



INHIBICIÓN DE LA CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO TIPO N80 UTILIZANDO POLVO DE CÁSCARA DE HUEVO EN AMBIENTES ÁCIDOS Y SALINOS: UN ESTUDIO BASADO EN ENSAYOS DE PÉRDIDA DE PESO, MICROINDENTACIÓN Y MODELADO ELECTROQUÍMICO

CORROSION INHIBITION OF TYPE N80 CARBON STEEL USING EGGSHELL POWDER IN ACIDIC AND BRINE ENVIRONMENTS: A STUDY BASED ON WEIGHT LOSS TESTING, MICRO-INDENTATION, AND ELECTROCHEMICAL MODELING

J. L. Dávalos-Monteiro^{1,*} , C. D. Rodríguez-Hernández¹ , R. M. Rached¹ , R. Dávalos-Monteiro²

Recibido: 16-10-2025, Recibido tras revisión: 28-01-2026, Aceptado: 21-04-2026, Publicado: 01-07-2026

Resumen

La corrosión representa un desafío importante para la industria del petróleo y del gas, especialmente en sistemas expuestos a ambientes ácidos y de alta salinidad. Este estudio evalúa el polvo de cáscara de huevo, un residuo biológico, como inhibidor ecológico de la corrosión del acero al carbono tipo N80 bajo condiciones representativas de ambientes ácidos y salinos. Se analizaron muestras de acero expuestas a soluciones de ácido clorhídrico (HCl) 2 M y cloruro de sodio (NaCl) 2 M, con y sin 6 g/L de polvo de cáscara de huevo, durante seis días. La tasa de corrosión, determinada a partir de la pérdida de masa, mostró una mejora significativa en medio ácido, al disminuir de 18.8 mm/año a 2.1 mm/año, con una eficiencia de inhibición del 90 %. En condiciones salinas, el efecto fue moderado, con una reducción del 14 %. El análisis de microindentación indicó que las muestras tratadas conservaron al menos el 85 % de la dureza del acero no expuesto, mientras que las no tratadas sufrieron una degradación severa. Los resultados sugieren que la protección se debe a la formación de una barrera de carbonato de calcio, la estabilización de la capa de productos de corrosión y la captura de iones agresivos, como el cloruro. Este estudio demuestra que el polvo de cáscara de huevo es una alternativa viable y sostenible para mitigar la corrosión en entornos industriales exigentes.

Palabras clave: acero al carbono, inhibidor verde de la corrosión, polvo de cáscara de huevo, ambientes agresivos, microindentación, sustentabilidad

Abstract

Corrosion poses a critical challenge to the oil and gas industry, particularly in systems exposed to acidic and high-salinity environments. This study evaluates eggshell powder, a biowaste-derived material, as a green corrosion inhibitor for type N80 carbon steel under conditions representative of acidic and brine environments. Its performance was systematically assessed through weight loss testing, micro-indentation hardness measurements, and numerical electrochemical modeling. N80 steel coupons were exposed to 2 M hydrochloric acid (HCl) and 2 M sodium chloride (NaCl) solutions, with and without 6 g/L of eggshell powder, for 6 days. Corrosion rates determined from mass loss showed substantial protection in the acidic medium, decreasing from 18.8 to 2.1 mm/year and corresponding to an inhibition efficiency of 90 %. In brine, the effect was more moderate, with a 14 % reduction in the corrosion rate. Micro-indentation analysis confirmed that inhibitor-treated samples retained at least 85 % of the hardness of unexposed steel in acid, whereas untreated samples exhibited severe mechanical degradation. The results suggest that corrosion protection arises from a combined mechanism involving the formation of a calcium carbonate barrier, stabilization of the corrosion product layer, and possible scavenging of aggressive chloride ions. Overall, this study demonstrates the potential of eggshell powder as a viable and sustainable candidate for corrosion mitigation in harsh industrial environments.

Keywords: carbon steel, green corrosion inhibition, eggshell powder, aggressive environments, micro-indentation, sustainability.

^{1,*}Sinopec Tech Middle East LLC, Dhahran 34464-4622, Kingdom of Saudi Arabia.
Autor para correspondencia ✉: jose.stme@sinopec.com.

²Escuela de Ciencias Biológicas e Ingeniería, Universidad Yachay Tech, Urucuquí, Ecuador.

Forma sugerida de citación: J. L. Dávalos-Monteiro, C. D. Rodríguez-Hernández, R. M. Rached y R. Dávalos-Monteiro "Inhibición de la corrosión del acero al carbono tipo N80 utilizando polvo de cáscara de huevo en ambientes ácidos y salinos: un estudio basado en ensayos de pérdida de peso, microindentación y modelado electroquímico," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 36, pp. 29-38, 2026. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n36.2026.03>.

1. Introducción

La corrosión es un proceso de degradación generalizado y un desafío crítico en múltiples aplicaciones de ingeniería. En el sector del petróleo y del gas, la corrosión general y localizada ocurre comúnmente en tuberías, tanques de almacenamiento y equipos de fondo de pozo expuestos a ambientes ácidos y de alta salinidad [1–4]. La corrosión compromete la integridad estructural de los equipos y puede conducir a fallas, pérdidas de producción, riesgos de seguridad e impactos ambientales significativos [5–7].

Las estrategias típicas de mitigación de la corrosión se basan en inhibidores químicos compuestos por sustancias orgánicas sintéticas, tales como aminas, sales de amonio cuaternario y fosfonatos [8–11]. A pesar de su alta eficiencia, estos inhibidores presentan varias desventajas, como el alto costo, la biodegradabilidad limitada y la toxicidad ambiental. La necesidad de mitigar la corrosión, junto con la creciente presión regulatoria, ha acelerado la búsqueda de inhibidores alternativos derivados de fuentes naturales o renovables, comúnmente denominados “inhibidores verdes” [12,13].

Los inhibidores verdes de la corrosión generalmente incluyen extractos de plantas, subproductos agrícolas y materiales procedentes de residuos biológicos, los cuales son no tóxicos, biodegradables y fácilmente disponibles [14–16]. Las cáscaras de huevo son un ejemplo notable, ya que se utilizan comúnmente en el sector agrícola como fertilizantes naturales. Están compuestas principalmente por carbonato de calcio ($CaCO_3$) y constituyentes orgánicos que pueden actuar como inhibidores de la corrosión al contribuir a la formación de una película protectora en la superficie metálica [17–19].

A pesar de los esfuerzos iniciales prometedores, el uso de inhibidores basados en cáscaras de huevo en aplicaciones del sector del petróleo y del gas sigue siendo poco estudiado. Estudios previos han evaluado su desempeño bajo condiciones modelo, las cuales difieren sustancialmente de los entornos de campo altamente dinámicos, donde la estabilidad física y química debe mantenerse durante períodos prolongados [20,21]. Por lo tanto, evaluar la degradación de las propiedades mecánicas y la durabilidad de la capa de productos de corrosión es fundamental para valorar el desempeño de cualquier inhibidor.

En consecuencia, este estudio evalúa sistemáticamente el desempeño del polvo de cáscara de huevo como inhibidor de la corrosión bajo condiciones relevantes para el sector del petróleo y del gas, mediante técnicas experimentales y métodos numéricos. Las probetas de acero N80 fueron expuestas a ambientes ácidos y salinos, y las tasas de corrosión se determinaron mediante mediciones de pérdida de masa. Además, se realizó un análisis de microindentación para evaluar la dureza de las capas de corrosión formadas con y

sin inhibidor. El modelado numérico de la cinética de corrosión y de la adsorción del inhibidor proporcionó información sobre el posible mecanismo de inhibición, el efecto de los componentes derivados de la cáscara de huevo en las reacciones anódicas y catódicas, y la influencia de estos componentes en los procesos de transferencia de carga en la interfaz acero-electrolito. Al combinar experimentos de laboratorio con análisis micromecánicos y numéricos, este estudio evaluó el potencial del polvo de cáscara de huevo como inhibidor verde de la corrosión.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

En este estudio se utilizaron probetas de acero al carbono tipo N80 como sustrato metálico para las pruebas de corrosión y polvo de cáscara de huevo como inhibidor verde. La composición química del acero N80, suministrado por Changzhou Qingli Huanneng Chemical Technology Co., Ltd., se presenta en la Tabla 1. Los medios corrosivos consistieron en dos soluciones acuosas: i) cloruro de sodio 2 molar (2M NaCl) para simular ambientes salinos, y ii) ácido clorhídrico 2 molar (2M HCl) para representar condiciones ácidas. Todos los productos químicos fueron de grado analítico y se prepararon en agua desionizada (PanReac AppliChem, ITW Reagents).

Tabla 1. Composición química del acero al carbono tipo N80

Elemento	Peso (%)
Carbono (C)	0.21-0.28
Manganeso (Mn)	0.60-1.00
Fósforo (P)	≤ 0.030
Azufre (S)	≤ 0.030
Silicio (Si)	0.15-0.35
Cromo (Cr)	≤ 0.25
Níquel (Ni)	≤ 0.25
Cobre (Cu)	≤ 0.25
Molibdeno (Mo)	≤ 0.15
Vanadio (V)	≤ 0.08
Otros elementos	≤ 0.30 (total)
Hierro (Fe)	Balance

2.2. Preparación de las muestras

Probetas de acero y soluciones de ensayo

Las placas de acero al carbono tipo N80, con dimensiones de 50 mm × 10 mm × 3 mm, fueron inicialmente desbastadas con papel SiC n.° 50 para eliminar óxidos superficiales y contaminantes, a fin de asegurar una superficie uniforme de acuerdo con la norma ASTM G1. La remoción de material se controló hasta alcanzar aproximadamente 0.0025 mm de espesor en todas

las superficies. Posteriormente, las muestras fueron pulidas utilizando papel SiC n.º 800 a n.º 1200 para obtener un acabado superficial adecuado para los ensayos posteriores. Después del pulido, las probetas se enjuagaron inmediatamente con agua desionizada, se limpiaron con etanol y se secaron con una pistola de aire antes del pesaje inicial.

Para las soluciones de ensayo, se disolvieron 116.8 g de NaCl y se diluyeron 166.7 ml de HCl concentrado al 37 % en agua desionizada para obtener soluciones de NaCl 2 M y HCl 2 M. Sus valores de pH fueron 7 y 0, respectivamente.

Inhibidor de cáscara de huevo

Las cáscaras de huevo fueron recolectadas de fuentes locales, lavadas minuciosamente, secadas en horno y molidas con un triturador mecánico. El polvo resultante fue tamizado para obtener un tamaño de partícula uniforme correspondiente a malla 80 ($\approx 180 \mu m$). El polvo de cáscara de huevo se añadió a las soluciones de ensayo a una concentración definida de 6 g/L y se mezcló hasta su completa dispersión.

2.3. Ensayo de corrosión y evaluación por pérdida de masa

Las tasas de corrosión se determinaron mediante un protocolo clásico de pérdida de masa. En primer lugar, cada espécimen fue pesado con una balanza analítica con una resolución de 1 mg (Mettler Toledo ME203). Luego, siguiendo la norma ASTM G31, las probetas se colocaron en vasos de vidrio y se sumergieron en 200 mL de solución de ensayo, ya sea NaCl 2 M o HCl 2 M, con o sin inhibidor de cáscara de huevo, durante seis días a temperatura ambiente, aproximadamente a 23 °C.

Después de la exposición, las probetas destinadas al análisis de pérdida de masa se retiraron y se limpiaron suavemente en un baño de sonicación con agua desionizada y un cepillo suave para eliminar los productos de corrosión sueltos. La limpieza se omitió en las muestras destinadas a la microindentación para preservar las propiedades de la capa de corrosión. Finalmente, todas las probetas se secaron con una pistola de aire inmediatamente después de la limpieza y se pesaron con una precisión de tres decimales.

Las tasas de corrosión se calcularon mediante la siguiente ecuación (1):

$$CR \left[\frac{mm}{año} \right] = \frac{87.6 \cdot (W_i - W_f)}{\rho \cdot A \cdot t} \quad (1)$$

donde CR representa la tasa de corrosión; W_i y W_f son las masas inicial y final, respectivamente, expresadas en mg; ρ es la densidad del acero, expresada en g/cm^3 ; A es el área superficial expuesta, expresada

en cm^2 ; y t es el tiempo de exposición, expresado en horas.

2.4. Mediciones de microindentación

En este estudio se utilizó un microindentador instrumentado Anton Paar Micro Combi Tester MCT, con una carga máxima de 30 N, resolución de carga de $6 \mu N$, rango de profundidad de $1000 \mu m$ y resolución de profundidad de 0.03 nm, para evaluar las propiedades mecánicas de la capa de corrosión formada en las probetas de acero después de la exposición. El indentador aplicó varios ciclos de carga y descarga mediante el método de carga multiciclo continuo (CMC). Se generó una matriz de cuatro ubicaciones de medición, y se registraron la fuerza aplicada y el desplazamiento resultante. El dispositivo midió la dureza de indentación, H_{IT} , como la presión media de contacto bajo el indentador a la carga máxima, ver ecuación (2):

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p} \quad (2)$$

donde F_{max} es la carga máxima aplicada y A_p es el área de contacto proyectada, determinada utilizando el método de Oliver-Pharr. Se reportaron valores medios, desviaciones estándar y errores estándar para cada condición con el fin de evaluar la integridad y la resistencia mecánica de la capa protectora formada en presencia y ausencia del inhibidor.

2.5. Simulación numérica

Implementación del modelo electroquímico de corrosión

El comportamiento corrosivo del acero tipo N80 fue simulado en MATLAB. El modelo numérico reprodujo la respuesta electroquímica del acero en ambientes ácidos y salinos con composiciones variables de la solución, concentraciones de inhibidor y propiedades del acero. El modelo incorporó cinéticas de corrosión estándar basadas en la ecuación de Butler-Volmer e isothermas de adsorción para predecir densidades de corriente y resistencia a la polarización, parámetros electroquímicos relacionados con la velocidad de corrosión.

El modelo simplificado se basó en reacciones anódicas y catódicas acopladas, descritas por la ecuación de Butler-Volmer, considerando la cinética de transferencia de carga. La forma general para cada reacción de semicelda es:

$$i = i_0 \left(\exp \left[\frac{\alpha_a F \eta}{RT} \right] - \exp \left[-\frac{\alpha_c F \eta}{RT} \right] \right) \quad (3)$$

donde i es la densidad de corriente, expresada en A/m^2 ; i_0 es la densidad de corriente de intercambio; α_a y α_c son los coeficientes de transferencia anódico y catódico,

respectivamente; F es la constante de Faraday, expresada en C/mol ; η es el sobrepotencial, en unidades de V ; R es la constante universal de los gases, expresada en $J/mol \cdot K$; y T es la temperatura, en K .

Efecto del inhibidor mediante isoterma de adsorción

Para incorporar el efecto del inhibidor de cáscara de huevo en el modelo numérico, la cobertura superficial (θ) del inhibidor sobre la superficie del acero se estimó mediante la isoterma de adsorción de Langmuir [22, 23]. Este enfoque asume que las moléculas del inhibidor forman una capa sobre la superficie metálica, con sitios de adsorción uniformes y sin interacciones entre las especies adsorbidas. La cobertura superficial se calculó como:

$$\theta = \frac{KC}{1 + KC} \quad (4)$$

donde θ es la fracción de la superficie metálica cubierta por el inhibidor, C es la concentración del inhibidor en $mol \cdot L^{-1}$ y K es la constante de equilibrio de adsorción en $L \cdot mol^{-1}$. La presencia del inhibidor reduce el área activa disponible para la corrosión, y el modelo numérico lo considera mediante el escalamiento de la densidad de corriente del caso sin inhibidor. Especifi-

camente, la densidad de corriente de corrosión en el sistema inhibido ($i_{corr,inh}$) se estimó como:

$$(i_{corr,inh}) = (1 - \theta)i_{corr,uninh} \quad (5)$$

donde $i_{corr,uninh}$ es la densidad de corriente de corrosión en ausencia del inhibidor. Esta formulación permitió al modelo considerar la eficiencia de inhibición como una función de la concentración del inhibidor, al simular cómo el aumento de la cobertura superficial conduce a una reducción proporcional de la actividad electroquímica.

Implementación en MATLAB y simulación numérica

El modelo numérico fue desarrollado en MATLAB para simular el comportamiento electroquímico del acero tipo N80 con y sin el inhibidor de cáscara de huevo. El modelo resuelve la ecuación de Butler-Volmer para las reacciones anódicas y catódicas en un intervalo de potencial definido y luego ajusta la respuesta en función de la cobertura superficial del inhibidor.

La simulación comenzó con la definición de los parámetros del sistema, incluidas todas las constantes, los parámetros electroquímicos y las propiedades del inhibidor presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros utilizados en el modelo numérico de corrosión del acero tipo N80 en sistemas salinos (NaCl) y ácidos (HCl)

Parámetro	Descripción	Valor (sistema NaCl)	Valor (sistema HCl)	Unidad	Fuente/Nota
F	Constante de Faraday		96485	$C \cdot mol^{-1}$	Constante estándar
R	Constante universal de los gases		8,314	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	Constante estándar
T	Temperatura		298	K	Ambiente (25 °C)
α_a	Coefficiente de transferencia anódica		0.5	-	Suposición típica
α_c	Coefficiente de transferencia catódica		0.5	-	Suposición típica
i_0	Densidad de corriente de intercambio	1×10^{-5}	8×10^{-5}	$A \cdot cm^{-2}$	Estimada para agua salina
E_{corr}	Potencial de corrosión	-0.5	-0.6	V (vs. Ref)	Estimada
K	Constante de equilibrio de adsorción	16.28	1011	$L \cdot mol^{-1}$	Ajustada a partir de datos experimentales
C	Concentración del inhibidor		2	$mol \cdot L^{-1}$	Experimental
θ	Cobertura superficial	0.14	0.91	-	De la isoterma de Langmuir
$i_{corr,sin}$	Densidad de corriente de corrosión (sin inhibidor)	1.56×10^{-5}	1.2×10^{-4}	A/cm^2	Salida del modelo
$i_{corr,con}$	Densidad de corriente de corrosión (con inhibidor)	1.34×10^{-5}	1.09×10^{-5}	A/cm^2	Salida del modelo

Luego, el modelo generó un rango de potenciales de electrodo alrededor del potencial de corrosión esperado, por ejemplo, de -0.7 V a -0.3 V, con lo cual simuló un barrido similar al utilizado en experimentos de polarización potenciodinámica [24]. Para cada valor de potencial, se calculó el sobrepotencial η y se utilizó como entrada para la ecuación de Butler-Volmer. Finalmente, la ecuación de Butler-Volmer se aplicó para calcular la densidad de corriente total en cada paso de potencial. La simulación produjo dos conjuntos completos de datos de polarización simulados: uno para el sistema sin inhibidor y otro para el sistema con el inhibidor de corrosión.

3. Resultados y discusión

3.1. Inspección visual de la corrosión

La Figura 1 muestra las probetas de acero antes y después de la exposición al fluido. La inspección visual reveló diferencias claras en el grado de corrosión entre las muestras expuestas a soluciones de HCl y NaCl. Las probetas sumergidas en HCl presentaron una degradación superficial extensa, formación severa de óxido y pérdida visible del brillo metálico, lo que indica una corrosión significativa (Figura 1a). En contraste, las probetas expuestas a la solución de NaCl mostraron una corrosión más moderada, con decoloración superficial y picaduras localizadas, pero con un daño menos generalizado del material que en las muestras tratadas con ácido (Figura 1b).

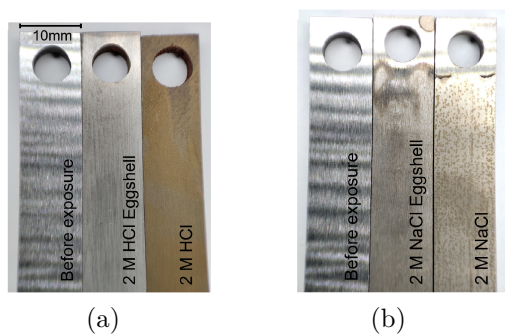


Figura 1. Imágenes de las probetas de acero N80 antes y después de la exposición al fluido, con y sin cáscara de huevo como inhibidor. a) HCl 2 M, b) NaCl 2 M.

Se observó un efecto protector notable cuando se añadió polvo de cáscara de huevo a ambas soluciones. Las superficies de acero expuestas al inhibidor presentaron una cantidad significativamente menor de productos de corrosión y conservaron una apariencia más uniforme que los controles sin inhibidor, como se muestra en la Figura 1. En ambientes tanto ácidos como salinos, la presencia del polvo de cáscara de huevo redujo la corrosión visible, con un efecto más

pronunciado en la solución de HCl, donde el inhibidor limitó el ataque agresivo típicamente observado bajo estas condiciones.

3.2. Análisis de pérdida de masa

La Figura 2 presenta las tasas de corrosión de las probetas de acero con y sin el inhibidor de cáscara de huevo. Las tasas de corrosión estimadas después de la exposición demostraron el efecto protector del inhibidor. En NaCl 2 M, la tasa de corrosión sin el inhibidor fue de 0.14 mm/año. La adición de polvo de cáscara de huevo la redujo ligeramente a 0.12 mm/año, lo que corresponde a una mejora aproximada del 14 %, como se muestra en la Figura 2a. El efecto del inhibidor fue mucho más pronunciado en condiciones ácidas, específicamente en HCl 2 M, donde la tasa de corrosión disminuyó de 18.8 mm/año sin inhibidor a 2.1 mm/año con inhibidor, lo que corresponde a una mejora aproximada del 90 %, como se muestra en la Figura 2b.

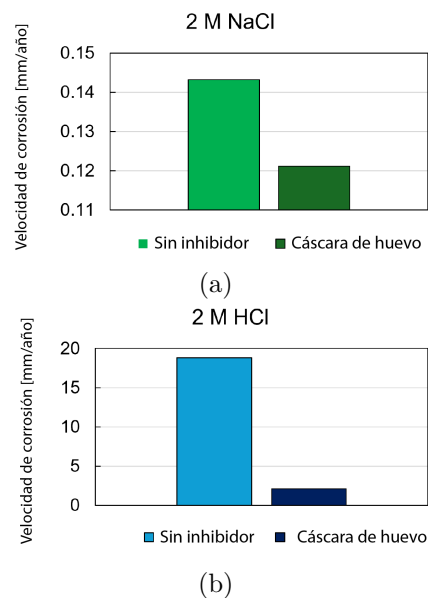


Figura 2. Tasa de corrosión de muestras de acero al carbono N80 cuando se exponen a (a) solución de NaCl 2 M y (b) solución de HCl 2 M con y sin cáscara de huevo como inhibidor.

Estos resultados indican que el polvo de cáscara de huevo proporciona una inhibición moderada en ambientes salinos, pero una protección sustancial bajo condiciones ácidas altamente agresivas. La disminución significativa de la pérdida de masa en las muestras expuestas al ácido y tratadas con inhibidor sugiere la formación de una barrera protectora sobre el acero, lo que limita eficazmente la disolución del metal. Estos hallazgos demuestran el potencial de los inhibidores derivados de la cáscara de huevo para la protección contra la corrosión en entornos donde la exposición a

ácidos es una preocupación principal, con beneficios medibles también observados en salmueras.

3.3. Análisis de microindentación

La Figura 3 muestra los resultados de dureza de indentación para las diferentes probetas. Los datos experimentales indican que, para las muestras expuestas a NaCl 2 M, los valores de dureza se mantuvieron similares a los del acero no expuesto, independientemente de la presencia del inhibidor, como se muestra en la Figura 3a. El valor medio de H_{IT} cambió únicamente de 2.44 GPa para el material de referencia no expuesto a 2.28 GPa sin inhibidor y 2.42 GPa con cáscara de huevo como inhibidor, lo que corresponde a una desviación de $\leq 7\%$. Esto sugiere que, bajo condiciones salinas y dentro del tiempo de exposición

evaluado, las propiedades superficiales de las probetas de acero se vieron mínimamente afectadas.

Se observó una tendencia diferente en ambientes ácidos. Las probetas de acero tipo N80 expuestas a HCl 2 M sin inhibidor mostraron una disminución marcada de la dureza en comparación con la muestra original no expuesta, como se muestra en la Figura 3b. El H_{IT} disminuyó de 1.77 GPa en probetas pulidas a solo 0.22 GPa en probetas no pulidas. Esta reducción indica que la capa de corrosión formada en medio ácido era mecánicamente débil y más susceptible a su remoción. En contraste, las muestras tratadas con el inhibidor de cáscara de huevo conservaron valores de dureza similares a los del material no expuesto. Las probetas pulidas y no pulidas alcanzaron 2.07 GPa y 2.32 GPa, respectivamente, lo que corresponde al menos al 85 % del valor de referencia.

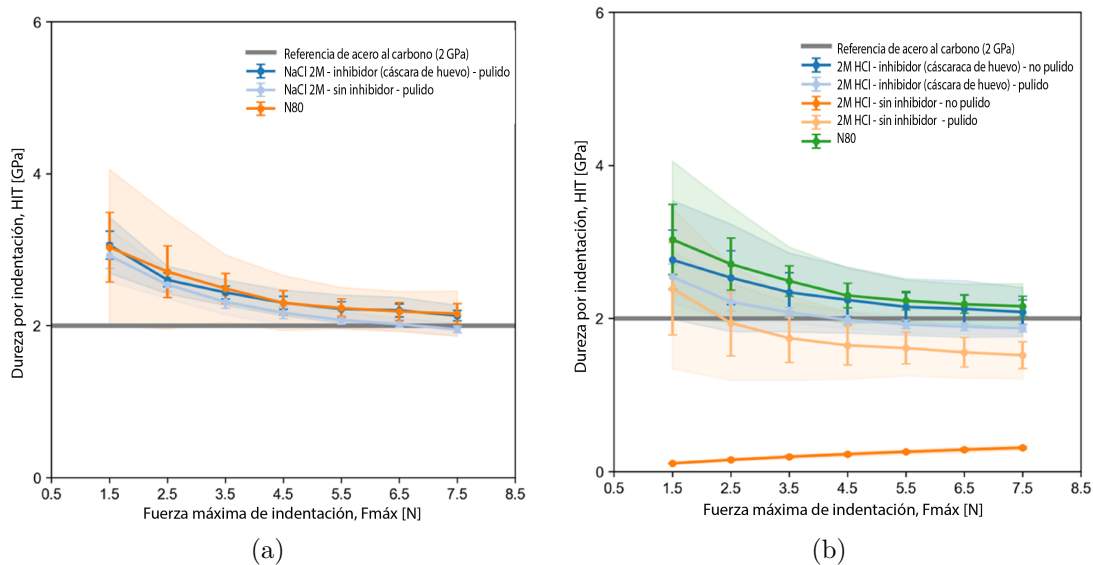


Figura 3. Dureza de indentación. a) Salmuera - NaCl 2 M; b) Ácido -HCl 2 M. Nota: el área sombreada muestra -1 desviación estándar, las barras muestran ± 1 error estándar y los puntos de datos representan los valores medios.

Los resultados sugieren que la capa de corrosión formada en medio ácido sin protección fue poco adherente y pudo eliminarse fácilmente, lo que condujo a una exposición continua del acero fresco al fluido corrosivo y a una pérdida sostenida de metal. Cuando se añadió el inhibidor de cáscara de huevo, la capa resultante fue mecánicamente robusta y más resistente a la remoción, por lo que sirvió eficazmente como una barrera protectora. Esta capa limitó la corrosión adicional y mejoró la durabilidad del acero en entornos de servicio expuestos a fuerzas abrasivas o impacto de fluidos. En general, los datos de microindentación respaldan la efectividad del inhibidor de cáscara de huevo en mantener la integridad mecánica de la superficie del acero, particularmente bajo condiciones ácidas agresivas.

3.4. Simulación numérica

La Figura 4 presenta las curvas de polarización potenciodinámica simuladas para las soluciones ensayadas con y sin el inhibidor de cáscara de huevo. La simulación reveló diferencias en la cinética de corrosión entre ambientes clorurados neutros y ácidos. En la solución de NaCl 2 M, las densidades de corriente fueron moderadas y el potencial de corrosión fue menos negativo, lo cual es consistente con un sistema en el que la reacción catódica está dominada por la reducción de oxígeno.

Las curvas de polarización simuladas para este entorno mostraron solo un desplazamiento menor en la densidad de corriente tras la adición del inhibidor, lo que indica una débil interacción superficial y una capacidad protectora limitada, como se muestra en la Figura 4. Este comportamiento se re-

flejó en una eficiencia de inhibición de solo 14 %. Con base en los resultados de la simulación, la densidad de corriente de corrosión sin inhibidor fue aproximadamente $1.56 \times 10^{-5} A/cm^2$, mientras que el sistema con inhibidor mostró una ligera reducción a $1.34 \times 10^{-5} A/cm^2$.

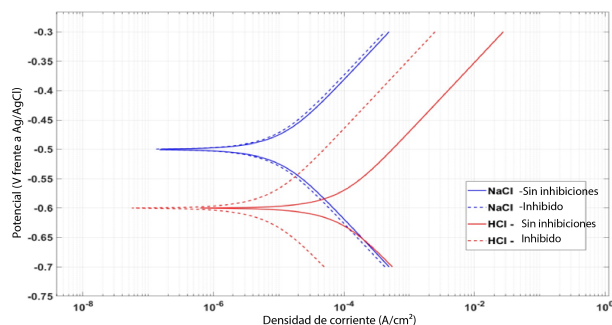


Figura 4. Curvas de polarización potenciodinámica simuladas en NaCl 2 M y HCl 2 M, con y sin el inhibidor de cáscara de huevo.

En contraste, los resultados numéricos para la solución de HCl 2 M mostraron un comportamiento corrosivo mucho más agresivo, como se espera bajo condiciones ácidas que favorecen la evolución del hidrógeno como reacción catódica. El sistema sin inhibidor presentó densidades de corriente significativamente más altas y un potencial de corrosión más negativo, lo que refleja una disolución anódica acelerada del hierro en el acero. Sin embargo, la adición de polvo de cáscara de huevo a la misma concentración ácida produjo una reducción marcada de la densidad de corriente, particularmente en la rama catódica. Este comportamiento se atribuyó a una mayor constante de adsorción y a una cobertura superficial casi completa, lo que es consistente con la eficiencia de inhibición del 90 % obtenida experimentalmente. Estos resultados sugieren que el ambiente ácido incrementó la afinidad de las especies derivadas del inhibidor por la superficie del acero, posiblemente mediante la protonación de grupos funcionales o el aumento de la quimisorción. Con base en los resultados de la simulación, la densidad de corriente de corrosión sin inhibidor en medio ácido fue aproximadamente $1.20 \times 10^{-4} A/cm^2$, mientras que el sistema con inhibidor mostró una reducción significativa a $1.09 \times 10^{-5} A/cm^2$.

Las diferencias en el comportamiento de la corrosión y la eficiencia de inhibición entre los dos entornos demuestran el papel del medio en el control del desempeño del inhibidor. Aunque se utilizó la misma concentración de inhibidor en ambos casos, su efectividad dependió en gran medida de la química del electrolito. Desde una perspectiva de modelado, los resultados validan la utilidad de acoplar la cinética electroquímica clásica con ensayos de inmersión para comprender los mecanismos de corrosión. La ecuación

de Butler-Volmer capturó con éxito el cambio en los perfiles de densidad de corriente, mientras que el modelo de Langmuir proporcionó una base para interpretar la interacción superficial entre el inhibidor y el sustrato. Sin embargo, el modelo asume condiciones idealizadas, como una cobertura superficial uniforme y parámetros cinéticos constantes, lo que puede no representar completamente la corrosión localizada, los efectos de difusión o la degradación del inhibidor. Trabajos futuros deberían considerar modelos de adsorción multisitio, limitaciones de transporte y especiación dependiente del pH para mejorar la precisión predictiva y reproducir mejor los sistemas reales.

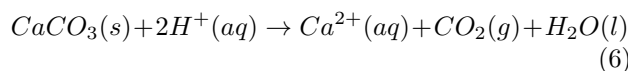
3.5. Posibles mecanismos de corrosión y papel de la cáscara de huevo como inhibidor de corrosión

El deterioro del acero al carbono bajo condiciones naturalmente agresivas ocurre mediante procesos electroquímicos espontáneos en la interfaz metal-solución. En medio ácido, la aleación de acero al carbono sufre disolución anódica, liberando iones Fe^{2+} mientras que el proceso catódico implica la reducción de iones hidrógeno para producir gas hidrógeno, comúnmente conocido como reacción de evolución de hidrógeno. En electrolitos neutros que contienen cloruros, el proceso es típicamente menos agresivo; sin embargo, los iones cloruro pueden iniciar corrosión localizada al alterar las películas protectoras formadas a pH neutro, lo que da lugar a picaduras, una de las formas más críticas de corrosión debido a la dificultad de su monitoreo [25].

El polvo de cáscara de huevo está compuesto principalmente por carbonato de calcio, junto con pequeñas cantidades de carbonato de magnesio, fosfato y proteínas orgánicas en trazas. Su protección contra la corrosión probablemente ocurre mediante varios mecanismos simultáneos, y los resultados experimentales indican un efecto inhibitorio más fuerte en medios ácidos. El posible mecanismo de inhibición en medio ácido, basado en los datos experimentales, se describe a continuación.

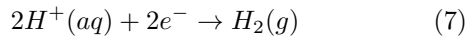
Formación de una barrera física de carbonato:

El componente principal del polvo de cáscara de huevo, el carbonato de calcio ($CaCO_3$), puede formar una barrera protectora sobre la superficie del acero. En ambientes ácidos como HCl 2 M, el carbonato de calcio reacciona con iones H^+ para liberar iones Ca^{2+} solubles y dióxido de carbono (CO_2). La reacción procede de la siguiente manera:

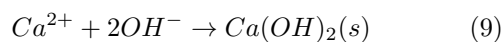


Una vez que el Ca^{2+} es liberado en la solución, puede reprecipitar cerca de la superficie metálica, particularmente bajo condiciones localizadas donde el pH

aumenta debido a reacciones catódicas como la evolución del hidrógeno, que consume H^+ :



En estas zonas alcalinas, el Ca^{2+} puede reaccionar con iones carbonato (CO_3^{2-}) o con iones hidróxido (OH^-) para formar nuevamente carbonato de calcio o producir hidróxido de calcio, también conocido como portlandita. Ambos compuestos son poco solubles y pueden formar depósitos sólidos sobre la superficie del acero. Estas dos reacciones pueden proceder de la siguiente manera:



Los compuestos precipitados a partir de las reacciones (8) y (9), en particular el carbonato de calcio ($CaCO_3$), pueden formar una capa compacta sobre la superficie del acero, la cual actúa como una barrera. Esta barrera física reduce el transporte de iones agresivos, tales como cloruros (Cl^-) e iones hidrógeno (H^+), al ralentizar o limitar su difusión hacia la superficie metálica. Como resultado, restringe la disolución anódica al bloquear parcialmente los sitios activos de corrosión, lo que disminuye el área electroactiva y reduce la velocidad de corrosión. La Figura 5 presenta un esquema del mecanismo propuesto de formación de la barrera física.

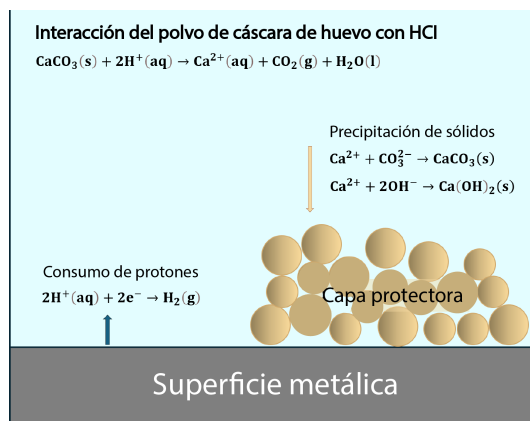


Figura 5. Esquema de la formación de la barrera física de carbonato de calcio sobre la superficie del acero.

Modificación de la capa de productos de corrosión

La adición de componentes derivados de la cáscara de huevo puede modificar la estructura y las propiedades de la capa de productos de corrosión, al hacerla más estable, más densa y menos propensa a agrietarse o desprenderse. Esto es consistente con el aumento de la

dureza superficial observado en presencia del inhibidor, particularmente en medio ácido. Una capa mecánicamente estable resiste el desprendimiento causado por el flujo o la abrasión, lo que disminuye la probabilidad de una mayor exposición y pérdida de metal.

Captura potencial de iones agresivos de corrosión:

Los iones calcio liberados del polvo de cáscara de huevo pueden interactuar con los iones cloruro libres en la solución, lo que reduce su actividad y ayuda a prevenir el ataque localizado, como la corrosión por picaduras.

La inhibición de la corrosión mediante un mecanismo de captura puede haber contribuido específicamente en el experimento con salmuera, donde la alta concentración de iones cloruro probablemente interactuó con los iones calcio liberados del polvo de cáscara de huevo. Una vez que los aniones agresivos son capturados, su capacidad para alterar las películas pasivas o iniciar corrosión localizada se reduce. Además, el exceso de Ca^{2+} en solución puede conducir a la formación de especies de calcio ligeramente solubles, como complejos de cloruro de calcio o carbonato de calcio, dependiendo del pH y de la disponibilidad de carbonato. La Figura 6 ilustra el mecanismo de inhibición de la corrosión que involucra iones cloruro e iones calcio que actúan como agentes captadores.

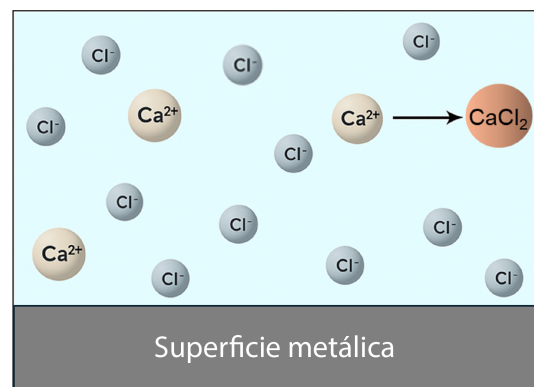


Figura 6. Inhibición de la corrosión mediante un mecanismo de captura de iones cloruro por iones calcio.

En resumen, los efectos combinados de la formación de una barrera y la modificación de la capa de productos de corrosión pueden explicar el desempeño efectivo de inhibición del polvo de cáscara de huevo, particularmente bajo condiciones ácidas. Al formar una película superficial más protectora y mecánicamente estable, los inhibidores derivados de la cáscara de huevo pueden ayudar a preservar la integridad del acero y ralentizar la progresión de la corrosión, lo que respalda su potencial aplicación como una estrategia de inhibición verde de la corrosión en entornos agresivos.

4. Conclusiones

Los resultados de este estudio experimental demuestran que el polvo de cáscara de huevo inhibe eficazmente la corrosión del acero al carbono tipo N80, particularmente bajo condiciones ácidas agresivas. La notable reducción de la velocidad de corrosión, respaldada por mediciones de pérdida de masa, indica que el polvo de cáscara de huevo reduce sustancialmente la disolución del metal en HCl 2 M, con una eficiencia de inhibición del 90 %. Este es un hallazgo importante, ya que los entornos ácidos representan un desafío significativo en diversas operaciones de campo.

El análisis de microindentación reveló cambios mínimos en la dureza en salmuera, con valores de 2.44 GPa para el acero no expuesto, 2.28 GPa sin el inhibidor y 2.42 GPa con polvo de cáscara de huevo. En contraste, la exposición a HCl 2 M sin protección redujo la dureza superficial a 1.77 GPa en probetas pulidas y a 0.22 GPa en probetas no pulidas. Esta baja dureza indica la formación de una capa de corrosión débil y poco adherente que puede eliminarse fácilmente, lo que expone continuamente el acero fresco al ataque ácido. La adición de polvo de cáscara de huevo incrementó la dureza a 2.07 y 2.32 GPa, lo que confirma la formación de una película densa y bien adherida que resistió la remoción, limitó la corrosión adicional y mejoró la durabilidad bajo condiciones abrasivas o de alto flujo.

La simulación numérica, que incorporó la cinética de Butler-Volmer y las isothermas de adsorción de Langmuir, reprodujo los comportamientos diferenciados observados experimentalmente tanto en sistemas salinos como ácidos. La concordancia entre los datos simulados y experimentales resalta el valor de combinar técnicas experimentales con análisis numérico para comprender y proponer posibles mecanismos de corrosión.

En conjunto, los efectos acoplados de la formación de una barrera, la estabilización de los productos de corrosión y la captura de iones cloruro contribuyeron al desempeño inhibitorio del polvo de cáscara de huevo. Estos hallazgos respaldan el potencial del polvo de cáscara de huevo como candidato viable para futuras aplicaciones en estrategias de control de la corrosión en entornos industriales agresivos.

Rol de los autores

- **J. L. Dávalos-Monteiro:** conceptualización, investigación, metodología, análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición.
- **C. D. Rodríguez-Hernández:** conceptualización, investigación, metodología, análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición.

- **R. M. Rached:** conceptualización, investigación, metodología, análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición.
- **R. Dávalos-Monteiro:** conceptualización, investigación, metodología, análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición, supervisión.

Referencias

- [1] M. Kermani and A. Morshed, “Carbon dioxide corrosion in oil and gas production—a compendium,” *Corrosion*, vol. 59, no. 8, pp. 659–683, Aug. 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5006/1.3277596>
- [2] Y. T. Al-Janabi, “An overview of corrosion in oil and gas industry: Upstream, midstream, and downstream sectors,” *Corrosion Inhibitors in the Oil and Gas Industry*, pp. 1–39, Feb. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/9783527822140.ch1>
- [3] S. Papavinasam, *Corrosion control in the oil and gas industry*. Elsevier, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-04629-X>
- [4] G. M. Castro, J. Park, A. Sherik, and J. C. Santamarina, “Metal corrosion in partially saturated sands: pore fluid conductivity and water saturation,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 62, pp. 1–13, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0097>
- [5] R. B. Jackson, “The integrity of oil and gas wells,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, no. 30, pp. 10902–10903, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1073/pnas.1410786111>
- [6] A. A. Soomro, A. A. Mokhtar, J. C. Kurnia, N. Lashari, H. Lu, and C. Sambo, “Integrity assessment of corroded oil and gas pipelines using machine learning: A systematic review,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 131, p. 105810, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105810>
- [7] O. Shabarchin and S. Tesfamariam, “Internal corrosion hazard assessment of oil & gas pipelines using bayesian belief network model,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 40, pp. 479–495, Mar. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.02.001>
- [8] G. Camila and F. Alexandre, *Corrosion Inhibitors – Principles, Mechanisms and Applications*. InTech, Feb. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/57255>

- [9] P. B. Raja, M. Ismail, S. Ghoreishiamiri, J. Mirza, M. C. Ismail, S. Kakooei, and A. A. Rahim, "Reviews on corrosion inhibitors: A short view," *Chemical Engineering Communications*, vol. 203, no. 9, pp. 1145–1156, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/00986445.2016.1172485>
- [10] V. S. Sastri, *Corrosion Inhibitors: Principles and Application*. Wiley, 1998. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar3r10>
- [11] A. Kadhum, A. A. Al-Amiery, R. Alazawi, M. K. S. Al-Ghezi, and R. H. Abass, "Corrosion inhibitors. A review," *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, vol. 10, no. 1, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-1-3>
- [12] V. S. Sastri, *Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice*. Wiley, May 2011. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1002/9781118015438>
- [13] L. T. Popoola, "Organic green corrosion inhibitors (OGCIs): a critical review," *Corrosion Reviews*, vol. 37, no. 2, pp. 71–102, Jan. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1515/corrrev-2018-0058>
- [14] N. Hossain, M. Asaduzzaman Chowdhury, and M. Kchaou, "An overview of green corrosion inhibitors for sustainable and environment friendly industrial development," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 35, no. 7, pp. 673–690, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1816793>
- [15] A. Miralrio and A. Espinoza Vázquez, "Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media: A review," *Processes*, vol. 8, no. 8, p. 942, Aug. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/pr8080942>
- [16] S. Marzorati, L. Verotta, and S. P. Trasatti, "Green corrosion inhibitors from natural sources and biomass wastes," *Molecules*, vol. 24, no. 1, p. 48, Dec. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/molecules24010048>
- [17] M. Alfattah, I. G. A. Arwati, Arramel, A. A. Afkauni, and R. M. Yofatama, "Efficiency of eggshell waste as a metal corrosion inhibitor ss316l based on green technology in seawater media," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2942, no. 1, p. 012017, Feb. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2942/1/012017>
- [18] O. Sanni, A. Popoola, and O. Fayomi, "The inhibitive study of egg shell powder on uns n08904 austenitic stainless steel corrosion in chloride solution," *Defence Technology*, vol. 14, no. 5, pp. 463–468, Oct. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.07.015>
- [19] V. S. Aigbodion and E. Dinneya-Onuoha, "Unveiling the anti-corrosion properties of Zn-eggshell particle composite coatings on mild steel in seawater-simulated solution using starch as a modifier," *RSC Advances*, vol. 14, no. 34, pp. 24 548–24 560, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1039/d4ra04283b>
- [20] O. Sanni, S. A. Iwarere, and M. O. Daramola, "Investigation of eggshell agro-industrial waste as a potential corrosion inhibitor for mild steel in oil and gas industry," *Sustainability*, vol. 15, no. 7, p. 6155, Apr. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su15076155>
- [21] S. K. Alias, H. F. Pahraraji, H. M. Hairi, M. M. Ali, M. A. M. Shah, and B. Abdullah, "Eggshell waste extract as potential natural corrosion inhibitor for AISI 1020 steel in acidic environment," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, pp. 10 192–10 201, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15282/jmes.18.3.2024.8.0805>
- [22] A. Kokalj, "On the use of the langmuir and other adsorption isotherms in corrosion inhibition," *Corrosion Science*, vol. 217, p. 111112, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111112>
- [23] E. Ituen, O. Akaranta, and A. James, "Evaluation of performance of corrosion inhibitors using adsorption isotherm models: An overview," *Chemical Science International Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 1–34, Jan. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.9734/CSJI/2017/28976>
- [24] R. Dávalos Monteiro, J. van de Wetering, B. Krawczyk, and D. L. Engelberg, "Corrosion behaviour of type 316l stainless steel in hot caustic aqueous environments," *Metals and Materials International*, vol. 26, no. 5, pp. 630–640, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00403-2>
- [25] R. L. Dávalos Monteiro and S. D. Ananda, "Pitting corrosion of type 304 stainless steel and sulfate inhibition effect in chloride containing environments," *Revista Tecnológica - ESPOL*, vol. 30, no. 3, 2017. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar3r25>