

COMPORTAMIENTO CORROSIVO DEL ACERO DE BAJO CARBONO EN CONTACTO CON HIPOCLORITO DE SODIO Y AMBIENTES ANÁLOGOS: UNA REVISIÓN

CORROSIVE BEHAVIOR OF LOW-CARBON STEEL IN CONTACT WITH SODIUM HYPOCHLORITE AND SIMILAR ENVIRONMENTS: A REVIEW

Daylen Lázara García Laza^{ab} (0009-0003-7854-2360)
Juan José Camejo Giniembra^a (0000-0002-8726-4273)
Jocelaine Carvajal Alvarez^{b,*} (0009-0000-1691-1894)

^a Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE. Facultad de Ingeniería Química. Calle 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana, Cuba.

^b Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET), Churrucá # 481, Cerro, La Habana, Cuba.

^{a,*} jocelaine.carvajal@ceinpet.cupet.cu

Recibido: 02 de julio de 2025;

Aceptado: 12 de diciembre de 2025;

RESUMEN

La presente revisión examina el comportamiento corrosivo del acero de bajo carbono en presencia de hipoclorito de sodio (NaClO) y ambientes análogos, resaltando la importancia de este material y la agresividad del desinfectante. El objetivo central es identificar los mecanismos de corrosión más relevantes y los factores que influyen en su desarrollo. Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas, enfocándose en estudios recientes que analizaran la corrosión del acero de bajo carbono en soluciones de NaClO, considerando variables como el pH, la temperatura y la concentración del desinfectante. Los resultados revelan que el hipoclorito de sodio presenta una alta capacidad corrosiva en comparación con otros desinfectantes clorados, manifestándose a través de corrosión generalizada y localizada. Factores como las inclusiones no metálicas en la superficie del acero y las condiciones hidrodinámicas del medio desempeñan un papel significativo. Además, la influencia del entorno ambiental, como la presencia de contaminantes atmosféricos, es un aspecto crucial a considerar. Se identificó que el agua ozonizada podría ser una alternativa menos agresiva en ciertas aplicaciones.

Palabras claves: corrosión; acero de bajo carbono; hipoclorito de sodio.

ABSTRACT

This review examines the corrosive behavior of low-carbon steel in the presence of sodium hypochlorite (NaClO) and analogous environments, highlighting the importance of this material and the aggressiveness of the disinfectant. The central objective is to identify the most relevant corrosion mechanisms and the factors that influence their development. A comprehensive search of scientific databases was conducted, focusing on recent studies analyzing the corrosion of low-carbon steel in NaClO solutions, considering variables such as pH, temperature, and disinfectant concentration. The results reveal that sodium hypochlorite exhibits a high corrosive capacity compared to other chlorinated disinfectants, manifested through generalized and localized corrosion. Factors such as non-metallic inclusions on the steel surface and the hydrodynamic conditions of the medium play a significant role. Furthermore, the influence of the environmental surroundings, such as the presence of atmospheric pollutants, is a crucial aspect to consider. It was identified that ozonated water could be a less aggressive alternative in certain applications.

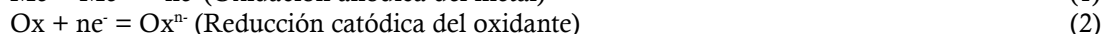
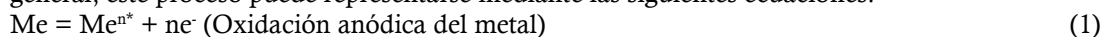
Keywords: corrosion; low carbon steel; sodium hypochlorite.



INTRODUCCIÓN

La corrosión electroquímica es el proceso de degradación de las propiedades de un metal o aleación en contacto con una disolución electrolítica que constituye el medio corrosivo que contiene uno o más agentes oxidantes. El fenómeno de la corrosión ocurre debido a que los materiales metálicos tienden a alcanzar su estado oxidado natural, que es un estado energético de menor potencial, termodinámicamente más estable. En esencia, este tipo de corrosión no se produce por reacciones directas entre el metal y el medio con que se encuentra en contacto, sino por el desarrollo de reacciones de oxidación y reducción, según un mecanismo de celdas galvánicas (Domínguez Domínguez et al., 2023).

El intercambio de electrones entre el metal y el oxidante se produce en diferentes puntos de la superficie metal-medio corrosivo. La oxidación del metal (cede electrones) se produce en los puntos o zonas anódicas, mientras que la reducción del agente oxidante (capta electrones) se produce en los puntos o zonas catódicas. Los electrones que cede el metal (Me) al oxidarse (Ox) en los puntos o zonas anódicas se mueven a través del propio metal hacia los puntos o zonas catódicas donde son captados por el agente oxidante (Ox) para su reducción. De manera muy general, este proceso puede representarse mediante las siguientes ecuaciones:



La corrosión será posible, o sea espontánea siempre que el potencial de reducción catódica del agente oxidante sea más positivo que el potencial de oxidación anódica del metal; $E_{\text{OX}} > E_{\text{ME}}$ (Dr. Ing. Domínguez Domínguez et al., 2023).

En la industria del gas y petróleo, el proceso de corrosión del acero es un fenómeno que genera grandes pérdidas económicas debido a que el crudo y el gas natural pueden llevar varios productos químicos con altas impurezas, lo cual hace que estos sean extremadamente corrosivos. El efecto del proceso de corrosión se debe a los ambientes altamente agresivos involucrados en diferentes etapas de procesamiento del petróleo y sus derivados. En el caso de las tuberías de petróleo y gas, los medios corrosivos principales son el dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S); por lo tanto, durante el proceso de extracción del petróleo y sus derivados las superficies internas de las tuberías sufren efectos de corrosión, y por ende su degradación. Esto ocasiona la pérdida de las propiedades mecánicas como resistencia mecánica y química, ductilidad, impacto, entre otras (Ayala Gaxiola, 2021). Los sulfuros y mercaptanos son las principales sustancias corrosivas para el acero al carbono en los productos derivados del petróleo crudo. Frecuentemente el hierro, los aceros al carbono, níquel, cobre y sus aleaciones, no son resistentes a los compuestos de azufre presentes en los hidrocarburos. Sin embargo, materiales como el aluminio y los aceros inoxidables son, por lo general, resistentes a estos compuestos (Vargel et al., 2004). La necesidad del estudio de la corrosión se debe a su trascendencia en múltiples aspectos o esferas de la vida por tres razones esenciales: seguridad, economía y conservación. Así, su importancia se manifiesta a través de los aspectos económico, ecológico, humano, estratégico y técnico. La afectación económica causada por la corrosión en todo el mundo es enorme. Se estima que estas, normalmente, superan el 3% del producto interno bruto de los países, pero solo los desarrollados han realizado evaluaciones cercanas a la realidad. Las afectaciones económicas por corrosión son tan elevadas, debido a que incluyen tanto las pérdidas directas vinculadas al material constructivo como las indirectas que este fenómeno causa en las instalaciones productivas. En el caso de pérdidas de salud o de vidas, debido a contaminaciones de productos alimenticios, explosiones de equipos industriales, catástrofes de aviones y otros medios de transporte debido a fallas por corrosión de sus partes críticas, las pérdidas indirectas son aún más difíciles de estimar, porque no pueden ser evaluadas en simples términos monetarios. De igual manera, la seguridad de una nación depende, entre otros factores, de la inmediata disponibilidad combativa de su armamento, lo que no puede ser logrado si este está corroído. En general, el fenómeno de la corrosión conspira en contra de la satisfacción de necesidades y calidad de vida de la población, a lo que se une un enorme daño ecológico aún mucho más difícil de cuantificar (Domínguez Domínguez et al., 2023).

El acero al carbono es uno de los materiales más utilizados en la industria en todo el mundo por casi todas las mismas razones: su costo, propiedades, facilidad de fabricación, disponibilidad, soldabilidad, etc. El término acero se suele entender como una aleación a base de hierro que contiene carbono en cantidades inferiores a aproximadamente el 2 %. Los aceros al carbono (a veces también denominados aceros al carbono simples o aceros ordinarios) pueden definirse como aceros que contienen solo cantidades residuales de elementos distintos del carbono, excepto aquellos (como el silicio y el aluminio) añadidos para la desoxidación y aquellos (como el manganeso y el cerio) añadidos para contrarrestar ciertos efectos nocivos del azufre residual (EPRI, 2007).

Los aceros de bajo carbono, con un contenido de carbono generalmente inferior al 0,25%, son ampliamente utilizados en la fabricación de tuberías, recipientes y aparatos para las industrias química y petrolera —como separadores bifásicos o trifásicos en centros colectores y en instalaciones de tratamiento primario y



almacenamiento de crudo—. Esta idoneidad se debe a su estructura ferrítico-perlítica con bajo contenido de cementita, que les confiere una excelente plasticidad (ductilidad), permitiendo su conformado en frío (p. ej., rolado) sin riesgo de fractura. Si bien no son endurecibles mediante tratamiento térmico para formar martensita, sí pueden endurecerse por deformación en frío, proceso durante el cual los granos se deforman y fragmentan, aumentando la dureza, pero reduciendo la plasticidad e incrementando la fragilidad. Estos aceros suelen tener un límite de fluencia de 275 MPa, una resistencia a la tracción comprendida entre 415 y 550 MPa y una ductilidad el 25% (Amasifuen Carbajal & Cardozo Neira, 2019; Castañeda Ruiz, 2016; Duskocil et al., 2021; Llulluna Llumiquinga, 2014).

El hipoclorito de sodio (NaOCl) es un compuesto químico ampliamente utilizado por sus propiedades desinfectantes. Su acción como biocida está determinada, en lo fundamental, por su poder oxidante. Su potencial redox normal (E^0) es de 0.89 V, considerablemente superior al del oxígeno que es de 0,401 V (Domínguez Domínguez et al., 2023).

Se emplea en la limpieza doméstica, el tratamiento y potabilización del agua, como blanqueador de textiles, y en procedimientos médicos y de investigación que requieren condiciones asépticas. A nivel industrial, es eficaz para la desinfección del agua y se utiliza como detergente y desinfectante de superficies. La solución industrial de NaOCl es transparente, de color amarillo pálido, con un olor característico al cloro. Es inestable y puede descomponerse rápidamente por la luz, el calor o la presencia de iones metálicos, lo que requiere precauciones en su almacenamiento y uso. Debido a su toxicidad, se vende en concentraciones relativamente bajas (0,5 a 5,25%) para evitar daños tisulares. El pH de la solución resultante determina las concentraciones de ácido hipocloroso (HOCl) y de ion hipoclorito (OCl^-) presentes, ambos importantes en su mecanismo desinfectante. Además, el NaOCl es un oxidante fuerte que reacciona intensamente con compuestos inflamables y sustancias reductoras, lo que debe tenerse en cuenta durante su manejo. El hipoclorito de sodio puede generar subproductos corrosivos durante su uso, como el cloro gaseoso (Cl_2) y las cloraminas (NH_2Cl , $NHCl_2$, NCl_3). El cloro gaseoso se forma en ambientes ácidos y acelera la corrosión de algunos metales, mientras que las cloraminas son irritantes y corrosivas. Además, el HOCl, la forma activa del hipoclorito, también contribuye a la corrosión. Para minimizar estos efectos corrosivos sin afectar los requerimientos de los procesos tecnológicos, se recomienda mantener un pH alcalino, realizar un prelavado exhaustivo, utilizar la concentración mínima necesaria de hipoclorito y reducir el tiempo de contacto (Causil V et al., 2017; Ronco & Mishkin).

El objetivo principal de esta revisión es analizar los mecanismos de corrosión que afectan al acero de bajo carbono en presencia de soluciones de NaClO y en ambientes con características similares. Comprender cómo interactúa el acero con el hipoclorito de sodio permitirá identificar los factores que aceleran la corrosión y, en consecuencia, desarrollar estrategias efectivas para mitigar su impacto.

MATERIALES Y MÉTODOS

La revisión bibliográfica se realizó mediante una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas como ScienceDirect, Scopus, Web of Science, Google Scholar, SciELO, entre otras. Se utilizaron términos clave como "corrosión del acero de bajo carbono", "hipoclorito de sodio", "comportamiento corrosivo", "soluciones oxidantes", y combinaciones de estos. Con el objetivo de asegurar la actualidad de los hallazgos, se tomaron en cuenta, preferentemente, artículos, libros y trabajos de diploma publicados durante la última década.

Se incluyeron estudios en los cuales:

- Se investigó específicamente el comportamiento corrosivo del acero de bajo carbono en soluciones de hipoclorito de sodio.
- Se presentaron resultados cuantitativos sobre la tasa de corrosión, potencial de corrosión, o parámetros electroquímicos relevantes.
- Se analizó el efecto de variables como pH, temperatura, concentración de hipoclorito, y tiempo de exposición.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

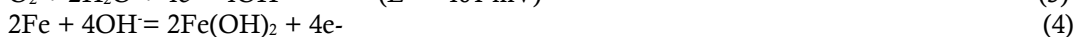
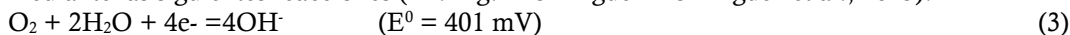
El hipoclorito de sodio, si bien es un desinfectante común, no es una opción recomendada para la limpieza de tanques de almacenamiento de combustibles debido a su alta corrosividad, especialmente en contacto con el acero que no posee una protección anticorrosiva adecuada. La utilización de este producto puede dañar la integridad estructural del tanque con el tiempo. Además, existe un riesgo significativo de que queden residuos de hipoclorito de sodio tras la limpieza, los cuales pueden interactuar negativamente con el combustible almacenado. Esta interacción puede alterar la composición del combustible y disminuir su eficiencia energética, comprometiendo su rendimiento y potencialmente causando problemas en los sistemas que lo utilicen. En su lugar, se recomiendan métodos de limpieza alternativos y más seguros, como el uso de alcohol isopropílico, que



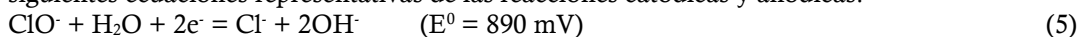
ofrece una limpieza efectiva sin ser tan agresivo con los materiales del tanque, o el agua ozonizada, una opción ecológica que desinfecta sin dejar residuos perjudiciales para el combustible (Ing. Muñiz, 2024).

Mecanismos de corrosión en aceros de bajo carbono

Los aceros de bajo carbono son ampliamente utilizados en diversas industrias debido a su buena relación costo-propiedades. Su principal desventaja es su baja resistencia química, o sea, a la corrosión, puesto que se corroen en medios ácidos, neutros y ligeramente alcalinos con pH menores que 9,5. En contacto con aguas naturales, en las que el oxígeno disuelto es el principal agente oxidante, el proceso de corrosión de los aceros se representa mediante las siguientes reacciones (Dr. Ing. Domínguez Domínguez et al., 2023):



En contacto con soluciones de hipoclorito de sodio este puede pasar a ser el principal agente oxidante debido a su mayor poder oxidante respecto al oxígeno. El proceso de corrosión del acero puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones representativas de las reacciones catódicas y anódicas:



En condiciones atmosféricas, la corrosión es influenciada por factores como la humedad, la deposición de sales de iones cloruro y la presencia de contaminantes atmosféricos como el dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), que pueden formar ácidos fuertes y acelerar la corrosión ácida en las estructuras metálicas (Abel Castañeda Valdés et al., 2020; Rodríguez, 2024).

A diferencia de otros metales como el cobre y el latón, los aceros al carbono no forman capas superficiales de óxidos protectoras en agua de mar, lo que los hace especialmente vulnerables a la corrosión generalizada. Según datos experimentales, la velocidad de corrosión del acero al carbono en condiciones de marea y salpicadura de agua de mar alcanza valores promedios de 0,13 mm/año, significativamente mayores en comparación con el cobre (0,002 mm/año) y el latón (0,005 mm/año). Este alto índice de corrosión refleja la interacción entre el acero y los iones agresivos presentes en el agua de mar, como cloruros, bromuros y yoduros, que intensifican los procesos electroquímicos responsables del deterioro. Por lo tanto, es fundamental implementar estrategias de protección como recubrimientos o sistemas de protección catódica para mitigar los efectos de la corrosión en aplicaciones marítimas e industriales (Dr. Ing. Domínguez Domínguez et al., 2023).

En ambientes industriales, la corrosión puede ser exacerbada por la presencia de gases corrosivos como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), que puede causar fragilización por hidrógeno y Stress Corrosión Cracking (SCC) (Lamorú Urgelles et al., 2024; Rodríguez, 2024).

En medios específicos como el ácido sulfúrico, la corrosión de los aceros al carbono se ve influenciada por la concentración del ácido y la energía de activación del proceso corrosivo. Además, en soluciones desinfectantes, los aceros de bajo carbono pueden sufrir corrosión significativa, especialmente en presencia de hipoclorito de sodio, que es más corrosivo que otros compuestos clorados. Sin embargo, el agua ozonizada puede ser menos agresiva que los desinfectantes clorados, lo que la convierte en una alternativa potencial para aplicaciones desinfectantes (Nóvoa et al., 2000; Parodi et al., 2018).

Comparación de la resistencia a la corrosión en aceros de bajo carbono frente a desinfectantes clorados y ozonizados (Carbotecnia, 2023)

El estudio realizado por (Romanovski & Chaika, 2014) evaluó la resistencia a la corrosión de dos tipos de acero de bajo carbono (St37-3 y Ct20) al exponerse a soluciones desinfectantes, incluyendo hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, cloruro de cal y una solución saturada de ozono en agua. Los resultados indicaron que el hipoclorito de sodio es el desinfectante más corrosivo entre los compuestos clorados, presentando índices de corrosión significativamente mayores en comparación con el hipoclorito de calcio y el cloruro de cal. En particular, los índices de profundidad de corrosión para Ct20 en una solución saturada de ozono fueron hasta 31,4 veces superiores a los observados en soluciones cloradas, lo que evidencia una mayor susceptibilidad al ataque corrosivo en presencia de ozono.

Por otro lado, se observó que el acero St37-3 presentó menor pérdida de peso y menor índice de profundidad de corrosión en comparación con Ct20. Este comportamiento se atribuyó al menor contenido de carbono del St37-3, lo cual reduce las áreas catódicas disponibles en la superficie del metal. Además, la aceleración del proceso de despolarización del hidrógeno en medios ácidos contribuyó a incrementar la velocidad de corrosión. A pesar del mayor índice de corrosión asociado al ozono, los tiempos más cortos requeridos para la desinfección (15-20 minutos frente a 8-24 horas para los desinfectantes clorados) reducen significativamente el impacto total sobre los materiales evaluados.



En un estudio complementario, (Pospelov et al., 2022) analizaron la corrosión en aceros St3 y St08 expuestos durante 24 horas a soluciones desinfectantes basadas en compuestos clorados (hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, cloramina B) y agua ozonizada. Los resultados confirmaron que el hipoclorito de sodio genera las mayores densidades de corriente de corrosión. En contraste, el agua saturada con ozono mostró un comportamiento similar al agua potable, siendo significativamente menos agresiva. Los ensayos también revelaron que el hipoclorito de calcio ocasiona una mayor degradación debido a su menor pH y la formación localizada de focos corrosivos, mientras que la corrosión inducida por cloramina B fue más uniforme. Estos hallazgos sugieren que el agua ozonizada podría ser una alternativa menos agresiva frente a los compuestos clorados tradicionales para aplicaciones desinfectantes.

El estudio realizado por (Romanouski & Zhilinski, 2015) investigó la resistencia a la corrosión del acero de bajo carbono C15E (equivalente al acero 15) al exponerse a desinfectantes clorados (hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio y cal clorada) a concentraciones de 50, 100 y 150 mg/L de cloro activo, y a una solución saturada de ozono en agua. Los ensayos, realizados mediante el método gravimétrico con tiempos de exposición de hasta 16 horas, confirmaron que la solución de ozono es el agente más corrosivo, registrando un índice de profundidad de corrosión de 6.2 mm/año que clasifica al acero como de baja resistencia. Entre los desinfectantes clorados, el hipoclorito de sodio mostró la mayor agresividad, con índices de corrosión entre 1.12 y 2.17 mm/año, mientras que el hipoclorito de calcio y la cal clorada resultaron significativamente menos dañinos. El estudio también reveló que el ozono inhibe la formación de una capa pasivante estable, oxidando el hierro directamente a Fe^{3+} y acelerando así el proceso de corrosión.

La corrosividad de los desinfectantes sobre aceros de bajo carbono depende críticamente de su naturaleza química y del tiempo de exposición. Entre los agentes clorados, el hipoclorito de sodio destaca como el más agresivo. En contraste, el ozono, si bien posee un alto poder oxidante que inhibe la pasivación del metal, suele aplicarse en ciclos mucho más breves, lo que puede resultar en un daño corrosivo acumulado menor comparado con exposiciones prolongadas a desinfectantes clorados. Un factor determinante adicional es la composición del acero, donde un menor contenido de carbono confiere una mayor resistencia a la corrosión. La selección del desinfectante debe considerar un equilibrio entre la eficacia microbiológica, su agresividad corrosiva y el tiempo de exposición, posicionando al ozono como una alternativa viable para aplicaciones de corta duración.

Influencia del entorno ambiental en la corrosión atmosférica

La corrosión atmosférica del acero de bajo carbono está intrínsecamente ligada a las condiciones ambientales específicas de cada ubicación. Los ambientes marino-industriales, con altas concentraciones de cloruros y dióxido de azufre, representan el escenario más agresivo. En estos ambientes se generan tasas de corrosión elevadas, donde la composición de los contaminantes resulta determinante. Factores como la proximidad al mar, la humedad relativa, los patrones de viento y la orientación de las superficies modifican sustancialmente la acumulación de agentes agresivos y la persistencia de la humedad, definiendo el comportamiento corrosivo final. (De Gracia de Araque & S. de Villalaz, 2015) estudiaron la corrosión atmosférica del acero SAE 1020 en dos entornos contrastantes en Panamá: un ambiente urbano (ciudad de Panamá) y un ambiente marino-industrial (Bahía Las Minas, Colón). Los resultados mostraron diferencias significativas en las tasas de corrosión entre ambas ubicaciones. En Bahía Las Minas, la velocidad alcanzó 106,53 $\mu\text{m}/\text{año}$ durante el primer año, mientras que en la ciudad de Panamá fue considerablemente menor (38,10 $\mu\text{m}/\text{año}$). Esta discrepancia se atribuyó a factores climáticos y contaminantes atmosféricos específicos del ambiente marino-industrial, como concentraciones elevadas de dióxido de azufre (SO_2) y cloruros (Cl^-), que aceleraron notablemente el proceso corrosivo. El estudio subrayó la importancia del análisis ambiental al evaluar la durabilidad del acero al carbono en diferentes entornos. Estos hallazgos son relevantes para diseñar estrategias preventivas contra la corrosión atmosférica.

(Viña Rodríguez et al., 2021) realizaron una recapitulación de conceptos fundamentales y experiencias prácticas derivadas de numerosos estudios de corrosión atmosférica en el clima tropical costero de Cuba, haciendo especial referencia a las normas ISO 9223, 9225 y 9226. Basándose en investigaciones previas que utilizaron acero al carbono AISI 1018 con exposiciones típicas de un año, los autores enfatizaron la necesidad de priorizar la determinación directa de la velocidad de corrosión anual (tercera variante) junto con la descripción ambiental (primera variante) para una evaluación confiable. Destacaron que, en atmósferas clasificadas como industriales, donde la deposición de iones sulfato supera ampliamente a la de cloruros, se ha observado sistemáticamente una gran diferencia entre la agresividad estimada mediante las funciones dosis/respuesta (C4-C5) y la determinada experimentalmente (C2-C3) para el acero al carbono y el acero galvanizado, debido a la formación de capas de óxido más protectoras. Esta experiencia subraya la limitación de las funciones estandarizadas en estos ambientes específicos.



(Abel Castañeda Valdés et al., 2020) estudiaron la corrosión atmosférica del acero al carbono AISI 1018 en cuatro sitios de la Refinería de Petróleo de La Habana, Cuba, durante un año (marzo/2014 a febrero/2015), combinando tres condiciones exteriores y una interior bajo abrigo ventilado. Los resultados revelaron que, para las atmósferas exteriores clasificadas como industrial e industrial altamente contaminada, donde la deposición de sulfatos (DSO_4^-) fue muy superior a la de cloruros (DCl^-), se encontró una discrepancia significativa: la categoría de agresividad corrosiva se estimó como elevada (C4) mediante funciones dosis/respuesta, pero la determinación directa mediante pérdida de masa mostró una categoría media (C3). Los autores atribuyeron esto a la formación de productos de corrosión más compactos y adherentes en presencia de altos sulfatos. Por el contrario, en el sitio industrial-costero, donde la DCl^- fue más significativa, sí hubo equivalencia entre la estimación y determinación de una categoría elevada (C4). Para la condición interior, se determinó una categoría elevada (IC4), identificando al incremento en la humedad relativa como el factor de mayor influencia.

(González Prada & Marrero Águila, 2005) investigaron los factores ambientales que determinan la agresividad corrosiva en la estación de ensayos naturales de Cojimar, Cuba, comparándola con la estación de Maracaibo (Venezuela) y el sur de la Florida (EE.UU.), mediante el estudio del comportamiento de acero al carbono y sistemas de recubrimientos. Los ensayos de exposición natural, realizados en el período 2001-2002, demostraron que la estación de Cojimar presentaba una agresividad corrosiva muy elevada (C5) para el acero, con una velocidad de corrosión anual de 1152.8 g/m^2 . Esta severidad se atribuyó a la combinación de una alta deposición de cloruros ($192.78 \text{ mg/m}^2\text{d}$) provenientes del aerosol marino —favorecida por la cercanía al mar (150 m) y el efecto de los rompientes de olas— y de dióxido de azufre ($24.67 \text{ mg/m}^2\text{d}$) originado por la actividad industrial y portuaria cercana. El estudio también correlacionó el ensayo acelerado CASS con la exposición natural, encontrando que 96 horas en cámara simulaban razonablemente la agresividad de 8 meses de exposición en Cojimar.

(Jiménez Salas et al., 2023) estudiaron la corrosión atmosférica del acero al bajo carbono (0,055 %C; 0,266 %Mn; 0,031 %Si) en el Valle Central de Costa Rica, una región tropical, durante un período de exposición de 12 meses. La investigación se centró en evaluar la influencia del ángulo de exposición (0° , 30° , 45° , 60° y 90° con respecto a la horizontal) sobre la velocidad de corrosión en tres estaciones con características ambientales distintas: San Luis (rural), Sabanilla (urbana) y Eólicas (rural). Los resultados mostraron que la velocidad de corrosión aumentó linealmente al disminuir el ángulo de exposición, registrándose los valores más altos en la posición horizontal (0°), con un promedio de $21 \text{ }\mu\text{m/año}$ para las tres estaciones, y los más bajos en la vertical (90°), con $12 \text{ }\mu\text{m/año}$. Esta variación se atribuyó a una mayor acumulación y permanencia de humedad y contaminantes en las superficies más horizontales. A pesar de presentar tiempos de humectación elevados (categorías r4 a r5), la corrosividad general se clasificó como C2 (baja) según la norma ISO 9223, debido a las bajas concentraciones promedio de contaminantes, específicamente dióxido de azufre (nivel P1) y cloruros (nivel S1). Los productos de corrosión identificados fueron lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$) y goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), independientemente del ángulo o estación. El estudio también destacó la influencia de eventos puntuales, como las erupciones del Volcán Turrialba, que causaron picos en la deposición de sulfatos.

(Fernández-Soto & Castañeda-Valdés, 2015.) estudiaron la agresividad corrosiva atmosférica en el Puerto del Mariel, Cuba, una zona de atmósfera industrial-costera. Durante un año de exposición (noviembre 2011 – octubre 2012), evaluaron la corrosión en acero al carbono, cobre, aluminio, cinc y acero galvanizado. Los resultados mostraron que la velocidad de corrosión fue significativamente mayor en los sitios más cercanos al mar, con el acero al carbono alcanzando una categoría de agresividad extrema (CX) en el sitio más cercano (1,520 m). El cobre y el cinc fueron los materiales más afectados, con categorías de muy elevada (C5) a extrema (CX) en la mayoría de los sitios. El estudio determinó que el factor más influyente en la corrosión fue la deposición de cloruros, seguido por los compuestos de azufre y el complejo humedad relativa-temperatura, confirmando la alta agresividad de la atmósfera industrial-costera hasta distancias de hasta 8 km desde la línea costera.

Efecto hidrodinámico sobre la corrosión localizada

(Villagrán Olivera, 2012) investigó cómo las condiciones hidrodinámicas favorecen la corrosión localizada en aceros SAE 1020 y SAE 1010 expuestos a soluciones salinas (NaCl) con concentraciones entre 0,01 y 0,1 M. Utilizando una celda electroquímica diseñada para generar gradientes controlados de velocidad sobre una placa rectangular, se observó visualmente la formación de picaduras mediante análisis cuantitativos. El uso combinado de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía por dispersión de energía (EDS) permitió caracterizar las superficies corroídas e identificar inclusiones no metálicas ricas en Mn, Al, Ca, S, O y Fe como sitios preferenciales para el inicio del ataque corrosivo. Un hallazgo clave fue que el número total de picaduras disminuyó con el aumento progresivo en la velocidad del flujo; incluso se identificó una velocidad crítica entre 1



y 2,5 m/s por encima de la cual las picaduras se inhibieron casi por completo. Este fenómeno fue atribuido a una rápida repasivación superficial facilitada por una mayor transferencia masiva tanto de reactantes como productos. Un estudio realizado por (Xu et al., 2021) investiga el efecto de la velocidad de flujo en la corrosión acelerada por flujo (FAC) y la erosión-corrosión del acero al carbono EH32 en agua de mar natural. Se observó que, a bajas velocidades (1 m/s), la corrosión se manifiesta como “marcas de flujo”, mientras que a velocidades superiores (3–8 m/s) predomina la picadura. La formación de una capa de óxido compacta de magnetita (Fe_3O_4) a altas velocidades limita la difusión de oxígeno y favorece un ambiente oclusivo que promueve la corrosión localizada bajo la capa de óxido. Además, en presencia de partículas de arena, la erosión-corrosión muestra una fuerte sinergia entre el daño mecánico y la disolución anódica, acelerando la formación y crecimiento de picaduras. La erosión domina a 8 m/s, mientras que a velocidades inferiores la corrosión es el principal mecanismo de degradación. La variación temporal de la velocidad de corrosión puede servir como indicador de la transición entre corrosión generalizada y localizada.

(Marrero-Águila & Zelaya-Reina, 2014) evaluaron el comportamiento a la corrosión de tuberías de acero de bajo carbono en una central hidroeléctrica, donde el agua circulaba a velocidades entre 2-3 m/s. El análisis del agua del embalse, mediante el Índice de Saturación de Langelier ($\text{IS} = +0.18$), clasificó el medio como "no corrosivo y muy poco incrustante". La inspección interna confirmó la formación de una capa calcárea compacta y adherente, que actuó como barrera física limitando la difusión de oxígeno hacia la superficie del metal. Bajo esta capa se encontró una superficie metálica bien conservada, lo que demuestra que, en condiciones hidrodinámicas estables y con la formación de depósitos protectores, la corrosión interna fue insignificante a pesar del contenido de oxígeno disuelto (0.2–8.3 mg/L) y la presencia esporádica de H_2S (hasta 0.150 mg/L). Este caso ilustra cómo un régimen de flujo constante, junto con la composición química del agua, puede favorecer la formación de capas protectoras que inhiben la corrosión localizada, incluso en presencia de agentes agresivos.

CONCLUSIONES

Esta revisión bibliográfica permitió analizar en profundidad el comportamiento corrosivo del acero de bajo carbono en presencia de hipoclorito de sodio y ambientes similares. Los resultados confirman que el hipoclorito de sodio es un agente corrosivo significativo, superando a otros compuestos clorados en su agresividad hacia este material. La corrosión se presenta tanto de forma generalizada como localizada, influenciada por factores como la concentración del desinfectante, el pH, la temperatura, las condiciones hidrodinámicas del medio y la presencia de inclusiones en la superficie del acero. El entorno ambiental, especialmente la presencia de contaminantes atmosféricos y ambientes marinos, también juega un papel importante en la aceleración del proceso corrosivo. En contraste, se ha identificado que el agua ozonizada podría ser una alternativa menos agresiva en ciertas aplicaciones. La selección del desinfectante y el control de las condiciones operativas resultan esenciales para mitigar la degradación de estas aleaciones en entornos industriales y de servicio.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Amasifuen Carbajal, D. A., & Cardozo Neira, M. D. (2019). Influencia de la densidad de corriente y contenido de hipoclorito de sodio en agua de mar natural sobre el potencial electroquímico y velocidad de corrosión del acero API 5L X42 PS L2 protegido catódicamente con corriente impresa. (Grado), Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
- Ayala Gaxiola, O. d. J. (2021). Análisis electroquímico y superficial del acero AISI 1018 tratado con poli (líquidos iónicos) entrecruzados como inhibidores de corrosión. (Maestría en Ingeniería Química), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Carbotecnia. (2023). ¿Qué es la cloración? Método de desinfección de agua. Retrieved from <https://www.carbotecnia.info/que-es-la-cloracion/>
- Castañeda Ruiz, J. (2016). Soldabilidad de aceros ASTM A572 G-50 por el proceso GMAWLSC, utilizando 100 % CO_2 como gas de protección en la aplicación de uniones de soldadura de filete en componentes para la industria pesada. Monografía Corporación Mexicana de Investigación en materiales, División de estudios de posgrado. Saltillo, Coahuila, México.
- Castañeda Valdés, A., Valdés Clemente, C., et al. (2020). Estudio de la corrosión atmosférica del acero al carbono en la refinería de petróleo de La Habana, Cuba Rev. CENIC Cienc. Quím., Vol. 51.
- Castañeda Valdés, A., Valdés Clemente, C., et al. (2020). Estudio de la corrosión atmosférica del acero al carbono en la refinería de petróleo de La Habana, Cuba. Revista CENIC Ciencias Químicas, 51, 126-146.



- Causil V, L. A., Conrado G., J. L., et al. (2017). Efecto citotóxico del hipoclorito de sodio (NaClO), en células apicales de raíces de cebolla (*Allium cepa* L.). Revista colombiana de ciencias hortícolas, Vol. 11(No. 1), pp. 97-104. doi:<http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5662>
- De Gracia de Araque, L., & S. de Villalaz, M. (2015). Comportamiento del acero al carbono y acero galvanizado en diferentes ambientes panameños. Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Experimental de Ingeniería.
- Doskocil, L., Horak, T., & Honc, J. (2021). Corrosion of low carbon steel in sodium chloride solution containing a water soluble fraction of humic acid Metal. doi:<https://doi.org/10.37904/metal.2021.4180>
- Dr. Ing. Domínguez Domínguez, J. A., Dr. Ing. Camejo Giniebra, J. J., & Dr. Ing. Marrero Águila, R. (2023). Introducción al estudio de la corrosión y protección de metales (D. I. Martín Laurencio Ed. 2 ed.). La Habana.
- EPRI. (2007). Carbon Steel Handbook (H. W. R. David J. Hall Ed.). Palo Alto, California, USA.
- Fernández-Soto, D., & Castañeda-Valdés, A. (2015.). Estudio de la corrosión atmosférica en el Puerto del Mariel de Cuba. Revista CENIC. Ciencias Químicas, Vol. 46, 47-58.
- González Prada, C., & Marrero Águila, R. (2005). Factores ambientales y su influencia en la agresividad corrosiva de la estación de ensayos de Cojimar. Comparación con otras estaciones. Revista CENIC Ciencias Químicas, Vol. 36, 181-185.
- Ing. Muñiz, J. L. (2024). El combustible de aviación. Anatomía de los contaminantes y la filtración (8va ed.).
- Jiménez Salas, R., Brenes Brenes, R., et al. (2023). Corrosión atmosférica del acero al bajo carbono, a diferentes ángulos de exposición, en un ambiente tropical. Tecnología en Marcha, Vol. 36., doi:<https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5845>
- Lamorú Urgelles, M., Fernández Columbié, T., et al. (2024). Modificaciones en las estructuras de un acero al carbono y un acero estructural por efecto del ciclo térmico. Ciencia & Futuro, 14(3).
- Llulluna Llumiuinga, F. R. (2014). Procesamiento de imágenes mediante software libre Phyton para el análisis metalográfico en aceros de bajo contenido de carbono. (Ingeniero Mecánico Grado), Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Marrero-Águila, R., & Zelaya-Reina, A. R. (2014). Evaluación de problemas de corrosión en tuberías de una central hidroeléctrica. Revista Tecnológica Química, 34.
- Nóvoa, x. R., Losada, J. M., & Espada, L. (2000). Corrosión de aceros al carbono en ácidos minerales. II parte: Ácido sulfúrico. Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección., 15(5).
- Parodi, S., Kappes, M., et al. (2018). Obtención de aceros de baja aleación con diferentes contenidos de Ni y similares microestructuras y propiedades mecánicas. Revista Materia, 23.
- Pospelov, A., Matsukevich, I., et al. (2022). Коррозия углеродистых сталей в дезинфицирующих растворах (Corrosión de aceros de carbono en soluciones desinfectantes). Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F (Boletín de la Universidad Estatal de Polotsk. Serie F), 14, 89-93. doi:10.52928/2070-1683-2022-32-14-89-93
- Rodríguez, M. (2024). Influencia de las condiciones ambientales en la corrosión atmosférica. Corrosión y materiales.
- Romanouski, V. I., & Zhilinski, V. V. (2015). Steel C15E corrosion resistance to disinfectants. Proceedings of BSTU, No. 3, 24-28.
- Romanovski, V., & Chaika, Y. N. (2014). Carbon steels corrosion resistance to disinfectants. Proceedings of BSTU, 3.
- Ronco, C., & Mishkin, G. J. Disinfection by Sodium Hypochlorite: Dialysis Applications (C. Ronco Ed. Karger ed. Vol. 154). Suiza.
- Vargel, C., Jacques, M., & Schmidt, M. P. (2004). The Corrosion of Aluminium. In Corrosion of Aluminium, Elsevier Amsterdam.
- Villagrán Olivera, V. A. (2012). Estudio de la corrosión de acero al carbono en soluciones salinas de NaCl y el efecto de la hidrodinámica. (Trabajo de diploma), Universidad de Chile, Chile.
- Viña Rodríguez, J., Castañeda Valdés, A., & Valdés Clementea, C. (2021). Corrosión atmosférica. Conceptos básicos y experiencias obtenidas en el clima tropical costero de Cuba. Rev. CENIC Cienc. Quím., Vol. 52, 121-137.
- Xu, Y., Zhang, Q., et al. (2021). Flow accelerated corrosion and erosion–corrosion behavior of marine carbon steel in natural seawater. Nature Partner Journals. doi:<https://doi.org/10.1038/s41529-021-00205-1>

En este artículo no existen conflicto de interes entre los autores.

