



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“ESTUDIO DE CORROSIÓN DE ACEROS 1018, 4140 Y
ACERO INOXIDABLE 316 UTILIZANDO INHIBIDOR DE
CORROSIÓN BASE RESINA DE COCO”**

TESIS INDIVIDUAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN MATERIALES

PRESENTA

DIANA LAURA PADILLA AMAYA

DIRIGIDA POR

Dr. ADRIÁN SOSA DOMÍNGUEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2025.

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“ESTUDIO DE CORROSIÓN DE ACEROS 1018, 4140 Y
ACERO INOXIDABLE 316 UTILIZANDO INHIBIDOR DE
CORROSIÓN BASE RESINA DE COCO”**

TESIS INDIVIDUAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN MATERIALES

PRESENTA

DIANA LAURA PADILLA AMAYA

DIRIGIDA POR

Dr. ADRIÁN SOSA DOMÍNGUEZ

SINODALES

DR. ADRIÁN SOSA DOMÍNGUEZ

DIRECTOR

DR. JOSÉ SANTOS CRUZ

SINODAL

DRA. ARELY IRAÍS CÁRDENAS ROBLES

SINODAL

DRA. CLAUDIA ELENA PÉREZ GARCÍA

SINODAL

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	
1. ANTECEDENTES	1
1.1 Corrosión	1
1.2 Tipos de corrosión	2
1.2.1 Corrosión por picadura	2
1.2.2 Corrosión galvánica	4
1.2.3 Corrosión de soldadura y ranurado	4
1.2.4 Corrosión por erosión	5
1.2.5 Corrosión por agrietado	6
1.2.6 Corrosión a alta temperatura	7
1.2.7 Corrosión intergranular	7
1.2.8 Corrosión microbiana	8
1.2.9 Corrosión seca	8
1.2.10 Corrosión húmeda	9
1.2.11 Corrosión uniforme	10
1.2.12 Corrosión localizada	11
1.3 Costos de corrosión	11
1.4 Inhibidores de corrosión	14
1.5 Tipos de inhibidores de corrosión	15
1.5.1 Los inhibidores orgánicos	16
1.5.2 Los inhibidores inorgánicos	17
1.5.3 Inhibidores de corrosión anódicos	17
1.5.4 Inhibidores de corrosión catódicos	17
1.5.5 Inhibidores de corrosión mixtos	18
1.5.6 Inhibidores de corrosión verde	18

1.5.7	Historia de los inhibidores de corrosión verde	19
1.6	Propiedades inhibidoras de las Fibras de Coco	20
1.7	Electroquímica de la corrosión	21
1.8	Curvas de Polarización Potenciodinámicas	23
1.9	Espectroscopia de Impedancia Electroquímica	27
2.	HIPÓTESIS	34
3.	OBJETIVOS	35
3.1	General	35
3.2	Específicos	35
4.	METODOLOGÍA	36
4.1	Materiales	36
4.2	Métodos	36
4.2.1	Preparación de la muestra	36
4.2.2	Elaboración de Salmuera NACE	36
4.2.3	Elaboración del medio ácido	37
4.2.4	Obtención del inhibidor base resina de coco	37
4.2.5	Montaje de la celda electroquímica	38
4.2.6	Evaluación de la velocidad de corrosión	38
4.3	Diseño experimental	40
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
5.1	Evaluación de los parámetros de corrosión obtenidos para acero AISI 1018, 4140 y acero inoxidable 316 mediante curvas de polarización	41
5.2	Evaluación de los parámetros de corrosión obtenidos para acero AISI 1018, 4140 y acero inoxidable 316 mediante espectroscopia de impedancia electroquímica	49
6.	CONCLUSIONES	59
7.	BIBLIOGRAFÍA	60

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Composición utilizada para la salmuera	37
2	Condiciones experimentales para la aplicación de la técnica electroquímica de curvas de polarización potenciodinámicas	39
3	Condiciones experimentales para la aplicación de la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica	39
4	Parámetros electroquímicos, velocidad de corrosión y resistencia a la polarización del ajuste de curvas de polarización para acero AISI 1018	42
5	Parámetros electroquímicos, velocidad de corrosión y resistencia a la polarización del ajuste de curvas de polarización para acero AISI 4140	44
6	Parámetros electroquímicos, velocidad de corrosión y resistencia a la polarización del ajuste de curvas de polarización para acero inoxidable 316	46
7	Parámetros electroquímicos, resistencia del electrolito y resistencia a la transferencia de carga obtenidos del ajuste de diagramas de Nyquist para acero AISI 1018	52
8	Parámetros electroquímicos, resistencia del electrolito y resistencia a la transferencia de carga obtenidos del ajuste de diagramas de Nyquist para acero AISI 4140	55
9	Parámetros electroquímicos, resistencia del electrolito y resistencia a la transferencia de carga obtenidos del ajuste de diagramas de Nyquist para acero inoxidable 316	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Corrosión atmosférica de un puente ferroviario en Vietnam	1
2	Tipos de corrosión	2
3	Mecanismo de picadura	3
4	Esquema de la corrosión galvánica	4
5	Mecanismo de corrosión por erosión	5
6	Esquema de la corrosión intergranular	7
7	Tipos de corrosión por su entorno corrosivo	8
8	Modelo de una corrosión seca	9
9	Modelo de una corrosión húmeda	10
10	Tipos de corrosión por la forma	10
11	Esquema de la corrosión uniforme	11
12	Desglose de los costos de corrosión en todos los sectores industriales	14
13	Comportamiento del acero al carbono con hidróxido de sodio. Isoterma de adsorción de Langmuir, lo que indica que estos inhibidores se comportan como inhibidores orgánicos de adsorción	15
14	Clasificación de los tipos de inhibidores	16
15	Esquema de una celda electroquímica	22
16	Las reacciones electroquímicas asociado con la corrosión del zinc en una solución ácida	23
17	Curvas obtenidas por Tafel para la dependencia del potencial catódico y la densidad de corriente	25
18	Gráfico de Tafel para las ramas anódica y catódica de la curva de sobrepotencial de corriente para $O + e \leftrightarrow R$ con $\alpha = 0.5$, $T = 298\text{ K}$ y $j_0 = 10^{-6}\text{ A/cm}^2$	27
19	Circuito puente para mediciones de impedancia electroquímica	28

20	Gráficos de Bode para un circuito RC en serie con $R = 100 \text{ } \Omega$ y $C = 1 \text{ } \mu\text{F}$	28
21	Gráfico de Nyquist para un circuito RC paralelo con $R = 100 \text{ } \Omega$ y $C = 1 \text{ } \mu\text{F}$	29
22	(a) Circuito equivalente de una celda electroquímica. (b) Subdivisión de Z_f en R_s y C_s , o en R_{ct} y Z_w	31
23	Gráfico del plano de impedancia para bajas frecuencias	31
24	Circuito equivalente para un sistema en cual la impedancia de Warburg no es importante	31
25	Gráfico del plano de impedancia para el circuito equivalente de la Figura 24	32
26	Diagrama de Nyquist para un sistema electroquímico	32
27	Inhibidor de corrosión base resina de coco a utilizar	37
28	Celda electroquímica y potencióstato	38
29	Curvas de polarización potenciodinámicas en H_2SO_4 1 N y salmuera NACE para muestras de acero 1018	42
30	Curvas de polarización potenciodinámicas en H_2SO_4 1 N y salmuera NACE para muestras de acero 4140	44
31	Curvas de polarización potenciodinámicas en H_2SO_4 1 N y salmuera NACE para muestras de acero inoxidable 316	46
32	Velocidad de corrosión (mm/año) para diferente material en H_2SO_4 1 N y salmuera NACE sin y con inhibidor obtenida por curvas de polarización	49
33	Diagramas de Nyquist para acero AISI 1018 sin y con inhibidor de corrosión en H_2SO_4 1 N	50
34	Diagramas de Nyquist para acero AISI 1018 sin y con inhibidor de corrosión en salmuera NACE	50
35	Circuito eléctrico equivalente con una capa de corrosión sobre la superficie de acero AISI 1018, acero 4140 y acero inoxidable 316 en contacto con una solución 1 N de H_2SO_4 y salmuera NACE	51

36	Diagramas de Nyquist para acero 4140 sin y con inhibidor de corrosión en H_2SO_4 1 N	53
37	Diagramas de Nyquist para acero 4140 sin y con inhibidor de corrosión en salmuera NACE	54
38	Diagramas de Nyquist para acero inoxidable 316 sin y con inhibidor de corrosión en H_2SO_4 1 N	56
39	Diagramas de Nyquist para acero inoxidable 316 sin y con inhibidor de corrosión en salmuera NACE	56
40	Velocidad de corrosión (mm/año) para diferente material en H_2SO_4 1 N y salmuera NACE sin y con inhibidor obtenida mediante espectroscopia de impedancia electroquímica	58

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo llevar a cabo la evaluación de la velocidad de corrosión por medio de la aplicación de técnicas electroquímicas como curvas de polarización potenciodinámicas y espectroscopia de impedancia electroquímica en muestras de aceros al carbono 1018, 4140 y una muestra de acero inoxidable 316 cuando se les aplica un inhibidor de corrosión base resina de coco y cuando no se les aplica ningún tipo de capa superficial de protección. Las soluciones de prueba para evaluar la velocidad de corrosión fueron H_2SO_4 y salmuera NACE 1D182 con la siguiente composición (9.62 % NaCl, 0.305 % CaCl_2 y 0.186 % $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), las soluciones anteriores se mantuvieron a temperatura ambiente. A partir de las técnicas electroquímicas de curvas de polarización potenciodinámicas y espectroscopia de impedancia electroquímica se pudo determinar las velocidades de corrosión de los diferentes materiales probados. Para el acero AISI 1018 la velocidad de corrosión fue de 0.89 mm/año con una reducción del 61% de la velocidad al aplicar el inhibidor, para el acero 4140 la reducción fue de la velocidad de corrosión fue de un 57 % de 1.8 a 1.03 mm/año y para el acero inoxidable una velocidad de corrosión que se mantuvo constante sin y con la aplicación del inhibidor en medio ácido, el efecto de la disminución de la velocidad de corrosión en la salmuera fue similar al mostrado en medio ácido. Con base en los resultados obtenidos fue posible aumentar la resistencia a la corrosión de los materiales probados aplicando un inhibidor base resina de coco el cual es amigable con el medio ambiente con excelentes resultados.

1. ANTECEDENTES

1.1 Corrosión

La corrosión se define como el deterioro de un material debido a las reacciones químicas y electroquímicas de este con el medio corrosivo en el que se encuentra. La corrosión del metal es el proceso de deterioro que sufren los materiales metálicos debido a la interacción con su entorno como se observa en la Figura 1. La oxidación es la forma más común de corrosión, en la cual se produce una reacción química o electroquímica en la superficie del metal, convirtiéndolo en un estado oxidado o ionizado. Este proceso afecta negativamente las propiedades mecánicas de los metales, como su resistencia, plasticidad y tenacidad. Además, la corrosión puede deformar la geometría de los componentes metálicos, incrementar el desgaste entre piezas, deteriorar las propiedades eléctricas y ópticas, acortar la vida útil de los equipos e incluso provocar accidentes graves como incendios o explosiones. Hay varias formas de clasificar la corrosión mencionada en la literatura tales como según el mecanismo de reacción de corrosión, según la clasificación del entorno corrosivo y según la clasificación por la forma (Figura 2) (Bahadori, 2014).



Figura 1. Corrosión atmosférica de un puente ferroviario en Vietnam (Popov, 2015).

1.2 Tipos de corrosión

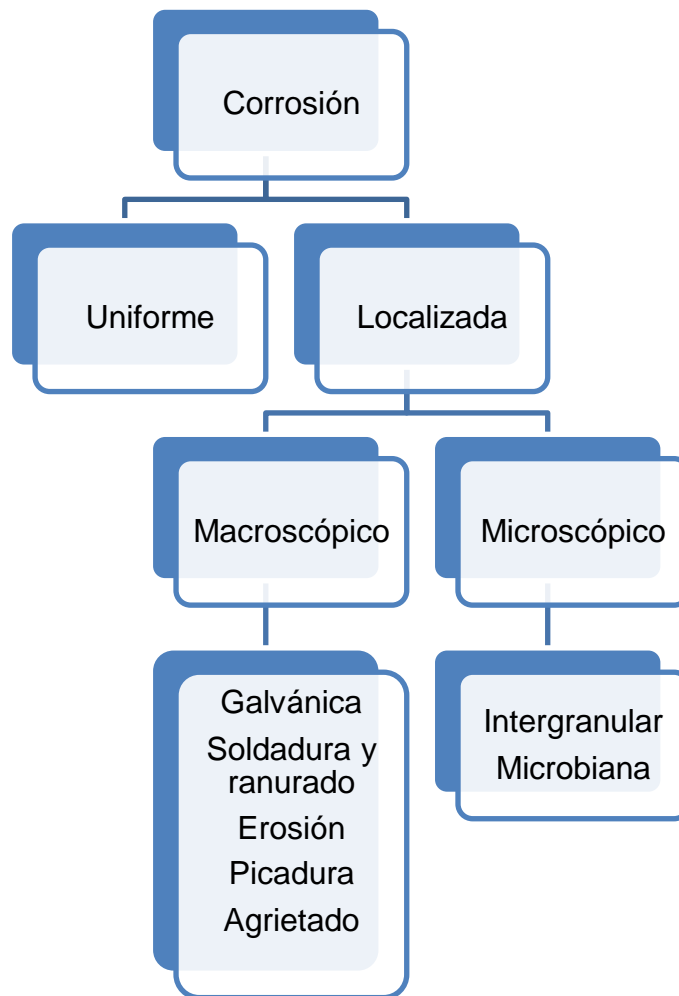


Figura 2. Tipos de corrosión (Davis, 1996).

1.2.1 Corrosión por picadura

La corrosión por picaduras también conocida como *pitting*, a menudo se produce en materiales que cuentan con película de pasivación o película protectora en la superficie, ya sea un producto de corrosión o un revestimiento. Cuando esta capa se ve comprometida o dañada, el metal expuesto se vuelve altamente susceptible a la liberación de electrones y se da inicio al proceso corrosivo. Generalmente, la profundidad de la corrosión por picaduras es mucho mayor que su diámetro. Bajo

ciertas condiciones, como bajas concentraciones de oxígeno o altas concentraciones de especies formadoras de aniones, la capacidad de la aleación para formar una película protectora pasiva puede verse afectada; estos aniones activos se absorben primero en ciertos puntos de la superficie del metal, pasivando así la superficie del metal. Una vez que la pasivación de la película se destruye y carece de capacidad de autopasivación, la superficie metálica se corroe. Esto ocurre debido a que el metal del material puede escapar fácilmente a través de defectos en la superficie metálica, lo que lo vuelve activo, mientras que la capa de pasivación aún se encuentra en un estado pasivo. Esta situación crea una configuración conocida como batería de corrosión activa-pasiva, donde el área del ánodo (región activa) es considerablemente más pequeña que el área del cátodo (región pasiva). Como resultado, la densidad de corriente en el ánodo es alta, lo que acelera la tasa de corrosión a través de un proceso autocatalítico y permite que la corrosión se desarrolle en forma profunda como se observa en la Figura 3. La velocidad y las características de las picaduras en la corrosión son influenciadas por diversos factores, entre ellos se encuentran las propiedades metalúrgicas y la composición de la aleación metálica, así como factores externos como la composición química del entorno (concentración del electrolito) y el pH (Mejía, 2020; Akpanyung y col., 2019).

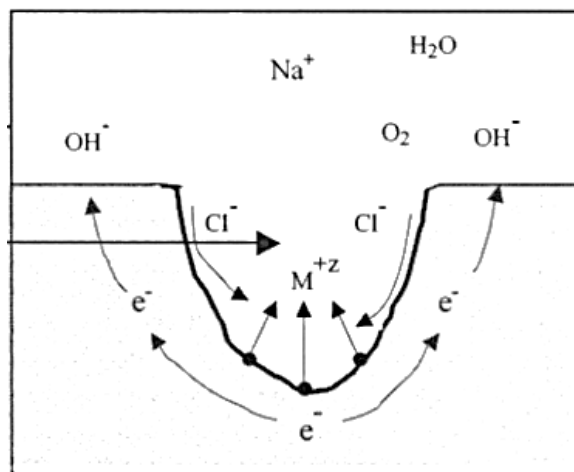


Figura 3. Mecanismo de picadura (Pérez, 2016).

1.2.2 Corrosión galvánica

La corrosión galvánica se debe a diferentes potenciales de corrosión, cuando 2 o más metales diferentes están en contacto entre sí o comunicados a través de otros conductores, y están en el mismo medio, lo que da como resultado una corrosión localizada de las partes en contacto de metales diferentes como se observa en la Figura 4, también conocida como corrosión por contacto o corrosión bimetalica. Cuando el metal menos activo (cátodo) y el metal más activo (ánodo) están en contacto entre sí en la solución electrolítica, se induce una corriente debido a la formación de una batería primaria de corrosión, lo que da como resultado la corrosión de un metal (ánodo) con un potencial más bajo. El fenómeno en el cual la velocidad de corrosión aumenta y la velocidad de corrosión del metal con un potencial más alto (cátodo) disminuye. Durante este proceso, el cátodo está protegido por el ánodo. El aumento de la relación del área del cátodo-ánodo y la disminución de la conductividad del medio agravarán la corrosión del ánodo (Rahimi y col., 2018; Harzheim y col., 2022; Kolesnikov y col., 2020).

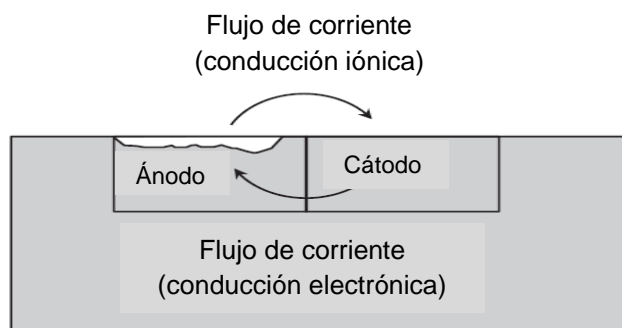


Figura 4. Esquema de la corrosión galvánica (Popov, 2015).

1.2.3 Corrosión de soldadura y ranurado

Existe un método de corrosión especial para el acero inoxidable, debido a que la formación del molde de protección de pasivación del acero inoxidable depende de uno de los elementos de aleación, el cromo, que suele ser del 18 %. Debido a las elevadas temperaturas requeridas durante la soldadura u otro procesamiento térmico, el carbono y el cromo en el acero inoxidable reaccionan para formar carburos de cromo en los límites de grano. Esta reacción química reduce la cantidad de cromo

en los límites de grano del material, lo que reduce la capacidad de estas áreas para resistir la corrosión. Al mismo tiempo, estas áreas también forman celdas galvánicas con aleaciones protegidas cercanas, lo que da como resultado un entorno altamente corrosivo (Jegdic y col., 2019; Rajesh y col., 2020).

1.2.4 Corrosión por erosión

Los materiales estructurales que trabajan en fluidos a menudo se dañan debido a la combinación de efectos mecánicos y de corrosión de los fluidos, este fenómeno se denomina "erosión-corrosión", Este fenómeno se produce debido al movimiento relativo entre partículas del fluido y superficies sólidas en un ambiente corrosivo (Figura 5). La erosión-corrosión se caracteriza principalmente por un aumento en la velocidad de deterioro del material metálico debido al movimiento relativo entre las partículas del fluido corrosivo y la superficie sólida. En los sistemas de energía de fluidos, la presencia de turbulencia localizada a altas velocidades (iniciada por picaduras corrosivas iniciales en la superficie interna de las tuberías) puede llevar a un rápido incremento en las tasas de erosión-corrosión. Con el paso del tiempo, se pueden observar altas tasas de corrosión debido a la pérdida de la película protectora que inicialmente recubre la superficie del metal y que es causada por la corrosión inicial. La erosión puede ocurrir incluso cuando el fluido está mayormente estacionario y las partes móviles del equipo están parcial o totalmente sumergidas en el fluido. La velocidad del fluido generalmente tiene un límite, ya que por encima de este límite se producen daños por erosión y tasas de corrosión muy rápidas. Este tipo de corrosión implica tanto la disolución electroquímica del metal como la erosión mecánica debido al impacto de las partículas (Mejía, 2020).

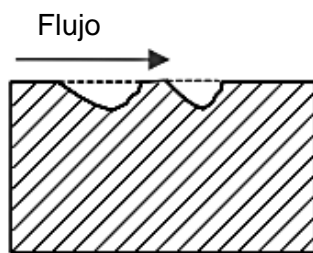


Figura 5. Mecanismo de corrosión por erosión (Landolfo y col., 2010).

1.2.5 Corrosión por agrietado

Esta es una forma de corrosión localizada que ocurre donde se depositan grietas debajo de la superficie o donde la capa de pasivación de la superficie en el área de protección se ve comprometida, cuando el líquido corrosivo en el ambiente generalmente puede ingresar a la ranura del material, pero no puede fluir libremente, lo que causará una diferencia en la concentración de oxígeno dentro y fuera de la ranura, y la velocidad de corrosión del material en la ranura se acelerará en gran medida. Por ejemplo, los espacios entre las piezas, la parte inferior de las juntas y los sellos, el interior de las grietas y los espacios llenos de lodos y sedimentos son lugares donde es probable que ocurra la corrosión por grietas. Este tipo de corrosión generalmente se atribuye a los siguientes factores: Cambios de acidez en la grieta, escasez de oxígeno en la grieta, desarrollo de iones diferentes en la grieta, agotamiento de Inhibidor en la grieta (Wu y col., 2021; Ning y col., 2019; Mu y col., 2021).

En primer lugar, la corrosión destruirá la capa protectora de la superficie del metal, provocando que pierda su función de anticorrosión. En este momento, el metal expuesto en la superficie reacciona fácilmente con gases externos, agua, electrolitos y otros medios, provocando corrosión química o electroquímica, así como corrosión microbiana. La corrosión electroquímica es uno de los métodos de corrosión más dañinos. Su mecanismo principal es depender de los iones de la solución electrolítica para generar electricidad a través de la superficie del metal. En segundo lugar, la corrosión también generará nuevos productos de corrosión en la superficie del metal, como óxidos, hidróxido, álcali y sal, etc. Estos productos también pueden promover la formación de grietas en el metal. Por ejemplo, en la corrosión química, se formará una capa de productos de corrosión con diferentes espesores sobre la superficie del metal. La geometría y distribución de estos productos de corrosión tienen un impacto significativo en el comportamiento de la corrosión y la resistencia a la fatiga del material (Mejía, 2020; Sastri, 2011; Mu y col., 2021).

1.2.6 Corrosión a alta temperatura

La corrosión a alta temperatura es el deterioro de los materiales debido a cambios químicos a temperaturas muy altas. Esta corrosión no es galvánica y puede ocurrir cuando los metales se exponen a atmósferas de alta temperatura que contienen oxígeno, azufre u otros componentes oxidantes. Por ejemplo, los materiales utilizados en la industria aeroespacial, la generación de energía e incluso los motores de automóviles deben poder exponerse a sustancias que pueden contener grandes cantidades de materiales corrosivos en entornos de alta temperatura, por lo que estos materiales deben tener la capacidad de resistir la corrosión a alta temperatura (Guo y col., 2021; Zhang, 2022).

1.2.7 Corrosión intergranular

La corrosión local que ocurre en o cerca de los límites de los granos, con poca o ninguna corrosión dentro de los granos, se llama corrosión intergranular. Esta corrosión localizada es causada principalmente por el agotamiento de elementos de aleación (principalmente Cr y Mo) en los límites de los granos (Figura 6). La corrosión intergranular del acero inoxidable se produce principalmente en la zona afectada por el calor de la soldadura. La sensibilidad a la corrosión intergranular se debe a la precipitación de carburo de cromo (Cr_{23}C_6) cerca de los límites de los granos, lo que resulta en una pérdida local de cromo cerca de los límites de los granos. Cuando el contenido local de cromo cae por debajo de aproximadamente el 12 % en peso, el área ya no es "inoxidable" y puede ocurrir una corrosión acelerada (Sastri, 2011; Zhang y col., 2019).

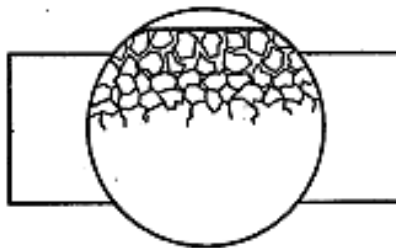


Figura 6. Esquema de la corrosión intergranular (Jones, 1996).

1.2.8 Corrosión microbiana

La corrosión microbiana, también conocida como corrosión bacteriana, es un fenómeno ocasionado por microorganismos, principalmente bacterias, que participan en la descomposición de materiales. Esta corrosión puede ocurrir tanto en metales como en materiales no metálicos, con o sin oxígeno. Es un proceso de corrosión que se produce debido a la actividad de ciertos microorganismos, que pueden crecer en el material y producir ácidos que corroen el material (El-Shamy, 2020).

De acuerdo con los diferentes entornos de corrosión, la corrosión se puede dividir en las siguientes categorías (Figura 7) (Gómez de Leon Hijes y col., 2004).

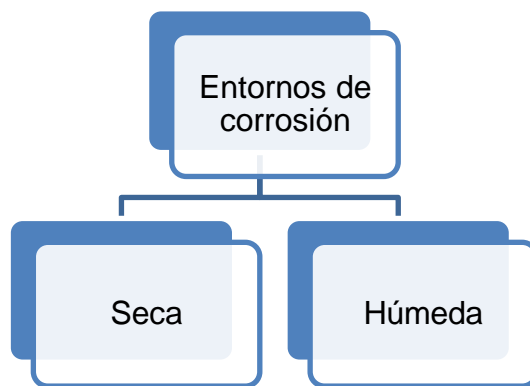


Figura 7. Tipos de corrosión por su entorno corrosivo.

1.2.9 Corrosión seca

También conocida como corrosión química, implica una degradación de los metales debido a reacciones químicas con el medio ambiente. Este tipo de corrosión es especialmente relevante cuando se combina con altas temperaturas. En este caso, no hay un flujo apreciable de corriente eléctrica a través del metal, sino que el daño se produce por la difusión de las sustancias gaseosas corrosivas como se observa en la Figura 8 (Gómez de Leon Hijes y col., 2004; Fayomi y col., 2019).

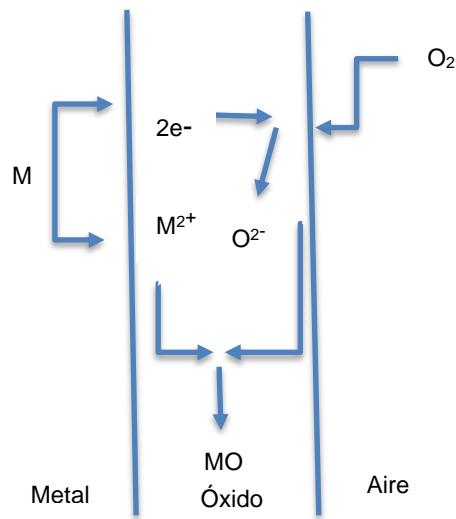


Figura 8. Modelo de una corrosión seca (Gómez de León Hijes y col., 2004).

1.2.10 Corrosión húmeda

Los metales tienen electrones libres que les permiten establecer reacciones electroquímicas internas. Estas reacciones requieren la presencia de un electrolito conductor, donde el agua es el medio más común, razón por la cual en ocasiones se le llama "corrosión acuosa". Muchos metales son tienden a corroerse en mayor o menor medida al estar en contacto con el agua y la atmósfera o por la exposición directa a soluciones químicas. La corrosión se produce por la migración de electrones en una reacción electroquímica que implica un proceso de oxidación-reducción y el establecimiento de una separación entre el ánodo y el cátodo por medio de una corriente eléctrica. Para este proceso influyen tres factores principales: el metal, el ambiente en el que se encuentra y el agua como electrolito como se observa en la Figura 9. La velocidad de la corrosión depende de diferentes factores, como la presión, la temperatura, las sales presentes en el medio y las propiedades del metal. Los metales buscan lograr una mayor estabilidad o una menor energía interna al realizar estas reacciones (Gómez de Leon Hijes y col., 2004; Fayomi y col., 2019).

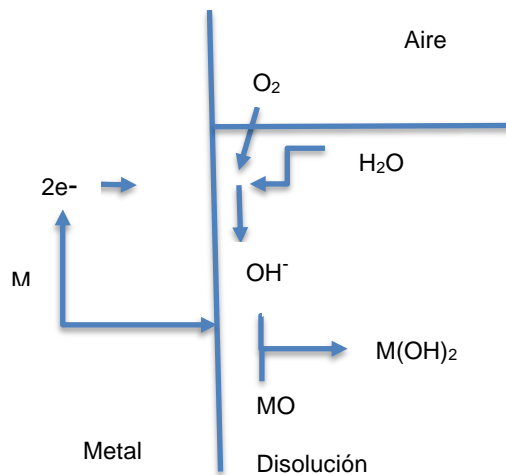


Figura 9. Modelo de una corrosión húmeda (Gómez de Leon Hijes y col., 2004).

La forma de corrosión se puede dividir en dos tipos: corrosión uniforme y corrosión localizada. En la producción química, este último el peligro es más serio (Figura 10).

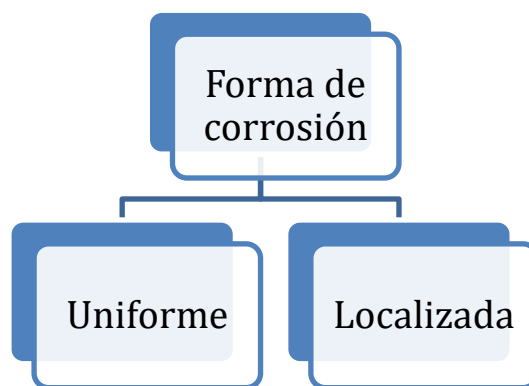


Figura 10. Tipos de corrosión por la forma.

1.2.11 Corrosión uniforme

La corrosión ocurre en toda o la mayor parte de la superficie del metal (Figura 11), también conocida como corrosión general. En la mayoría de los casos, se forma una película protectora de productos de corrosión sobre la superficie del metal, lo que ralentiza la corrosión. Algunos metales, como el acero, se disuelven rápidamente en ácido clorhídrico sin formar una película. Por lo general, la tasa de corrosión promedio (es decir, el espesor del material pierde varios milímetros por año) se utiliza como medida del grado de corrosión uniforme y también como principio para la selección

de materiales. Generalmente, la tasa de corrosión anual es inferior a 1 ~ 1.5 mm, que puede considerarse adecuado (con una vida útil razonable) (Zhang, 2018; Fayomi y col., 2019).

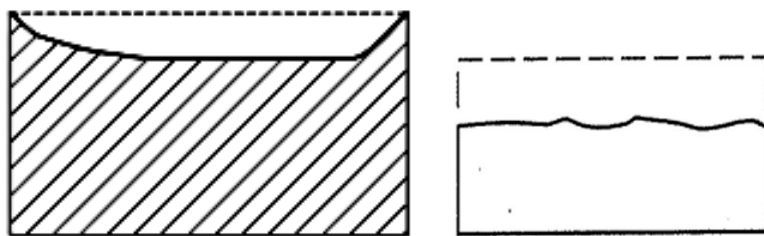


Figura 11. Esquema de la corrosión uniforme (Landolfo y col., 2010).

1.2.12 Corrosión localizada

La corrosión ocurre solo localmente en la superficie del metal. Sus peligros son mucho más graves que la corrosión uniforme. Representa alrededor del 70 % del daño total por corrosión de la maquinaria química, y puede ser repentino y catastrófico, provocando explosiones, incendios y otros accidentes. Por supuesto, la corrosión no solo es dañina, hay muchos procesos de producción que utilizan la corrosión (Fayomi y col., 2019).

Dada a la existencia de los diversos tipos de corrosión clasificados por la forma, el mecanismo de reacción y el ambiente al que están expuestos los materiales, es crucial estudiar estos fenómenos y controlarlos adecuadamente, ya que la falta de atención a este aspecto puede resultar pérdidas económicas importantes.

1.3 Costos de corrosión

El daño de la corrosión del metal es, en primer lugar, que la corrosión ha causado enormes pérdidas económicas. Esta pérdida se puede dividir en pérdida directa y pérdida indirecta. Las pérdidas directas incluyen la pérdida de material, la falla del equipo, el consumo de energía y el costo de la protección del revestimiento, la protección electroquímica y la selección de materiales resistentes a la corrosión para evitar la corrosión. Debido a la corrosión, una gran cantidad de materiales útiles se convierten en desechos. Se estima que la producción anual de equipos de hierro y

acero desechados debido a la corrosión en el mundo es aproximadamente el 30 % de su producción anual. La pérdida indirecta causada por la corrosión suele ser mayor que la pérdida directa, incluso difícil de estimar. Estas pérdidas incluyen la interrupción del trabajo y la producción causada por la corrosión, la disminución de la calidad del producto, la fuga de una gran cantidad de sustancias útiles y tóxicas, las explosiones y la contaminación ambiental a gran escala. En 2001, se estimó que el costo directo de la corrosión en los Estados Unidos ascendía a 276 mil millones de dólares anuales, lo que representaba el 3.1 % del Producto Interno Bruto (PIB) del país. De esta cifra, se asignaron 17.6 mil millones de dólares a los sectores de producción y manufactura. En el caso de la generación de energía eléctrica, donde se utilizan con frecuencia intercambiadores de calor, el estudio estimó un costo anual de corrosión de 6,900 millones de dólares (Faes y col., 2019).

En estudios más recientes, se calculó que el costo global anual de la corrosión alcanza los 2.5 billones de dólares y que el costo de la corrosión se puede dividir en cinco categorías: infraestructura, servicios públicos, gobierno, transporte y manufactura (Figura 12), además dicha investigación estimó, solo por ejemplificar algunos de los sectores ya mencionados, que el costo anual de la corrosión de la industria de producción es de \$1.372 mil millones; para el sector transporte , como por ejemplo, en el sector marítimo si se excluyen los costos indirectos, se sitúan entre 50,000 y 80,000 millones de dólares anuales, en el sector aeroespacial, el precio del diseño y la producción es de 200 millones de dólares, el tiempo de inactividad es de 300 millones de dólares y el mantenimiento de la corrosión es de 1,700 millones de dólares, estos incluidos en el costo anual proyectado de la corrosión de 2,200 millones de dólares para la industria aeronáutica estadounidense; para el sector de servicios públicos se estima que para las plantas que generan electricidad el costo es de \$23 mil millones anuales, el costo directo anual total de la corrosión para los sistemas de alcantarillado y agua potable es de \$36 mil millones. Esto representando numéricamente algunos de los sectores mencionados anteriormente (Yadav y col., 2024).

Las pérdidas indirectas causadas por la corrosión suelen ser incluso mayores que las pérdidas directas y a menudo son difíciles de estimar. Estas pérdidas incluyen interrupciones en el trabajo y la producción debido a la corrosión, disminución en la calidad del producto, fugas de sustancias útiles y tóxicas, riesgo de explosiones y contaminación ambiental a gran escala. De acuerdo con otras fuentes, en 1998, el costo total de la corrosión en la industria de la energía eléctrica fue de 15.4 mil millones de dólares en los Estados Unidos. Esta cifra se divide en diferentes categorías, y la corrosión de los intercambiadores de calor representa el 5.55 % o 855 millones de dólares anuales. Estas pérdidas significativas son una combinación de costos directos e indirectos causados por la corrosión, y pueden atribuirse a diversas consecuencias económicas, como la necesidad de reemplazar equipos corroídos, sobredimensionamiento para tener en cuenta la posible corrosión, mantenimiento preventivo, paradas de equipos, pérdida de eficiencia debido a la reducción en la transferencia de calor de los intercambiadores de calor y pérdida de productos debido a fugas o contaminación (Faes y col., 2019).

Como pudimos observar los costos por corrosión son muy elevados, por ello se ha buscado alguna manera de controlar y minimizar lo mayormente posible la corrosión, a continuación, se profundizará sobre una de las técnicas mayormente empleadas en el sector contra la corrosión que viene siendo la utilización de inhibidores de corrosión.

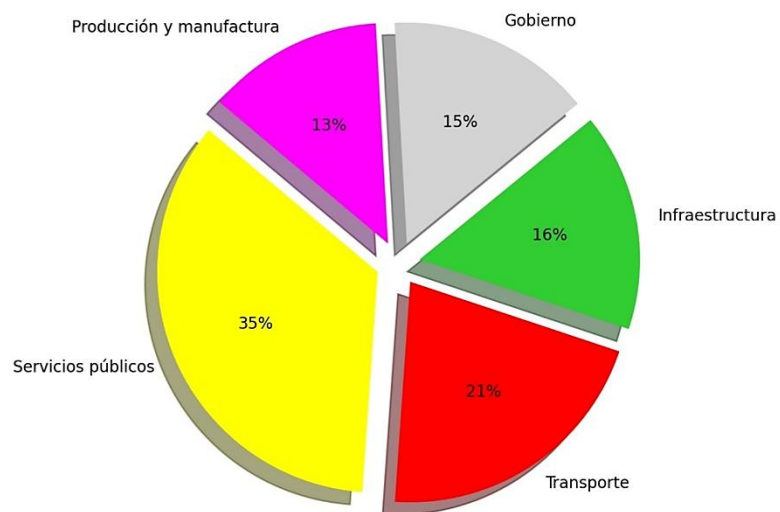


Figura 12. Desglose de los costos de corrosión en todos los sectores industriales (Yadav y col., 2024).

1.4 Inhibidores de corrosión

En química, un inhibidor de corrosión es un compuesto químico que, cuando se agrega disminuye la tasa de corrosión de un material, generalmente un metal o una aleación, que entra en contacto con un fluido o sustancia corrosiva. Los inhibidores de corrosión se han convertido en uno de los métodos más utilizados en la tecnología anticorrosiva debido a sus ventajas de alta eficiencia, bajo costo y operación simple. La mayoría de los inhibidores de corrosión tienen un buen efecto protector sobre los metales, pero los inhibidores de corrosión usados en la industria son altamente tóxicos y dañinos. Su dosis es muy pequeña (0.1 % - 1 %), pero el efecto es significativo. Los inhibidores de corrosión modifican las reacciones químicas que ocurren en la superficie de un metal cuando se expone a un entorno corrosivo. Estos compuestos tienen la capacidad de acelerar o disminuir la velocidad de estas reacciones, lo que a su vez afecta la velocidad a la que se produce la corrosión. Además de esto, los inhibidores también pueden retardar la difusión de sustancias químicas corrosivas en la superficie del metal y reducir la resistencia eléctrica de dicha superficie. Estos dos efectos trabajan juntos para prevenir la corrosión. La eficacia de un inhibidor de corrosión está estrechamente relacionada con la cantidad o concentración de dicho inhibidor presente en el sistema (Figura 13). Cuanto mayor

sea la concentración del inhibidor, mayor será la reducción en la velocidad de corrosión. Además de la concentración, existen otros factores cruciales para evaluar la efectividad de un inhibidor de corrosión, como su eficiencia, es decir, cuánto reduce la corrosión en comparación con la ausencia de cualquier inhibidor, y la superficie del metal que el inhibidor es capaz de proteger (Sanni y col., 2019).

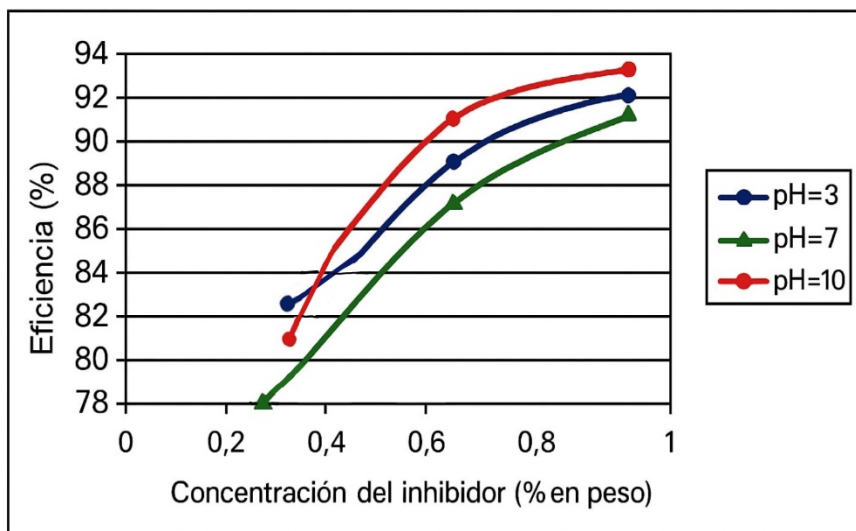


Figura 13. Comportamiento del acero al carbono con hidróxido de sodio. Isotherma de adsorción de Langmuir, lo que indica que estos inhibidores se comportan como inhibidores orgánicos de adsorción (Ojeda-Armagnac y col., 2011).

Existen muchos tipos de inhibidores de corrosión y, según sus diferentes mecanismos de acción, se pueden dividir en tres categorías: inhibidores de corrosión anódicos, catódicos y mixtos, pero veremos que según la bibliografía existe una variación en su clasificación.

1.5 Tipos de inhibidores de corrosión

La clasificación de los inhibidores de la corrosión se puede llevar a cabo de diversas maneras. Algunos autores optan por dividirlos en tres categorías: anódicos, catódicos y mixtos, lo que significa que se agrupan en función de las reacciones que predominantemente inhiben, o dicho de otro modo, según su influencia en la

velocidad de la reacción química. Otra forma de clasificación se basa en la naturaleza química del inhibidor, dividiéndolos en orgánicos e inorgánicos. También, algunos autores los categorizan según el medio en el que actúan y la estabilidad de los óxidos metálicos, creando así categorías de inhibidores específicos para medios ácidos, alcalinos y neutros (Al-Amiery y col.,2022).

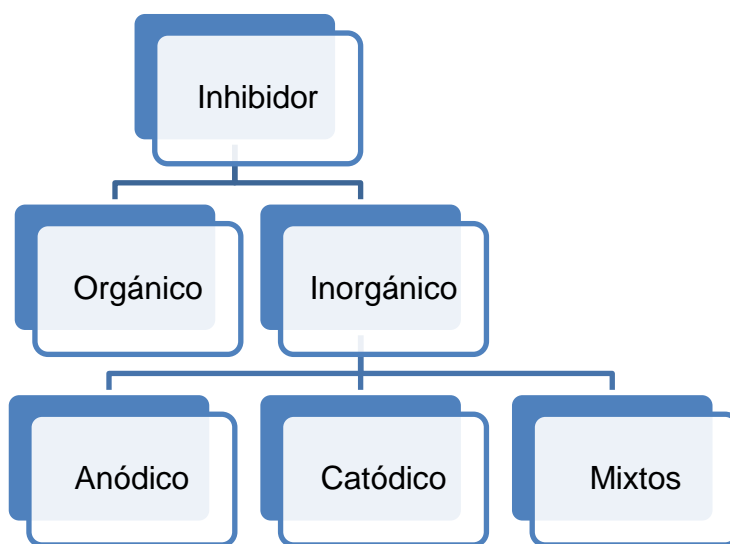


Figura 14. Clasificación de los tipos de inhibidores (Singh, 2019).

1.5.1 Los inhibidores orgánicos

Contienen heteroátomos (nitrógeno, oxígeno, azufre y fósforo), cuyos pares de electrones solitarios y electrones π parciales (anillos aromáticos y enlaces múltiples) pueden interactuar con la órbita D libre de metales, lo que es beneficioso para el proceso de adsorción; La estructura, las propiedades y la carga superficial, la distribución de cargas en la molécula y el tipo de medio de erosión (pH y/o potencial del electrodo) influyen en el efecto inhibidor. El mecanismo de inhibición se lleva por la formación de una película protectora por adsorción sobre la superficie del metal, desplazando el agua sobre la superficie del metal. Los inhibidores de corrosión orgánicos incluyen principalmente ácido fosfórico (sal), ácido fosfinocarboxílico,

mercaptobenzotiazol, benzotriazol, lignina sulfonada y otros compuestos (Al-Amiery y col., 2023; Al-Azzawi y col., 2022).

1.5.2 Los inhibidores inorgánicos

Son aquellos que contienen compuestos como cromatos, nitratos, fosfatos y molibdatos; estos tipos de inhibidores ayudan a evitar o disminuir el proceso de corrosión, debido a que establecen una capa protectora sobre la superficie del metal, que evita la formación de células de corrosión; pero debido a que los inhibidores orgánicos son más ecológicos, cuentan con una mejor eficacia en la prevención de la corrosión, su naturaleza no tóxica y su coste económico es menor, han provocado que se utilicen como alternativas de los orgánicos (Al-Amiery y col., 2023; Al-Azzawi y col., 2022; Cartledge, 1966).

1.5.3 Inhibidores de corrosión anódicos

Como cromato, nitrato, benzoato, etc. utilizados en medios neutros. Pueden aumentar la polarización anódica, cambiando así positivamente el potencial de corrosión. Generalmente, los aniones del inhibidor de corrosión anódico se mueven hacia la superficie del metal para pasivarlo. Sin embargo, si la dosis del inhibidor de corrosión es insuficiente, agravará la corrosión por picaduras del metal local. Por lo tanto, el inhibidor de corrosión anódico también se conoce como "inhibidor de corrosión peligroso". Los inhibidores de corrosión no oxidantes (como el benzoato de sodio, etc.) solo pueden inhibir la corrosión en presencia de oxígeno disuelto y, cuando su dosis es insuficiente, provocarán una corrosión generalizada (Singh 2019).

1.5.4 Inhibidores de corrosión catódicos

Como el carbonato de calcio ácido, polifosfato, sulfato de zinc, iones de arsénico, iones de antimonio, etc. Pueden aumentar la polarización catódica y cambiar el potencial de corrosión negativamente. Generalmente, los cationes de los inhibidores de corrosión catódicos se mueven a la superficie del metal y forman una película protectora precipitada sobre la superficie del metal a través de reacciones químicas

o electroquímicas, lo que inhibe la velocidad del proceso catódico (por ejemplo, aumenta en gran medida el sobrepotencial del hidrógeno), inhibiendo así la corrosión. Este tipo de inhibidor de corrosión no acelerará la corrosión cuando la dosis sea insuficiente, por lo que también se lo conoce como "inhibidor de corrosión seguro" (Singh 2019).

1.5.5 Inhibidores de corrosión mixtos

Como compuestos orgánicos que contienen nitrógeno y azufre, alcaloides, etc., que inhiben tanto el proceso catódico como el proceso anódico. En este momento, el potencial de corrosión no cambia mucho, pero la corriente de corrosión disminuye mucho. Según el entorno de aplicación de los inhibidores de corrosión, se pueden dividir aproximadamente en cuatro categorías: inhibidores de corrosión para soluciones ácidas, inhibidores de corrosión para soluciones alcalinas, inhibidores de corrosión para soluciones neutras e inhibidores de corrosión en fase de vapor (Nam y col., 2018; Lee y col., 2018).

A inicios del siglo XXI, con el fortalecimiento de la conciencia de las personas sobre la protección y seguridad del medio ambiente, los problemas ambientales y de seguridad, los inhibidores de corrosión verde en la industria han atraído la atención mundial, y algunos inhibidores de corrosión altamente tóxicos y dañinos han sido restringidos o prohibidos. Debido al efecto tóxico de los inhibidores de la corrosión industrial, muchos científicos en el país y en el extranjero han comenzado a extraer inhibidores de corrosión de las plantas naturales. La investigación encontró que muchos extractos de plantas no solo tienen buenos efectos de inhibición de la corrosión en los metales, sino que también tienen un bajo costo, proceso de extracción simple, verde y fácil de degradar, etc.

1.5.6 Inhibidores de corrosión verde

Los inhibidores de corrosión verdes actuales incluyen principalmente los siguientes dos tipos: Los inhibidores de corrosión de origen vegetal se extraen de inhibidores de corrosión efectivos en plantas y se utilizan para la protección contra la corrosión

de metales. Los inhibidores de corrosión que se utilizan hoy en día se derivan principalmente de materias primas minerales, etc., que tienen defectos tales como alto costo, gran contaminación ambiental, contaminación secundaria y degradación difícil. El inhibidor de corrosión vegetal natural es un tipo de protección ambiental verde. Los aminoácidos provienen de una amplia gama de fuentes que se pueden obtener a través de la descomposición de proteínas y también se pueden descomponer por completo en el entorno natural. Los aminoácidos se han utilizado ampliamente en la investigación y aplicación de inhibidores de corrosión debido a sus ventajas de fuente amplia, bajo precio y protección ambiental (Ibrahimi y col., 2020; Byrne y col., 2023).

Los inhibidores de corrosión de aminoácidos tienen pares de electrones en los átomos de nitrógeno y azufre en la molécula de aminoácido, que pueden combinarse con orbitales vacíos de hierro para formar complejos de superficie que se absorben en la superficie del metal y forman una película de adsorción densa. Además, el aminoácido puede absorber la parte activa de la interfaz metal/solución, aumentar la energía de activación de la reacción de la interfaz, lo que dificulta la reacción catódica o la reacción anódica en la reacción de corrosión y reduce drásticamente la resistencia a la corrosión del metal y por ende a su velocidad de corrosión (Alvarado y col., 2015; Ibrahimi y col., 2020; Byrne y col., 2023).

1.5.7 Historia de los inhibidores de corrosión verde

La primera patente de inhibidor de corrosión del mundo es un inhibidor de corrosión verde, y su componente principal es una mezcla de jarabe y aceite vegetal. Los actuales inhibidores de corrosión a base de plantas incluyen: plantas compuestas, hojas de eucalipto, hojas de nuez, hojas de bambú dorado, hojas de alcanfor, granos de destilería, salvado de arroz, semillas de ciprés, etc. Para ver un poco del trasfondo que ha habido de dichos inhibidores veremos un poco de las investigaciones más importantes que se han dado a lo largo de los años. En 1860 la primera patente de inhibidor de corrosión, como se mencionó con anterioridad, fue un inhibidor de corrosión verde a base de plantas, publicado por el científico británico Baldwin. Esta

patente describe un jarabe vegetal mezclado con aceite vegetal en una proporción específica. Esta mezcla se puede utilizar como un inhibidor de la corrosión no tóxico, ecológico y respetuoso con el medio ambiente y tiene un buen efecto inhibidor de la corrosión en los metales (Uwah y col., 2013).

En 1985, Lukovits y colaboradores, encontraron a través de métodos electroquímicos y de pérdida de peso que en medio corrosivo con 2 mol/L de HCl, conformado de insaturados (aromáticos y no aromáticos) compuestos (pirimidinas, derivados de benzotiazol, aminoácidos que contienen una parte aromática, piridinas y quinolinas) (Lukovits y col., 2001).

En 2004, Parikh y colaboradores, estudiaron el efecto inhibidor de la cebolla, ajo y calabaza amarga sobre el acero dulce en medio de ácido clorhídrico (Abdullah Dar 2011).

Luego en 2010, Eliane D'Elia y otros exploraron las condiciones apropiadas y encontraron que, bajo la condición de inmersión en ácido clorhídrico a 25 °C, agregando extractos de cascaras de mango, naranja, maracuyá y marañón, la eficiencia de inhibición de la corrosión del acero al carbono después de 24 h era tan alto como el 95 % (Rocha y col., 2010).

Los inhibidores de corrosión tienen la capacidad de reducir la velocidad de corrosión de un material, dicha velocidad de corrosión involucra la presencia de reacciones que puede entenderse a través de la electroquímica de corrosión que se profundizara a continuación.

1.6 Propiedades inhibidoras de las Fibras de Coco

Las fibras utilizadas en la literatura provienen del mesocarpio del coco verde (*Cocos nucifera* L.) que está compuesto por celulosa, hemicelulosas, pectina, taninos, polifenoles, flavonoides y lignina, esta última actuando como material aglutinante.

Se ha demostrado que la lignina y los compuestos fitoquímicos presentes en estas fibras poseen propiedades inhibitorias de la corrosión, ya que sus macromoléculas se adsorben a la superficie metálica, formando compuestos férricos con los productos de corrosión mediante un mecanismo de inhibición mixto.

Además, estas fibras han sido tratadas químicamente con una solución alcalina y utilizadas como agente de refuerzo en una resina epoxi. Se ha analizado la morfología y el desempeño mecánico de los materiales obtenidos, evaluando su resistencia al impacto y a la flexión en comparación con el polímero puro y los resultados de la investigación han demostrado que la incorporación de estas fibras mejora las propiedades mecánicas del material en relación con la resina sin modificar.

Asimismo, se destaca que, en las últimas décadas, los recubrimientos orgánicos han sido ampliamente utilizados para la protección de metales, reforzando la importancia del uso de materiales naturales en aplicaciones anticorrosivas. (Freitas y col., 2022)

1.7 Electroquímica de la corrosión

La corrosión de metales y aleaciones en soluciones acuosas o algún otro medio conductor iónico se produce en base a mecanismos electroquímicos. Se requieren cuatro elementos básicos para que ocurran las reacciones electroquímicas de corrosión: ánodo (A), cátodo (C), conductor metálico (M) y conductor electrolítico (E) (Ahmad, 2006).

En general, cuatro procesos ocurren simultáneamente cuando ocurre la reacción electroquímica de corrosión:

Cuando los iones del metal del ánodo abandonan la superficie del metal y entran en la solución, dejan electrones en la superficie del metal, de modo que el metal del ánodo se oxida como se observa en la Figura 15. La reacción del ánodo (corrosión) se puede escribir como la ecuación de reacción.

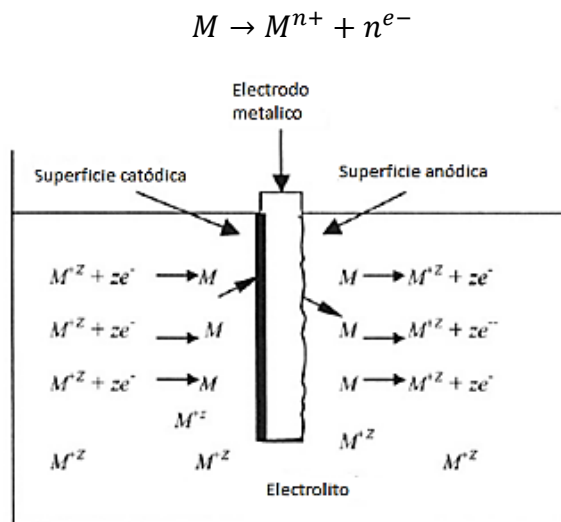


Figura 15. Esquema de una celda electroquímica (Pérez, 2016).

Los iones metálicos u otros grupos se mueven del ánodo al cátodo en el electrolito conductor de iones. Hay aniones y cationes en el electrolito, y los aniones tienen carga negativa y se mueven hacia el ánodo. El catión tiene carga positiva y se mueve hacia el cátodo. Por lo general, hay una variedad de iones que participan en la reacción en el electrolito. La reacción de reducción más común que ocurre en el cátodo es la reducción de iones de hidrógeno y oxígeno, como se observa en la Figura 16. Los electrones que salen de la región del ánodo se transfieren a la región del cátodo a través del conductor metálico.

La ausencia de cada uno de los cuatro procesos anteriores detendrá la reacción de corrosión. Estos cuatro procesos establecen un equilibrio tal que las velocidades de reacción en el cátodo y el ánodo son iguales, y las curvas de polarización electroquímica pueden usarse para determinar las velocidades de las reacciones anódica y catódica (Jones, 1996; During, 2018).

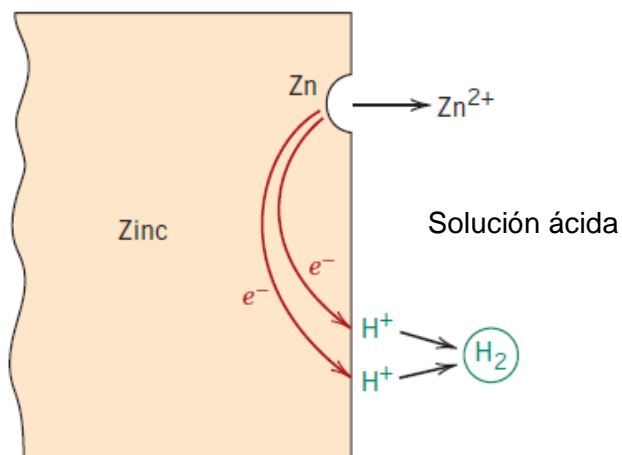


Figura 16. Las reacciones electroquímicas asociado con la corrosión del zinc en una solución ácida (Callister, 2007).

1.8 Curvas de polarización potenciodinámicas

Tafel era un químico orgánico, y sus principales investigaciones en aquella época se centraban en la síntesis de materia orgánica mediante la reducción de hidratos de carbono y la modificación de la materia orgánica, incluyendo azúcares hexosas, compuestos heterocíclicos, etc. Durante el proceso de investigación, Tafel descubrió que algunos compuestos son difíciles de sintetizar mediante reacciones homogéneas tradicionales, por lo que es necesario romper con la tradición, encontrar nuevas formas y encontrar nuevos métodos de síntesis. Tafel hizo un intento preliminar de preparar sustancias orgánicas mediante reducción catódica electroquímica y, mediante experimentos, descubrió que algunas sustancias orgánicas que no podían reducirse con métodos químicos tradicionales, pero si podían reducirse con éxito mediante métodos electroquímicos. El trabajo de Tafel sobre la síntesis electroquímica de la estircnina fue de gran importancia. Su artículo sobre la reducción electroquímica de la estircnina fue su primer artículo sobre electroquímica. En este artículo demostró que ambos átomos de oxígeno de la estircnina se pueden reducir, lo que no se puede lograr con otros métodos no electroquímicos. En algunos artículos posteriores, también intentó utilizar la reducción electroquímica para reducir algunos otros compuestos orgánicos.

Durante el proceso de investigación, Tafel descubrió que, si el sobrepotencial de desprendimiento de hidrógeno del electrodo metálico es bajo, la reacción de desprendimiento de hidrógeno se producirá fácilmente y se inhibirá la reacción de reducción de la materia orgánica. Para buscar materiales de electrodos más efectivos, Tafel realizó un estudio sistemático sobre la reacción de evolución de hidrógeno de electrodos metálicos como Pt, Ni, Cu, Au, Bi y Sn, y obtuvo la relación entre densidad de corriente y potencial en diferentes electrodos metálicos como se muestra en la Figura 17 (Burnstein, 2005).

En 1905, Tafel publicó un artículo titulado “Investigación sobre la polarización en el proceso de precipitación catódica del hidrógeno” según su traducción al español, en el que se propuso por primera vez la fórmula de Tafel:

$$\begin{aligned}\eta &= a + b \log \log (i) \\ \eta &= U - U_0 \\ b &= 2.3 \frac{RT}{\alpha F}\end{aligned}$$

η es el sobrepotencial, i es la densidad de corriente, a y b son constantes, donde b se llama pendiente de Tafel, R es la constante de los gases, T es la temperatura, α es el coeficiente de transferencia de electrones y F es la constante de Faraday (Tafel, 1905; Burnstein, 2005; Fang y col., 2014).

Al estudiar el proceso de evolución del cátodo del hidrógeno, Tafel utilizó la fórmula empírica anterior para proporcionar una descripción cuantitativa del proceso cinético del electrodo por primera vez. Aunque Tafel propuso una ecuación de relación lineal entre el potencial y el logaritmo de la corriente, no entendió completamente el significado de este descubrimiento, ni entendió el mecanismo interno de la fórmula en sí.

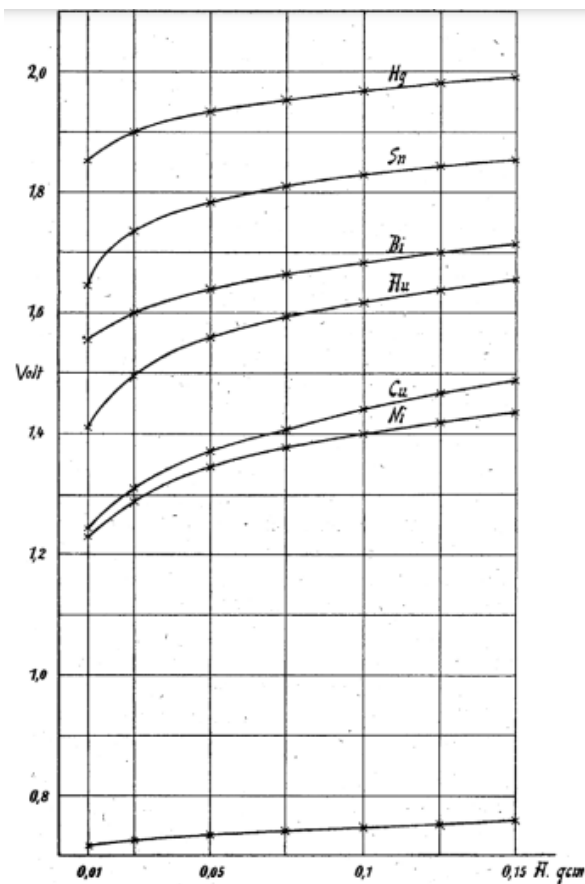


Figura 17. Curvas obtenidas por Tafel para la dependencia del potencial catódico y la densidad de corriente (Tafel ,1905).

En los más de 20 años transcurridos desde que Tafel publicó su artículo, ha habido una falta de comprensión profunda de la variación lineal del sobrepotencial con el logaritmo de la densidad de corriente en la dinámica de los electrodos. Alrededor de 1930, Butler y Volmer asumieron que los pasos para ganar o perder electrones eran pasos elementales y aplicaron la teoría del estado de transición y la ecuación de Nernst en cinética química para derivar los principios básicos de la cinética del proceso de electrodos. La ecuación de Butler-Volmer se muestra a continuación:

$$i = i_{fd} - i_{rev} = i_0 \exp \exp \left(\frac{\alpha \eta F}{RT} \right) - i_0 \exp \left(\frac{-(1 - \alpha) \eta F}{RT} \right)$$

i_{fd} es la densidad de corriente directa, i_{rev} es la densidad de corriente inversa e i_0 es la densidad de corriente de intercambio.

Se puede ver en la ecuación anterior que solo una parte de la energía eléctrica puede causar cambios en el potencial del electrodo durante la reacción electroquímica, y el sobrepotencial es el regulador de la velocidad de la reacción electroquímica. Varios órdenes de magnitud de cambios en la velocidad de la reacción electroquímica pueden lograrse controlando el sobrepotencial.

La ecuación de Butler-Volmer contiene dos partes: corriente anódica y catódica. Durante el proceso de investigación, Volmer y otros descubrieron que la corriente neta de la reacción electroquímica es igual a la suma de la corriente del ánodo y la corriente del cátodo en el proceso del electrodo. Cuando el sobrepotencial del cátodo es grande y la densidad de corriente de reducción aumenta, la densidad de corriente de oxidación disminuye, de modo que la densidad de corriente de reducción es rápidamente mucho mayor que la densidad de corriente de oxidación, por lo que la densidad de corriente de oxidación puede ignorarse, y viceversa. La ecuación simplificada es la siguiente:

$$\eta = -\left(\frac{2.303RT}{\alpha F}\right) \log i_0 + \left(\frac{2.303RT}{\alpha F}\right) \log i$$

Comparando la fórmula de Tafel, podemos ver que las constantes empíricas

$$a = \frac{2.3 RT}{\alpha F} \log i_0$$

$$b = \frac{-2.3 RT}{\alpha F}$$

Cuando el sobrepotencial es mayor que 52 mV, la densidad de corriente aumenta exponencialmente con el aumento del sobrepotencial, y cuando el sobrepotencial es constante, la densidad de corriente es proporcional a la densidad de corriente de intercambio. Algunos parámetros importantes del proceso del electrodo, como la densidad de corriente de intercambio, el coeficiente de transferencia de carga, etc., se pueden calcular utilizando la fórmula de Tafel de cátodo y ánodo y el logaritmo de

corriente y el diagrama de sobrepotencial Figura 18 (Bard y col., 2001; Alfaro y col., 2021; Dickinson y col., 2020; Tafel, 1905; Gabe, 2005).

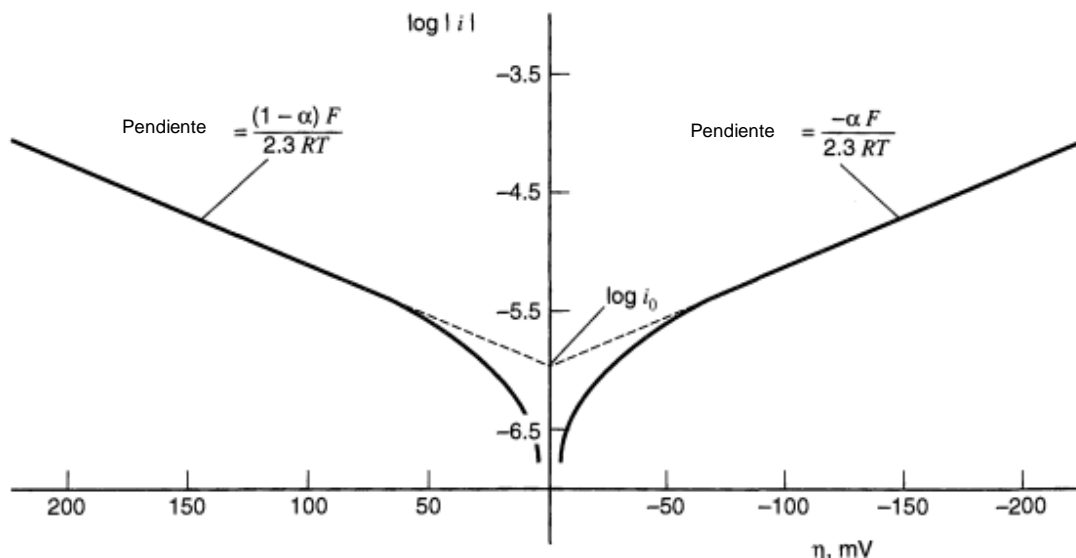


Figura 18. Gráfico de Tafel para las ramas anódica y catódica de la curva de sobrepotencial de corriente para $O + e \leftrightarrow R$ con $\alpha = 0.5$, $T = 298 \text{ K}$ y $j_0 = 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ (Bard, 2001).

1.9 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

La impedancia (Z) se define como la suma vectorial de la resistencia (R) y la reactancia (jX), esta última determina si un componente es un inductor o un capacitor, y se define de manera eléctrica con la siguiente ecuación.

$$Z = R + jX$$

La impedancia faradaica se aborda en relación con una fuente de corriente alterna y se mide en función de la frecuencia con la que cambia la dirección del sistema. Las mediciones implican señales de excitación de baja amplitud para mantener un comportamiento lineal.

Para medir la impedancia, se utiliza una celda con una solución de par redox como se muestra en la Figura 19, fijando el potencial del electrodo de trabajo. La variación en la frecuencia determina los valores de resistencia (R) y capacitancia (C).

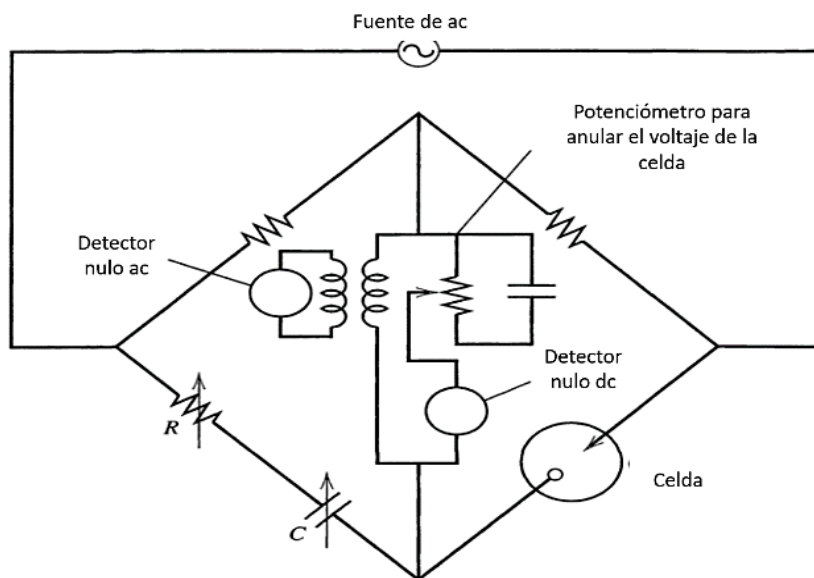


Figura 19. Circuito puente para mediciones de impedancia electroquímica (Bard 2001).

La relación entre la impedancia y la frecuencia puede visualizarse en diferentes diagramas, siendo uno el de Bode, el logaritmo de la impedancia en contra del logaritmo de la frecuencia como se muestra en la Figura 20.

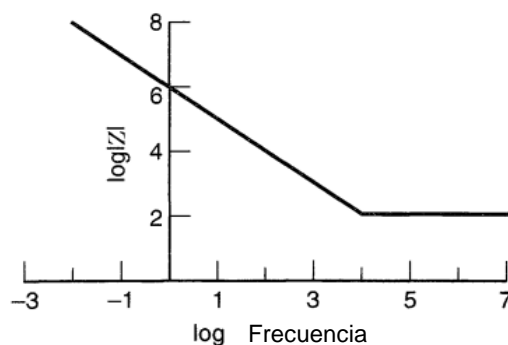


Figura 20. Gráficos de Bode para un circuito RC en serie con $R = 100 \text{ } \Omega$ y $C = 1 \text{ } \mu\text{F}$. (Bard, 2001).

Otra versión alternativa es el diagrama de Nyquist en donde se representa el valor de la impedancia imaginaria contra la impedancia real como se muestra en la Figura 21.

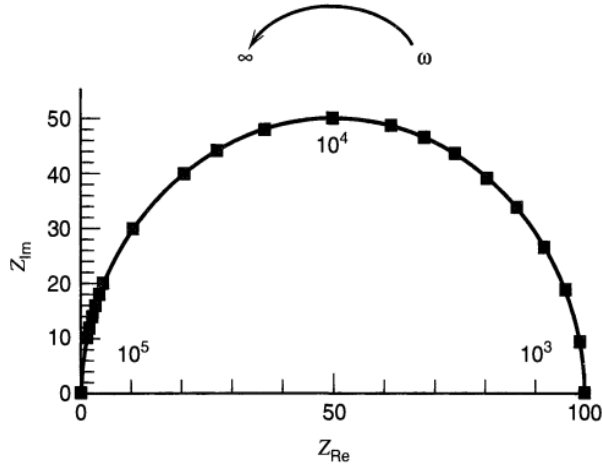


Figura 21. Gráfico de Nyquist para un circuito RC paralelo con $R = 100\Omega$ y $C = 1 \mu F$. (Bard, 2001).

Las celdas electroquímicas se consideran como circuitos equivalentes, representados por resistencias y capacitores. La impedancia faradaica no es ideal y varía con la frecuencia. Se utiliza un circuito equivalente para representar el rendimiento de la celda a una frecuencia dada, identificando valores de resistencia y capacitancia. Una desventaja de los circuitos equivalentes es que solo en los casos más simples se puede identificar los elementos individuales del circuito con los procesos de la celda electroquímica como se muestra en la Figura 22.

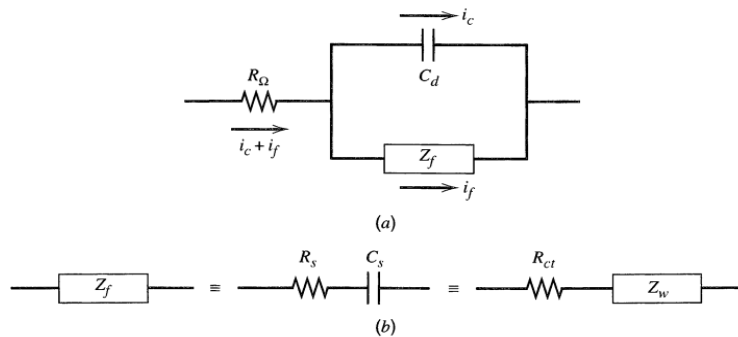


Figura 22. (a) Circuito equivalente de una celda electroquímica. (b) Subdivisión de Z_f en R_s y C_s , o en R_{ct} y Z_w (Bard, 2001).

La espectroscopia de impedancia electroquímica es una técnica reciente que determina la impedancia total aplicando una perturbación senoidal de potencial eléctrico de frecuencia variable. Se calculan los elementos individuales utilizando ecuaciones específicas. A bajas frecuencias, la relación entre ellas es lineal, mientras que a altas frecuencias la resistencia y la capacitancia de doble capa son relevantes. Fue desarrollado por Sluyters y su equipo, se trata de la variación de la impedancia total en el plano complejo, como en un gráfico de Nyquist. En el que con las siguientes ecuaciones se puede calcular los elementos individuales.

$$Z_{Re} = R_{\Omega} \frac{R_{ct} + \sigma \omega^{-\frac{1}{2}}}{(C_d \sigma \omega^{\frac{1}{2}} + 1)^2 + \omega^2 C_d^2 (R_{ct} + \sigma \omega^{-\frac{1}{2}})^2}$$

$$Z_{Im} = \frac{\omega C_d (R_{ct} + \sigma \omega^{-\frac{1}{2}})^2 + \sigma \omega^{-\frac{1}{2}} (\omega^{\frac{1}{2}} C_d \sigma + 1)}{(C_d \sigma \omega^{\frac{1}{2}} + 1)^2 + \omega^2 C_d^2 (R_{ct} + \sigma \omega^{-\frac{1}{2}})^2}$$

Donde Z_{Re} es la impedancia real, Z_{Im} es la impedancia imaginaria, R_{Ω} es la resistencia de la solución, R_{ct} es la resistencia de contacto, σ es la conductividad eléctrica, ω es frecuencia angular y C_d es la capacitancia de la doble capa.

Se puede obtener la información de la celda para diferentes frecuencias. Para un escenario en donde se aplican bajas frecuencias, cuando el valor de ω tiende a 0.

$$Z_{Im} = Z_{Re} - R_{\Omega} - R_{ct} + 2\sigma^2 C_d$$

Por lo tanto, la relación entre ambas debe de ser lineal y tener una pendiente unitaria como se muestra en la Figura 23. La línea extrapolada al eje corta en todo lo demás. Por lo que la dependencia de la frecuencia en la zona de bajas frecuencias solo viene de los términos de la impedancia de Warburg.

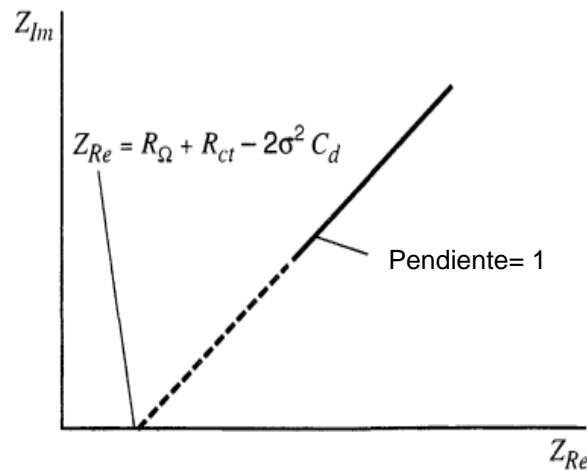


Figura 23. Gráfico del plano de impedancia para bajas frecuencias (Bard, 2001).

La impedancia de Warburg corresponde a un fenómeno de difusión semi-infinita que no consideran los efectos de la convección o de la migración y se vuelve menos importante a medida que aumenta la frecuencia. En altas frecuencias, la impedancia proviene principalmente de la capacitancia de doble capa, en cambio en frecuencias bajas, la capacitancia ofrece alta impedancia y la corriente pasa principalmente por resistencias como se muestra en la Figura 24. Por lo tanto, la gráfica posee una forma circular como se muestra en la Figura 25.

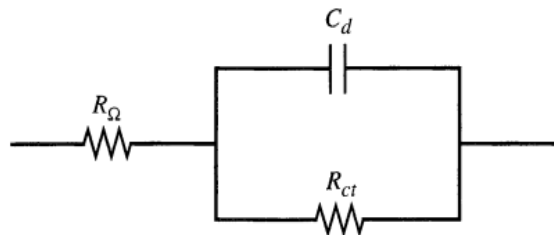


Figura 24. Circuito equivalente para un sistema en cual la impedancia de Warburg no es importante (Bard 2001).

La resistencia en el circuito se origina exclusivamente de la capacitancia de doble capa (C_d), y su contribución disminuye a cero en frecuencias elevadas, ya que no hay impedancia en ese rango. En este caso, toda la corriente es de carga, y la única resistencia presente es la resistencia óhmica. A medida que la frecuencia disminuye,

se observa una impedancia imaginaria significativa. En frecuencias muy bajas, la capacitancia exhibe una alta impedancia, lo que provoca que la mayoría de la corriente fluya a través de las resistencias competentes.

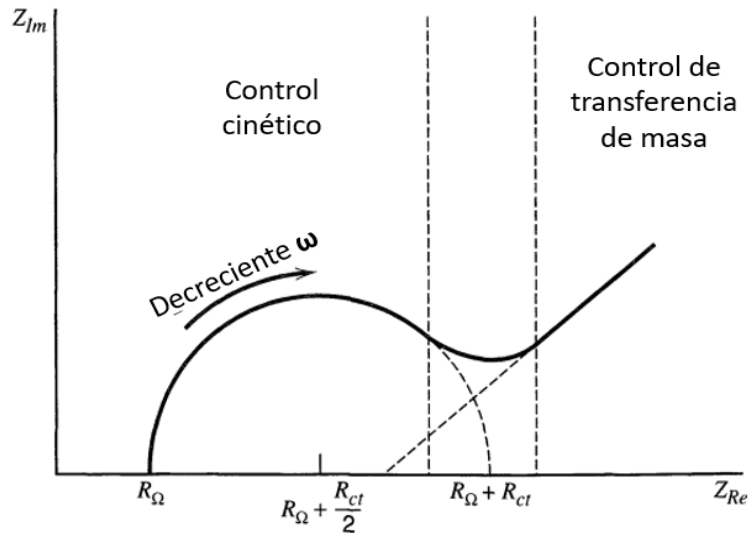


Figura 25. Gráfico del plano de impedancia para el circuito equivalente de la Figura 24 (Bard 2001).

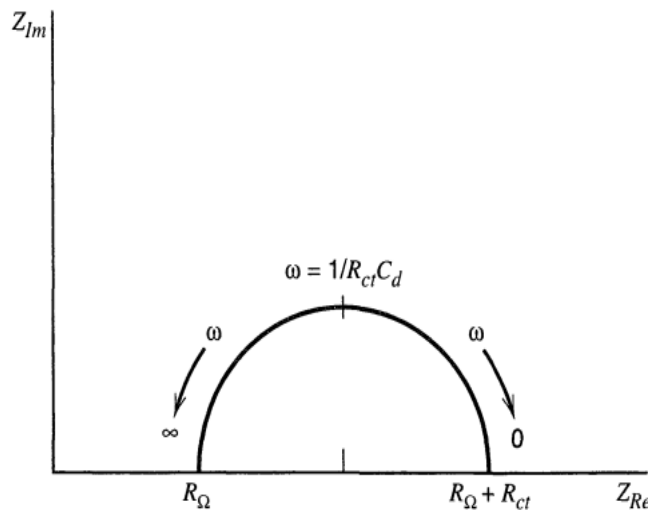


Figura 26. Diagrama de Nyquist para un sistema electroquímico. Las regiones de transferencia de masa (frecuencias bajas) y control cinético (frecuencias altas) (Bard 2001).

Un gráfico real mostrará características de ambos casos, y la resistencia de transferencia de carga determina la región de frecuencias relevante. La cinética del sistema afecta la forma del gráfico, mostrando resistencia elevada si es lenta y una región semicircular menos definida si es rápida en comparación con la resistencia de la solución como se observa en la Figura 26.

2. HIPÓTESIS

Es posible utilizar la resina de coco como un inhibidor de corrosión verde debido a su propiedad para disminuir la velocidad de corrosión de aceros en diferentes medios como ácido y salmuera en un porcentaje del 30 % evaluada mediante técnicas electroquímicas.

3. OBJETIVOS

3.1 General

Realizar el estudio de corrosión de los aceros AISI 1018, AISI 4140 e inoxidable 316 utilizando un inhibidor base resina de coco mediante curvas de polarización potenciodinámicas y espectroscopia de impedancia electroquímica.

3.2 Específicos

- Evaluar los parámetros de corrosión de los aceros AISI 1018, AISI 4140 e inoxidable 316 utilizando medio ácido y salino.
- Comparar los parámetros de corrosión obtenidos para los diferentes aceros utilizando curvas de polarización y espectroscopia de impedancia electroquímica.
- Evaluar la corrosión de los aceros bajo la norma ASTM G59-97.

4. METODOLOGÍA

4.1 Materiales

Los reactivos que se utilizaron en este proyecto fueron agua destilada, inhibidor base resina de coco, acetona, ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1 N y solución salina NACE.

Los materiales de laboratorio fueron 3 matraces aforados de 1 L, la celda electroquímica, 2 muestras de cada acero a evaluar, papel abrasivo de carburo de silicio de diferentes grados, contraelectrodo de placa de grafito y electrodo de referencia de Ag/AgCl saturado KCl. El equipo que se utilizó fue el potencióstato Biologic modelo VSP-300.

4.2 Métodos

4.2.1 Preparación de la muestra

La superficie de las piezas de acero AISI 1018, 4140 y acero inoxidable 316 se desbastaron con papel abrasivo de carburo de silicio de grados de 100, 120, 180, 220, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 800, 1200, 1500 y 2000, lo anterior con el fin de lograr una superficie completamente homogénea y libre de imperfecciones, posteriormente se lavaron con agua y jabón líquido para luego ser desengrasado con acetona y finalmente secado con aire caliente.

4.2.2 Elaboración de salmuera NACE

Se empleó la solución salina NACE como electrolito o entorno corrosivo, siguiendo el protocolo de la "Prueba de cilindro para la evaluación de inhibidores de corrosión en campos petroleros" descrito en la norma NACE 1D-182 (NACE International, 2017). Los detalles sobre la composición específica de la salmuera se encuentran detallados en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Composición utilizada para la salmuera.

Componente	Cantidad
Cloruro de sodio (NaCl)	9.62 %
Cloruro de calcio (CaCl ₂)	0.305 %
Cloruro de magnesio hexahidratado (MgCl ₂ ·6H ₂ O)	0.186 %
Agua destilada	89.89 %

4.2.3 Elaboración del medio ácido

Para la elaboración del medio ácido se utilizó ácido sulfúrico (H₂SO₄) 1N, se depositó en un matraz aforado de 1 L respectivamente, y se aforó con agua destilada.

4.2.4 Obtención del inhibidor base resina de coco

El inhibidor base resina de coco que se utilizó en esta investigación fue proporcionado por la empresa Corrosión y Protección cuya composición está protegida mediante una patente, por lo cual solo se sabe que su producción se realizó con una resina a base coco, se muestra el inhibidor en la Figura 27.



Figura 27. Inhibidor de corrosión base resina de coco a utilizar.

4.2.5 Montaje de la celda electroquímica

Para ensamblar la celda electroquímica, en primer lugar, se colocó el electrodo de trabajo que consistió en acero 1018, 4140 y acero inoxidable 316 y el contraelectrodo (placa de grafito) en los extremos de la celda. Posteriormente, se vertió la solución del electrolito preparada. En el capilar de Luggin se añadió una pequeña cantidad de electrolito y luego se insertó el electrodo de referencia de (Ag/AgCl, saturado KCl) en la parte superior de la celda. Una vez completado el montaje de la celda se conectó al potenciostato Biologic modelo VSP-300, una foto de la celda electroquímica que se utilizó y del potenciostato se muestran en la Figura 28.



Figura 28. Celda electroquímica y potenciostato.

4.2.6 Evaluación de la velocidad de corrosión

De acuerdo con las normas ASTM y NACE, se utilizaron las condiciones mostradas en el Cuadro 2 para la evaluación de la velocidad de corrosión mediante la técnica electroquímica de curvas de polarización potenciodinámicas y en el Cuadro 3 las correspondientes a la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica.

Cuadro 2. Condiciones experimentales para la aplicación de la técnica electroquímica de curvas de polarización potenciodinámicas (ASTM G 59 – 97, X; NACE 1D1812, 2017).

	Medio ácido	Medio salmuera NACE
dE/dt	0.166 mV/s	0.166 mV/s
Electrolito	H ₂ SO ₄ a 1 N	9.62 % NaCl, 0.305 % CaCl ₂ y 0.186 % MgCl ₂ *6H ₂ O
E _i	-0.030 V	-0.030 V
E _L	0.30	0.30

Cuadro 3. Condiciones experimentales para la aplicación de la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica (Díaz y col., 2019; ASTM G 59 – 97).

	Medio ácido	Medio salmuera NACE
Amplitud sinusoidal (Va)	10 mV	10 mV
Electrolito	H ₂ SO ₄ a 1 N	9.62 % NaCl, 0.305 % CaCl ₂ y 0.186 % MgCl ₂ *6H ₂ O
f _i	1 MHz	1 MHz
f _f	10 mHz	10 mHz

4.3 Diseño experimental

Para la obtención de la velocidad de corrosión de los aceros 1018, 4140 y acero inoxidable se aplicaron las técnicas electroquímicas de curvas de polarización potenciodinámicas y espectroscopia de impedancia electroquímica, las cuales se aplicaron por duplicado para cada uno de los materiales de estudio de esta investigación.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Evaluación de los parámetros de corrosión obtenidos para acero AISI 1018, 4140 y acero inoxidable 316 mediante curvas de polarización.

Las curvas de polarización del acero AISI 1018 en una solución de H_2SO_4 1 N y salmuera NACE se muestran en la Figura 29. Las cuatro curvas de polarización no muestran una transición activa-difusiva en el rango de polarización anódica, pero el acero en contacto con la salmuera sin inhibidor muestra una corriente de difusión baja y un potencial de corrosión más negativo que el mismo material, pero en contacto con H_2SO_4 sin y con inhibidor más positivos lo cual puede ser atribuido a la fuerza del electrolito para provocar el avance de la corrosión del acero. El potencial y la corriente de corrosión fueron obtenidos a través de los ajustes de las curvas de polarización los cuales se muestran en el Cuadro 4. Para el acero en contacto con H_2SO_4 y salmuera sin inhibidor de corrosión la densidad de corriente de corrosión fue de 127 y 11 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ respectivamente, las cuales son más grandes que para el mismo acero con inhibidor de corrosión con valores en promedio de 76 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y 4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ respectivamente. Los valores de potencial de corrosión fueron de -400 mV y -592 vs. Ag/AgCl (sat. KCl) para el acero sin inhibidor de corrosión y de -423 mV y -566 mV vs. Ag/AgCl (sat. KCl) para el acero con inhibidor de corrosión respectivamente, el acero 1018 con inhibidor de corrosión en contacto con H_2SO_4 y salmuera presentan en promedio un valor de potencial de corrosión más positivo. Lo anterior indica que el acero AISI 1018 con un inhibidor de corrosión expuesto a dos ambientes agresivos es más resistente a la corrosión comparado cuando este no está protegido por el inhibidor de corrosión base resina de coco.

En el Cuadro 4 se muestran los valores de velocidad de corrosión para el acero AISI 1018 sin y con inhibidor en contacto con ácido sulfúrico y salmuera, siendo de 1.47 mm/año y 0.09 mm/año sin inhibidor y de 0.89 mm/año y 0.05 mm/año con inhibidor respectivamente. Estos valores nos indican que el acero 1018 sin inhibidor presenta una velocidad de corrosión más alta como resultado del proceso de degradación al estar expuesto a una solución de salmuera y ácido.

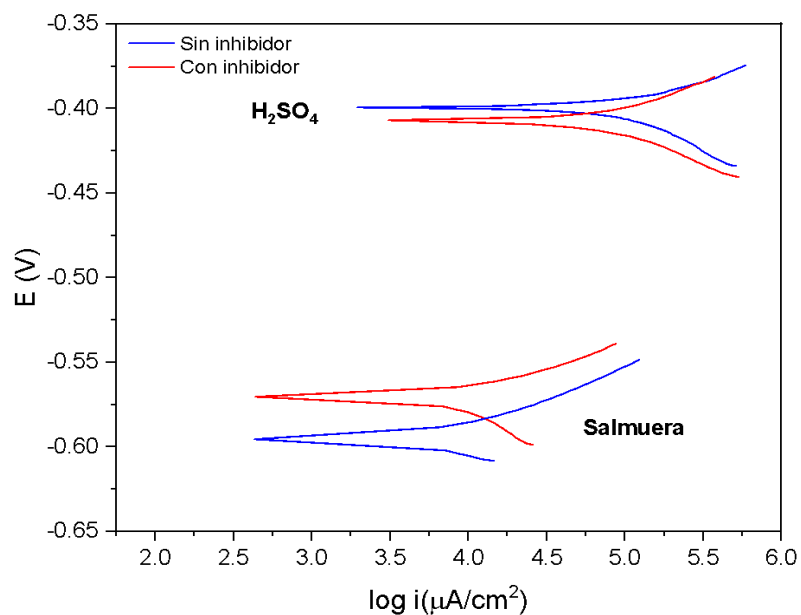


Figura 29. Curvas de polarización potenciodinámicas en H_2SO_4 1 N y salmuera NACE para muestras de acero 1018.

Cuadro 4. Parámetros electroquímicos, velocidad de corrosión y resistencia a la polarización del ajuste de curvas de polarización para acero AISI 1018.

	H_2SO_4		Salmuera NACE	
Parámetro	Sin inhibidor	Con inhibidor	Sin inhibidor	Con inhibidor
E corr (mV vs. Ag/AgCl sat (KCl))	-400.21±1.1	-423.61±4.6	-592.12±17.8	-566.15±4.4
I corr (μA/cm ²)	127.21±38.9	76.80±7.6	11.12±6.6	4.40±3.8
β _a (mV) (mV/década)	32.85±2.1	35.40±2.1	24.65±8.8	23.25±4.0
β _c (mV/década)	51.10±0.3	43.70±7	25.70±6.8	42.40±20.8
Velocidad de corrosión (mm/año)	1.47±0.5	0.89±0.09	0.09±0.08	0.05±0.04
R _p * área (Ω.cm ²)	68.5±5.9	110.7±11.2	492.8±63.5	1484±127

Por el contrario, la resistencia a la polarización del material con inhibidor de corrosión aumenta a valores de $110 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $1484 \Omega \cdot \text{cm}^2$ comparados con los valores del acero sin inhibidor de $68 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $492 \Omega \cdot \text{cm}^2$ lo cual nos indica la poca resistencia a la corrosión del material sin presencia del inhibidor de corrosión base resina de coco.

Las curvas de polarización del acero AISI 4140 en una solución de H_2SO_4 1 N y salmuera NACE se muestran en la Figura 30. Las cuatro curvas de polarización no muestran una transición activa-difusiva en el rango de polarización anódica, pero el acero en contacto con la salmuera sin inhibidor muestra una corriente de difusión baja y un potencial de corrosión más negativo que el mismo material, pero en contacto con H_2SO_4 sin y con inhibidor más positivos lo cual puede ser atribuido a la fuerza del electrolito para provocar el avance de la corrosión del acero. El potencial y la corriente de corrosión fueron obtenidos a través de los ajustes de las curvas de polarización los cuales se muestran en el Cuadro 5. Para el acero en contacto con H_2SO_4 y salmuera sin inhibidor de corrosión la densidad de corriente de corrosión fue de 155 y $4.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ respectivamente, las cuales son más grandes que para el mismo acero con inhibidor de corrosión con valores en promedio de $89 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $1.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ respectivamente. Los valores de potencial de corrosión fueron de -391 mV y -525 vs. Ag/AgCl (sat. KCl) para el acero sin inhibidor de corrosión y de -386 mV y -470 mV vs. Ag/AgCl (sat. KCl) para el acero con inhibidor de corrosión respectivamente, el acero 4140 con inhibidor de corrosión en contacto con H_2SO_4 y salmuera presentan en promedio un valor de potencial de corrosión más positivo. Lo anterior indica que el acero AISI 4140 con un inhibidor de corrosión expuesto a dos ambientes agresivos es más resistente a la corrosión comparado cuando este no está protegido por el inhibidor de corrosión base resina de coco.

En el Cuadro 5 se muestran los valores de velocidad de corrosión para el acero AISI 4140 sin y con inhibidor en contacto con ácido sulfúrico y salmuera, siendo de 1.8 mm/año y 0.06 mm/año sin inhibidor y de 1.03 mm/año y 0.02 mm/año con inhibidor respectivamente. Estos valores nos indican que el acero 4140 sin inhibidor presenta una velocidad de corrosión más alta como resultado del proceso de degradación al estar expuesto a una solución de salmuera y ácido.

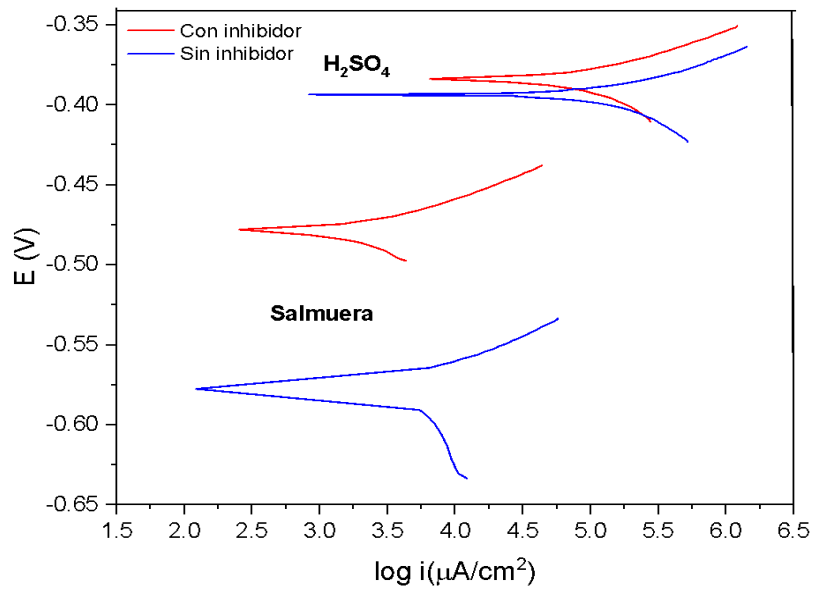


Figura 30. Curvas de polarización potenciodinámicas en H_2SO_4 1 N y salmuera NACE para muestras de acero 4140.

Cuadro 5. Parámetros electroquímicos, velocidad de corrosión y resistencia a la polarización del ajuste de curvas de polarización para acero AISI 4140.

	H_2SO_4		Salmuera NACE	
Parámetro	Sin inhibidor	Con inhibidor	Sin inhibidor	Con inhibidor
E corr (mV vs. Ag/AgCl sat (KCl))	-391.8±1.2	-386.2±3.1	-525.7±73.5	-470.8±10.3
I corr (μA/cm²)	155.5±59.4	89.1±2.8	4.8±0.04	1.8±0.9
βa (mV) (mV/década)	29.2±0.2	29±0.1	32.1±12	19.8±0.9
βc (mV/década)	53.6±9.4	48.7±5.9	108.3±56.6	59.3±35.1
Velocidad de corrosión (mm/año)	1.8±0.1	1.03±0.03	0.06±0.0004	0.02±0.007
Rp * área (Ω.cm²)	52.8±5.5	88.7±4.5	2240±1090	3572±1076

Por el contrario, la resistencia a la polarización del material con inhibidor de corrosión aumenta a valores de $88.7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $3572 \Omega \cdot \text{cm}^2$ comparados con los valores del acero sin inhibidor de $52 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $2240 \Omega \cdot \text{cm}^2$ lo cual nos indica la poca resistencia a la corrosión del material sin presencia del inhibidor de corrosión base resina de coco.

Las curvas de polarización del acero inoxidable 316 en una solución de H_2SO_4 1 N y salmuera NACE se muestran en la Figura 31. Las cuatro curvas de polarización no muestran una transición activa-difusiva en el rango de polarización anódica, pero el acero en contacto con la salmuera con inhibidor muestra una corriente de difusión baja y un potencial de corrosión más negativo que el mismo material, pero en contacto con H_2SO_4 sin y con inhibidor más positivos lo cual puede ser atribuido a la fuerza del electrolito para provocar el avance de la corrosión del acero. El potencial y la corriente de corrosión fueron obtenidos a través de los ajustes de las curvas de polarización los cuales se muestran en el Cuadro 6. Para el acero en contacto con H_2SO_4 y salmuera sin inhibidor de corrosión la densidad de corriente de corrosión fue de 110 y $0.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ respectivamente, las cuales son más grandes que para el mismo acero con inhibidor de corrosión con valores en promedio de $97 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $0.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ respectivamente. Los valores de potencial de corrosión fueron de -331 mV y -271 vs. Ag/AgCl (sat. KCl) para el acero sin inhibidor de corrosión y de -325 mV y -523 mV vs. Ag/AgCl (sat. KCl) para el acero con inhibidor de corrosión respectivamente, el acero 316 con inhibidor de corrosión en contacto con H_2SO_4 presenta en promedio un valor de potencial de corrosión más positivo. Lo anterior indica que el acero 316 con un inhibidor de corrosión expuesto a dos ambientes agresivos es resistente a la corrosión comparado cuando este no está protegido por el inhibidor de corrosión base resina de coco, la resistencia a la corrosión del material de manera general no se ve influenciada por la presencia del inhibidor de corrosión obtenida mediante curvas de polarización.

En el Cuadro 6 se muestran los valores de velocidad de corrosión para el acero inoxidable sin y con inhibidor en contacto con ácido sulfúrico y salmuera, siendo de 1.1 mm/año y 0.008 mm/año sin inhibidor y de 1.1 mm/año y 0.004 mm/año con inhibidor respectivamente.

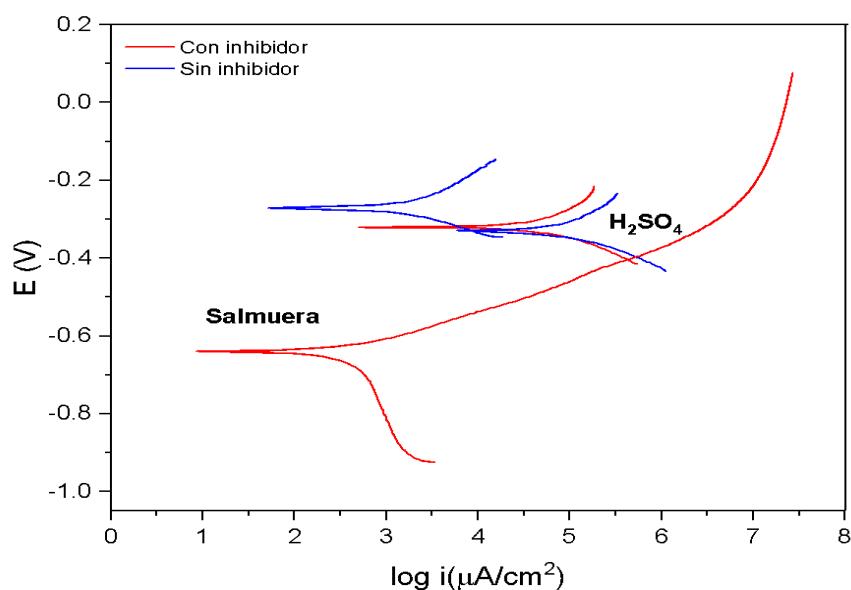


Figura 31. Curvas de polarización potenciodinámicas en H_2SO_4 1 N y salmuera NACE para muestras de acero inoxidable 316.

Cuadro 6. Parámetros electroquímicos, velocidad de corrosión y resistencia a la polarización del ajuste de curvas de polarización para acero inoxidable 316.

	H_2SO_4		Salmuera NACE	
Parámetro	Sin inhibidor	Con inhibidor	Sin inhibidor	Con inhibidor
E corr (mV vs. Ag/AgCl sat (KCl))	-331.8±2.3	-325.9±7.6	-271.2±0.5	-523.9±66.2
I corr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	110.7±30.3	97.9±31.8	0.7±0.7	0.4±0.7
β_a (mV) (mV/década)	239.7±3.5	317.5±98.5	87.7±2.5	37.1±7.8
β_c (mV/década)	99.3±14.8	115.8±6.8	63.1±6.4	374.6±95.6
Velocidad de corrosión (mm/año)	1.1±0.4	1.1±0.4	0.008±0.008	0.004±0.001
Rp * área ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	276±28	374.8±31	22714±3407	36700±9175

Estos valores nos indican que el acero 316 sin y con inhibidor presenta una velocidad de corrosión muy similar, aunque cuando está en contacto con la salmuera si aumenta su resistencia a la corrosión al tener la protección del inhibidor de corrosión base resina de coco.

Por el contrario, la resistencia a la polarización del material con inhibidor de corrosión aumenta a valores de $374 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $36700 \Omega \cdot \text{cm}^2$ comparados con los valores del acero sin inhibidor de $276 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $22714 \Omega \cdot \text{cm}^2$ lo cual nos indica la poca resistencia a la corrosión del material sin presencia del inhibidor de corrosión base resina de coco.

Las curvas de polarización del acero 1018, 4140 e inoxidable 316 en una solución de H_2SO_4 1N y de salmuera NACE se muestran en la Figura 29, 30 y 31 respectivamente. Es posible observar que la presencia del inhibidor de corrosión provoca un cambio notable en las ramas catódicas y, en menor medida, en las anódicas de las curvas de polarización, los valores del potencial de corrosión (E_{corr}) permanecen casi constantes. Por lo tanto, el inhibidor podría considerarse como un tipo mixto (Salleh y col., 2021), con una efectividad catódica predominante. Si el desplazamiento en E_{corr} (inhibido) es mayor a 85 mV desde E_{corr} (blanco), el inhibidor se denomina de tipo catódico o anódico, y si este desplazamiento es menor a 85 mV, el inhibidor se denomina de tipo mixto (Nahlé y col., 2021), las curvas de polarización obtenidas indican que el inhibidor base resina de coco actúa como un inhibidor mixto.

El acero 1018 con inhibidor en ácido sulfúrico tiene un comportamiento anódico y esto indica que el inhibidor está limitando la disolución del metal (oxidación) en la zona anódica, lo que es característico de una inhibición en el proceso de corrosión. En ácido sulfúrico, el inhibidor formar una película protectora en la superficie del acero, protegiéndolo de la disolución en la zona anódica, reduciendo la velocidad de corrosión (Pineda y col., 2021); en cambio si vemos el acero 1018 en salmuera tiende a un comportamiento catódico y esto puede estar dominada por la reducción de oxígeno o protones en la zona catódica. El inhibidor interfiere con esta reacción catódica (reducción de oxígeno o protones) y, por lo tanto, se observa un

comportamiento catódico. En este caso, el inhibidor está dificultando la reducción de oxígeno en la superficie metálica, lo que disminuye la tasa de corrosión, especialmente en ambientes donde la reducción de oxígeno es la principal fuente de corrosión. En cambio, en el acero 4140 se observa que el inhibidor de corrosión tiende a un comportamiento anódico.

Y en el caso del acero inoxidable 316 se observa que en ambos medios tiende a un comportamiento catódico y esto puede deberse a que el acero inoxidable 316 es conocido por su alta resistencia a la corrosión debido a la formación de una capa pasiva de óxido de cromo y níquel, que protege la superficie del material en una amplia variedad de ambientes, incluidos ácidos y soluciones salinas; El comportamiento catódico en ambos medios (ácido sulfúrico y salmuera) indica que el inhibidor puede estar actuando sobre las reacciones catódicas (reducción de oxígeno) en lugar de sobre las reacciones anódicas. Dado que el acero inoxidable ya está pasivado, el inhibidor podría estar interviniendo en la reducción de oxígeno, reduciendo la actividad catódica y, por lo tanto, disminuyendo la tasa de corrosión. (Ahmed y col., 2023); (Km y col., 2024).

En el Cuadro 4, Podemos notar que la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) se desplaza hacia valores más bajos debido a la aplicación del inhibidor y el incremento en el valor de la resistencia a la polarización (R_p) están asociados con una menor tendencia a la corrosión. Por lo tanto, la R_p es una variable que nos indica la eficacia del inhibidor en cuanto a su capacidad anticorrosiva (La Rosa y col., 2022).

En la Figura 32 podemos observar la velocidad de corrosión promedio (mm/año) para los diferentes materiales estudiados en H_2SO_4 1 N y salmuera NACE sin y con inhibidor, es posible identificar que la velocidad de corrosión baja un 50% aproximadamente cuando se le aplica el inhibidor en el H_2SO_4 1 N y un 30% aproximadamente cuando se le aplica el inhibidor de corrosión en salmuera; además si observamos la R_p (que implica la capacidad del material para resistir la corrosión o, en otras palabras, la dificultad que presenta el proceso de corrosión para desarrollarse de manera significativa) observamos que se obtuvo una R_p mayor cuando el inhibidor está presente.

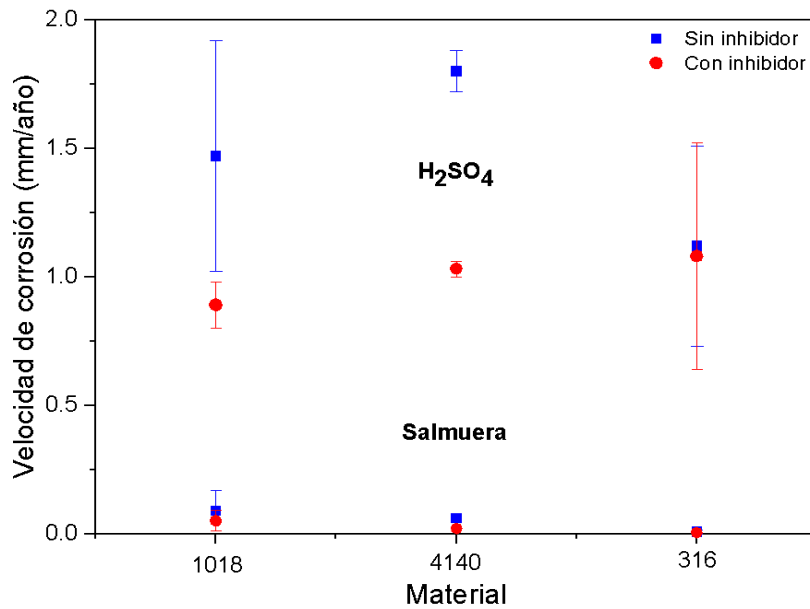


Figura 32. Velocidad de corrosión (mm/año) para diferente material en H₂SO₄ 1 N y salmuera NACE sin y con inhibidor obtenida por curvas de polarización.

5.2 Evaluación de los parámetros de corrosión obtenidos para acero AISI 1018, 4140 y acero inoxidable 316 mediante espectroscopia de impedancia electroquímica.

Las Figuras 33 y 34 muestran los diagramas de Nyquist obtenidos para el acero 1018 sin y con inhibidor de corrosión en contacto con un electrolito de H₂SO₄ 1 N y salmuera NACE. Los diagramas muestran formas similares y diferentes tamaños en todos los casos, revelando que el mismo proceso fundamental ocurre sobre las superficies. Para el acero sin y con inhibidor en ácido sulfúrico los valores de resistencia a la transferencia de carga fueron de 39 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ y 95 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ respectivamente. Para el acero sin y con inhibidor en salmuera NACE los valores de resistencia a la transferencia de carga fueron de 744 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ y 4896 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ respectivamente. Así, el acero 1018 independiente del electrolito de prueba, pero con inhibidor de corrosión ofrece una mayor resistencia a la corrosión. Los cuatro diagramas de Nyquist mostrados en las Figuras 33 y 34 son similares, consistiendo en un simple semicírculo en la región de alta frecuencia significando que la reacción es controlada por la carga.

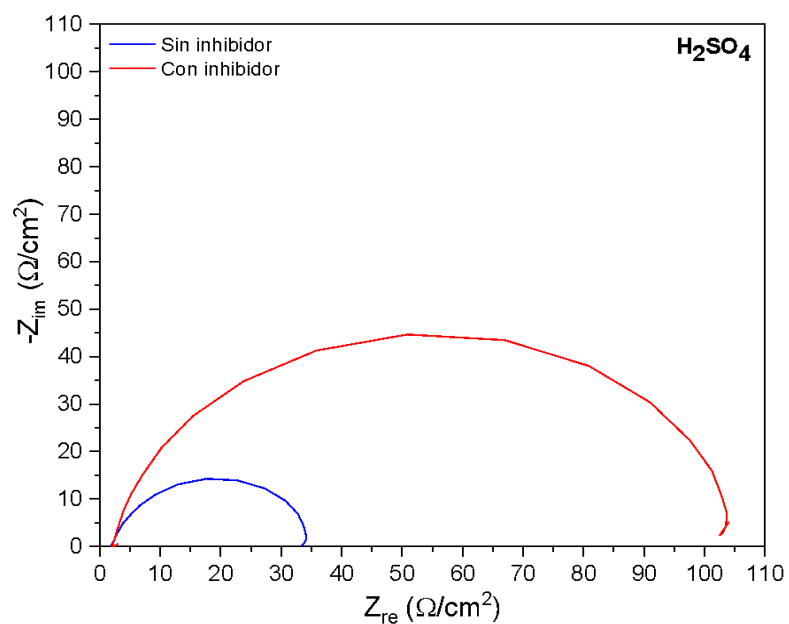


Figura 33. Diagramas de Nyquist para acero AISI 1018 sin y con inhibidor de corrosión en H_2SO_4 1 N.

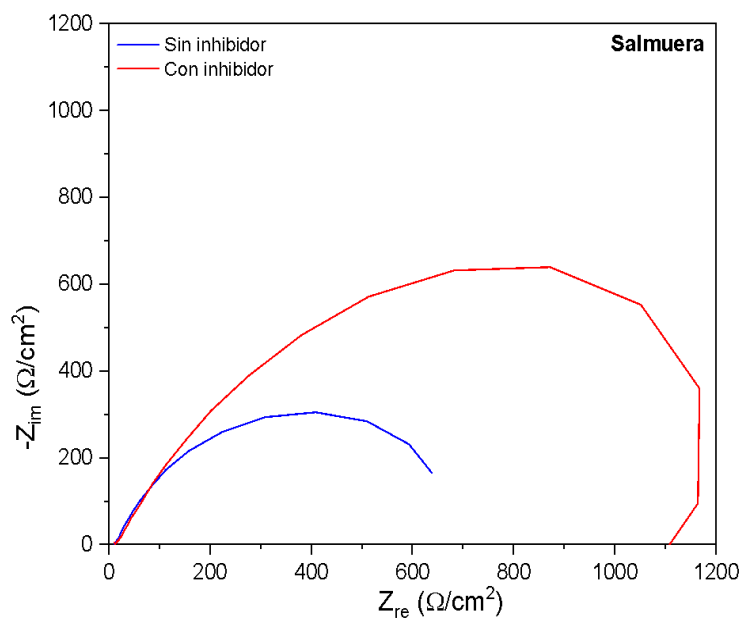


Figura 34. Diagramas de Nyquist para acero AISI 1018 sin y con inhibidor de corrosión en salmuera NACE.

Un circuito eléctrico equivalente es mostrado en la Figura 35 fue utilizado para simular la interfase metal/solución y para analizar los diagramas de Nyquist de las Figuras 33, 34, 36, 37, 38 y 39.

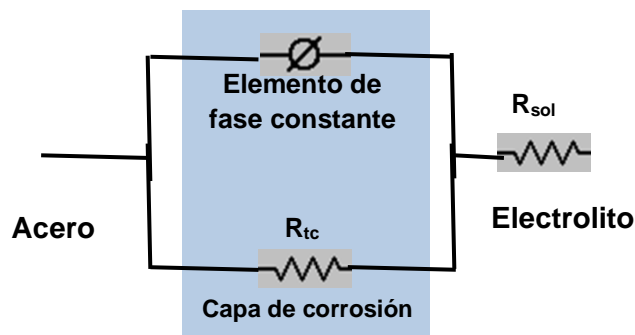


Figura 35. Circuito eléctrico equivalente con una capa de corrosión sobre la superficie de acero AISI 1018, acero 4140 y acero inoxidable 316 en contacto con una solución 1 N de H_2SO_4 y salmuera NACE.

La resistencia a la transferencia de carga R_{tc} y la capacitancia de la doble capa electroquímica C_{dl} fueron compiladas en el Cuadro 7 con el fin de realizar las comparaciones. La presencia de un simple semicírculo en los diagramas de Nyquist indica que el proceso corrosivo de estas superficies involucra una constante de tiempo.

Para los diagramas de Nyquist, la curvas azules y rojas corresponden a muestras de acero sin inhibidor y con inhibidor, respectivamente. De las Figuras 33 a la 39, se observa que los aceros con inhibidor exhiben un radio de curvatura mucho mayor que los aceros sin inhibidor, lo que indica un aumento notable en la resistencia a la corrosión.

El inhibidor base resina de coco funciona debido a la presencia de fitoquímicos, estos son compuestos bioactivos naturales presentes en las plantas, incluidos los cocoteros y son los responsables de la inhibición de la corrosión, además se sabe que el porcentaje de eficacia de inhibición de los inhibidores de corrosión verdes está

relacionado con la existencia de heteroátomos y electrones pi en los extractos de plantas (Salleh y col., 2021).

Cuadro 7. Parámetros electroquímicos, resistencia del electrolito y resistencia a la transferencia de carga obtenidos del ajuste de diagramas de Nyquist para acero AISI 1018.

	Ácido sulfúrico		Salmuera	
Parámetro	Sin inhibidor	Con Inhibidor	Sin inhibidor	Con inhibidor
R_{sol} (Ohm.cm ²)	1.9±0.04	6.9±6.8	13.1±0.4	14.3±1.4
R_{tc} (Ohm.cm ²)	39.2±7.7	95.5±14	744.7±73.2	4896±4399
Y_0 (S*s ^a)	3x10-4±1.2e-4	5x10-4±6x10-4	9x10-4±6.4x10-5	2x10-4±1.7x10-4
a	0.87±0.01	0.84±0.09	0.80±0.001	0.66±0.12
β_a (mV/década)	32.85±2.1	35.4±2.1	24.65±8.8	23.25±4
β_c (mV/década)	51.1±0.3	43.7±7	25.7±6.8	42.4±20.8
i_{corr} (μA/cm ²)	220.4±11	216.8±59	7.34	1.3±0.07
Velocidad de corrosión (mm/año)	2.6±1.2	2.5±1.2	0.085±0.009	0.015±0.005

Con el fin de lograr un ajuste más flexible de los resultados obtenidos por la técnica, el elemento de fase constante (CPE, designado como Q) fue usado en lugar de una capacitancia pura. La admitancia del CPE ($Y-Q(\omega)$) puede ser expresada como: $Y-Q(\omega) = Y_0(j\omega)^n$ donde j es el número imaginario y ω es la frecuencia angular. Y_0 y n son definidos como la constante de la admitancia y el exponente empírico del CPE respectivamente. El parámetro n es generalmente aceptado como la medida de la rugosidad superficial el cual tiene un valor en el rango de 0 y 1. Esta muestra la no-idealidad del bucle capacitivo observado en los diagramas de Nyquist (Habib y col., 2013).

Las Figuras 36 y 37 muestran los diagramas de Nyquist obtenidos para el acero 4140 sin y con inhibidor de corrosión en contacto con un electrolito de H_2SO_4 1 N y salmuera NACE. Los diagramas muestran formas similares y diferentes tamaños en todos los casos, revelando que el mismo proceso fundamental ocurre sobre las superficies. Para el acero sin y con inhibidor en ácido sulfúrico los valores de resistencia a la transferencia de carga fueron de $20 \Omega\cdot\text{cm}^2$ y $76 \Omega\cdot\text{cm}^2$ respectivamente. Para el acero sin y con inhibidor en salmuera NACE los valores de resistencia a la transferencia de carga fueron de $1127 \Omega\cdot\text{cm}^2$ y $5339 \Omega\cdot\text{cm}^2$ respectivamente. Así, el acero 4140 independiente del electrolito de prueba, pero con inhibidor de corrosión ofrece una mayor resistencia a la corrosión. Los cuatro diagramas de Nyquist mostrados en las Figuras 36 y 37 son similares, consistiendo en un simple semicírculo en la región de alta frecuencia significando que la reacción es controlada por la carga.

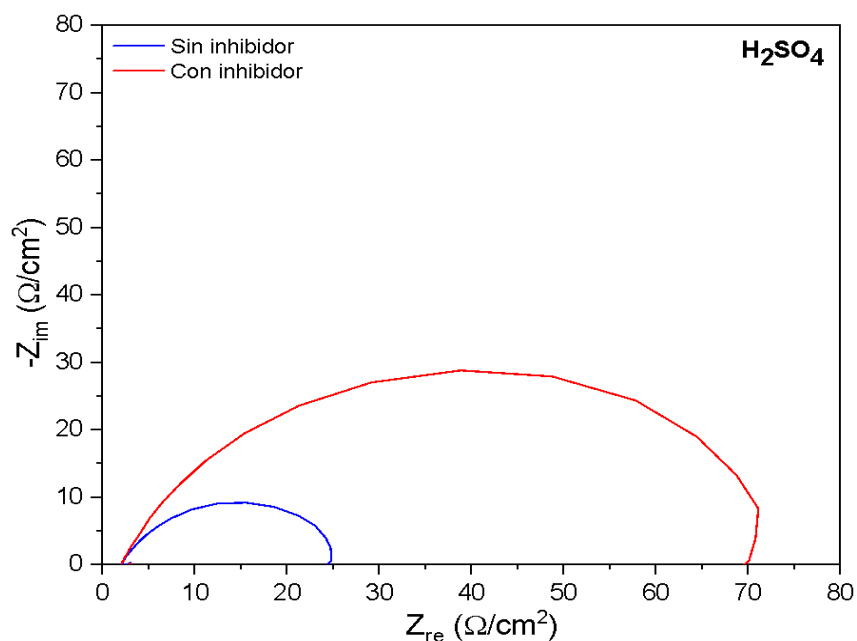


Figura 36. Diagramas de Nyquist para acero 4140 sin y con inhibidor de corrosión en H_2SO_4 1 N.

La resistencia a la transferencia de carga R_{tc} y la capacitancia de la doble capa electroquímica C_{dl} fueron compiladas en el Cuadro 8 con el fin de realizar las comparaciones. La presencia de un simple semicírculo en los diagramas de Nyquist indica que el proceso corrosivo de estas superficies involucra una constante de tiempo.

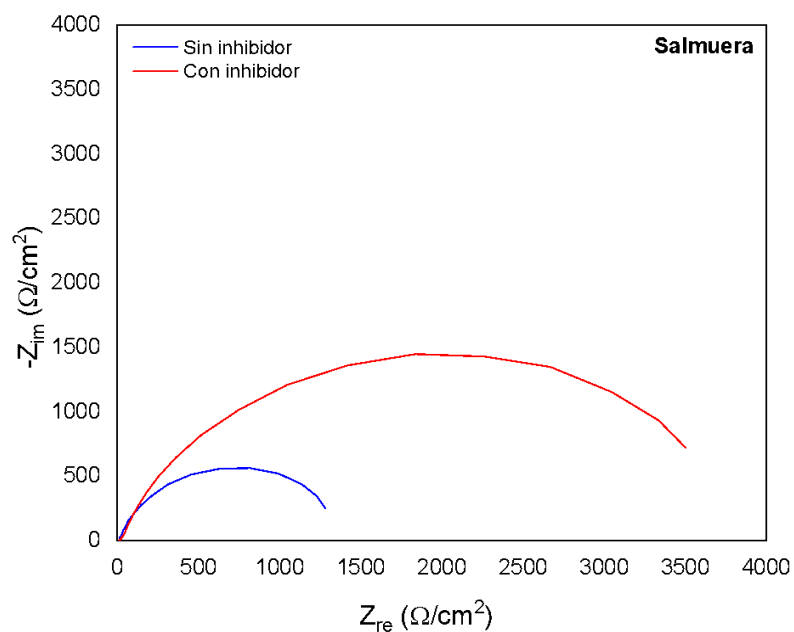


Figura 37. Diagramas de Nyquist para acero 4140 sin y con inhibidor de corrosión en salmuera NACE.

Cuadro 8. Parámetros electroquímicos, resistencia del electrolito y resistencia a la transferencia de carga obtenidos del ajuste de diagramas de Nyquist para acero AISI 4140.

	Ácido sulfúrico		Salmuera	
Parámetro	Sin inhibidor	Con Inhibidor	Sin inhibidor	Con inhibidor
R_{sol} (Ohm.cm ²)	2.1±0.06	1.9±0.03	12.3±0.83	21.8±3.3
R_{tc} (Ohm.cm ²)	20.3±6.1	76.3±2.4	1127.8±396.3	5339±1770
Y_0 (S*s ^a)	4.5x10- 4±7.1x10-7	2.4x10- 4±2.2x10-5	7.9x10- 4±2.8x10-4	6x10- 5±4.4x10-6
a	0.80±0.009	0.82±0	0.84±0.007	0.78±0.007
β_a (mV/década)	29.2±0.2	29±0.1	32.1±12	19.8±0.9
β_c (mV/década)	53.6±9.4	48.7±5.9	108.3±56.6	59.3±35.1
i_{corr} (μA/cm ²)	403.5±5	103.5±3	9.5±7	1.2±0.4
Velocidad de corrosión (mm/año)	4.7±1.2	1.2±0.1	0.11±0.008	0.014±0.005

Las Figuras 38 y 39 muestran los diagramas de Nyquist obtenidos para el acero inoxidable 316 sin y con inhibidor de corrosión en contacto con un electrolito de H₂SO₄ 1 N y salmuera NACE. Los diagramas muestran formas similares y diferentes tamaños en todos los casos, revelando que el mismo proceso fundamental ocurre sobre las superficies. Para el acero sin y con inhibidor en ácido sulfúrico los valores de resistencia a la transferencia de carga fueron de 172 Ω.cm² y 332 Ω.cm² respectivamente. Para el acero sin y con inhibidor en salmuera NACE los valores de resistencia a la transferencia de carga fueron de 7675 Ω.cm² y 13547 Ω.cm² respectivamente. Así, el acero inoxidable 316 independiente del electrolito de prueba, pero con inhibidor de corrosión ofrece una mayor resistencia a la corrosión. Los cuatro diagramas de Nyquist mostrados en las Figuras 38 y 39 son similares, consistiendo en un simple semicírculo en la región de alta frecuencia significando que la reacción es controlada por la carga.

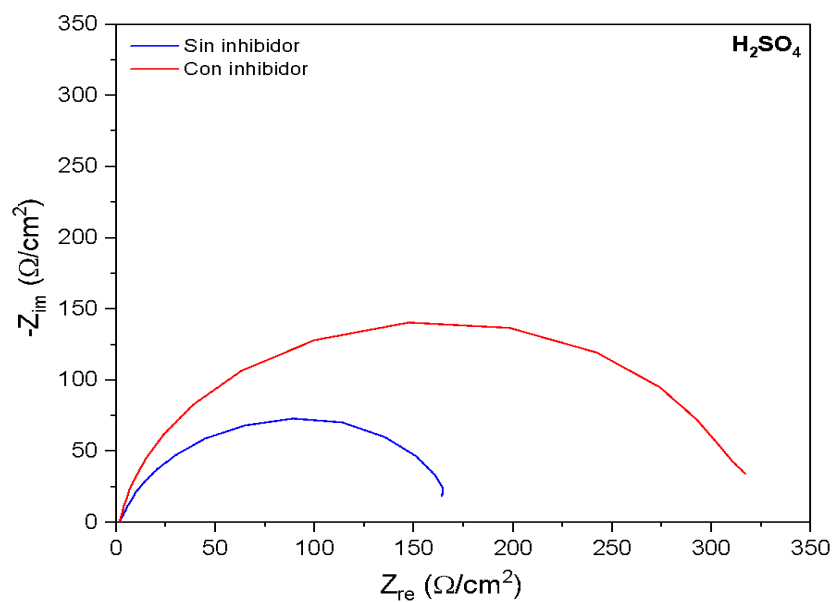


Figura 38. Diagramas de Nyquist para acero inoxidable 316 sin y con inhibidor de corrosión en H₂SO₄ 1 N.

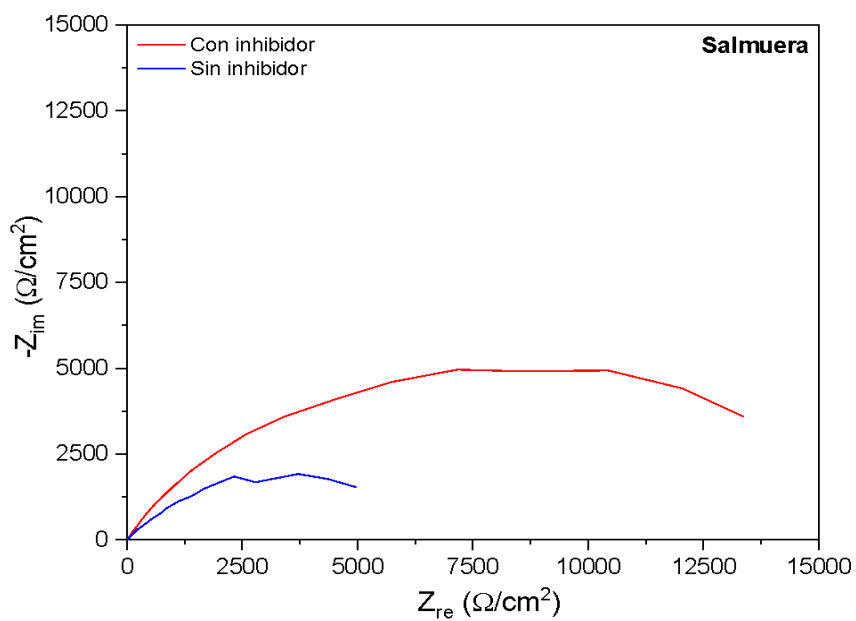


Figura 39. Diagramas de Nyquist para acero inoxidable 316 sin y con inhibidor de corrosión en salmuera NACE.

La resistencia a la transferencia de carga R_{tc} y la capacitancia de la doble capa electroquímica C_{dl} fueron compiladas en el Cuadro 9 con el fin de realizar las comparaciones. La presencia de un simple semicírculo en los diagramas de Nyquist indica que el proceso corrosivo de estas superficies involucra una constante de tiempo.

Los valores de porcentajes de disminución de la velocidad de corrosión obtenidos en este trabajo de tesis en comparación con los de se encontraron en la literatura de extractos de plantas van desde un intervalo del 50 % al 99 % (Salleh y col., 2021), podemos decir que nuestro inhibidor de corrosión entra en dicho rango, por tanto, es una excelente alternativa para sustituir a los inhibidores que pueden llegar a ser altamente dañinos para el medio ambiente, por ejemplo , los cromatos, que han suscitado con frecuencia preocupaciones ambientales debido a sus efectos perjudiciales sobre el suelo y la vida acuática (Ahmed y col., 2024).

Cuadro 9. Parámetros electroquímicos, resistencia del electrolito y resistencia a la transferencia de carga obtenidos del ajuste de diagramas de Nyquist para acero inoxidable 316.

	Ácido sulfúrico		Salmuera	
Parámetro	Sin inhibidor	Con Inhibidor	Sin inhibidor	Con inhibidor
R_{sol} (Ohm.cm ²)	2.1±0.12	2.1±0.16	8±6.2	13±5.4
R_{tc} (Ohm.cm ²)	172.3±11	332.4±15.8	7675±1011	13547±3653
Y_0 (S*s ^a)	3.6x10-4±1x10-4	9.8x10-5±7x10-7	3x10-4±4.9x10-5	4.2x10-5±4.8x10-5
a	0.83±0.03	0.89±0.02	0.66±0.04	0.61±0.12
β_a (mV/década)	239.7±3.5	317.5±98.5	87.7±2.5	37.1±7.8
β_c (mV/década)	99.3±14.8	115.8±6.8	63.1±6.4	374.6±95.6
i_{corr} (μA/cm ²)	177±9	110.4±12	2.1±0.5	1.1±0.3
Velocidad de corrosión (mm/año)	2.0±0.5	1.3±0.5	0.012±0.003	0.012±0.004

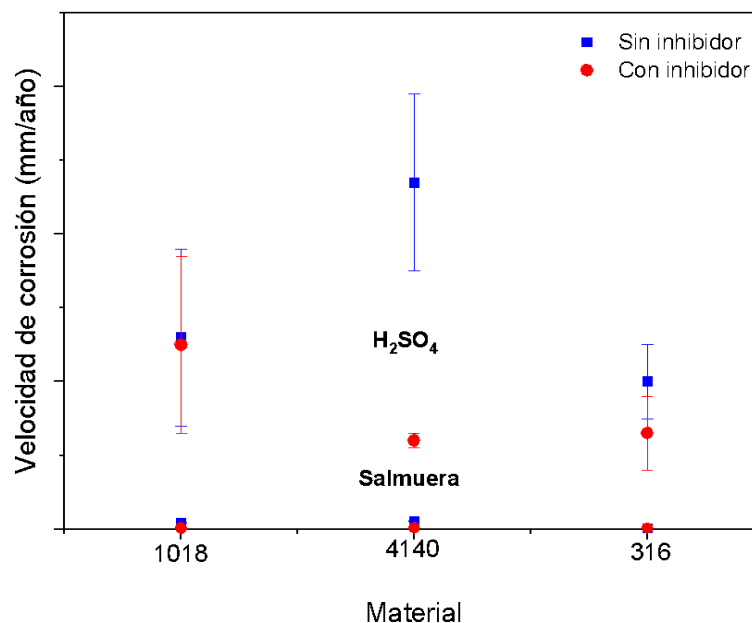


Figura 40. Velocidad de corrosión (mm/año) para diferente material en H₂SO₄ 1 N y salmuera NACE sin y con inhibidor obtenida mediante espectroscopia de impedancia electroquímica.

En la Figura 40 podemos observar la velocidad de corrosión promedio (mm/año) para los diferentes materiales estudiados en H₂SO₄ 1 N y salmuera NACE sin y con inhibidor, es posible identificar que la velocidad de corrosión baja un 50 % aproximadamente cuando se le aplica el inhibidor en el H₂SO₄ 1 N y aproximadamente alrededor de un 10 % aproximadamente cuando se le aplica el inhibidor de corrosión en salmuera, lo cual deja en evidencia que el inhibidor de corrosión base resina de coco actúa de manera más eficiente en ambientes ácidos que en ambientes salinos como ha quedado demostrado. El inhibidor de corrosión verde base resina de coco utilizado en la presente investigación ha demostrado propiedades para disminuir la velocidad de corrosión de los materiales probados en condiciones ambientales y con protección al medio ambiente.

6. CONCLUSIONES

A partir de este estudio, se concluye que el inhibidor de corrosión a base de resina de coco es una opción viable para la protección de aceros, ya que logró reducir la velocidad de corrosión en aproximadamente un 30% en salmuera y hasta un 50% en ácido sulfúrico, mostrando una mayor eficiencia en medio ácido; destacando así que en medio ácido el acero AISI 1018 presentó una reducción del 61 % en la velocidad de corrosión, mientras que para el acero 4140 la disminución fue del 57 %. En el caso del acero inoxidable, la velocidad de corrosión se mantuvo constante tanto con como sin la presencia del inhibidor, lo que indica una alta resistencia inherente en condiciones ácidas. Asimismo, en medio salino, el acero 1018 mostró una reducción del 56 % en la velocidad de corrosión, el acero 4140 presentó una disminución del 33 %, y el acero inoxidable una reducción del 50 %.

Estos resultados destacan el alto potencial de la resina de coco como inhibidor de corrosión, posicionándola como una alternativa prometedora para la protección de materiales metálicos. Además de su efectividad, este inhibidor presenta la ventaja de ser una opción ecológica y sostenible, ya que es biodegradable y no genera contaminantes tóxicos, por ello podría llegar a considerarse su implementación en aplicaciones industriales no solo porque ofrece una protección eficiente, sino que también porque contribuye a la reducción del impacto ambiental en comparación con los inhibidores convencionales.

7. BIBLIOGRAFÍA

Abdullah Dar, M. (2011). A review: plant extracts and oils as corrosion inhibitors in aggressive media. *Industrial Lubrication and Tribology*, 63(4), 227–233.

Ahmad, Z. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control.* Elsevier. (2006). 368-386

Ahmed, A. Al-Amiery, A., Yousif, E., Nor Roslam Wan Isahak, W., & Khalid Al-Azzawi, W. (2023). A review of inorganic corrosion inhibitors: Types, mechanisms, and applications. *Tribology in Industry*, 45(1), 313–339. <https://doi.org/10.24874/ti.1456.03.23.06>

Ahmed, M. A., Amin, S., & Mohamed, A. A. (2024). Current and emerging trends of inorganic, organic and eco-friendly corrosion inhibitors. *RSC Advances*, 14(43), 31877–31920. <https://doi.org/10.1039/d4ra05662k>

Akpanyung, K. V., & Loto, R. T. (2019). Pitting corrosion evaluation: a review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1378(2), 022088.

Al-Amiery, A. A., Al-Azzawi, W. K., & Isahak, W. N. R. W. (2022). Isatin Schiff base is an effective corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution: gravimetric, electrochemical, and computational investigation. *Scientific Reports*, 12(1), 17773.

Al-Amiery, A. A., Isahak, W. N. R. W., & Al-Azzawi, W. K. (2023). Corrosion Inhibitors: Natural and Synthetic Organic Inhibitors. *Lubricants*, 11(4), 174.

Al-Azzawi, W. K., Al-Amiery, A. A., & Isahak, W. N. R. W. (2022). Isatin Schiff base is an effective corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution: gravimetric, electrochemical, and computational investigation. *Scientific Reports*, 12(1), 17773.

Alfaro Guerra, M. A., Alfaro, I., & Guerra, R. (2021). Uso de un potenciostato de fuente abierta de bajo costo para estudios de inhibición de corrosión de acero: determinación de la velocidad de corrosión. *Educación Química*, 32(3), 95.

Alvarado Quiroz, K. D., & Esquivel Tohalino, G. S. (2015). Diseño de inhibidores de corrosión derivados de aminoácidos para la protección de acero, utilizando dft. *scientiarvm*, 1(1), 29–32.

ASTM International. (2014). “ASTM G59-97, Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements”.

Bard, A. J., & Faulkner, L. R. Electrochemical methods Fundamentals and Applications. **(2001)**.368-386

Burstein, G. T. (2005). A hundred years of Tafel’s Equation: 1905–2005. *Corrosion Science*, 47(12), 2858–2870.

Byrne, C., Ojeda Telles, S., Uviedo Barone, N., Toro, S., & D’Alessandro, O. (2023). Incorporación de ASP y TRP en pinturas alquídicas para la protección del aluminio AA1050: ensayos acelerados. *Investigación Joven*, 10(1).

Callister, W. D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7ma. Nueva York: John Wiley & Sons, Incorporated. **(2007)**. 624.

Cartledge, G. H. (1966). The mechanism of the action of inorganic inhibitors. *British Corrosion Journal*, 1(8), 293–302.

Da Rocha, J. C., da Cunha Ponciano Gomes, J. A., & D’Elia, E. (2010). Corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution by fruit peel aqueous extracts. *Corrosion Science*, 52(7), 2341–2348.

Davis, J. R. Principles and prevention of corrosion. 2da. Nevada: Pretice Hall, **(1996)**. 9-25

Díaz Silanes, J. A., Vara Salazar, G., & Vega Vega, J. M. Evaluación de la corrosión mediante métodos electroquímicos como alternativa a la niebla salina.[serie en internet]. *Aeronáutica* **(2019)**. [consultado 2024 febrero 18]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Aeronautica/Articulos/251996-Evaluacion-corrosion-mediante-metodos-electroquimicos-como-alternativa-niebla-salina.html>

Dickinson, E. J. F., & Wain, A. J. (2020). The Butler-Volmer equation in electrochemical theory: Origins, value, and practical application. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 872, 114145.

During, E. D. D. Corrosion Atlas: A Collection of Illustrated Case Histories. 3ra.Oxford: Elsevier, **(2018)**.46-58

- El Ibrahim, B., Jmiai, A., Bazzi, L., & el Issami, S. (2020).** Amino acids and their derivatives as corrosion inhibitors for metals and alloys. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 740–771.
- El-Shamy, A. (2020).** A Review on: Biocidal Activity of Some Chemical Structures and Their Role in Mitigation of Microbial Corrosion. *Egyptian Journal of Chemistry*.
- Faes, W., Lecompte, S., Ahmed, Z. Y., van Bael, J., Salenbien, R., Verbeken, K., & de Paepe, M. (2019).** Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers. *Corrosion Reviews*, 37(2), 131–155.
- Fang, Y.-H., & Liu, Z.-P. (2014).** Tafel Kinetics of Electrocatalytic Reactions: From Experiment to First-Principles. *ACS Catalysis*, 4(12), 4364–4376.
- Fayomi, O. S. I., Akande, I. G., & Odigie, S. (2019).** Economic Impact of Corrosion in Oil Sectors and Prevention: An Overview. *Journal of Physics: Conference Series*, 1378(2), 022037.
- Freitas, B. R., Braga, J. O., Orlandi, M. P., da Silva, B. P., Aok, I. V., Lins, V. F. C., & Cotting, F. (2022).** Characterization of coir fiber powder (*Cocos nucifera* L.) as an environmentally friendly inhibitor pigment for organic coatings. *Journal of Materials Research and Technology*.
- Gabe, D. R. (2005).** The centenary of Tafel's equation. *Transactions of the IMF*, 83(3), 121–124.
- Gómez de León Hijes, F. C., & Alcaraz Lorente, D. J.** Manual básico de corrosión para ingenieros. Universidad de Murcia, (2004) vol.1:25-28
- Guo, H., Fan, W., Liu, Y., Zhang, X., Liu, S., Wu, X., Chen, J., Liu, Z., Wang, X., & Ma, R. (2021).** Dynamic simulation on high-temperature corrosion behaviour of tube surface with fouling in utility boiler fired by high-chlorine coal. *Journal of the Energy Institute*, 95, 120–131.
- Harzheim, S., Hofmann, M., & Wallmersperger, T. (2022).** Comparison of two mesh-moving techniques for finite element simulations of galvanic corrosion. *Acta Mechanica*, 233(11), 4427–4439.
- Jegdić, B., Bobić, B., Radojković, B., Alić, B., & Radovanović, L. (2019).** Corrosion resistance of welded joints of X5CrNi18-10 stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 579–587.

Jones, D. A. (1996). Principles and prevention of corrosion (2nd ed.). Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.9-14

Km, S., Praveen, B. M., & Devendra, B. K. (2024). A review on corrosion inhibitors: Types, mechanisms, electrochemical analysis, corrosion rate and efficiency of corrosion inhibitors on mild steel in an acidic environment. Results in Surfaces and Interfaces, 16, 100258. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100258>

Kolesnikov, A., Kolek, M., Dohmann, J. F., Horsthemke, F., Börner, M., Bieker, P., Winter, M., & Stan, M. C. (2020). Galvanic Corrosion of Lithium-Powder-Based Electrodes. Advanced Energy Materials, 10(15).

Landolfo, R., Cascini, L., & Portioli, F. (2010). Modeling of Metal Structure Corrosion Damage: A State of the Art Report. Sustainability, 2(7), 2163–2175. <https://doi.org/10.3390/su2072163>

La Rosa , A., & Vergaray D'Arrigo, D. (2022). Electropolimerización del pirrol sobre cobre y su evaluación como inhibidor de la corrosión. Revista de la Sociedad Química del Perú, 88(2). <https://doi.org/10.37761/rsqp.v88i2.386>

Lee, H.-S., Saraswathy, V., Kwon, S.-J., & Karthick, S. (2018). Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete: A Review. In Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications. InTech.

Lukovits, I., Kálmán, E., & Zucchi, F. (2001). Corrosion Inhibitors—Correlation between Electronic Structure and Efficiency. CORROSION, 57(1), 3–8.

Mejía, C. (2020). Corrosión de los metales en ortodoncia. Revista Tamé, 9.

Mu, J., Li, Y. Z., & Wang, X. (2021). Crevice corrosion behavior of X70 steel in NaCl solution with different pH. Corrosion Science, 182, 109310.

NACE Technical Publication 1D182 (2005) Wheel Test Method Used for Evaluation of Film Persistent Corrosion Inhibitors for Oilfield Applications. NACE International.

Nahlé, A., Salim, R., El Hajjaji, F., Aouad, M. R., Messali, M., Ech-chihbi, E., Hammouti, B., & Taleb, M. (2021). Novel triazole derivatives as ecological corrosion inhibitors for mild steel in 1.0 M HCl: Experimental & theoretical approach. RSC Advances, 11(7), 4147–4162. <https://doi.org/10.1039/d0ra09679b>

- Nam, N. D., Hien, P. van, Hoai, N. T., & Thu, V. T. H. (2018).** A study on the mixed corrosion inhibitor with a dominant cathodic inhibitor for mild steel in aqueous chloride solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 91, 556–569.
- Ning, F., Wu, X., & Tan, J. (2019).** Crevice corrosion behavior of Alloy 690 in high-temperature water. *Journal of Nuclear Materials*, 515, 326–337.
- Ojeda-Armaignac, E., & Hing-Cortón, R. (2011).** Evaluación de inhibidores de la corrosión obtenidos a partir de la vinaza residual de las destilerías de alcohol etílico con aditivos. *Tecnología Química* (1), 33-39.
- Perez, N. (2016).** *Electrochemistry and Corrosion Science*. Springer International Publishing, (2)455.
- Pineda, D. A., Restrepo Parra, E., Arango Arango, P. J., Segura Giraldo, B., & Acosta Medina, C. D. (2021).** Innovative method for coating of natural corrosion inhibitor based on artemisia vulgaris. *Materials*, 14(9), 2234. <https://doi.org/10.3390/ma14092234>
- Popov, B. N.** *Corrosion Engineerin*. Amsterdam. Elsevier, (2015). 1-28
- Rahimi, E., Rafsanjani-Abbasi, A., Imani, A., Hosseinpour, S., & Davoodi, A. (2018).** Correlation of surface Volta potential with galvanic corrosion initiation sites in solid-state welded Ti-Cu bimetal using AFM-SKPFM. *Corrosion Science*, 140, 30–39.
- Rajesh, K. V. D., Buddi, T., Kanth, P. R., & Satyanarayana, K. (2020).** Microstructural and corrosion resistance study on plasma arc welded joints of AISI 304 and AISI 316. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 6(2), 189–205.
- Salleh, S. Z., Yusoff, A. H., Zakaria, S. K., Taib, M. A. A., Abu Seman, A., Masri, M. N., Mohamad, M., Mamat, S., Ahmad Sobri, S., Ali, A., & Teo, P. T. (2021).** Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review. *Journal of Cleaner Production*, 304, 127030. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127030>
- Sanni, O., Popoola, A. P. I., & Fayomi, O. S. I. (2019).** Temperature Effect, Activation Energies and Adsorption Studies of Waste Material as Stainless Steel Corrosion Inhibitor in Sulphuric Acid 0.5 M. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 5(4), 88.
- Sastri, V. S. (2011).** Introduction and Forms of Corrosion. In *Green Corrosion Inhibitors. Theory and Practice* (1st ed., pp. 1–28). Wiley.

- Singh, A. (2019).** Corrosion Inhibitors (A. Singh, Ed.). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76742>.
- Tafel, J. (1905).** Über die Polarisierung bei kathodischer Wasserstoffentwicklung. Zeitschrift Für Physikalische Chemie, 50U(1), 641–712.
- Uwah, I. E., Okafor, P. C., & Ebiekpe, V. E. (2013).** Inhibitive action of ethanol extracts from *Nauclea latifolia* on the corrosion of mild steel in H₂SO₄ solutions and their adsorption characteristics. Arabian Journal of Chemistry, 6(3), 285–293.
- Wu, X., Liu, Y., Sun, Y., Dai, N., Li, J., & Jiang, Y. (2021).** A discussion on evaluation criteria for crevice corrosion of various stainless steels. Journal of Materials Science & Technology, 64, 29–37.
- Yadav, S., Raman, A. P. S., Singh, M. B., Massey, I., Singh, P., Verma, C., & AlFantazi, A. (2024).** Green nanoparticles for advanced corrosion protection: Current perspectives and future prospects. Applied Surface Science Advances, 21, 100605.
- Zhang, Y. (2022).** Strengthening, Corrosion and Protection of High-Temperature Structural Materials. Coatings, 12(8), 1136.
- Zhang, S., Li, H., Jiang, Z., Zhang, B., Li, Z., Wu, J., Fan, S., Feng, H., & Zhu, H. (2019).** Effects of Cr and Mo on precipitation behavior and associated intergranular corrosion susceptibility of superaustenitic stainless steel S32654. Materials Characterization, 152, 141–150.
- Zhang, J. (2018).** Uniform corrosion and passivation in metallic materials. In Materials Corrosion and Protection (pp. 181–218). De Gruyter.