

Derivados del tiazol como inhibidores de la corrosión de acero en medios ácidos: una breve reseña

Daniel Díaz Rodríguez¹ ; Javier E. Rodríguez-Yáñez² ; Jean Sanabria-Chinchilla^{3,4} ; Leonardo X. Alvarez^{4,5a} 

¹Escuela de Ciencias Exactas y Naturales: Catedra de Química para Ingenierías; ²Laboratorio de Ecología Urbana Universidad Estatal a Distancia (UNED), Mercedes de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

³Centro de Electroquímica y Energía Química, ⁴Escuela de Química, ⁵Laboratorio de Síntesis y Química Verde Universidad de Costa Rica, Sede Central Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.

^aleonardo.alvarezgalan@ucr.ac.cr

Fecha recepción: 13 de noviembre de 2024

Fecha aceptación: 26 de mayo de 2025

Resumen gráfico



Resumen

La química moderna ha planteado nuevos retos para obtener nuevos compuestos ecológicamente responsables; los inhibidores de la corrosión (IC), como elementos protectores de los materiales metálicos, no son una excepción. Entre la miríada de inhibidores de corrosión reportados, los compuestos heterocíclicos que contienen nitrógeno (N) y azufre (S) han sido considerados como opciones adecuadas para el desarrollo de nuevos IC. En este trabajo de revisión se analizan las características de los estudios realizados para la evaluación de tiazol compuestos de cinco átomos como inhibidores de la corrosión de materiales metálicos, especialmente del acero al carbono en medios ácidos. También se discuten las metodologías sintéticas aplicadas para su preparación, y los cálculos de química cuántica.

Palabras clave: Compuestos heterocíclicos; Tiazol; Acero al carbón; Inhibidores orgánicos de corrosión; Inhibidores verdes.

Thiazole derivatives as corrosion inhibitors of steel in acidic media: a short review

Abstract

Modern chemistry has posed new challenges to obtain new ecologically responsible compounds; corrosion inhibitors (CI), as protective elements for metallic materials are not the exception. Among the myriads of reported corrosion inhibitors, the Nitrogen (N) and Sulfur (S) containing heterocyclic compounds have been considered as suitable options for developing new CI. In this review paper, we analyze the characteristics of the studies carried out to evaluate five-membered thiazo compounds as corrosion inhibitors for metallic materials, especially for carbon steel in acidic media. The synthetic methodologies applied for their preparation and the quantum chemical calculations are also discussed.

Keywords: *Heterocyclic compounds; Thiazole; Carbon steel; Organic corrosion inhibitors; Green inhibitors.*

Derivados de tiazol como inibidores de corrosão para aço em meio ácido: uma breve revisão

Resumo

Química moderna tem apresentado novos desafios para a obtenção de novos compostos ambientalmente responsáveis; os inibidores de corrosão (IC), como elementos de proteção para materiais metálicos, não são exceção. Entre a miríade de inibidores de corrosão relatados, os compostos heterocíclicos contendo Nitrogênio (N) e Enxofre (S) foram considerados como opções adequadas para o desenvolvimento de novos IC. Neste artigo de revisão, são discutidas as características dos estudos realizados para a avaliação de compostos de tiazol com cinco átomos como inibidores de corrosão de materiais metálicos, especialmente aço carbono em meio ácido. As metodologias sintéticas aplicadas para sua preparação e os cálculos de química quântica também são discutidas.

Palavras-chave: *Compostos heterocíclicos; Tiazol; Aço carbono; Inibidores orgânicos de corrosão; Inibidores verdes.*

Introducción

Los tiazoles son compuestos heterocíclicos aromáticos de cinco miembros que presentan un átomo de N, uno de S y tres de C. Con esta constitución, estos compuestos tienen dos isómeros posibles: los tiazoles y los isotiazoles. Generalmente, el primer término se utiliza para referirse a los 1,3-tiazoles, mientras que el segundo se emplea para referirse al isómero en el que los átomos de N y S están unidos entre sí, en las posiciones 1,2 (Figura 1). La información recopilada en este artículo de revisión está relacionada únicamente con los tiazoles y su uso como inhibidores de la corrosión. Aunque los isotiazoles también son de gran interés científico, las propiedades que han demostrado y sus aplicaciones los hacen merecedores de su propia revisión.

Tanto si se encuentran en la naturaleza como si se preparan sintéticamente, los tiazoles han mostrado una gran variedad de aplicaciones en diferentes áreas de la medicina, la farmacia, la agricultura y en la industria manufacturera. Por ejemplo, la fracción tiazol se encuentra en compuestos naturales como la vitamina B1, las Epothilonas A y B (medicamentos contra el cáncer) [1] y en el Myxothiazol (antibiótico) [2]. También está presente en los compuestos sintéticos Sulfathiazole (antimicrobiano) [3], Abafungin (antifúngico) [4], Fluensulfone (nematicida) [5], Clothianidin (insecticida) [6] y el amarillo Antra (colorante de tina) [7]. Todos ellos presentan un núcleo tiazólico en sus estructuras (Figura 2). Además, varios derivados del tiazol también se han descrito como inhibidores de la corrosión de superficies metálicas en medios ácidos [8-10].



1,3-tiazol



1,2-tiazol o isotiazol

Figura 1. Estructura de los isómeros constitucionales, 1,3-tiazol e 1,2-tiazol (isotiazol).

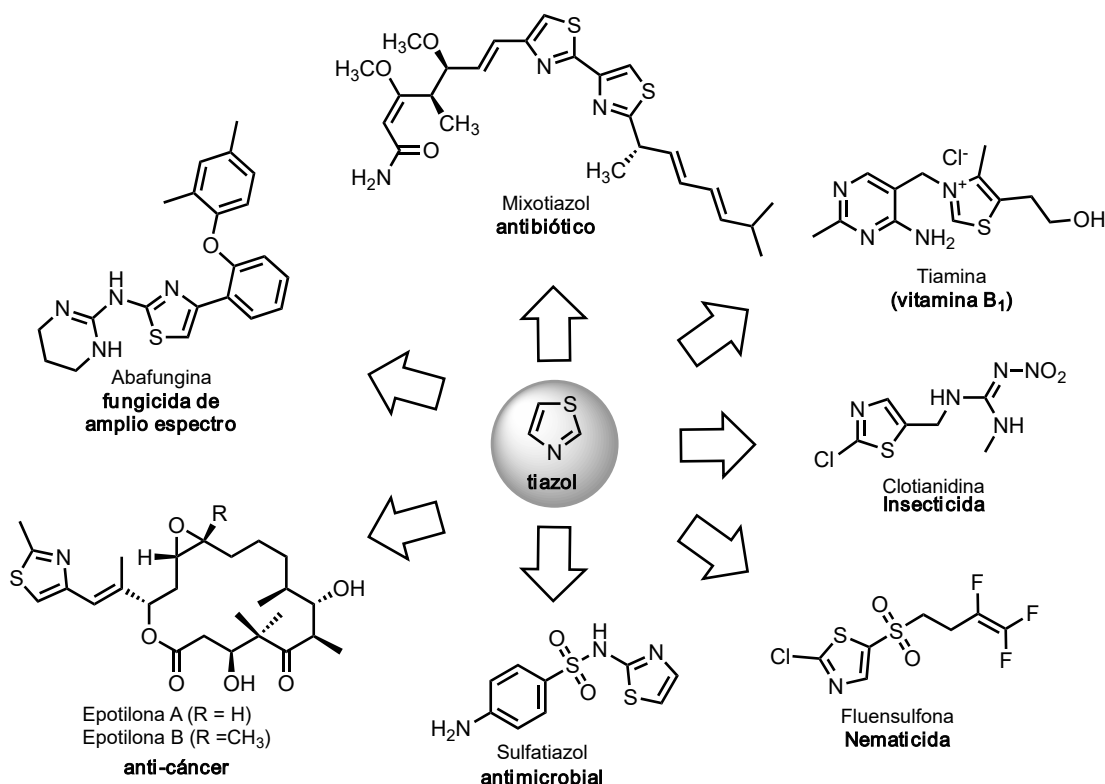


Figura 2. Algunos ejemplos de tiazoles naturales o sintéticos y sus aplicaciones.

Los inhibidores de corrosión son compuestos químicos que disminuyen la velocidad de corrosión de un material en un medio específico. Suelen clasificarse como inhibidores de corrosión orgánicos (ICO) o inorgánicos (ICI) en función de su composición química, es decir, si están basados en C o no [11,12].

Hasta la fecha, se prefieren los inhibidores de corrosión orgánicos debido a su mayor eficacia y menor impacto ecológico. Además, si los ICO tienen la capacidad de degradarse sin dañar el medio ambiente, estos compuestos se conocen como inhibidores de corrosión orgánicos verdes (ICOV) o inhibidores de corrosión respetuosos con el medio ambiente (ICRA), y es más probable que se considere su aplicación como inhibidores de corrosión en diferentes áreas de la industria [13-15].

La eficacia de los inhibidores orgánicos de la corrosión se basa en su capacidad de adsorción superficial, que genera un efecto barrera sobre la superficie metálica. Esta capacidad depende de la estructura química del compuesto y de las características fisicoquímicas asociadas al mismo. Estudios de diferentes tipos de inhibidores sugieren que ciertos grupos funcionales, como anillos aromáticos, insaturaciones (con electrones π) y átomos donantes de electrones (N, S y O), son características deseables en la estructura de los inhibidores orgánicos de corrosión [15-17]. Por estas razones, los compuestos heterocíclicos de 5 y 6 átomos han sido considerados como excelentes candidatos para inhibir la corrosión de diferentes metales [18].

Los tiazoles son una familia de compuestos hidrocarbonados (HC), cuya aplicación como ICO para acero en medio ácido ha sido escasamente explorada [19,20]. Para hacer frente a esto y continuar trabajando en el estudio de la actividad inhibidora de la corrosión de compuestos orgánicos heterocíclicos [21] y no heterocíclicos [22-24], se decidió revisar la literatura relacionada con la aplicación de estos compuestos como inhibidores de la corrosión desde 2013 hasta el 2023. Las síntesis químicas, las técnicas electroquímicas utilizadas para caracterizar estos inhibidores y su comportamiento durante la inhibición de la corrosión en acero en medios ácidos (HCl, H_2SO_4) se discuten y revisan en las siguientes secciones.

Síntesis de inhibidores de corrosión basados en tiazoles

Los tiazoles pueden prepararse principalmente

mediante métodos clásicos como la síntesis de Hantzsch [25-27] o la de Cook-Heilbron [28,29]. Más recientemente, se plantean otras varias metodologías sintéticas originales, como la reacción catalizada por Rh entre azidas de sulfonilo, alquinos terminales y tioésteres [30], las reacciones catalizadas por Pd/Fe de azidas de vinilo y KSCN [31], el acoplamiento catalizado por Cu de cetoximas, anhídridos y tiocianatos [32], el acoplamiento catalizado por Cu de acetatos de oxima con alquilisotiocianatos [33], los procesos de sulfuración/anulación oxidativa catalizados por Cu [34], la reacción promovida por ácido tribromoisocianúrico entre β -cetoésteres y tioureas [35] y la apertura de α -nitroepóxidos [36]. Sin embargo, por lo encontrado durante la recopilación de datos para esta revisión, parece que el método más utilizado para la preparación de tiazoles implica la condensación entre un compuesto α halocarbonilo y una tioamida (la síntesis de tiazoles de Hantzsch) (Figura 3) [37,38] o mediante una modificación, en la que el compuesto α halocarbonilo se genera in situ para ser condensado con tiourea (Figura 4). Ambos métodos siguen siendo los preferidos [39-46].

La preferencia por estos métodos puede entenderse en términos de eficacia (altos rendimientos), en la posibilidad de utilizar condiciones de reacción suaves y la versatilidad al permitir obtener variaciones estructurales con facilidad. A saber, la reacción puede llevarse a cabo en condiciones que no requieren el uso de bases, de altas temperaturas o de disolventes tóxicos [47,48], donde debido al tipo de reactivos que se utilizan, la diversidad estructural puede ser introducida desde las etapas iniciales de la síntesis. En la Figura 4 se muestra la preparación de varios tiazoles sustituidos mediante una modificación de la reacción de Hantzsch, en donde los tiazoles fueron obtenidos con rendimientos bastante buenos. Este detalle es fundamental en el desarrollo de nuevos inhibidores de corrosión orgánicos para el acero al carbono. Adicionalmente, varios trabajos han reportado el uso de organocatalizadores, protocolos de una sola etapa y el empleo de disolventes eutécticos profundos, que han permitido mejorar los rendimientos y reducir el impacto ambiental [49,50]. Estas publicaciones son también evidencia de que el uso de la reacción de Hantzsch para la preparación de tiazoles se alinea con las tendencias contemporáneas recomendadas por la química verde.

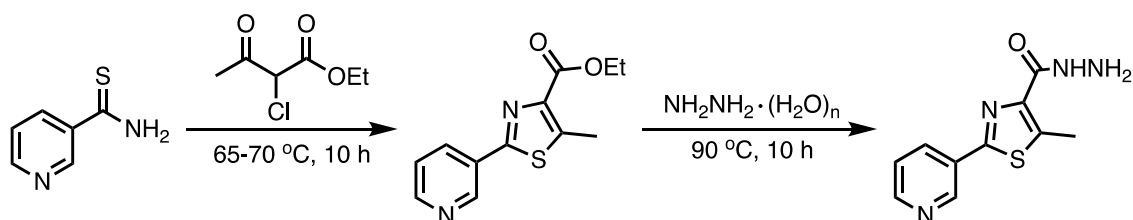
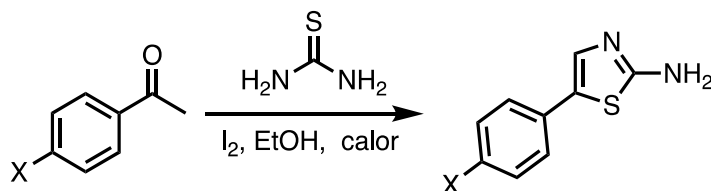


Figura 3. Síntesis de un ICO derivado del tiazol utilizando la reacción de Hantzsch para construir la fracción heterocíclica que contiene azufre [37].



X	Rendimiento (%)	Ref.
-OCH ₃	36	[39]
-OH	80	[40]
-Br	85	[42]
-H	88	[42]
-F	91	[42]
-Cl	93	[42]

Figura 4. Preparación de inhibidores de corrosión derivados del tiazol mediante una modificación de la reacción de Hantzsch [39,40,42].

Evaluación de los inhibidores de corrosión

¿Por qué en medio ácido?

El HCl y el H₂SO₄ son los dos ácidos inorgánicos más utilizados en la industria química. Su uso tanto para la limpieza de superficies como para reacciones químicas se basa en gran medida en su disponibilidad, sus elevadas concentraciones comerciales y la solubilidad de la mayoría de sus productos de reacción. Estos ácidos son muy agresivos con la mayoría de los materiales metálicos básicos, por lo que su uso como medio de evaluación de los inhibidores de corrosión se ha extendido y normalizado. Las concentraciones comúnmente utilizadas tienen niveles de pH del orden de 0 o inferiores, con una dependencia del tipo de ácido utilizado según el material [13,18,51-55]. En los medios H₂SO₄ y HCl, la disolución anódica del material férrico depende de la formación de (FeOH)_{ads} y (FeCl)_{ads}, respectivamente, y de sus intermediarios adsorbidos. Mientras que las reacciones catódicas están asociadas principalmente a la reducción del hidrógeno y secundariamente del oxígeno disuelto [56-59].

Mecanismos de adsorción de los inhibidores

La carga superficial de un material metálico se calcula como la diferencia entre su potencial de circuito abierto (E_{oc}), respecto a su potencial de carga cero (E_{zcp}). En medios ácidos, el acero suele presentar una carga superficial positiva, cuya variación depende de la naturaleza del electrolito y del inhibidor presentes [12,13]. En una superficie cargada positivamente, la carga es neutralizada inicialmente por los aniones del ácido en la capa adyacente. En una segunda capa, la aproximación del inhibidor dependerá inicialmente de sus características electrostáticas para una atracción física inicial, considerando especialmente las partes con densidad de carga positiva en la molécula. En un proceso posterior, estando ya en la capa adyacente a la superficie metálica, la interacción del inhibidor dependerá también de la existencia de átomos capaces de donar electrones (N, S, P, etc.), de áreas en la molécula con mayor densidad electrónica (enlaces pi, sistemas aromáticos, etc.) o eventualmente de cargas negativas [12-15]. En este último caso, también es posible que ocurra una transferencia de electrones del metal

al inhibidor. Esto plantearía una interacción de los orbitales d del Fe y los orbitales π del inhibidor, dando lugar a una adsorción química (proceso de quimisorción). En algunos casos, también es posible que los pares de electrones solitarios del inhibidor generen interacciones con los iones Fe^{+2} de la superficie para formar complejos. Éstos son finalmente adsorbidos o retenidos en la superficie por fuerzas débiles generando una película protectora [12-15,18,56-58]. Estos procesos son competitivos y distorsionan el potencial en la superficie del metal, por lo que eventualmente también es posible que se produzca una retro donación del exceso de carga superficial negativa al inhibidor [13,18,59-61].

Métodos gravimétricos y fisicoquímicos

Un primer tamizado de posibles especies moleculares como inhibidores, se realiza mediante un método gravimétrico de corrosión (GCM). Este método se realiza en materiales de acero de bajo contenido en carbono (o aceros dulces) en un medio ácido (HCl 1 M o H_2SO_4 0,5 mol/L) según el método ASTM G 31-72 o similar [54,55]. La evaluación de la corrosión se realiza por métodos de decapado y evaluación de pérdida de masa tomando medidas a intervalos de 1, 6, 12 y 24 horas. Los valores de velocidad de corrosión (CR) suelen expresarse en $mm\ a\tilde{no}^{-1}$ o $mg\ cm^{-2}\ h^{-1}$, utilizándose la ecuación 1:

$$CR = \frac{8,76 \cdot 10^4 \cdot \Delta m}{A \cdot \rho \cdot t} \quad (1)$$

donde CR es la velocidad de corrosión, en $mm\ a\tilde{no}^{-1}$; $8,76 \cdot 10^4$ es una constante para la conversión de las unidades a $mm\ a\tilde{no}^{-1}$; Δm es el peso perdido, en g; A es el área, en cm^2 ; ρ es la densidad del material, en $g\ cm^{-3}$ y t es el tiempo, en horas.

En este ensayo también se estima la eficiencia de inhibición (IE %) como la relación porcentual entre la corrosión con y sin el inhibidor, respecto a la corrosión sin inhibidor. La ecuación 2 es la utilizada para dicho cálculo:

$$IE\ \% = \frac{CR - CR_{inh}}{CR} \cdot 100 \quad (2)$$

donde IE % es el porcentaje de eficacia del inhibidor; CR es la velocidad de corrosión sin inhibidor, en $mm\ a\tilde{no}^{-1}$; CR_{inh} es la velocidad de corrosión con inhibidor, en $mm\ a\tilde{no}^{-1}$. Cuando el

valor de IE % se expresa en escala unitaria, este puede considerarse como el grado de cobertura (θ) del inhibidor sobre la superficie metálica a proteger, y se utiliza para estimar a cuál modelo de isothermas de adsorción se ajustan los resultados. El cálculo del grado de cobertura se realiza mediante la ecuación 3:

$$\theta = \frac{CR - CR_{inh}}{CR} \quad (3)$$

Los inhibidores prometedores, con valores de eficiencia de inhibición (IE %) superiores al 80 %, siguen posteriormente un análisis fisicoquímico asociado a su estabilidad frente a cambios de concentración, temperatura y tiempo. Estos procesos permiten establecer características iniciales como la concentración óptima, el efecto de la temperatura asociado a sus energías de activación (E_a), y los parámetros termodinámicos de la entropía y la entalpía de adsorción del inhibidor (ΔS^* y ΔH^*) durante el proceso de adsorción del inhibidor. Los valores de E_a son indicadores de la competencia de adsorción del inhibidor con las moléculas de agua o iones del entorno y entre las moléculas del inhibidor, en función de las características de la adsorción en la superficie (físicas o químicas). Del mismo modo, el cálculo de los valores de ΔS^* y ΔH^* permiten establecer las características termodinámicas de adsorción superficial del inhibidor analizado [13,18,52].

Para definir las características de la adsorción es necesario realizar el análisis de su isoterma. En general, el análisis suele partir de una isoterma de Langmuir, donde se considera que se forma una monocapa superficial del inhibidor sin interacciones laterales. Si este modelo no se ajusta a los datos experimentales, sería necesario probar otras isothermas como Temkin, o Frumkin con interacciones laterales y multicapa, o incluso isothermas más complejas como Freundlich, El Awady o Flory Huggins [52,62,63].

Con estas isothermas es posible calcular la magnitud de la constante de adsorción (K_{ads}) (que se asocia con la estabilidad del inhibidor en la superficie) y se puede obtener la energía libre de adsorción (ΔG_{ads}^0). Una ΔG_{ads}^0 negativa indicará una adsorción espontánea; sin embargo, el tipo de adsorción estará más condicionado a su magnitud, donde valores negativos menores a $-20\ kJ\ mol^{-1}$ se considerarán asociados a un proceso de fisorción,

mientras que por encima de -40 kJ mol^{-1} se tomarán como una quimisorción. En magnitudes intermedias, se considerará una adsorción mixta (física y química), donde se requiere el cálculo detallado de E_a , ΔS^* y ΔH^* para establecer mejor las características de adsorción [64-66].

Otra forma de establecer claramente el tipo de adsorción es calcular el calor de adsorción (Q_{ads}) del inhibidor sobre el metal. La problemática es que es un proceso difícil de medir. Valores positivos de Q_{ads} sugieren adsorción química, y valores negativos de Q_{ads} sugieren adsorción física [18,57]. Además, los inhibidores necesitan tiempo para estabilizarse frente a la adsorción superficial, lo que debe tenerse en cuenta para el análisis y los efectos a largo plazo del medio sobre el material considerado. En este análisis se establece simplemente la concentración óptima del inhibidor, en el método gravimétrico, considerando la medición en diferentes momentos dentro de las primeras 24 horas, para establecer el tiempo de estabilización del equilibrio en la superficie cuando no hay cambio sustancial en el IE % [13,18].

Métodos Electroquímicos

Las metodologías electroquímicas para el análisis de inhibidores se basan en establecer los efectos de la modificación de la polarización superficial causada por el inhibidor. Las metodologías habituales son la medida del potencial de circuito abierto (PCA o E_{oc}), la medida de las curvas de Tafel y el análisis mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). En algunos casos se utilizan otras técnicas complementarias o confirmatorias [67-68].

Potencial de Circuito Abierto

La medida de E_{oc} frente al tiempo, permite determinar el cambio del potencial de equilibrio entre las condiciones de presencia y ausencia de inhibidor. Generalmente se considera que los cambios hacia potenciales más negativos indican la formación de películas protectoras por el inhibidor. En algunos casos, el análisis de E_{oc} y la densidad de corriente (j) en las condiciones del ruido electroquímico (EN), sin aplicación de perturbaciones externas, presentan una evaluación básica de la posibilidad de picaduras y junto con el análisis por Transformada Rápida de Fourier (FFT) de los valores de E_{oc} y j , permiten la estimación de la resistencia de transferencia de carga (R_{tc}) [69-70].

Esta medida de EN es una técnica no destructiva utilizada en situaciones especiales para evaluar las picaduras o cuando las características superficiales del material no deben cambiar con la aplicación de potencial. Sin embargo, la EN no se utiliza habitualmente, ya que en otras situaciones las técnicas electroquímicas clásicas proporcionan más información.

Curvas de Tafel

Las curvas de Tafel implican la polarización de la superficie mediante la aplicación de un barrido de potencial de al menos -200 a $+200 \text{ mV}$ respecto a E_{oc} , a una velocidad de barrido generalmente del orden de 10 mV min^{-1} [67]. Con las curvas de Tafel es posible obtener información sobre el E_{oc} , la densidad de corriente de corrosión o de intercambio ($j_{corr} = j_0$), el factor de simetría (β , valor beta) y las pendientes de Tafel ($b_{catódica}$ y $b_{anódica}$) para cada semi-reacción en mV década^{-1} [68-70]. Pero este proceso implica la destrucción o degradación de la muestra ya que la polarización sobre el material es importante y no siempre se recupera la posición E_{oc} inicial al final del proceso. Cuando se utiliza un medio ácido libre de O_2 , la reacción catódica que tiene lugar corresponde exclusivamente a la reducción de H^+ ; mientras que la reacción anódica corresponde a la oxidación del metal. Debe considerarse que estas son las únicas reacciones que tienen lugar y que ambas están bajo control de activación. En general, esta es una situación que se cumple plenamente, lo que permite considerar el cálculo del IE % aplicando los valores de j_{corr} con y sin inhibidor, al igual que se hace con CR en la ecuación 2).

Adicionalmente, la modificación del valor de E_{oc} en las situaciones con y sin inhibidor plantea la posibilidad de establecer si existe claramente algún tipo de control específico de la inhibición. Para variaciones superiores a $(+85 \text{ mV})$ respecto a la situación sin inhibidor (blanco), se considera una inhibición de tipo anódico; mientras que, en el caso contrario (-85 mV) , se establece una inhibición de tipo catódico. En la región intermedia, la inhibición corresponde a un tipo mixto [69-70].

La resistencia de polarización lineal (LPR) es una variación de Tafel en la que la perturbación del sistema es mucho menor, de -20 a $+20 \text{ mV}$ respecto a E_{oc} , con una velocidad de barrido similar. En este proceso la pendiente entre la variación de potencial vs corriente es el valor de la resistencia de polarización (R_p). El valor de R_p es similar a R_{tc} [67,70].

$$j_{corr} = \frac{0,26}{R_p} \quad (4)$$

donde j_{corr} es la densidad de corriente, en mA cm⁻²; R_p es la Resistencia de polarización, en Ω cm².

Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

Se trata de una técnica de análisis muy habitual en el campo de la corrosión. El método EIS realiza la medición de la impedancia del sistema (Z) en función de una perturbación sinusoidal pequeña (menor a 10 mV vs E_{oc}) en un rango amplio de frecuencia (usualmente de 100 kHz a 0,1 Hz). La expresión grafica usual es a través de los gráficos de Nyquist y Bode [71-75].

Las curvas de EIS para inhibidores se asocian usualmente al modelo de Randles (Figura 5), donde la resistencia de disolución (R_s) está en serie con un sistema en paralelo constituido por la resistencia de transferencia de carga (R_{tc}) y una capacidad asociada a la doble capa superficial (C_{dl}) sobre la superficie metálica [76-81]. Un valor elevado de R_{tc} debido al efecto del inhibidor indica un aumento de la barrera a la transferencia de carga, en la doble capa electroquímica de la superficie metálica. El valor de R_{tc} se utiliza para estimar los valores de j_{corr} y IE % de forma similar a como se hace en LPR con R_p .

La disminución del valor de C_{dl} está asociada al espesor de la capa de inhibidor que se adsorbe sobre el metal, ya que elimina las moléculas de agua de la superficie dieléctrica. La C_{dl} suele sustituirse por un Elemento de Fase Constante (CPE) que considera la heterogeneidad de la superficie [82]. A bajas frecuencias (menor a 1Hz) los inhibidores pueden tener efectos inductivos (L) o difusivos (W) adicionales.

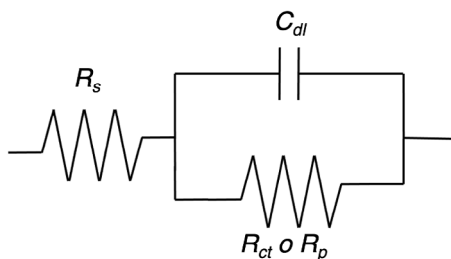


Figura 5. Modelo eléctrico de Randles utilizado como base para el análisis EIS de inhibidores.

La modulación electroquímica de frecuencia (EFM) es otra técnica asociada a la EIS. Esta

técnica permite estimar las pendientes de Tafel y j_{corr} , así como factores de ajuste para visualizar la eficiencia de la medida. En general, se utilizan como análisis de verificación de EIS, Tafel o en sistemas que no permiten análisis destructivos o grandes tiempos de análisis [78,83].

Evaluaciones Físicas

Las evaluaciones físicas típicas están asociadas al uso de microscopía (SEM, AFM), complementadas con EDX o FTIR. En casos especiales se utiliza la técnica del ángulo de contacto con el agua para estudiar el efecto hidrofóbico en la superficie del material debido al inhibidor [84,85].

Las imágenes SEM y AFM muestran la morfología de la superficie tras el ataque ácido, con o sin inhibidores. El análisis complementario de EDX mide la variación de la concentración superficial del metal y de los átomos especiales de los inhibidores (S, N, P, etc.), mientras que el FTIR permite obtener información asociada a la adsorción del inhibidor en la superficie del metal con el espectro infrarrojo asociado a un proceso de Reflectancia Total Atenuada (ATR) [84,85].

Modelos matemáticos

Inicialmente se realiza una modelización matemática para predecir el comportamiento de los inhibidores a sintetizar en el medio y sobre la superficie considerada. Esto permite centrarse en aquellos con mayor potencial como inhibidores, verificando las hipótesis obtenidas con los datos experimentales. La teoría funcional de la densidad (DFT) es la herramienta computacional más popular para modelizar las interacciones entre una parte del inhibidor y la superficie metálica. La DFT utiliza diferentes tipos de conjuntos básicos como: metal, índice de Miller, medio, etc., para estimar la interacción en un cálculo de tiempo moderado para obtener una mejor correlación con la reactividad química del inhibidor en la superficie [86-90].

La relación entre el inhibidor y el metal viene marcada por los orbitales moleculares frontera entre la capa de conducción y de valencia en las moléculas de los inhibidores de corrosión, denominados habitualmente HOMO y LUMO. El orbital HOMO (Orbital molecular ocupado de mayor energía) se asocia con la posibilidad de donar electrones y el LUMO (Orbital molecular no ocupado de menor energía) con la capacidad de aceptar electrones. Ambos representan los principales sitios de absorción en la molécula del inhibidor de corrosión. La diferencia de energía (ΔE) entre el HOMO y el LUMO se denomina separación

de bandas y representa la brecha energética. En un inhibidor de corrosión es deseable un valor bajo de esta brecha para que se requiera menos cantidad de energía para transferir el electrón en el HOMO a un orbital d con vacante de electrones en el metal [91]. Las energías HOMO y LUMO permiten calcular algunos parámetros asociados como el potencial de ionización, la afinidad electrónica, el band gap, la electronegatividad, la dureza (o suavidad), la electrofilicidad global y la fracción de transferencia de electrones. En algunos otros modelos se estiman además otros parámetros como: momento dipolar, afinidad protónica, potencial electrostático molecular e índices de Fukui [91-100].

En estos procesos de modelados las simulaciones de dinámica molecular o de Monte Carlo son las más populares, ya que en ellas se obtienen varios parámetros energéticos y coeficientes para expresar la interacción entre el inhibidor y el metal [41,101-110].

Inhibidores de corrosión derivados del tiazol, aspectos generales

Origen de los tiazoles

A lo largo de esta revisión, se encontró que la preparación de los distintos inhibidores a base de tiazoles rara vez parte de moléculas simples, y cuando lo hacen, en general utilizan el método de Hantzsch o una modificación de este. En contraposición a los pocos métodos que reportan la preparación de inhibidores a partir de la construcción del núcleo tiazólico, la mayoría de los trabajos recientes reporta la síntesis de los inhibidores utilizando al tiazol o a un derivado del mismo como molécula de partida (Figura 6) [37,39,42,111-120]. Por esta razón, en esta revisión se decidió no profundizar en la síntesis *per se* de los tiazoles, ya que su preparación está bien documentada en la literatura reciente [121-149].

Inhibidores de corrosión derivados del tiazol y la química verde

Tal y como se muestra en las secciones siguientes, los tiazoles presentan una eficiencia de inhibición de la corrosión del acero al carbono >85 % en medios ácidos, por lo que pueden ser considerados buenos candidatos para aplicaciones industriales. Sin embargo, algunos derivados tiazólicos presentan baja biodegradabilidad [150], por lo que el riesgo ecológico de los mismos siempre debe ser considerado.

De manera general, las publicaciones encontradas durante la preparación de esta revisión se centran únicamente en la síntesis sostenible de tiazoles; reportan el empleo de técnicas y métodos que se ajustan a los principios de la química verde, minimizando subproductos peligrosos, reduciendo el consumo energético y mejorando la biodegradabilidad de los productos. Estos trabajos involucran el uso de síntesis asistida por microondas o por ultrasonido [151], síntesis mecanoquímica [152] y el uso de biocatalizadores [153]. No obstante, a pesar de las diversas ventajas que presentan estas técnicas, tales como las altas velocidades de reacción, economías de átomos altas, bajo desperdicio de disolventes y el bajo consumo energético, las limitaciones, tales como el uso de equipo especializado y costoso, la dificultad de escalamiento y el alto costo de los catalizadores, no pueden dejarse de lado y deben ser mencionadas.

Evaluación de inhibidores de corrosión a base de derivados del tiazol

Método gravimétrico y fisicoquímico

Las concentraciones usualmente consideradas para los derivados del tiazol como inhibidores están en el rango de 1 a 20 mM en medios ácidos, con un IE % mínimo cercano al 80 % a 303 K. Los valores típicos de CR con inhibidor están entre (0,1 a 1,5) mg cm⁻² h⁻¹ [38,41,44-46,62,104,105,109-113,115,121]. La estabilidad con el tiempo es del orden de 6 a 24 horas, pero presentan un marcado efecto de decaimiento ya en las primeras horas de actividad [38,46,115,119].

Para la mayoría de los inhibidores de tiazol analizados, se ajustan a un modelo termodinámico de Arrhenius, con un modelo de adsorción según Langmuir. En esta situación, los ΔG_{ads} obtenidos en la mayoría de los casos son ligeramente inferiores a -40 kJ mol⁻¹, del orden de 30 a 38 kJ mol⁻¹ (pero superiores a -20 kJ mol⁻¹), lo que representa un tipo mixto de adsorción (química y física), sin llegar a una adsorción química completa [38,44-46,62,97,112,113,119,122]. Los valores de E_a y ΔH^* , tienden a crecer con la adición del inhibidor, mientras que ΔS^* tiende a disminuir. Estos efectos refuerzan el concepto de las adsorciones químicas parciales, la cual se ve afectada por la agitación térmica y, en general, disminuye su IE % con el aumento de la temperatura. Los valores de Q_{ads} son raramente calculados, siendo en esos casos negativos [111].

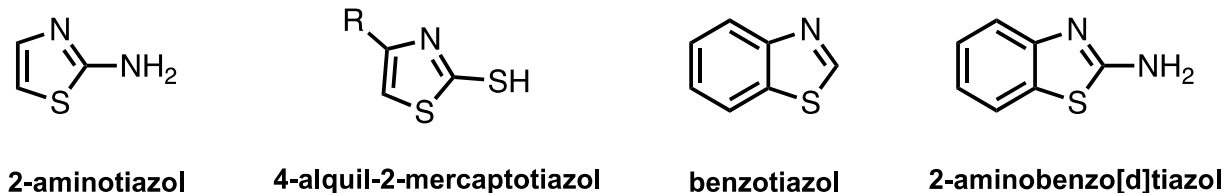


Figura 6. Estructuras de los materiales de partida más utilizados para la generación de inhibidores de corrosión derivados del tiazol.

Métodos electroquímicos

Según lo encontrado, las principales técnicas utilizadas para evaluar la densidad de corriente de corrosión son las curvas de Tafel y la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). Estas últimas técnicas se utilizan mayormente para complementar o confirmar los valores obtenidos por las técnicas principales.

En ambientes ácidos, los heterociclos orgánicos tienden a protonarse, lo que hace que la mayoría de los inhibidores sean de naturaleza catódica. En el caso de los derivados tiazólicos, la variación de E_{oc} , con y sin inhibidor, suele ser inferior a 30 mV, mientras que las pendientes de Tafel no presentan diferencias sustanciales entre ambas ramas, estando en el orden de 90 a 120 mV dec⁻¹. Esto sugiere que la mayoría de los tiazoles tienen un efecto tipo barrera, actuando como inhibidores de tipo mixto.

Los valores de densidad de corriente de corrosión (j_{corr}) suelen ser del orden de (20 a 80) $\mu A cm^{-2}$, sin variaciones significativas en las diferentes técnicas utilizadas. Mientras que los modelados para EIS resultan similares a los circuitos de Randles (Figura 5), lo que permite utilizar la R_{tc} como estimador de j_{corr} para utilizar las ecuaciones de IE % (ecuación 2), apoyando así el concepto de inhibidores físicos con una acción de tipo barrera. Las bajas frecuencias en el análisis EIS muestran, en unos pocos casos, un segundo bucle con efectos inductivos (L) o/y difusionales (Warburg). Este comportamiento está asociado al efecto de acoplamiento inhibidor-metal o al efecto difusional a los iones metálicos, respectivamente [38,97,128,129].

En la Tabla 1 se resumen los valores característicos obtenidos a través de los estudios gravimétricos, termodinámicos y electroquímicos para los inhibidores reportados en la presente revisión.

Análisis de superficie (Técnicas físicas)

El SEM y el AFM se utilizan especialmente para evaluar el deterioro que una superficie metálica

puede sufrir al ser expuesta a un medio corrosivo en presencia o ausencia de un inhibidor de corrosión. La magnitud de este daño puede relacionarse de manera cualitativa con la eficiencia de los inhibidores de corrosión derivados del tiazol [125,135,136]. Por su parte, la técnica de EDX (análisis de rayos X por energía dispersiva) se emplea para visualizar los cambios superficiales de composición; sin embargo, a pesar de su gran potencial, se utiliza en contadas ocasiones. El EDX estima inicialmente el valor de la cantidad de metal en la superficie en las condiciones del medio ácido. Posteriormente, cuando se añade el inhibidor, se detectan el metal y los átomos especiales que indican la presencia del inhibidor (S y N en los derivados del tiazol) y se expresan en porcentaje. Lo más común es la disminución del porcentaje de Fe y el aumento del porcentaje de S y N con la presencia de los inhibidores. Esto implica una adsorción de las especies moleculares en la superficie y un efecto en la disminución de la disolución del metal, asociado a su efecto barrera [44,86,87,96,120,124,135]. Finalmente, la espectroscopía de fotoelectrones de Rayos X (XPS) ha sido utilizada para caracterizar la composición elemental de una superficie metálica luego de haber sido expuesta a un medio corrosivo en presencia de un inhibidor. Esta técnica opera según el principio de irradiar una muestra con fotones de rayos X, lo que provoca la emisión de fotoelectrones desde la superficie del material. Si se mide la energía cinética de estos electrones emitidos, se obtiene información sobre las energías de enlace de los electrones en el material. Estos datos pueden utilizarse para deducir la composición elemental y obtener información acerca de los entornos químicos que rodean a los átomos de la capa superficial. En el caso específico de los tiazoles, trabajos recientes han hecho uso de esta técnica para corroborar la efectividad de los inhibidores y relacionarlos con la formación de una barrera protectora en la superficie del metal [46,154].

Estudios de la Teoría del funcional de la densidad (DFT)

La aplicación de la DFT para los inhibidores de corrosión tiazólicos es común en los artículos más recientes [45,120,124,129-133,135,137,145]. Las características del HOMO-LUMO para los tiazoles dependen de la estructura de las funcionalidades enlazadas al núcleo heterocíclico, teniendo mejores valores de ΔE cuando hay posibilidad de deslocalización de electrones y cargas por dichas estructuras. Este valor tiende a ser alto en valor absoluto y mayor a 3 eV, pero en las comparaciones entre tiazoles similares no siempre es un elemento discriminante.

Normalmente el efecto del HOMO-LUMO se concentra alrededor del tiazol, usualmente en el N del anillo y secundariamente con otros átomos donantes cercanos como O, N o S, y eventualmente algún otro centro de carga de la estructura. En la mayoría de los casos la fracción de electrones (ΔN) intercambiados es superior a 0,5 pero inferior a 1,5; lo que indica que en general el intercambio es parcial. Los valores del dipolo (μ) no siempre concuerdan con la modelización, por lo que no suelen ser un factor discriminante. Los demás parámetros secundarios se utilizan raramente, en consecuencia, no es posible establecer criterios generales [91,31].

Tabla 1. Valores típicos de los inhibidores de corrosión tiazólicos.

Propiedad	Valores típicos	Observaciones	Ref
Ensayo Gravimétrico		ASTM G 31	
Concentración óptima	1 a 20 mM	a veces en ppm	[38,41]
CR (mg cm ⁻² h ⁻¹)	0,1 a 1,5	a 30 °C, con inhibidor	[44-46]
IE %	85 a 95 (%)	a 30 °C, con inhibidor	[44-46]
Modelo Termodinámico			
	Arrhenius	usualmente entre 25 y 60 °C	
E _a (kJ mol ⁻¹)	70 to 80	valores usuales, con inhibidor	[38,44-46]
DS (J mol ⁻¹)	40 to 90	valores usuales, con inhibidor	[38,62,104]
DH (kJ mol ⁻¹)	50 to 90	valores usuales, con inhibidor	[38,62,104]
DG (kJ mol ⁻¹)	30 to 38	Adsorción de tipo mixta (física y química)	[38,62,104]
Tipo de Isoterma	Lagmuir	Sin interacción lateral significativa	[38,62,104]
Tafel		Valores de desviación de 250 mV vs E _{oc}	[38,97,128,129]
DE _{oc} (mV)	menos de 30	valores usuales	
Tipo de inhibidor	Mixto	cobertura de barrera (formación de capa protectora)	[109-113]
j _{corr} (μA cm ⁻²)	20 to 80	valores usuales, con inhibidor	[109-113]
b _{anodic} (mV dec ⁻¹)	80 to 110	valores usuales, con inhibidor	[109-113]
b _{cathodic} (mV dec ⁻¹)	90 to 150	valores usuales, con inhibidor	[109-113]
Espect. Imp. Electroq. (EIS)		Frecuencias desde 100KHz a 10mHz, con ΔV de 10 mV	
R _s (Ω cm ²)	menos de 1	valores usuales, con inhibidor	[38, 97,128,129]
R _{tc} (Ω cm ²)	100 to 1000	valores usuales, con inhibidor	[38, 97,128,129]
C _{dl} (μF cm ⁻²)	20 to 50	valores usuales, con inhibidor	[38, 97,128,129]

Tiazoles destacados

Debido a la gran variedad estructural encontrada en las moléculas reportadas y las diferencias en las condiciones experimentales utilizadas durante la evaluación, intentar encontrar una tendencia no es trabajo sencillo. Sin embargo, en la [Tabla 2](#) se presentan las estructuras y los mejores resultados reportados para el mejor inhibidor de cada trabajo consultado durante la revisión. En esta tabla se puede observar que los inhibidores presentan usualmente buenas eficacias en medios ácidos pues la mayoría presenta IE % superiores al 80 %. Tal y como se puede observar, la diversidad estructural es elevada. Esto, unido a las diferencias en las condiciones de evaluación (tipo de acero, tipo de ácido y concentración del inhibidor), hacen que sea muy difícil el encontrar

algún tipo de tendencia, razón por la cual en la [Figura 7](#), se presentan las estructuras de los seis inhibidores que presentaron las eficiencias más altas. Ahora bien, a pesar de la gran diversidad estructural, es posible remarcar que las moléculas con mejores resultados presentan sustituyentes que aumentan la deslocalización electrónica del anillo heterocíclico (enlaces múltiples, sistemas aromáticos, etc.), así como átomos con pares de electrones libres (que pueden incrementar la interacción con la superficie metálica); y que la interacción con el metal es de tipo mixto, donde se producen tanto acoplamientos superficiales sobre la doble capa electroquímica, como la formación de complejos y la generación de efectos donadores entre el hierro y los átomos donadores del anillo tiazol o sus sustituyentes [\[91,120,133,135,139\]](#).

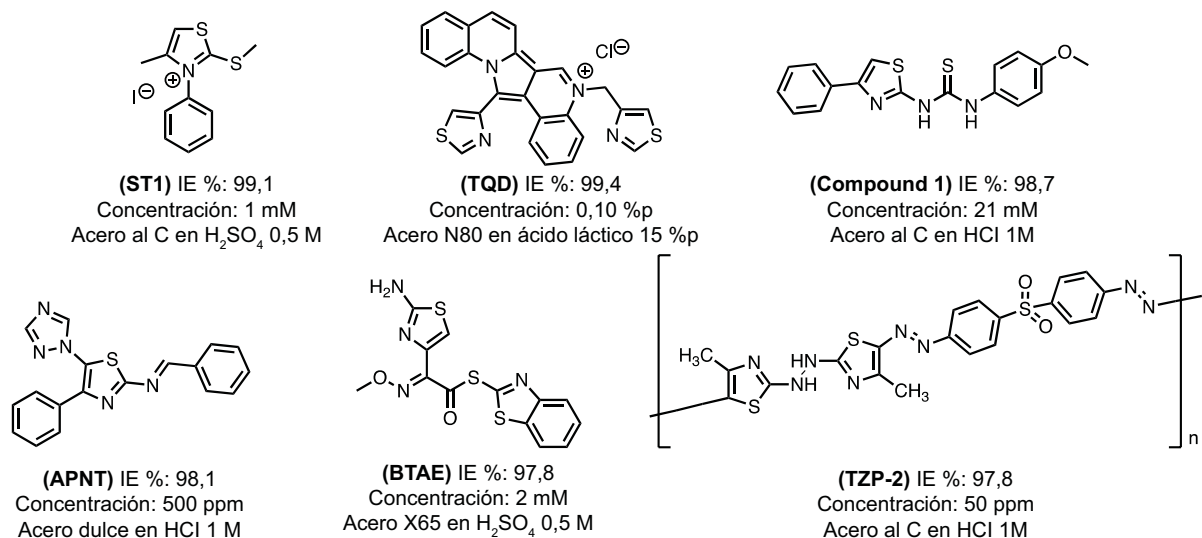
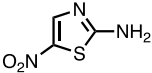
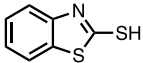
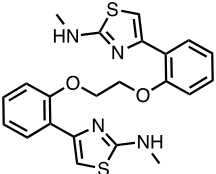
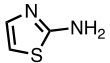
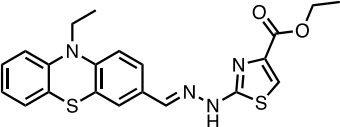
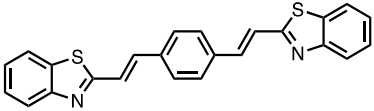
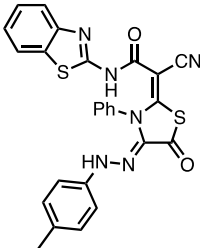
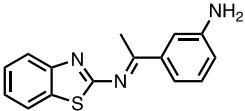
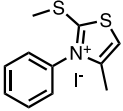
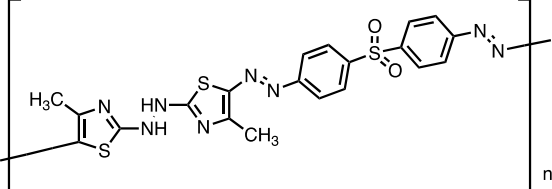
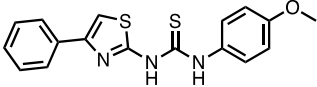


Figura 7. Inhibidores tiazólicos que mostraron las eficiencias más altas [\[114,127,131,133,135,143\]](#).

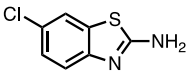
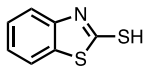
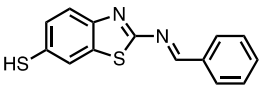
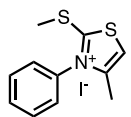
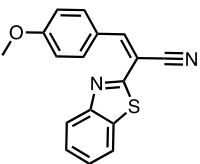
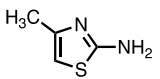
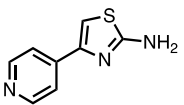
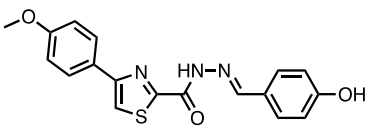
Tabla 2. Eficiencia de inhibición (IE %) de la corrosión de diferentes tipos de acero para los derivados del tiazol en diversas condiciones experimentales.

Línea	Inhibidores de corrosión tiazólicos*	Metal	Medio	Conc Inh.	IE %	Ref.
1	 2-amino-5-nitrothiazol (Nitramine)	Acero 4130	HCl 1 M	250 mM	72,9	[98]
2	 2-mercaptobenzotiazol (MBT)	Acero 4130	HCl 1 M	250 ppm	88,1	[101]
3	 4,4'-((etano-1,2-diilbis(oxi))bis(2,1-fenileno))bis(N-metiltiazol-2-amina) (o-Bis-MeAT)	Acero al carbono	H ₂ SO ₄ 0,5 M	500 ppm	95,4	[99]
4	 2-aminotiazol (AT)	Acero al carbono	HCl 0,1 M	500 ppm	90,3	[100]
5	 (E)-2-(2-((10-etil-10H-fenotiazin-3-il)metilen)hidrazinil)tiazol-4-carboxilato de etilo (CxTP)	Acero al carbono	HCl 1 M	150 mM	91,6	[38]

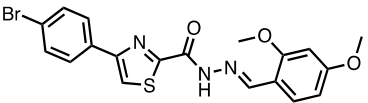
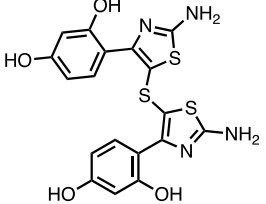
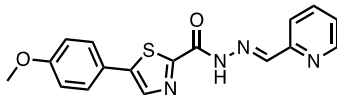
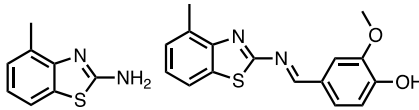
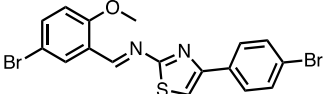
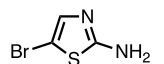
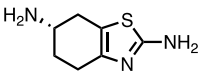
*Los códigos en Negritas corresponden al identificador asignado por los autores.

Línea	Inhibidores de corrosión tiazólicos*	Metal	Medio	Conc Inh.	IE %	Ref.
6	 1,4-bis((E)-2-(benzo[d]thiazol-2-yl)vinil)benceno (Distyryl Benzothiazole)	Acero al carbono	H ₂ SO ₄ 0,5 M	240 mM	78,8	[119]
7	 (2E)-2-((Z)-4-(2-p-toluidilhidrazono)-5-oxo-3-feniltiazolidin-2-iliden)-N-(benzo [d]tiazol-2-il)-2-cianoacetamida (inhibitor A)	Acero al carbono	HCl 1 M	20 mM	73	[107]
8	 (E)-3-(1-(benzo[d]tiazol-2-ilimino)etil)anilina (BTPIA)	Acero al carbono	HCl 1 M	6 ppm	90	[122]
9	 yoduro de N-fenil-4-metil-2-(tiometil)-1,3-tiazolinio (ST1)	Acero al carbono	HCl 1 M	1 mM	93,8	[134]
10	 poli[2-(2-(4-metiltiazol-2-il)hidrazinil)-4-metil-5-((3-(diazenil)fenil)diazenil)tiazol] (TZP-2)	Acero al carbono	HCl 1 M	50 ppm	97,8	[135]
11	 1-(4-metoxifenil)-3-(4-feniltiazol-2-il)tiourea (Compound 1)	Acero al carbono	HCl 1 M	21 mM	98,7	[114]

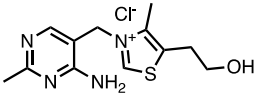
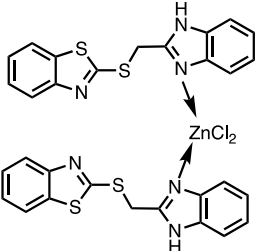
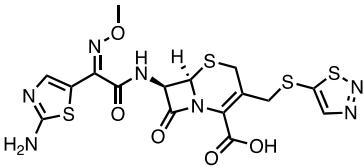
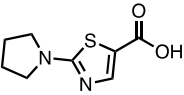
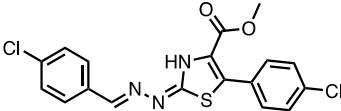
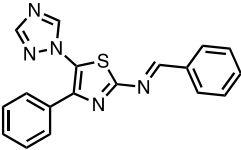
*Los códigos en Negritas corresponden al identificador asignado por los autores.

Línea	Inhibidores de corrosión tiazólicos*	Metal	Medio	Conc Inh.	IE %	Ref.
12	 2-amino-6-clorobenzotiazol (2ACBT)	Acero al carbono	H ₂ SO ₄ 0,5 M	1mM	93	[91]
13	 2-mercaptobenzotiazol (MTB)	Acero al carbono	HCl 1 M	300 ppm	86,3	[125]
14	 (E)-2-(bencilideneamino)benzo[d]tiazol-6-tiol (SH-BTPM)	Acero al carbono	HCl 1 M	40 ppm	90,0	[136]
15	 yoduro de N-fenil-4-metil-2-(tiometil)-1,3-tiazolinio (ST1)	Acero al carbono	H ₂ SO ₄ 0,5 M	1 mM	99,1	[127]
16	 (Z)-2-(benzo[d]tiazol-2-yl)-3-(4-metoxifenil)acrilonitrilo (Compound A)	Acero al carbono 1018	HCl 0,5 M	21 mM	87,0	[44]
17	 2-amino-4-metiltiazol (2A4MT)	Acero dulce	HCl 0,5 M	10 mM	88,0	[103]
18	 2-amino-4-(piridin-4-il)tiazol (PTA)	Acero dulce	HCl 1 M	0,2 mM	96,6	[41]
19	 (E)-N'-(4-hidroxibencilideno)-4-(4-metoxifenil)tiazol-2-carbohidrazida (TH-3)	Acero dulce	HCl 0,5 M	2,4 mM	93,0	[117]

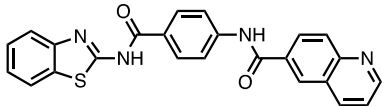
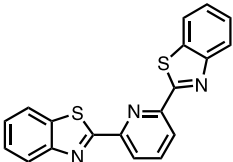
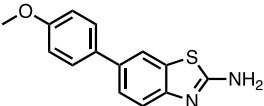
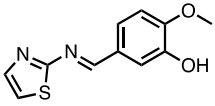
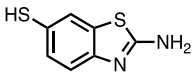
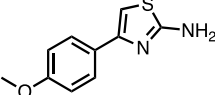
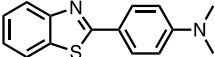
*Los códigos en Negritas corresponden al identificador asignado por los autores.

Línea	Inhibidores de corrosión tiazólicos*	Metal	Medio	Conc Inh.	IE %	Ref.
20	 (E)-4-(4-bromofenil)-N'-(2,4-dimetoxibencilideno)tiazol-2-carbohidrazida (BDTC)	Acero dulce	HCl 0,5 M	1,1 mM	91,3	[102]
21	 4,4'-(tiobis(2-aminotiazol-5,4-diil))bis(benceno-1,3-diol) (DHAT-3)	Acero dulce	HCl 1 M	89 mM	96,2	[118]
22	 (E)-5-(4-metoxifenil)-N'-(piridin-2-ilmetilen)tiazol-2-carbohidrazida (2-MPTH)	Acero dulce	HCl 0,5 M	0,88 mM	96,2	[45]
23	 Derecha: 2-amino-4-metilbenzotiazol (AMBT) Izquierda: (E)-2-metoxi-4-(((4-metilbenzo[d]tiazol-2-il)imino)metil)fenol (MBTP)	Acero dulce	HCl 0,5 M	100 ppm ambos	92	[62]
24	 (E)-1-(5-bromo-2-metoxifenil)-N-(4-(4-bromofenil)tiazol-2-il)metanimina (Br-THS)	Acero dulce	H ₂ SO ₄ 0,5 M	1 mM	94,4	[121]
25	 2-amino-5-bromo-1,3-tiazol (BTA)	Acero dulce	H ₂ SO ₄ 0,001 M	5 mM	52,4	[110]
26	 (S)-4,5,6,7-tetrahidrobenzo[d]tiazol-2,6-diamina (TDA)	Acero dulce	HCl 1 M	320 ppm	89,8	[104]

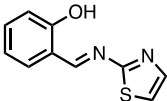
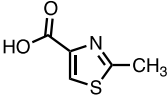
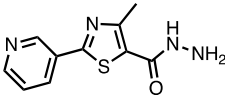
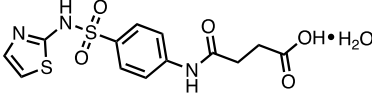
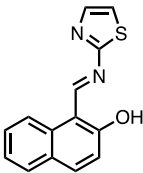
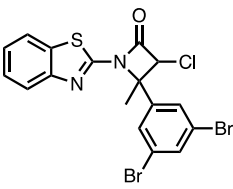
*Los códigos en Negritas corresponden al identificador asignado por los autores.

Línea	Inhibidores de corrosión tiazólicos*	Metal	Medio	Conc Inh.	IE %	Ref.
27	 Vitamina B1 (VitB1)	Acero dulce	HCl 0,5 M	10 mM	91,5	[105]
28	 diclorobis(2-(((1H-benzo[d]imidazol-2-il)methyl)tio)benzo[d]tiazol)zinc (II) (Complex Inhibitor II)	Acero dulce	H ₂ SO ₄ 0,5 M	1 mM	92,1	[115]
29	 Cefuzonam (CZM)	Acero dulce	HCl 1 M	400 ppm	89,7	[97]
30	 ácido 2-(pirrolidin-1-il)tiazol-5-carboxílico (PTCA)	Acero dulce	HCl 0,5 M	10 mM	93,2	[137]
31	 (E)-2-(((E)-4-clorobenzilidene)hidrazono)-5-(4-clorofenil)-2,3-dihidrotiazol-4carboxilato de metilo (T3)	Acero dulce	HCl 1 M	0,5 Mm	92,1	[128]
32	 2-(N-bencilidenamino)-4-fenil-5-(1,2,4-triazol-1-il)-1,3-tiazol (APNT)	Acero dulce	HCl 1 M	500 ppm	98,1	[131]

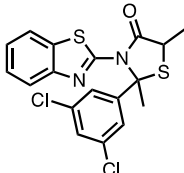
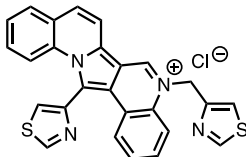
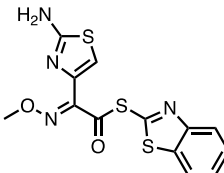
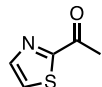
*Los códigos en Negritas corresponden al identificador asignado por los autores.

Línea	Inhibidores de corrosión tiazólicos*	Metal	Medio	Conc Inh.	IE %	Ref.
33	 N-(4-(benzo[d]thiazol-2-ylcarbamoyl)fenil)quinolin-6-carboxamida (NBCPQC)	Acero dulce	HCl 1 M	100 ppm	95,8	[132]
34	 2,6-bis-(2-benzotiazolil)piridina (BBTP)	Acero dulce	HCl 1 M	1mM	95	[129]
35	 2-amino-6-(4-metoxifenil)benzo[d]tiazol (MBTA)	Acero dulce	HCl 1 M	0,33mM	96,4	[138]
36	 (E)-2-metoxi-5-((tiazol-2-ilimino)metil)fenol (MTMP)	Acero dulce	HCl 1 M	6 ppm	93,9	[130]
37	 2-amino-6-mercaptobenzo[d]tiazol (TBTA)	Acero dulce	HCl 1 M	50 ppm	97,4	[108]
38	 2-amino-4-(4-metoxifenil)-1,3-tiazol (MPT)	Acero dulce	H ₂ SO ₄ 0,5 M	2,5 mM	91,3	[39]
39	 2-(4-dimetilaminofenil)benzo[d]tiazol (BTDA)	Acero dulce	HCl 1 M	50 ppm	95,0	[120]

*Los códigos en Negritas corresponden al identificador asignado por los autores.

Línea	Inhibidores de corrosión tiazólicos*	Metal	Medio	Conc Inh.	IE %	Ref.
40	 2-((thiazol-2-ylimino)metil)fenol (THYMP)	Acero dulce	HCl 2 M	0,01 M	93,0	[116]
41	 ácido 2-metiltiazol-4-carboxílico (MTCA)	Acero dulce	HCl 0,1 M	150 ppm	91,1	[126]
42	 4-metil-2-(piridin-3-il)thiazol-5-carbohidrazida (MPTC)	Acero dulce	HCl 1 M	0,5 mM	95,1	[37]
43	 succinilsulfatiazol hidrato (SSTH)	Acero dulce	HCl 1 M	800 ppm	96,1	[144]
44	 (E)-1-((thiazol-2-ylimino)metil)naftalen-2-ol (L3)	Acero dulce	HCl 1 M	500 ppm	90,0	[145]
45	 1-(benzo[d]thiazol-2-il)-3-cloro-4-(3,5-dibromofenil)-4-metilazatidin-2-ona (BDMA)	Acero N80	HCl 15 %	50 ppm	94,6	[112]

*Los códigos en Negritas corresponden al identificador asignado por los autores.

Línea	Inhibidores de corrosión tiazólicos*	Metal	Medio	Conc Inh.	IE %	Ref.
46	 3-(benzo[d]thiazol-2-il)-2-(3,5-diclorofenil)-2,5-dimetiltiazolidin-4-ona (BDMT)	Acero N80	HCl 15 %	50 ppm	95,4	[113]
47	 Cloruro de 14-(tiazol-4-il)-5-(tiazol-4-ilmetil)pirrolo[1,2-a:3,4-c']diquinoli-5-nio(TQD)	Acero N80	Á. Láctico 15 %	0,1 % peso	99,4	[143]
48	 S-(benzo[d]thiazol-2-il) (E)-2-(2-aminotiazol-4-il)-2-(metoximino)etanotioato (BTAE)	Acero X65	H ₂ SO ₄ 0,5 M	2 mM	97,8	[133]
49	 2-acetil-1,3-tiazol (TEO)	Acero X65	H ₂ SO ₄ 0,5 M	5 mM	89,9	[124]

*Los códigos en Negritas corresponden al identificador asignado por los autores.

Conclusiones

Los tiazoles son compuestos que han demostrado ser eficaces en la inhibición de la corrosión del acero en medio ácido. Este comportamiento puede asociarse principalmente con la estructura heterocíclica aromática y la presencia de átomos de N y S que facilitan su adsorción en las superficies metálicas.

La adsorción de los inhibidores facilita la formación de una capa protectora, la cual es crucial para el proceso de inhibición puesto que actúa como una barrera, reduciendo así significativamente la velocidad de corrosión. Su mecanismo de acción ha sido explorado mediante el uso de diversas técnicas experimentales que incluyen tanto métodos gravimétricos (pérdida de masa) como electroquímicos. Estas técnicas han demostrado que el comportamiento de los tiazoles como inhibidores de corrosión para el acero en medio ácido puede asociarse principalmente al comportamiento de un inhibidor de tipo mixto, con una adsorción de baja energía en la que se produce un intercambio parcial de electrones de los átomos donadores del tiazol a los átomos Fe. Esto da lugar a un tipo de adsorción física que suele seguir el modelo de Langmuir.

Aunado a esto, la facilidad de las síntesis utilizadas en su preparación y la accesibilidad comercial de precursores modificables sintéticamente (por ejemplo, 2-aminotiazol, 2-mercaptotiazol, benzotiazol, 2-aminobenzotiazol, entre otros) permite la realización de variaciones estructurales que pueden modular su comportamiento, haciéndolos adecuados según su aplicación. Todos estos factores hacen que los tiazoles sean opciones atractivas para mitigar la corrosión en diversas aplicaciones del sector industrial.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

JER-Y agradece al Programa de Innovación y Capital Humano para la Competitividad (PINN) del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT) de Costa Rica y a la Universidad Estatal a Distancia (UNED), por la beca y el apoyo brindado. Por su parte LXA expresa su gratitud a la vice rectoría de

investigación de la Universidad de Costa Rica (UCR) por el financiamiento proporcionado para el desarrollo de inhibidores de corrosión (Proyectos C3107 y C3108).

Referencias

- [1] Cheng H, Huang H, Huang G. Synthesis and antitumor activity of epothilone B. *Eur. J. Med. Chem.* 2018;157:925-934. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2018.08.055>
- [2] Thierbach G, Reichenbach H. Myxothiazol, a new antibiotic interfering with respiration. *Antimicrob. Agents Chemother.* 1981;19(4):504-507. <https://doi.org/10.1128/AAC.19.4.504>
- [3] Park K, Kwak IS. Disrupting effects of antibiotic sulfathiazole on developmental process during sensitive life-cycle stage of *Chironomus riparius*. *Chemosphere.* 2018;190:25-34. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.118>
- [4] Borelli C, Schaller M, Niewerth M, Nocker K, Baasner B, Berg D, *et al.* Modes of action of the new arylguanidine abafungin beyond interference with ergosterol biosynthesis and in vitro activity against medically important fungi. *Chemotherapy.* 2008;54(4):245-59. <https://doi.org/10.1159/000142334>
- [5] Kearns J, Ludlow E, Dillon J, O'Connor V, Holden-Dye L. Fluensulfone is a nematocide with a mode of action distinct from anticholinesterases and macrocyclic lactones. *Pestic Biochem Physiol.* 2014;109:44-57. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.01.004>
- [6] Srinivasa Babu K, Singh B, Mhaske B, Sharma A. Clothianidin, a new neonicotinoid insecticide for the management of foliar aphid complex of wheat in India and its safety to coccinellid predators. *Cereal Res. Commun.* 2012;40 (2):296-303. <https://doi.org/10.1556/CRC.40.2012.2.14>
- [7] He K, Ding G. Method for preparing vat yellow 2-anthraquinone thiazole dyes. *CN 101381525 A.* 2009 Mar 11.
- [8] Lukovits I, Kálmán E, Zucchi F. Corrosion Inhibitors - Correlation between Electronic Structure and Efficiency. *Corrosion.* 2001;57(1):3-8. <https://doi.org/10.5006/1.3290328>
- [9] Antonijevic MM, Petrovic MB. Copper Corrosion Inhibitors. A review. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2008;3:1-28. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)15441-1](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)15441-1)

- [10] Döner A, Solmaz R, Özcan M, Kardaş G. Experimental and theoretical studies of thiazoles as corrosion inhibitors for mild steel in sulphuric acid solution. *Corros. Sci.* 2011;53(9):2902-2913. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.05.027>
- [11] Fontana MG. *Corrosion Engineering*. 3 ed. Singapore: MacGraw-Hill Book Company; 1987.
- [12] Schweitzer PA. *Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods*. Boca Ratón: CRC-Press, Taylor & Francis Group; 2010. <https://doi.org/10.1201/9781420067712>
- [13] Sastri VS. *Green Corrosion Inhibitors. Theory and Practice*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2012. <https://doi.org/10.1002/9781118015438>
- [14] Sharma SK. *Green Corrosion Chemistry and Engineering. Opportunities and Challenges*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2012.
- [15] Popoola LT. Organic green corrosion inhibitors (OGCIs): a critical review. *Corros. Rev.* 2019;37(2):71-102. <https://doi.org/10.1515/correv-2018-0058>
- [16] Revie RW, editor. *Uhlig's Corrosion Handbook*. 3 ed. Pennington, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2011.
- [17] Brycki BE, Kowalczyk IH, Szulc A, Kaczerewska O, Pakiet M. Organic Corrosion Inhibitors. In: *Organic Corrosion Inhibitors, Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications*. Aliofkhazraei M, editor. Iran: IntechOpen. 2018;3-33. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72943>
- [18] Quraishi MA, Chauhan DS, Saji VS. *Heterocyclic Organic Corrosion Inhibitors. Principles and Applications*. Amsterdam: Elsevier; 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00001-1>
- [19] Loto RT, Loto CA, Popoola API. Corrosion inhibition of thiourea and thiadiazole derivatives: A Review. *J. Mater. Environ. Sci.* 2012;3(5):885-894.
- [20] Damodara J, Fernandes ST, Dsouza SM. Evaluation of 1,3-Thiazole Derivatives with Pharmaceutical and Chemical Activity: a Review. *Heterocycles*. 2023;106(5). <https://doi.org/10.3987/REV-23-1003>
- [21] Fernandes CM, Alvarez LX, dos Santos NE, Maldonado Barrios AC, Ponzio EA. Green synthesis of 1-benzyl-4-phenyl-1H-1,2,3-triazole, its application as corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium and new approach of classical electrochemical analyses. *Corros. Sci.* 2019;149:185-194. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.019>
- [22] Machado Fernandes C, Pina VGSS, Alvarez LX, de Albuquerque ACF, dos Santos Júnior FM, Barrios AM, *et al.* Use of a theoretical prediction method and quantum chemical calculations for the design, synthesis and experimental evaluation of three green corrosion inhibitors for mild steel. *Coll. Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2020;599. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124857>
- [23] Machado Fernandes C, Guedes L, Alvarez LX, Barrios AM, Lgaz H, Lee H-S, *et al.* Anticorrosive properties of green-synthesized benzylidene derivatives for mild steel in hydrochloric acid: An experimental study combined with DFTB and molecular dynamics simulations. *J. Mol. Liq.* 2022;363. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119790>
- [24] Fernandes CM, Pina VGSS, Alfaro CG, de Sampaio MTG, Massante FF, Alvarez LX, *et al.* Innovative characterization of original green vanillin-derived Schiff bases as corrosion inhibitors by a synergic approach based on electrochemistry, microstructure, and computational analyses. *Coll. Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2022;641. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128540>
- [25] Hantzsch A, Weber JH. Ueber Verbindungen des Thiazols (Pyridins der Thiophenreihe). *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* 1887;20:3118-3132. <https://doi.org/10.1002/cber.188702002200>
- [26] Egan RS, Tadanier J, Garmaise DL, Gaunce AP. Intermediates in the Hantzsch thiazole synthesis. *J. Org. Chem.* 1968;33(12):4422-4426. <https://doi.org/10.1021/jo01276a024>
- [27] de Souza M, Facchinetti V, Avellar M, Nery A, Gomes C, Vasconcelos T. An Eco-friendly, Hantzsch-Based, Solvent-Free Approach to 2-Aminothiazoles and 2-Aminoselenazoles. *Synthesis*. 2016;48(03):437-440. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1560534>
- [28] Cook AH, Heibron I. Studies in the azole series. Part I. A novel route to 5-aminithiazoles. *J. Chem. Soc.* 1947:1594-1598. <https://doi.org/10.1039/jr9470001594>
- [29] Cook AH, Heibron I, Levy AL. Studies in the azole series. Part II. The interaction of alpha-amino-nitriles and carbon disulphide. *J. Chem. Soc.* 1947:1598-1609. <https://doi.org/10.1039/JR9470001598>

- [30] Miura T, Funakoshi Y, Fujimoto Y, Nakahashi J, Murakami M. Facile synthesis of 2,5-disubstituted thiazoles from terminal alkynes, sulfonyl azides, and thionoesters. *Org. Lett.* 2015;17(10):2454-7. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.5b00960>
- [31] Chen B, Guo S, Guo X, Zhang G, Yu Y. Selective Access to 4-Substituted 2-Aminothiazoles and 4-Substituted 5-Thiocyano-2-aminothiazoles from Vinyl Azides and Potassium Thiocyanate Switched by Palladium and Iron Catalysts. *Org. Lett.* 2015;17(19):4698-701. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.5b02152>
- [32] Tang X, Yang J, Zhu Z, Zheng M, Wu W, Jiang H. Access to Thiazole via Copper-Catalyzed [3+1+1]-Type Condensation Reaction under Redox-Neutral Conditions. *J. Org. Chem.* 2016;81(22):11461-11466. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.6b02124>
- [33] Tang X, Zhu Z, Qi C, Wu W, Jiang H. Copper-Catalyzed Coupling of Oxime Acetates with Isothiocyanates: A Strategy for 2-Aminothiazoles. *Org. Lett.* 2016;18(2):180-3. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.5b03188>
- [34] Wang X, Qiu X, Wei J, Liu J, Song S, Wang W, *et al.* Cu-Catalyzed Aerobic Oxidative Sulfuration/Annulation Approach to Thiazoles via Multiple Csp(3)-H Bond Cleavage. *Org. Lett.* 2018;20(9):2632-2636. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.8b00840>
- [35] de Mattos M, de Andrade V. One-Pot Telescoped Synthesis of Thiazole Derivatives from β -Keto Esters and Thioureas Promoted by Tribromoisocyanuric Acid. *Synthesis.* 2018;50(24):4867-4874. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1610243>
- [36] Zhu Y, Chen W, Zhao D, Zhang G, Yu Y. One-Pot Three-Component Strategy for Polysubstituted 2-Aminothiazoles via Ring Opening of α -Nitro Epoxides. *Synthesis.* 2019;51(09):2023-2029. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1612101>
- [37] Salman TA, Al-Amiery AA, Shaker LM, Kadhum AAH, Takriff MS. A study on the inhibition of mild steel corrosion in hydrochloric acid environment by 4-methyl-2-(pyridin-3-yl) thiazole-5-carbohydrazide. *Int. J. Corros. Scale Inhib.* 2019;8(4):1035-1059. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2019-8-4-14>
- [38] Varvara S, Găină L, Bostan R, Popa F, Grozav A. Some Phenothiazinyl-thiazolyl-hydrazine Derivatives as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in 1.0 M HCl: Electrochemical, SEM-EDX and DFT Investigations. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2018;13(9):8338-8364. <https://doi.org/10.20964/2018.09.32>
- [39] Gong W, Yin X, Liu Y, Chen Y, Yang W. 2-Amino-4-(4-methoxyphenyl)-thiazole as a novel corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium. *Prog. Org. Coat.* 2019;126:150-161. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.10.001>
- [40] Farahati R, Ghaffarinejad A, Mousavi-Khoshdel SM, Rezaia J, Behzadi H, Shokravi A. Synthesis and potential applications of some thiazoles as corrosion inhibitor of copper in 1 M HCl: Experimental and theoretical studies. *Prog. Org. Coat.* 2019;132:417-428. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.04.005>
- [41] Yang X, Li F, Zhang W. 4-(Pyridin-4-yl)thiazol-2-amine as an efficient non-toxic inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solutions. *RSC Adv.* 2019;9(19):10454-10464. <https://doi.org/10.1039/C8RA09618J>
- [42] Gong W, Xu B, Yin X, Liu Y, Chen Y, Yang W. Halogen-substituted thiazole derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in 0.5 M sulfuric acid at high temperature. *J. Taiwan Inst. Chem. E.* 2019;97:466-479. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.02.018>
- [43] Farahati R, Behzadi H, Mousavi-Khoshdel SM, Ghaffarinejad A. Evaluation of corrosion inhibition of 4-(pyridin-3-yl) thiazol-2-amine for copper in HCl by experimental and theoretical studies. *J. Mol. Struct.* 2020;1205. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127658>
- [44] Fouda AS, Rashwan SM, Farag ME. Corrosion inhibition of 1018 carbon steel in hydrochloric acid solutions by benzothazol-2-cyanomethyl derivatives. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2015;51(4):637-650. <https://doi.org/10.1134/S2070205115040097>
- [45] Chaitra TK, Mohana KN, Tandon HC. Study of New Thiazole Based Pyridine Derivatives as Potential Corrosion Inhibitors for Mild Steel: Theoretical and Experimental Approach. *Int. J. Corros.* 2016;2016:1-21. <https://doi.org/10.1155/2016/9532809>
- [46] Lgaz H, Masroor S, Chafiq M, Damej M, Brahmia A, Salghi R, *et al.* Evaluation of 2-Mercaptobenzimidazole Derivatives as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Hydrochloric Acid. *Metals.* 2020;10(3). <https://doi.org/10.3390/met10030357>

- [47] Tomassetti M, Lupidi G, Piermattei P, Rossi FV, Lillini S, Bianchini G, *et al.* Catalyst-Free Synthesis of Polysubstituted 5-Acylamino-1,3-Thiazoles via Hantzsch Cyclization of α -Chloroglycinates. *Molecules*. 2019;24(21). <https://doi.org/10.3390/molecules24213846>
- [48] Shaikh MS, Kale MA, Muralidharan V, Venkatachalam T, Ali SS, Islam F, *et al.* The Design, Synthesis, and Evaluation of Diaminopimelic Acid Derivatives as Potential dapF Inhibitors Preventing Lysine Biosynthesis for Antibacterial Activity. *Antibiotics*. 2023;12(1):47. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12010047>
- [49] Bouherrou H, Saidoun A, Abderrahmani A, Abdellaziz L, Rachedi Y, Dumas F, *et al.* Synthesis and Biological Evaluation of New Substituted Hantzsch Thiazole Derivatives from Environmentally Benign One-Pot Synthesis Using Silica Supported Tungstosilicic Acid as Reusable Catalyst. *Molecules*. 2017;22(5):757. <https://doi.org/10.3390/molecules22050757>
- [50] Zhao D, Liu Y, Li Y, Chen Y. A green synthesis and antibacterial activity of ferrocene-based thiazole derivatives in choline chloride/glycerol eutectic solvent. *RSC Advances*. 2022;12(34):22054-22059. <https://doi.org/10.1039/D2RA04587G>
- [51] Cramer SD, Covino BS, Jr. Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection: ASM International; 2003. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v13a.9781627081825>
- [52] Schmitt G. Application of Inhibitors for Acid Media: Report prepared for the European Federation of Corrosion Working Party on Inhibitors. *Br. Corros. J.* 1984;19(4):165-176. <https://doi.org/10.1179/000705984798273100>
- [53] González Fernández JA. Control de la Corrosión: Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas. Madrid: Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas; 1989.
- [54] ASTM. ASTM G102-2010 - Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. West Conshohocken, PA: ASTM international; 2010.
- [55] ASTM. ASTM G31-72 - Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2021.
- [56] Mourya P, Banerjee S, Rastogi RB, Singh MM. Inhibition of Mild Steel Corrosion in Hydrochloric and Sulfuric Acid Media Using a Thiosemicarbazone Derivative. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2013;52(36):12733-12747. <https://doi.org/10.1021/ie4012497>
- [57] Shetty P. Schiff bases: An overview of their corrosion inhibition activity in acid media against mild steel. *Chem. Eng. Commun.* 2020;207(7):985-1029. <https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1630387>
- [58] Zehra S, Mobin M, Aslam J, Parveen M. Assessment of glycine derivative N-benzylidene-2((2-oxo-2-(10H-phenothiazine-10yl)ethyl) amino) acetohydrazide as inhibitor for mild steel corrosion in 1 M HCl solution: electrochemical and theoretical approach. *J. Adhes. Sci. Technol.* 2018;32(3):317-342. <https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1354669>
- [59] Bockris JOM, Reddy AKN, Gamboa-Aldeco M. Modern Electrochemistry 2A: Fundamentals of Electrodics. 2 ed: Springer New York, NY; 2001. 763 p.
- [60] Muthukumar N. Petroleum Products Transporting Pipeline Corrosion - A Review. In: The Role of Colloidal Systems in Environmental Protection. Fanun M, editor. East Jerusalem: Elsevier; 2014. p. 527-571. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63283-8.00021-1>
- [61] Bammou L, Belkhaouda M, Salghi R, Benali O, Zarrouk A, Zarrok H, *et al.* Corrosion inhibition of steel in sulfuric acidic solution by the Chenopodium Ambrosioides Extracts. *J. Assoc. Arab Univ. Basic Appl. Sci.* 2014;16(1):83-90. <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2013.11.001>
- [62] Shainy KM, Rugmini Ammal P, Joseph A. Development of passive film and enhancement of corrosion protection of mild steel in hydrochloric acid through the synergistic interaction of 2-amino-4-methyl benzothiazole (AMBT) and (E)-2-methylbenzo[d]thiazol-2-yl) imino-4-methyl) phenol (MBTP). *Egypt. J. Pet.* 2018;27 (4):621-632. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.09.004>
- [63] Ahamad I, Prasad R, Quraishi MA. Experimental and theoretical investigations of adsorption of fexofenadine at mild steel/hydrochloric acid interface as corrosion inhibitor. *J. Solid State Electrochem.* 2010;14(11):2095-2105. <https://doi.org/10.1007/s10008-010-1041-9>
- [64] Ahamad I, Prasad R, Quraishi MA. Thermodynamic, electrochemical and quantum chemical investigation of some

- Schiff bases as corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid solutions. *Corros. Sci.* 2010;52:933-942. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.11.016>
- [65] Chauhan DS, Ansari KR, Sorour AA, Quraishi MA, Lgaz H, Salghi R. Thiosemicarbazide and thiocarbonylhydrazide functionalized chitosan as ecofriendly corrosion inhibitors for carbon steel in hydrochloric acid solution. *Int J Biol Macromol.* 2018;107(B):1747-1757. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.050>
- [66] Gupta NK, Joshi PG, Srivastava V, Quraishi MA. Chitosan: A macromolecule as green corrosion inhibitor for mild steel in sulfamic acid useful for sugar industry. *Int J Biol Macromol.* 2018;106:704-711. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.064>
- [67] ASTM. ASTM G5-2004 - Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2010.
- [68] Kelly RG, Scully JR, Shoesmith D, Buchheit RG. *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering* 1ed. New York: CRC Press; 2003. <https://doi.org/10.1201/9780203909133>
- [69] Bard AJ, Faulkner LR. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2000.
- [70] Stansbury EE, Buchanan RA. *Fundamentals of Electrochemical Corrosion*. Ohio, USA: ASM International; 2000. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.fec.9781627083027>
- [71] Lazanas AC, Prodromidis MI. Electrochemical Impedance Spectroscopy-A Tutorial. *ACS Meas. Sci. Au.* 2023;3(3):162-193. <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00070>
- [72] Orazem ME, Tribollet B. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.; 2008. <https://doi.org/10.1002/9780470381588>
- [73] Barsoukov E, Macdonald JR. *Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.; 2005. <https://doi.org/10.1002/0471716243>
- [74] Scully JR, Silverman DC, Kendig MW. *Electrochemical Impedance: Analysis and Interpretation*. Philadelphia, PA: ASTM; 1993. <https://doi.org/10.1520/STP1188-EB>
- [75] Lasia A. *Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications*. New York: Springer; 2014. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8933-7>
- [76] Baboian R. *Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation*. 2 ed. West Conshohocken, PA: ASTM; 2005. https://doi.org/10.1520/MNL20_2ND-EB
- [77] Yang L. *Techniques for Corrosion Monitoring*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2008. <https://doi.org/10.1533/9781845694050>
- [78] Obot IB, Onyeachu IB. Electrochemical frequency modulation (EFM) technique: Theory and recent practical applications in corrosion research. *J. Mol. Liq.* 2018;249:83-96. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.006>
- [79] Arya SB, Joseph FJ. Chapter 3 - Electrochemical methods in tribocorrosion. In: Siddaiah A, Ramachandran R, Menezes PL, editors. *Tribocorrosion*: Academic Press; 2021. p. 43-77. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818916-0.00003-1>
- [80] Popov BN. Chapter 5 - Basics of Corrosion Measurements. In: Popov BN, editor. *Corrosion Engineering*. Amsterdam: Elsevier; 2015. p. 181-237. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62722-3.00005-7>
- [81] Zhu C, Zhou Z, Zhou Y, Xiang B. Chapter 22 - Modern testing and analyzing techniques in corrosion. In: Guo L, Verma C, Zhang D, editors. *Eco-Friendly Corrosion Inhibitors*: Elsevier; 2022. p. 429-450. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91176-4.00002-7>
- [82] Rodríguez-Yáñez JE, Battle SF, Sanabria-Chinchilla J, Rojas-Marín JF. Combined effect of the exposure angle and face orientation on the atmospheric corrosion behavior of low carbon steel. *Electrochim. Acta.* 2023;439. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141567>
- [83] Xia D-H, Deng C-M, Macdonald D, Jamali S, Mills D, Luo J-L, et al. Electrochemical measurements used for assessment of corrosion and protection of metallic materials in the field: A critical review. *J. Mater. Sci. Technol.* 2022;112:151-183. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.004>
- [84] Martínez S, Grozdanić V, Ivanković A. SEM/EDS analysis of corrosion products from the interior of a crude oil pipeline. *Zast. Mater.* 2012;53(3):191-194.
- [85] Akhtar S. Applications of Atomic Force Microscopy in Corrosion Research. *Recent Developments in Analytical Techniques for Corrosion Research* 2022. p. 187-201. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89101-5_9

- [86] Gece G. The use of quantum chemical methods in corrosion inhibitor studies. *Corros. Sci.* 2008;50(11):2981-2992. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.08.043>
- [87] Ramachandran KI, Gopakumar D, Namboori K. *Computational Chemistry and Molecular Modeling: Principles and Application*. 1 ed. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin; 2008.
- [88] Hehre WJ. *A guide to molecular mechanics and quantum chemical calculations*. Irvine: Wavefunction, Inc.; 2003. 796 p.
- [89] Obot IB, Macdonald DD, Gasem ZM. Density functional theory (DFT) as a powerful tool for designing new organic corrosion inhibitors. Part 1: An overview. *Corros. Sci.* 2015;99:1-30. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.01.037>
- [90] Guo L, Kaya S, Obot IB, Zheng X, Qiang Y. Toward understanding the anticorrosive mechanism of some thiourea derivatives for carbon steel corrosion: A combined DFT and molecular dynamics investigation. *J. Colloid. Interface Sci.* 2017;506:478-485. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.082>
- [91] Kokalj A. On the alleged importance of the molecular electron-donating ability and the HOMO-LUMO gap in corrosion inhibition studies. *Corros. Sci.* 2021;180. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.109016>
- [92] Obot IB, Haruna K, Saleh TA. Atomistic Simulation: A Unique and Powerful Computational Tool for Corrosion Inhibition Research. *Arab. J. Sci. Eng.* 2018;44(1):1-32. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3605-4>
- [93] Rubinstein RY, Kroese DP. *Simulation and the Monte Carlo Method*. 3 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.; 2017. <https://doi.org/10.1002/9781118631980>
- [94] Guo L, Zhu S, Zhang S, He Q, Li W. Theoretical studies of three triazole derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in acidic medium. *Corros. Sci.* 2014;87:366-375. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.06.040>
- [95] Verma C, Lgaz H, Verma DK, Ebenso EE, Bahadur I, Quraishi MA. Molecular dynamics and Monte Carlo simulations as powerful tools for study of interfacial adsorption behavior of corrosion inhibitors in aqueous phase: A review. *J. Mol. Liq.* 2018;260:99-120. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.03.045>
- [96] Saha SK, Dutta A, Ghosh P, Sukul D, Banerjee P. Novel Schiff-base molecules as efficient corrosion inhibitors for mild steel surface in 1 M HCl medium: experimental and theoretical approach. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2016;18(27):17898-17911. <https://doi.org/10.1039/C6CP01993E>
- [97] Singh AK, Ebenso EE, Quraishi MA. Corrosion inhibition behavior of cefuzonam at mild steel/HCl acid interface. *Res. Chem. Intermed.* 2013;39(7):3033-3042. <https://doi.org/10.1007/s11164-012-0815-3>
- [98] Hosein Zadeh AR, Danaee I, Maddahy MH. Thermodynamic and Adsorption Behaviour of Medicinal Nitramine as a Corrosion Inhibitor for AISI Steel Alloy in HCl Solution. *J. Mat. Sci. Technol.* 2013;29(9):884-892. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.06.006>
- [99] Abdallah M, El Defrawy AM, Zaafarany IA, Sobhi M, Elwahy AHM, Shaaban MR. Inhibition Effects and Theoretical Studies of Synthesized Novel Bisaminothiazole Derivatives as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in Sulphuric Acid Solutions. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2014;9(5):2186-2207. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)07920-8](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)07920-8)
- [100] Cui FY, Guo L, Zhang ST. Experimental and theoretical studies of 2-amino thiazole as an inhibitor for carbon steel corrosion in hydrochloric acid. *Mater. Corros.* 2014;65(12):1194-1201. <https://doi.org/10.1002/maco.201307591>
- [101] Hoseizadeh AR, Danaee I, Maddahy MH. Adsorption and corrosion inhibitive properties of 2-mercaptobenzothiazole on AISI steel 4130 alloy in hydrochloric acid solution. *Kov. Mater.* 2014;45(3):1031-1042. https://doi.org/10.4149/km_2014_1_35
- [102] Kumar CBP, Mohana KN. Corrosion inhibition efficiency and adsorption characteristics of some Schiff bases at mild steel/hydrochloric acid interface. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2014;45(3):1031-1042. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.08.017>
- [103] Ongun Yüce A, Doğru Mert B, Kardaş G, Yazıcı B. Electrochemical and quantum chemical studies of 2-amino-4-methyl-thiazole as corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution. *Corros. Sci.* 2014;83:310-316. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.02.029>
- [104] Manivel A, Ramkumar S, Wu JJ, Asiri AM, Anandan S. Exploration of (S)-4,5,6,7-tetrahydrobenzo[d]thiazole-2,6-diamine as feasible corrosion inhibitor for mild steel in acidic media. *J. Environ. Chem. Eng.* 2014;2(1):463-470. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.01.018>

- [105]Solmaz R. Investigation of corrosion inhibition mechanism and stability of Vitamin B1 on mild steel in 0.5M HCl solution. *Corros. Sci.* 2014;81:75-84. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.12.006>
- [106]Fouda AE-AS, Farahat MM, Abdallah M. Cephalosporin antibiotics as new corrosion inhibitors for nickel in HCl solution. *Res. Chem. Intermed.* 2014;40(3):1249-1266. <https://doi.org/10.1007/s11164-013-1036-0>
- [107]Fouda AS, Megahed HE, Younis T, Abd El-Salam S. Corrosion control of steel in HCl solutions by cyanoacetamide derivatives. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2014;50(2):254-265. <https://doi.org/10.1134/S2070205114020075>
- [108]Patel NS, Beranek P, Nebyla M, Pribyl M, Snita D. Inhibitive Effects by Some Benzothiazole Derivatives on Mild Steel Corrosion in 1 N HCl. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2014;9(7):3951-3960. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)08063-X](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)08063-X)
- [109]Fouda AS, Shalabi K, Ezzat R. Evaluation of some thiadiazole derivatives as acid corrosion inhibitors for carbon steel in aqueous solutions. *J. Mater. Environ. Sci.* 2015;6(4):1022-1039.
- [110]Berisha A, Podvorica F, Mehmeti V, Sylva F, Vataj D. Theoretical and experimental studies of the corrosion behavior of some thiazole derivatives toward mild steel in sulfuric acid media. *Maced. J. Chem. Chem. Eng.* 2015;34(2):287-294. <https://doi.org/10.20450/mjccce.2015.576>
- [111]Desai PS. Inhibitory action of Thiazole and Triazole on mild Steel Corrosion in Hydrochloric acid Solutions. *Res. J. Chem. Sci.* 2015;5(3):30-36.
- [112]Yadav M, Sharma D, Kumar S. Azetidine derivatives as efficient corrosion inhibitor for N80 steel in hydrochloric acid solution. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2015;51(4):680-692. <https://doi.org/10.1134/S207020511504036X>
- [113]Yadav M, Sharma D, Kumar S. Thiazole derivatives as efficient corrosion inhibitor for oil-well tubular steel in hydrochloric acid solution. *Korean J. Chem. Eng.* 2015;32(5):993-1000. <https://doi.org/10.1007/s11814-014-0275-0>
- [114]Fouda AS, Soliman AH. Corrosion protection of carbon steel in hydrochloric acid solutions using thiourea derivatives. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2015;51(5):847-860. <https://doi.org/10.1134/S2070205115050093>
- [115]Bilel M, Mehdi B, Elhadi SM, Lyamine M, Ali B, Hocine M, *et al.* Synthesis, X-ray structure and theoretical study of benzazole thioether and its zinc complex as corrosion inhibitors for steel in acidic medium. *Res. Chem. Intermed.* 2016;42(10):7447-7470. <https://doi.org/10.1007/s11164-016-2546-3>
- [116]Yilmaz N, Fitoz A, Ergun Y, Emregül KC. A combined electrochemical and theoretical study into the effect of 2-((thiazole-2-ylimino)methyl)phenol as a corrosion inhibitor for mild steel in a highly acidic environment. *Corros. Sci.* 2016;111:110-120. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.05.002>
- [117]Chaitra TK, Mohana KN, Gurudatt DM, Tandon HC. Inhibition activity of new thiazole hydrazones towards mild steel corrosion in acid media by thermodynamic, electrochemical and quantum chemical methods. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2016;67:521-531. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.08.013>
- [118]Verma C, Quraishi MA, Singh A. A thermodynamical, electrochemical, theoretical and surface investigation of diheteroaryl thioethers as effective corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2016;58:127-140. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.06.020>
- [119]Fouda AS, Fayed T, Elmorsi MA, Elsayed M. Distyryl Derivatives as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in Acid Cleaning Process in Cooling Towers. *J. Bio- . Tribo- Corros.* 2017;3(3). <https://doi.org/10.1007/s40735-017-0093-0>
- [120]Salarvand Z, Amirnasr M, Talebian M, Raeissi K, Meghdadi S. Enhanced corrosion resistance of mild steel in 1M HCl solution by trace amount of 2-phenyl-benzothiazole derivatives: Experimental, quantum chemical calculations and molecular dynamics (MD) simulation studies. *Corros. Sci.* 2017;114:133-145. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.11.002>
- [121]Hegde M. Synthesis, Characterization and Study of New Thiazole-2-amine Derivative as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in 0.5 M H₂SO₄ Solution. *J. Chem. Pharm. Sci.* 2018;(Special Issue 1):16-24. <https://doi.org/10.30558/jchps.201811s01004>
- [122]Chugh B, Singh AK, Thakur S, Pani B, Pandey AK, Lgaz H, *et al.* An Exploration about the Interaction of Mild Steel with Hydrochloric Acid in the Presence of N-(Benzo[d]thiazole-2-yl)-1-phenylethan-1-imines. *The Journal of Physi-*

- cal Chemistry C. 2019;123(37):22897-22917. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b03994>
- [123]Singh AK, Chugh B, Saha SK, Banerjee P, Ebenso EE, Thakur S, *et al.* Evaluation of anti-corrosion performance of an expired semi synthetic antibiotic cefdinir for mild steel in 1 M HCl medium: An experimental and theoretical study. Results Phys. 2019;14. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102383>
- [124]Tan B, Zhang S, Liu H, Guo Y, Qiang Y, Li W, *et al.* Corrosion inhibition of X65 steel in sulfuric acid by two food flavorants 2-isobutylthiazole and 1-(1,3-Thiazol-2-yl) ethanone as the green environmental corrosion inhibitors: Combination of experimental and theoretical researches. J. Colloid Interface Sci. 2019;538:519-529. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.12.020>
- [125]Jafari H, Akbarzade K, Danaee I. Corrosion inhibition of carbon steel immersed in a 1 M HCl solution using benzothiazole derivatives. Arab. J. Chem. 2019;12(7):1387-1394. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.11.018>
- [126]Talari M, Mozafari Nezhad S, Alavi SJ, Mohtashamipour M, Davoodi A, Hosseinpour S. Experimental and computational chemistry studies of two imidazole-based compounds as corrosion inhibitors for mild steel in HCl solution. J. Mol. Liq. 2019;286. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.110915>
- [127]Zebida M, Benali O, Maschke U, Trainse M. Corrosion inhibition properties of 4-methyl-2-(methylthio)-3-phenylthiazol-3-ium iodide on the carbon steel in sulfuric acid medium. Int. J. Corros. Scale Inhib. 2019;8(3):613-627. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2019-8-3-11>
- [128]El aoufir Y, Zehra S, Lgaz H, Chaouiki A, Serrar H, Kaya S, *et al.* Evaluation of inhibitive and adsorption behavior of thiazole-4-carboxylates on mild steel corrosion in HCl. Coll. Surf. A Physicochem. Eng. Asp. 2020;606. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125351>
- [129]Suhasaria A, Murmu M, Satpati S, Banerjee P, Sukul D. Bis-benzothiazoles as efficient corrosion inhibitors for mild steel in aqueous HCl: Molecular structure-reactivity correlation study. J. Mol. Liq. 2020;313. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113537>
- [130]Singh AK, Chugh B, Thakur S, Pani B, Lgaz H, Chung I-M, *et al.* Green approach of synthesis of thiazolyl imines and their impeding behavior against corrosion of mild steel in acid medium. Coll. Surf. A Physicochem. Eng. Asp. 2020;599. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124824>
- [131]Alamiery A, Mohamad AB, Kadhum AAH, Takriff MS. The synergistic role of azomethine group and triazole ring at improving the anti-corrosive performance of 2-amino-4-phenylthiazole. S. Afr. J. Chem. Eng. 2021;38:41-53. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.07.003>
- [132]Senthilkumar G, Umarani C, Ramachandran A. Investigation on corrosion inhibition effect of N-[4-(1,3-benzo[d]thiazol-2-ylcarbonyl)phenyl] quinoline-6-carboxamide as a novel organic inhibitor on mild steel in 1N HCl at different temperatures: Experimental and theoretical study. J. Indian Chem. Soc. 2021;98(6). <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100079>
- [133]Zhang J, Li W, Zuo X, Chen Y, Luo W, Zhang Y, *et al.* Combining experiment and theory researches to insight into anti-corrosion nature of a novel thiazole derivatives. J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 2021;122:190-200. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.04.035>
- [134]Benali O, Zebida M, Maschke U. Synthesis and inhibition corrosion effect of two thiazole derivatives for carbon steel in 1 M HCl. J. Indian Chem. Soc. 2021;98(8). <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100113>
- [135]Abd El-Lateef HM, Sayed AR, Gomha SM, Bakir EM, Shalabi K. Synthesis and study of poly[(hydrazinylazo)]thiazoles as potent corrosion inhibitors for cast iron-carbon alloy in molar HCl: A collective computational and experiential methods. J. Mol. Liq. 2021;337. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116555>
- [136]Farag AA, Eid AM, Shaban MM, Mohamed EA, Raju G. Integrated modeling, surface, electrochemical, and biocidal investigations of novel benzothiazoles as corrosion inhibitors for shale formation well stimulation. J. Mol. Liq. 2021;336. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116315>
- [137]Karazehir T, Mert ME, Doğru Mert B. Corrosion prevention of mild steel in acidic medium by 2-Pyrrolidin-1-yl-1,3-thiazole-5-carboxylic acid: Theoretical and experimental approach. Journal of the Indian Chemical Society. 2022;99(9). <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100642>
- [138]Sheetal, Sengupta S, Singh M, Thakur S, Pani B, Banerjee P, *et al.* An insight about the interaction of Aryl Benzothiazoles with mild steel surface in aqueous HCl solution.

- Journal of Molecular Liquids. 2022;354.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118890>
- [139] Alamry KA, Aslam R, Khan A, Hussein MA, Tashkandi NY. Evaluation of corrosion inhibition performance of thiazolidine-2,4-diones and its amino derivative: Gravimetric, electrochemical, spectroscopic, and surface morphological studies. *Process Saf. Environ. Prot.* 2022;159:178-197.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.12.061>
- [140] Abd El-Lateef HM, Sayed AR, Shalabi K. Studying the effect of two isomer forms thiazole and thiadiazine on the inhibition of acidic chloride-induced steel corrosion: Empirical and Computer simulation explorations. *J. Mol. Liq.* 2022;356.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119044>
- [141] Zhang X, Zhang Y, Su Y, Wang X, Lv R. Synthesis and Corrosion Inhibition Performance of Mannich Bases on Mild Steel in Lactic Acid Media. *ACS Omega.* 2022;7(36):32208-32224.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03545>
- [142] Alamiery A, Mohamad AB, Kadhum AAH, Takriff MS. Comparative data on corrosion protection of mild steel in HCl using two new thiazoles. *Data Br.* 2022;40:107838.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107838>
- [143] Zhang X, Su Y, Zhang Y, Guan S, Wang X, He Y. A quinoline-based quaternary ammonium salt dimer as corrosion inhibitor for N80 steel in lactic acid solution. *J. Mol. Struc.* 2023;1290:135914.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135914>
- [144] Assad H, Kumar S, Saha SK, Kang N, Dahiya H, Thakur A, *et al.* A research combined experimental and computational approaches of Succinylsulfathiazole Hydrate as potent corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium. *J. Mol. Liq.* 2023;388:122739.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122739>
- [145] Chioma F, Chizoba WT, Atamunotekeari II. Performance of Organic Frameworks as Thriving Mild Steel Corrosion Inhibitors in Acid Medium: Syntheses and Characterization. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2023;59(3):504-515.
<https://doi.org/10.1134/S2070205123700594>
- [146] Chhabria MT, Patel S, Modi P, Brahmksatriya PS. Thiazole: A Review on Chemistry, Synthesis and Therapeutic Importance of its Derivatives. *Curr Top Med Chem.* 2016;16(26):2841-2862.
<https://doi.org/10.2174/1568026616666160506130731>
- [147] Ali SH, Sayed AR. Review of the synthesis and biological activity of thiazoles. *Synthetic Communications.* 2021;51(5):670-700. <https://doi.org/10.1080/00397911.2020.1854787>
- [148] Ayman M, Abdelmonsef AH, Rashdan HRM. Mini Review on The Synthesis and Biological Impact of Thiazoles. *ChemistrySelect.* 2023;8(14):e202300414.
<https://doi.org/10.1002/slct.202300414>
- [149] Kumari G, Dhillon S, Rani P, Chahal M, Aneja DK, Kinger M. Development in the Synthesis of Bioactive Thiazole-Based Heterocyclic Hybrids Utilizing Phenacyl Bromide. *ACS Omega.* 2024;9(17):18709-18746. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c10299>
- [150] Baaloudj O, Scranio L, Bufo SA, Modley L-AS, Lelario F, Zizzamia AR, *et al.* Environmental Fate, Ecotoxicity, and Remediation of Heterocyclic Pharmaceuticals as Emerging Contaminants: A Review of Long-Term Risks and Impacts. *Organics.* 2025;6(1):1.
<https://doi.org/10.3390/org6010001>
- [151] Sharma D, Sharma V, Sharma A, Goyal R, Tonk RK, Thakur VK, *et al.* Green chemistry approaches for thiazole containing compounds as a potential scaffold for cancer therapy. *Sustainable Chemistry and Pharmacy.* 2021;23.
<https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100496>
- [152] Taj MB, Raheel A, Alelwani W, Alnajeebi AM, Alnoman RB, Javed T. Mechanochemical Synthesis of Thiazolidinone-Triazoles Derivatives as Antidiabetic Agents: Pharmacokinetics, Molecular Docking, and In Vitro Antidiabetic Properties. *Russ J Gen Chem.* 2023;93(4):912-919. <https://doi.org/10.1134/S1070363223040199>
- [153] Zheng H, Mei YJ, Du K, Cao XT, Zhang PF. One-pot chemoenzymatic multicomponent synthesis of thiazole derivatives. *Molecules.* 2013;18(11):13425-33.
<https://doi.org/10.3390/molecules181113425>
- [154] Benali O, Zebida M, Benhiba F, Zarrouk A, Maschke U. Carbon steel corrosion inhibition in H₂SO₄ 0.5 M medium by thiazole-based molecules: Weight loss, electrochemical, XPS and molecular modeling approaches. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2021;630.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127556>