategias y manteniendo un programa de inspección riguroso, las estructuras marinas pueden prolongar su vida útil y reducir los riesgos asociados a la corrosión anaeróbica.



Referencias bibliográficas

[1] [2] [3] [4] [5] [21] [23] Artículo | Corrosión Microbiológica

<https://inspenet.com/articulo/corrosion-microbiologica/>

[6] [7] [8] [9] Bacteria reductora de sulfato - Wikipedia, la enciclopedia libre

https://es.wikipedia.org/wiki/Bacteria_reductora_de_sulfato

[10] [11] [12] [20] [22] [24] [25] [26] [27] la corrosion anaerobica en el agua de mar.pdf

<https://es.slideshare.net/slideshow/la-corrosion-anaerobica-en-el-agua-de-mar-pdf/282162002>

[13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [42] Aspectos ambientales en la corrosión de estructuras marítimas

<https://inspenet.com/articulo/corrosion-de-estructuras-maritimas/>

[28] [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [43] Ensayos No Destructivos en la detección de la corrosión.

<https://inspenet.com/articulo/desarrollos-en-ensayos-no-destructivos/>

[36] [37] [38] [39] [40] [41] Control de Corrosión en Pilotes Submarinos

<https://www.esglobalgroup.com/es/post/control-de-corrosi%C3%B3n-en-pilotes-submarinos>

