BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

COMPORTAMIENTO CORROSIVO DE DIFERENTES ALEACIONES EN MEDIOS ÁCIDOS

TESINA PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:
Arquímedes Morales Córdova

DIRECTOR DE TESINA:
Dra. Paulina Arellanes Lozada

ASESOR:
Dra. Paulina Arellanes Lozada

ABRIL DEL 2021

Contenido

CAPÍTULO 1. ANTEDECENTES 7

1.1 Corrosión 7

1.2 Impacto de la corrosión 7

1.3 Costos de la corrosión 8

1.4 Formas de la corrosión 10

1.5 Factores que influyen en la corrosión 12

1.6 Cinética de la corrosión 15

1.7 Corrosión electroquímica 17

1.8 Determinación de la velocidad de corrosión 18

1.9 Pruebas electroquímicas 20

1.9.1 Ventajas de las pruebas electroquímicas 20

1.9.2 Limitaciones de las pruebas electroquímicas 20

1.10 Método de extrapolación de Tafel 21

1.11 Prueba de la Resistencia a la polarización (Rp) 23

1.11.1 Beneficios de la prueba de resistencia a la polarización 25

1.11.2 Limitaciones de la prueba de resistencia a la polarización 26

1.12 Mediciones en una celda electroquímica 26

1.13 Determinación de la velocidad de corrosión mediante la prueba Rp 28

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA 29

2.1 Estado del Arte 29

2.1.1 Acero 29

2.1.2 Acero AISI 1018 29

2.1.3 Acero API-5L 31

2.1.4 Acero API-5L-X52 31

2.1.5 Acero API-5L-X60 31

CAPÍTULO 3. RESULTADOS 34

3.1 Corrosión de aleaciones de hierro en ácido clorhídrico (HCl) 34

3.2 Corrosión de aleaciones de hierro en ácido sulfúrico (H_2SO_4) 44

4. Discusión 52

4.1. Efecto de la composición química 52
4.2. Efecto del medio corrosivo 58
4.3. Efecto de la concentración del ácido 62
4.4 Efecto de la temperatura 64
CONCLUSIONES 66
BIBLIOGRAFÍA 67

Planteamiento del problema

El acero es el metal más común y ampliamente utilizado en diferentes industrias (Northern Weldarc LTD., 2018). Sin embargo, es altamente susceptible a la corrosión, fenómeno que se acelera en gran medida en ambientes ácidos, tales como ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido clorhídrico (HCl) (Alhaffar, Umoren, Obot, & Ali, 2018). Estas soluciones son corrosivas y modifican las propiedades fisicoquímicas de los materiales metálicos (Arellanes Lozada, et al., 2018).

El efecto de la corrosión tiene graves consecuencias, entre las que destacan: reducir la eficiencia de un proceso, costos por mantenimiento, costos por paro de producción, costos por remplazo de equipo, poner en riesgo la salud del personal, aumentar la contaminación por los productos generados, entre muchas otras (Corrales M. , et al., 2019). Este problema representa uno de los principales obstáculos en la industria. En 2016, la organización National Association of Corrosion Engineers (NACE) International estimó que el costo global de la corrosión es de $2.5 billones de dólares al año.

Para reducir los efectos de la corrosión, los sectores industriales emplean diferentes tecnologías para el control de esta. Debido a los diversos factores que intervienen en el fenómeno de la corrosión, el diseño de un método de control requiere una adecuada elección de los materiales metálicos empleados, procesos idóneos y variables de proceso. Algunas de las variables que influyen en la velocidad de corrosión son: tipo de aleación metálica, medio corrosivo, temperatura, presión, tiempo de exposición, entre otros. El éxito de un sistema adecuado de control puede conducir a ahorros entre el 20 y 30% (Bilurbina, Liesa, & Iribarren, 2003). Mientras que antagónicamente, una elección inadecuada puede generar costos añadidos a la propia corrosión.

Justificación

El estudio de la corrosión de acero es de especial interés, por el gran uso de esta aleación a nivel mundial. Es empleado como material para la fabricación de diversas estructuras como ductos, los cuales son utilizados para el transporte de agua, petróleo y productos químicos (Corrales M. , et al., 2019). El acero es una aleación compuesta de Fe y otros elementos, como C, Mn, P, S, Si, Cu, Ni, entre otros. Algunos de estos elementos se agregan intencionalmente a la matriz de Fe con el fin de lograr ciertas propiedades y características específicas (May, 2017). En base a su composición química existen diferentes tipos de acero. Entre los que más destacan por su utilidad industrial son los aceros al carbono, como los aceros AISI (Instituto Americano del Hierro y el Acero) y API (Instituto Americano del Petróleo). La composición química de las aleaciones de hierro influye en su resistencia a la corrosión, debido a que cada elemento químico tiene diferente cinética de reacción en un medio corrosivo.

Por otra parte, los medios corrosivos ácidos son empleados en múltiples industrias. Siendo el H_2SO_4 y HCl los ácidos más empleados para diversas operaciones como acidificación de pozos petroleros, decapado, limpieza y procesos de eliminación de óxido y sarro (Corrales M. , et al., 2019). El análisis de la velocidad de corrosión de aleaciones de hierro en medio ácido es de especial interés y es principalmente estudiado por técnicas electroquímicas. Este tipo de técnicas brindan información no solo de la velocidad de corrosión de materiales metálicos, sino que además sirven para determinar mecanismos de corrosión por los parámetros electroquímicos obtenidos.

El análisis de las variables que aceleran o retardan la corrosión del acero, es determinante para implementar un adecuado control de esta. El desarrollo del conocimiento en este sentido puede servir como guía para reducir los efectos de este fenómeno y propiciar una disminución de la pérdida de material y de sus propiedades estructurales.

Por lo anterior, en el siguiente trabajo se analizará teóricamente la velocidad de corrosión y parámetros electroquímicos de tres tipos de aleaciones de hierro: AISI

1018, API-5L-X52 y API-5L-X60, empleando como medios corrosivos el H_2SO_4 y HCl. Además, se discutirá el efecto de la temperatura, tiempo y concentración de ácido sobre el comportamiento corrosivo del acero empleando pruebas electroquímicas: polarización potenciodinámica (PDP) y resistencia a la polarización (Rp). Finalmente, se indicará el mecanismo de corrosión de aleaciones de hierro en función de la composición química en ambos medios.

Objetivo

Realizar una reseña del mecanismo de corrosión de tres aleaciones de hierro en medio ácido, analizando el efecto de las variables que influyen sobre la velocidad de corrosión del acero, tales como: la composición química de las aleaciones, temperatura, tiempo de inmersión y concentración del medio corrosivo.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica acerca de la velocidad de corrosión de aleaciones de hierro en medios ácidos.
- Comparar los parámetros electroquímicos por Rp y PDP de tres aleaciones de hierro, AISI 1018, API-5L-X52 y API-X60, en soluciones de H_2SO_4 y HCl, bajo diferentes condiciones de temperatura, tiempo de inmersión y concentración del medio ácido.
- Analizar el efecto de la temperatura, tiempo de inmersión y concentración del medio ácido sobre el mecanismo de corrosión.
- Analizar el efecto de la composición química de las aleaciones sobre el mecanismo de corrosión.

Hipótesis

La composición química de aleaciones de hierro y variables del medio corrosivo, tales como, tipo y concentración de ácido, temperatura y tiempo de inmersión; modifican el mecanismo de corrosión del acero.

CAPÍTULO 1. ANTEDECENTES

1.1 Corrosión

La corrosión es un fenómeno natural y es el ataque destructivo de un metal por su entorno para causar un deterioro en las propiedades del material (McCafferty, 2010). Este fenómeno ocurre cuando los mecanismos de protección han sido dominados, rotos o se han agotado, dejando vulnerable al metal o aleación (Talbot & Talbot, 1998). La corrosión se puede definir simplemente como el proceso de un metal regresando a su estado termodinámico, se refiere a la formación de óxidos o sulfuros de los que originalmente empezaron cuando fueron extraídos de la tierra (Schweitzer, 2010).

Hay 85 metales en la tabla periódica y sea cual sea su uso, todos los metales tienden a reaccionar con el ambiente en diferentes condiciones (McCafferty, 2010). Los metales bajo ciertos medios agresivos y esfuerzos mecánicos pueden corroerse, ocasionando que en algunos casos la formación de grietas, generando la fractura de estos. También pueden ser atacados en forma de pequeños agujeros profundos (llamados picaduras), llegando a perforar gruesas secciones de estructuras metálicas, haciendo a éstas deficientes en sus propiedades e inutilizándolas por completo. Es entonces cuando todos los conocimientos que se tienen acerca de la corrosión deber ser aplicados, para que un metal o aleación perdure más años (Ávila & Genesca, 1986).

Otros materiales como los plásticos, concreto, madera, cerámica y otros materiales compuestos también están sometidos a un deterioro (McCafferty, 2010); pero este trabajo sólo se referirá a la corrosión de las aleaciones de hierro.

1.2 Impacto de la corrosión

Las principales aplicaciones de los metales son en construcciones, medios de transporte y en la industria. Estos materiales también tienen varias aplicaciones electrónicas, como computadoras, circuitos, conectores e interruptores. Incluso son usados en el cuerpo humano como reemplazo de cadera o rodilla, como

placas quirúrgicas, tornillos y alambres (McCafferty, 2010). Por lo que su impacto en la vida humana es alto.

Los sectores en los cuales la corrosión tiene una gran repercusión son las centrales nucleares, la extracción de petróleo y la industria química (Ávila & Genesca, 1994). Dentro de estos sectores, el fenómeno de la corrosión puede ser localizado en tanques perforados, contenedores y tuberías (Hansson, 2015), generando desde pérdidas económicas hasta humanas.

1.3 Costos de la corrosión

La corrosión es el mayor problema para incrementar la vida útil y la seguridad de los materiales metálicos (Marcus, 2002), esto implica desde estructuras, residencias, puentes y automóviles, hasta tuberías, tanques de almacenamiento y equipos industriales. Grandes corporaciones, industrias y agencias gubernamentales han establecido grupos y comités para ocuparse de los problemas relacionados con la corrosión, pero en muchos de los casos las responsabilidades son repartidas entre los fabricantes o productores y los usuarios. Tal situación genera negligencia y puede llegar a ser costoso en términos de dólares y vidas humanas (Roberge P. , 1999).

Los costes de la corrosión se pueden dividir en tres grupos:

1. Económicos
2. Medioambientales
3. Seguridad

Los costos económicos no solamente son los ocasionados por la sustitución de la pieza deteriorada, sino también los derivados de los tiempos perdidos en la reparación, los que dan lugar a una disminución de la calidad de los productos obtenidos y los que influyen en una disminución de los rendimientos energéticos (Bilurbina, Liesa, & Iribarren, 2003).

En 1978 en Estados Unidos, se realizó un estudio sobre los efectos económicos de la corrosión metálica. Los resultados de estos estudios indicaron que el costo

total de la corrosión en dicho país para el año 1975 fue de $70 billones de dólares o aproximadamente el 5% del producto nacional bruto de ese año. Aunque esta cifra parece pequeña en comparación a un estudio más reciente llevado a cabo entre 1999 y 2001, donde la cifra es de $276 billones de dólares, la corrosión consume entre 3-5% del producto nacional bruto de ese país (McCafferty, 2010).

En la Figura 1 se observa el desglose de los costos de corrosión en los sectores industriales de Estados Unidos.

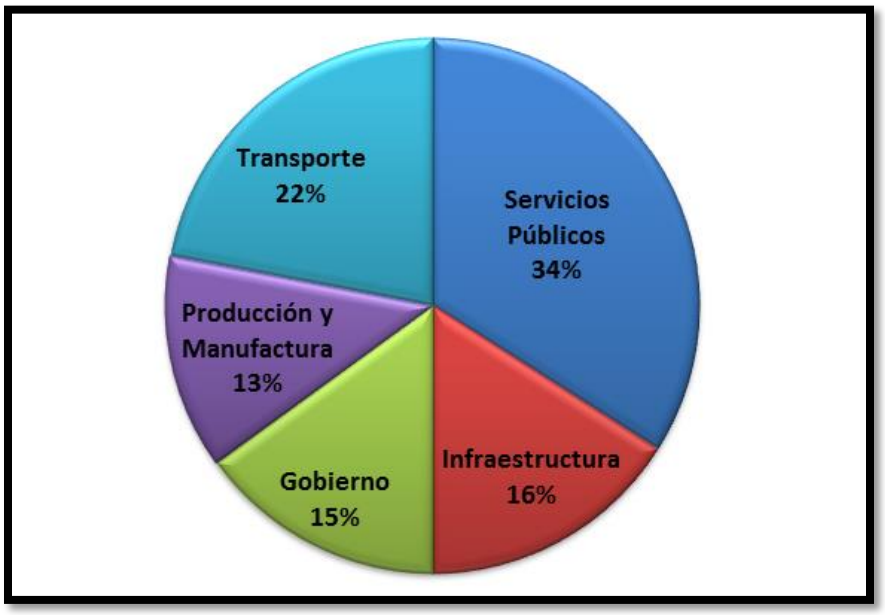


Figura 1. Los costes según diferentes sectores industriales en Estados Unidos. Adaptado de (Roberge P. , 2008).

En un estudio más reciente, la organización NACE International (2016) publicó el informe "International Measures of Prevention, Application, and Economic of Corrosion Technologies Study (IMPACT)" en donde se estimó que el costo global de la corrosión es el 3,4% del Producto Mundial Bruto, lo equivale aproximadamente a 2,5 billones de dólares EU.

De acuerdo a Bilurbina (2003), aplicar una buena tecnología para el control de la corrosión al diseñar, escoger los materiales más adecuados y procesos idóneos,

puede conducir a ahorros entre el 20-30%, además de evitar problemas importantes.

Respecto a los costos medioambientales y de seguridad, existen muchos casos de daños y muertes (tanto humanas como animales) relacionados con este fenómeno. Un ejemplo de esto, es el accidente ocurrido en una planta química en Bhopal-India en 1984, donde se llevó a cabo el peor desastre relacionado con la corrosión, en términos de muertes, daños al medioambiente y problemas de salud. Esta planta intentó proveer de fertilizantes y pesticidas para impulsar la producción de grano. Sin embargo, un número de fallas en el diseño y problemas de mantenimiento coincidieron para causar una catastrófica explosión. Se reportó que cuando las tuberías de acero fueron corroídas y agua se filtró entre los tanques que contenían metilisocianato, los productos de la corrosión del hierro generaron un catalizador para una reacción, la cual destrozó la planta permitiendo que el metilisocianato y otros gases tóxicos escaparan, matando a más de 8000 personas (Hansson, 2015).

A causa de ese accidente se contaminaron las fuentes de agua, y aún hoy se presenta una gran cantidad de peligrosos residuos tóxicos. Actualmente, los sobrevivientes de este desastre presentan problemas graves de salud, como cáncer y daños cerebrales, entre otros (Amparo, 2007).

1.4 Formas de la corrosión

En 1982, la organización NACE publicó el libro *Forms of Corrosion: Recognition and Prevention*, donde agrupó en tres categorías las formas de la corrosión. En la Figura 2 se presentan estas formas y sus categorías.

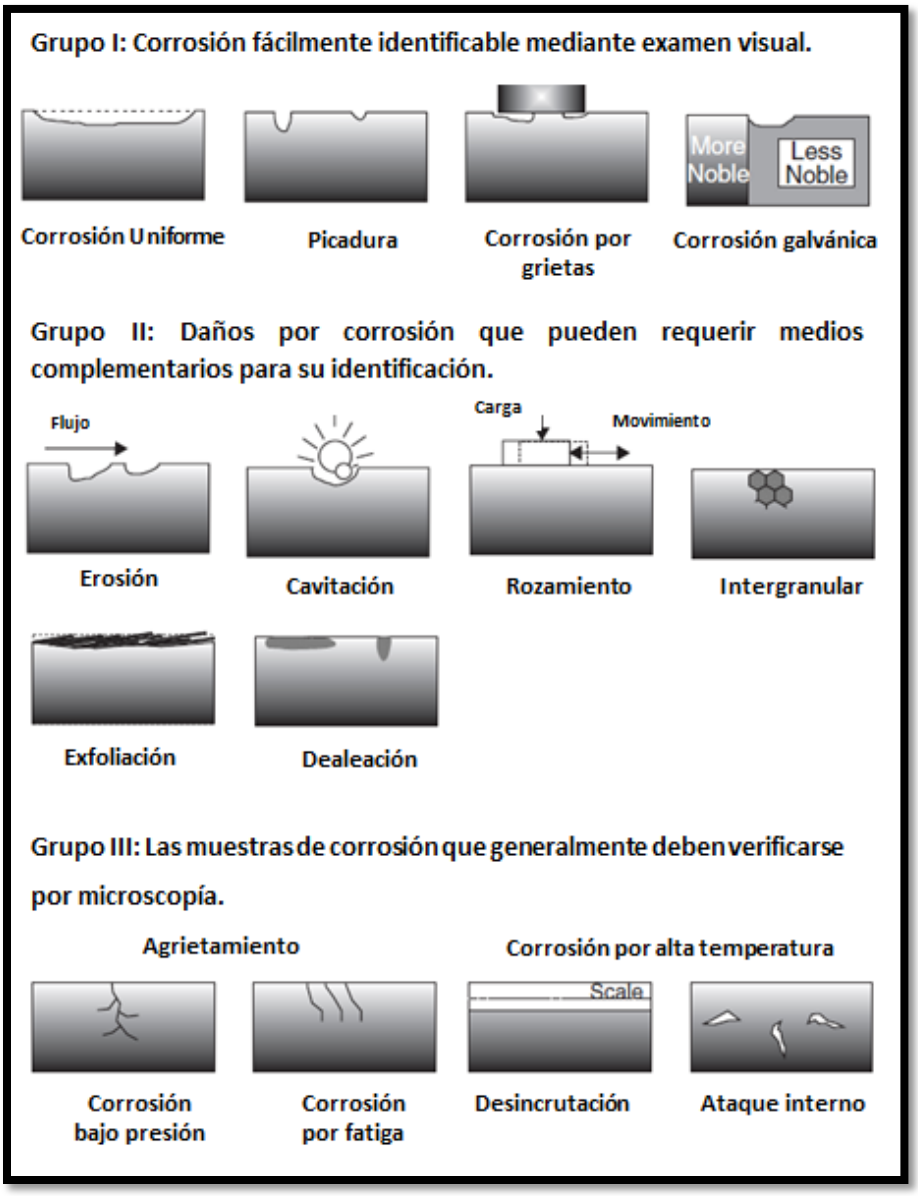


Figura 2. Principales formas de ataque por corrosión agrupadas por la facilidad de su identificación. Adaptado de (Roberge P. , 2008).

Grupo I: Corrosión fácilmente identificable mediante examen visual.

1) La corrosión uniforme se caracteriza por una pérdida de manera uniforme y regular del metal en su superficie corroída.
2) Corrosión en la cual toda o la mayor parte de la pérdida de metal ocurre en áreas discretas. Ejemplos son la corrosión por picaduras y por grietas, que éstas últimas son una forma particular de picaduras.

3) Corrosión galvánica ocasionada por contacto eléctrico entre diferentes conductores en un electrolito.

Grupo II: Daños por corrosión que pueden requerir medios complementarios para su identificación.

4) Los efectos de la velocidad incluyen: erosión, una forma de ataque causada por flujo de alta velocidad; cavitación, causada por el colapso de altos flujos con burbujas formadas en áreas de baja presión; y rozamiento, causado por un movimiento relativo de dos superficies en estrecho contacto. (erosión, cavitación, rozamiento).
5) Corrosión intergranular en los límites de grano en la estructura metálica (intergranular, exfoliación).
6) Corrosión de desprendimiento debido a la disolución selectiva de uno componente de una aleación.

Grupo III: Las muestras de corrosión que generalmente deben verificarse por microscopía.

7) Los fenómenos de agrietamiento incluyen fatiga por corrosión, un fenómeno mecánico potenciado por ambientes corrosivos, y corrosión bajo tensión.
8) Corrosión por alta temperatura (desincrustación y ataque interno).
9) Efectos microbianos causados por ciertos tipos de bacterias o microbios cuando su metabolismo produce especies corrosivas.

La corrosión uniforme es la forma en la que se localiza la corrosión estudiada en este trabajo.

1.5 Factores que influyen en la corrosión

Los procesos de corrosión son dependientes principalmente de la temperatura y del tiempo de inmersión. (Schweitzer, 2010), así como de la composición química del material metálico, el medio y su concentración, entre otros factores.

La velocidad de corrosión tiende a aumentar conforme se eleva la temperatura. A altas temperaturas se acelera la difusión de oxígeno a través de las capas

catódicas de la película protectora de óxido (Charng & Lansing, 1982). La temperatura también tiene efectos secundarios mediante su influencia sobre la solubilidad del aire (oxígeno), que es la sustancia oxidante más común que influye en la corrosión (Perry & Green, 2012).

Resultados experimentales, llevados a cabo por Kirby en el año 1979, indicaron que con un aumento en la temperatura de 18 a 20°C se duplicará la velocidad de corrosión. En 1951, Speller, presentó en un gráfico la influencia de la temperatura en la corrosión del acero en agua, la cual se muestra en la Figura 3.

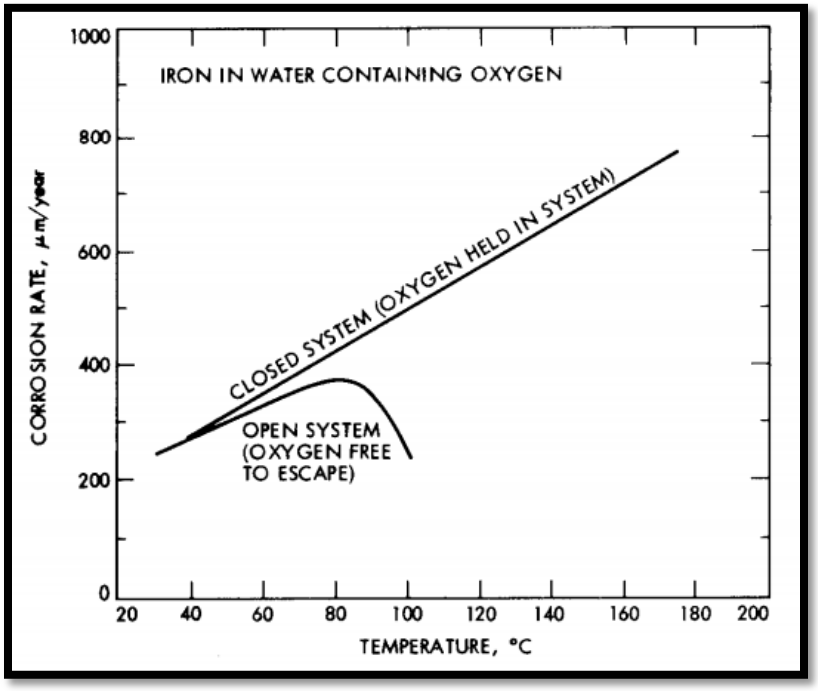


Figura 3. Efecto de la temperatura en la velocidad de corrosión en acero en agua (Charng & Lansing, 1982).

De acuerdo a Speller, en un sistema cerrado donde el oxígeno no puede escapar (closed system, oxigen held in system), la velocidad de corrosión aumenta con la temperatura hasta que todo el oxígeno es consumido. En cambio, en un sistema abierto donde el oxígeno es libre de escapar (open system, oxigen free to escape), la velocidad de corrosión aumenta con la temperatura aproximadamente hasta 80°C. Además, se observa que en un punto la temperatura incrementa resultando

en una disminución en la velocidad de corrosión, esto es debido a la caída en la solubilidad del oxígeno en agua por encima de los 80°C.

Respecto al efecto del tiempo, no hay ninguna ley universal que rija la reacción para todos los metales. Algunas velocidades de corrosión permanecen constantes con el tiempo en intervalos amplios, otras disminuyen con el tiempo y algunas aleaciones tienen mayores índices de corrosión con respecto al tiempo (Perry & Green, 2012).

El medio corrosivo y su concentración son otros de los factores clave para la velocidad de corrosión. (Roberge P. , 1999). La velocidad de corrosión del acero al carbono incrementa con la concentración de ácido (Abdul & Sanad, 1972). En el mecanismo de corrosión del acero ocurren, de forma simultánea, reacciones anódicas y catódicas, es decir, reacciones de óxido-reducción. La principal reacción anódica, o de oxidación, es la del Fe, la cual se presenta en la ecuación 1. En esta reacción se liberan electrones y se remueve el átomo metálico de la superficie convirtiéndolo en un ion de Fe^{2+} (Ugaz Lock & Díaz Tang, 1988).

La teoría del potencial mixto propone que todos los electrones generados por las reacciones anódicas son consumidos por las correspondientes reacciones catódicas, o de reducción (Ugaz Lock & Díaz Tang, 1988). Para que se lleve a cabo la reacción catódica es necesario un agente oxidante, los más comunes son el oxígeno disuelto y los protones (H^+), éstos últimos se encuentran en gran número en las soluciones ácidas y su reacción se muestra en la ecuación 2. Un aumento en la concentración del ácido elevará la cantidad de H^+ en el medio, los cuales favorecerán a las reacciones de redox y por lo tanto aumentará la velocidad de corrosión del acero (Arellanes Lozada, 2020). En la Figura 4 se presenta el mecanismo de corrosión del acero en medios ácidos.

Es importante mencionar que en los procesos de corrosión puede ocurrir simultáneamente más de una reacción anódica y catódica (Ugaz Lock & Díaz Tang, 1988).

Reacción anódica $Fe \leftrightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ (1)

Reacción catódica $2H^{+} + 2e^{-} \leftrightarrow H_2$ (2)

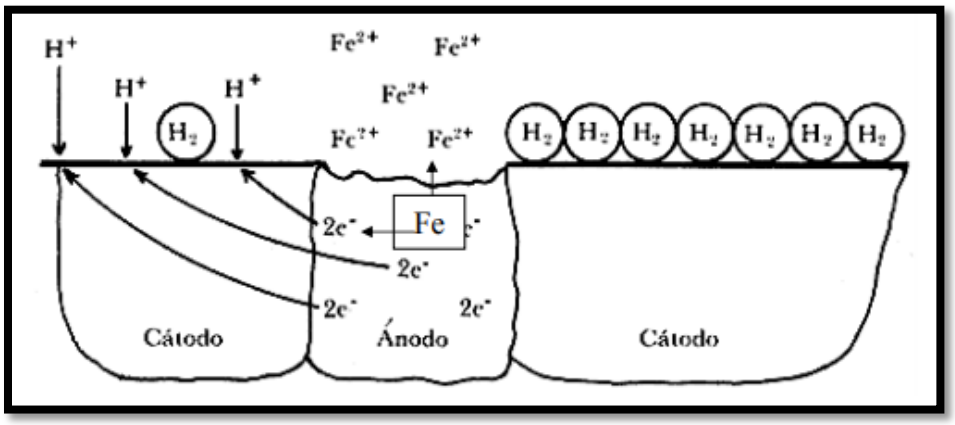


Figura 4. Mecanismo de corrosión del acero en un medio ácido.

1.6 Cinética de la corrosión

La cinética de la corrosión es una disciplina que se ocupa de la definición de la velocidad de corrosión, la influencia de varios factores y la determinación del mecanismo de corrosión. En otras palabras, la cinética se ocupa de la dinámica de las reacciones químicas. Si se conoce el mecanismo de corrosión se podrá seguir y controlar su velocidad y dirección. Las reacciones de corrosión pueden ser rápidas o lentas, complicadas o relativamente simples, y la manera en la cual suceden son asunto de la cinética de corrosión (Groysman, 2010).

Las reacciones electroquímicas dependen de la concentración de las especies implicadas, así como de la temperatura. La ecuación de Nernst describe esta dependencia (Kelly, Scully, Shoesmith, & Buchheit, 2003). La reacción general para un proceso electroquímico puede ser

$$aA + bB \leftrightarrow cC + dD \quad (3)$$

La variación de la energía libre de Gibbs, G, para esta reacción, vendrá dada por la diferencia entre la energía libre molar de productos y reactivos

$$\Delta G = cG_g + dG_d - aG_a - bG_b \quad (4)$$

Si a_n es la actividad de la sustancia n

$$G_n = G_n^0 + RT \ln a_n \quad (5)$$

Es decir que la ecuación 4 se transforma en

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln\left(a_C^c a_D^d\right) : \left(a_A^a a_B^b\right) \quad (6)$$

Y aplicando las relaciones

$$\Delta G = -nFE \quad (7)$$

$$J = \ln\left(a_C^c a_D^d\right) : \left(a_A^a a_B^b\right) \quad (8)$$

Se deduce que

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln J \quad (9)$$

La ecuación 9 es conocida como la ecuación de Nernst, que expresa el potencial de un electrodo en función de las actividades de los iones y de la temperatura (Bilurbina, Liesa, & Iribarren, 2003). Donde E es el potencial reversible (V), E^0 es el potencial estándar reversible y J es la actividad de las especies (Kelly, Scully, Shoesmith, & Buchheit, 2003).

La ecuación de Nernst es usada a temperatura ambiente. Tomando ésta como 298K (25°C), insertando los valores de R (8.314 J mol^{-1}) y F (96490 Coulombs mol^{-1}) y sustituyendo 2.303 log (J) por ln (J) (Talbot & Talbot, 1998).

Como la corrosión es un fenómeno en donde interviene una reacción anódica y una catódica, en el momento en que se produce la corrosión, la velocidad de oxidación anódica ha de ser igual a la velocidad de reducción catódica. Por tanto, la intersección de las curvas de polarización anódica y catódica nos dará el potencial de corrosión (E_{corr}) y la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), que será proporcional a la velocidad de corrosión (Marcus, 2002).

1.7 Corrosión electroquímica

La corrosión es una reacción electroquímica (Perry & Green, 2012), y consiste en la reacción de un metal en un medio agresivo que se transforma en un óxido u otro compuesto termodinámicamente estable en aquellas condiciones, por medio de una reacción de oxidación-reducción en un medio conductor de la electricidad (Bilurbina, Liesa, & Iribarren, 2003).

Hay cuatro componentes para la corrosión que son: un ánodo (donde ocurre la oxidación del metal), un cátodo (donde ocurre la reducción de una especie diferente), un medio electrolítico (para la conducción iónica entre las reacciones) y una corriente eléctrica para la conducción de electrones entre las reacciones (Kelly, Scully, Shoesmith, & Buchheit, 2003). Estos componentes son ilustrados en la Figura 5. El ánodo es el lugar donde se produce la corrosión. El cátodo, que puede ser una parte de la superficie del propio metal en contacto con el primero, forma el otro electrodo y se consume en el proceso.

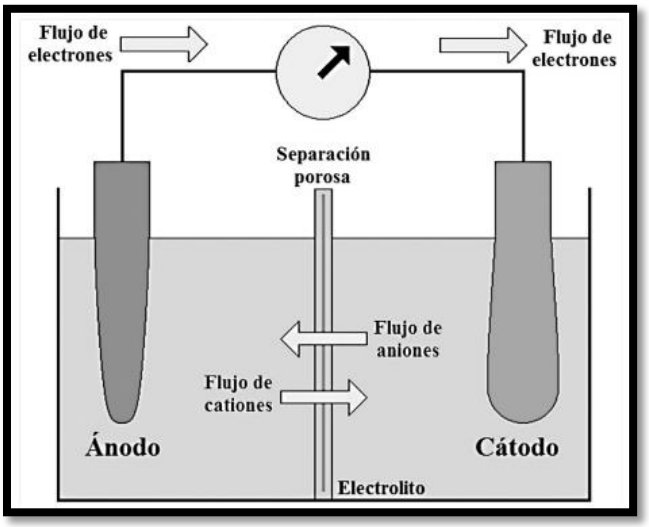


Figura 5. Representación de una celda electroquímica (Salazar, 2015).

Las reacciones electroquímicas son reacciones químicas en la cual no sólo los elementos pueden ser añadidos o removidos de la especie química, también al menos una especie sufre un cambio en el número de electrones de valencia

(Kelly, Scully, Shoesmith, & Buchheit, 2003). Ejemplo de una reacción química pura es la precipitación de hidróxido de hierro, $Fe(OH)_2$:

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 \quad (10)$$

Ninguno de los átomos involucrados ha cambiado su valencia; el hierro y el oxígeno aún están en el estado divalente; y el hidrógeno es univalente. Un ejemplo de reacción electroquímica es la reacción de oxidación de hierro, en donde, se produce el ion ferroso vía la oxidación del ion metálico (valencia cero):

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \quad (11)$$

En el orden que ocurre esta reacción, los dos electrones producidos deben ser consumidos en una reacción de reducción como la reducción del oxígeno disuelto.

$$O_2 + H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \quad (12)$$

Si las dos reacciones no son separadas físicamente en la superficie del metal, la reacción química entre el hidróxido y los iones ferrosos pueden producir un sólido en la superficie. Así las reacciones químicas y electroquímicas pueden ser acopladas (Kelly, Scully, Shoesmith, & Buchheit, 2003).

1.8 Determinación de la velocidad de corrosión

La velocidad de corrosión es la velocidad con la que se llevan a cabo las reacciones de óxido-reducción y depende de diversos factores mencionados anteriormente. La velocidad de corrosión para metales puede determinarse por diferentes métodos:

1. Pérdida de peso
2. Ganancia de peso
3. Análisis químico de la solución
4. Pruebas gasométricas (cuando uno de los productos de la reacción es gas).
5. Medición del espesor
6. Método de marcado inerte
7. Pruebas electroquímicas

Varias unidades se han usado para expresar la velocidad de corrosión. Estas incluyen pérdida de peso por unidad de área por unidad de tiempo y velocidad electroquímica. No existe una unidad estándar para expresar la velocidad de corrosión (McCafferty, 2010). En la Tabla 1 se indican algunas unidades.

Tabla 1. Algunas unidades comúnmente usadas para expresar la velocidad de corrosión (McCafferty, 2010).

Pérdida de Peso
g/cm^2h
$g/cm^2día$
g/m^2h
$g/m^2día$
mg/m^2s
mdd $(mg/dm^2\ día)$
Penetración
ipy $(inches\ per\ year)$ $[pulgadas\ por\ año]$
mpy $(mils\ per\ year)$ $*$ $[millas\ por\ año]$
$mm/year$ $[milímetros\ por\ año]$
$\mu m/year$
Densidad de corriente de corrosión (i_{corr})
$\mu A/cm^2$
mA/cm^2
A/cm^2
A/m^2

Este trabajo de investigación se enfocará en el uso de pruebas electroquímicas para la determinación de la velocidad de corrosión de acero en medios ácidos.

1.9 Pruebas electroquímicas

Las pruebas electroquímicas pueden proporcionar información sobre el mecanismo de corrosión. Además, ofrecen la posibilidad de mitigar la corrosión controlando el potencial electrodo (McCafferty, 2010). De acuerdo con Groysman (2010), las ventajas y las limitaciones de las pruebas electroquímicas son las siguientes.

1.9.1 Ventajas de las pruebas electroquímicas

1. Permiten una rápida información dinámica acerca de la velocidad de corrosión.
2. Desde el punto de vista ingeniería, estas pruebas son convenientes ya que dan señales eléctricas permitiendo una rápida reacción y almacenamiento de datos.
3. Algunas pruebas usan la polarización del metal en el ambiente. Dichos métodos permiten recibir información útil sobre regiones activas y pasivas en la superficie del metal, sobre mecanismos de corrosión e inhibición, así como una velocidad de corrosión.

1.9.2 Limitaciones de las pruebas electroquímicas

1. Estas pruebas se basan en la medición del flujo de corriente eléctrica a través de la solución. Por lo tanto, existen limitaciones para su uso en una solución con baja conductancia eléctrica: en no electrolitos (solventes orgánicos, combustibles), sistemas de dos fases (electrolitos y no electrolitos) o en agua muy pura.
2. Las mediciones de la velocidad de corrosión suponen que es uniforme, pero esto no es siempre correcto.
3. No todas las superficies metálicas se corroen, pero los cálculos se relacionan con una densidad de corriente (A/cm^2), y una pérdida de peso de toda la superficie (g/cm^2). Por lo tanto, no se obtiene una velocidad de corrosión cien por cierto real.

Existen varios métodos para determinar la velocidad de corrosión por medio de pruebas electroquímicas, particularmente, las dos técnicas electroquímicas de polarización potenciodinámica que son objeto de estudio en ésta investigación son: el Método de extrapolación de Tafel y la prueba de Resistencia a la polarización. A continuación, se describirán las características de ambas pruebas.

1.10 Método de extrapolación de Tafel

El procedimiento más fundamental para evaluar la densidad de corrosión (i_{corr}) es mediante el método de extrapolación de Tafel. Este método requiere la presencia de una sección lineal en la curva E_{corr} vs log(i_{corr}), también conocida como gráfica de Tafel. Generalmente se requiere una exploración del potencial de aproximadamente ±300 mV alrededor de E_{corr} para determinar si está presente una sección lineal de al menos una década de corriente, de manera que se pueda hacer una extrapolación razonablemente precisa al potencial de E_{corr} (Buchanan & Stansbury, 2012). Esta condición de linealidad de ambas pendientes de al menos una década de corriente es denominada como comportamiento Tafeliano.

La intersección de E_{corr} y la extrapolación de las ramas anódicas y catódicas es el valor de i_{corr}, como se muestra en la Figura 6. Además, con este método se obtienen los parámetros de Tafel (β_a y β_c).

La existencia de una relación lineal entre E y log(I) ha sido demostrada cuando el electrodo es polarizado a potenciales suficientemente grandes y lejos del potencial de corrosión, tanto en direcciones anódicas como catódicas, como se puede ver en la curva de polarización representada en la Figura 6. Las porciones en las cuales las relaciones prevalecen son llamadas regiones Tafel (Berradja, 2019).

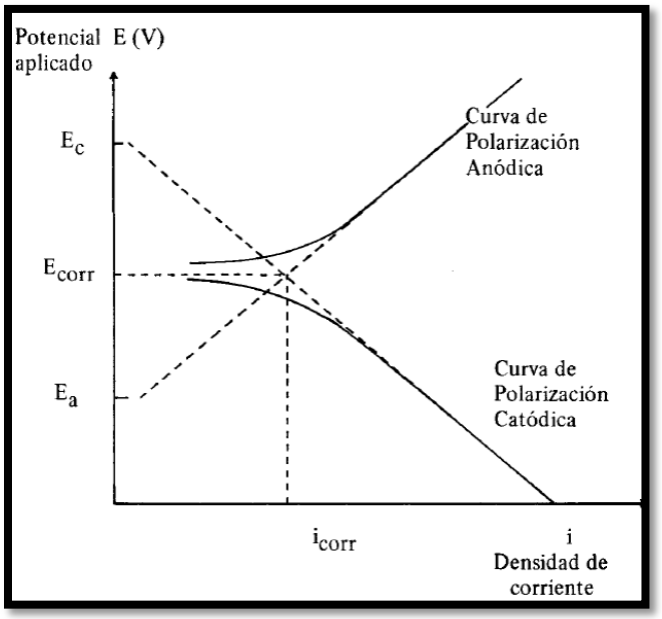


Figura 6. Ejemplo de una gráfica de Tafel (Ugaz Lock & Díaz Tang, 1988).

Esto puede ser matemáticamente expresado como

$$I = i_{corr}\left[\exp\left(\frac{2.303\eta}{b_a}\right) - exp\left(-\frac{2.303\eta}{b_c}\right)\right] \quad (13)$$

$$I = i_{corr}\left[\exp\left(\frac{2.303(E - E_{corr})}{b_a}\right) - exp\left(-\frac{2.303(E - E_{corr})}{b_c}\right)\right] \quad (14)$$

donde E_{corr} es el potencial de corriente, E el potencial aplicado, η el sobrepotencial (diferencia entre E y E_{corr}), I la corr$_i$ente, i_{corr} la corriente de corrosión, y tanto b_a como b_c son las constantes de Tafel o parámetros Tafel, derivados de los gráficos E vs log(I) como pendientes anódicas y catódicas en las regiones Tafel (Berradja, 2019).

Las ecuaciones 13 y 14 se pueden reorganizar, según corresponda, para elegir una sola dirección de polarización ya sea anódica o catódica (Berradja, 2019). A valores suficientemente mayores de η (100mV≤ η ≤ 500 mV). En la dirección anódica, la ecuación 13 se puede reorganizar como

$$\eta_a = b_a \log \frac{I}{i_{corr}} \tag{15}$$

Del mismo modo, a valores suficientemente mayores de η, en la dirección catódica, la ecuación 13 puede ser modificada a

$$\eta_a = -b_c \log \frac{I}{i_{corr}} \tag{16}$$

Las constantes de Tafel (b_a y b_c) se pueden calcular mediante las siguientes ecuaciones:

En la forma anódica

$$b_a = 2.303 \frac{RT}{\beta nF} \tag{17}$$

En la forma catódica

$$b_c = -2.303 \frac{RT}{\beta nF} \tag{18}$$

donde R es la constante de los gases de valor 8.314 $J/mol * K$, T es la temperatura absoluta, β es la transferencia de carga para la reacción anódica o catódica, usualmente cercano a 0.5, n es el número de electrones transferidos y F es Faraday de valor 96,485 C/mol de electrones (Roberge P. , 2008).

La principal ventaja de esta técnica es que resulta rápida. Las curvas pueden generarse en una hora aproximadamente (Perry & Green, 2012). En cambio, la desventaja de la técnica de Tafel es que las grandes densidades de corriente son a menudo requeridas para generar los gráficos de Tafel completos. El uso de grandes densidades de corriente puede alterar las condiciones de la superficie del espécimen, es decir, provocar daños permanentes, distorsionando los resultados (Berradja, 2019).

1.11 Prueba de la Resistencia a la polarización (Rp)

La prueba Rp está basada en la medida de la corriente eléctrica formada entre dos electrodos similares cuando el potencial eléctrico entre ellos es de 10 a 30 mV. Ambos electrodos se colocan en una solución de electrolitos y se comienza a

cambiar el potencial eléctrico, entonces se obtiene una curva casi recta, potencial eléctrico (o polarización) vs densidad de corriente (Groysman, 2010).

La tendencia de los iones metálicos de una aleación para pasar en una solución, o corroerse, es entendida por la relación entre un pequeño cambio en el potencial eléctrico (típicamente de 10 a 30 mV) a través de la interfaz de corrosión y el aumento en la densidad de corriente (i_{corr}), que resultan de un cambio en el flujo de iones en la solución (Groysman, 2010).

En la Figura 7 se muestra un ejemplo del gráfico de la línea de polarización.

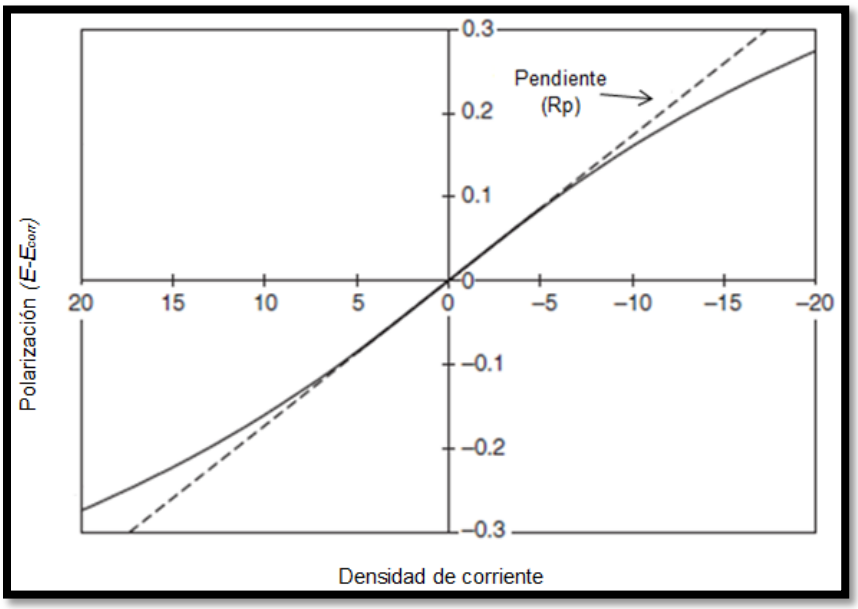


Figura 7. Gráfico hipotético de la línea de polarización. Adaptado de (Roberge P. , 2008).

En otras palabras, la resistencia a la polarización de un material está definida como la pendiente de $\Delta E/\Delta i$ de una curva de densidad de corriente en el potencial de corrosión libre, produciendo la resistencia a la polarización (R_p) que está relacionada con la corriente de corrosión (i_{corr}) (Roberge P. , 2008). La teoría de esta relación fue desarrollada por Stern y Geary, quienes demostraron en 1957 que i_{corr} puede ser calculada si se conoce el valor de Rp (Groysman, 2010).

La aproximación de Stern-Geary es la siguiente:

$$R_p = \frac{B}{i_{corr}} = \frac{(\Delta E)}{(\Delta i)_{\Delta E \to 0}} \quad (19)$$

Donde $R_p = resistencia\ a\ la\ polarización$

$i_{corr} = densidad\ de\ corrosión$ (mA/cm^2)

$B = es\ la\ constante\ de\ Stern - Gaery\ (mV)$

El valor de la constante B en la ecuación 19 se puede calcular mediante la siguiente relación:

$$B = \frac{b_a * b_c}{2.3\ (b_a + b_c)} \quad (20)$$

Donde b_a y b_c son las constantes anódicas y catódicas de Tafel, respectivamente. La contante B depende del tipo de metal y el ambiente.

Por lo tanto, el valor de i_{corr} se puede calcular directamente de la unión de las ecuaciones 19 y 20.

$$i_{corr} = \frac{1}{R_p} * \frac{b_a * b_c}{2.3\ (b_a + b_c)} \quad (21)$$

El principio de la técnica Rp se basa únicamente en la evaluación de corrosión uniforme en estado estacionario. Los valores B, generalmente se consideran dentro de un rango de 26 a 30 mV para la mayoría de los sistemas de entornos metálicos (Groysman, 2010).

1.11.1 Beneficios de la prueba de resistencia a la polarización

De acuerdo a Groysman (2010), la prueba R_p es usada para monitorear la velocidad de corrosión del reforzamiento del concreto, desechos nucleares de tanques, para evaluar la eficacia de los inhibidores de corrosión en tuberías de gas y petróleo, para medir las velocidades de corrosión de las superficies externas de las tuberías en un sitio de excavación y en sistemas de enfriamiento. A continuación se enlistan los beneficios de esta prueba.

1. Permite la medición en tiempo real de la velocidad de corrosión y proporciona datos en pocos minutos.

2. Esta prueba es particularmente adecuada para la aplicación de soluciones acuosas, para que se puedan detectar alteraciones del proceso u otras condiciones de corrosión de manera rápida y tomar medidas correctivas de inmediato. La prueba es usada para la rápida estimación del rendimiento de los inhibidores de corrosión en un ambiente conductivo.
3. Algunos sistemas combinan este método con las mediciones de ruido electroquímico para determinar la localización del inicio de la corrosión o como un indicador de la estabilidad de la película inhibidora en la superficie del metal.

1.11.2 Limitaciones de la prueba de resistencia a la polarización

1. Es imposible medir la corrosión localizada.
2. Las incrustaciones y otros sedimentos formados en la superficie del electrodo dan lugar a un aumento en la resistencia eléctrica, no refiriéndose al cambio de velocidad de corrosión en el metal.
3. Las reacciones redox, diferentes de las reacciones de corrosión, contribuyen al incremento de la corriente de corrosión y puede provocar errores.
4. Es muy importante colocar correctamente los electrodos en una corriente de flujo.
5. La principal desventaja es que éste método no función en soluciones de baja conductividad y es imposible para monitorear la corrosión localizada.
6. La constante B en la ecuación 19 puede variar con el tiempo y este cambio provoca resultados erróneos. La prueba requiere el previo conocimiento de las constantes de Tafel para el cálculo de velocidades de corrosión.

1.12 Mediciones en una celda electroquímica

Las pruebas electroquímicas se llevan a cabo en una celda electroquímica adaptada a un potenciostato. La celda electroquímica está formado por un sistema de tres electrodos, los cuales son: un electrodo de trabajo (WE), que es la muestra de interés; un contra electrodo (CE), a través del cual la corriente fluye hasta completar el circuito (Perry & Green, 2012); y un electrodo de referencia (RE), el

cual tiene un potencial conocido que permanece constante y que es independiente de la composición de la disolución (Skoog, West, Holler, & Crouch, 2014). En la Figura 8 se muestra una ilustración de un potenciostato.

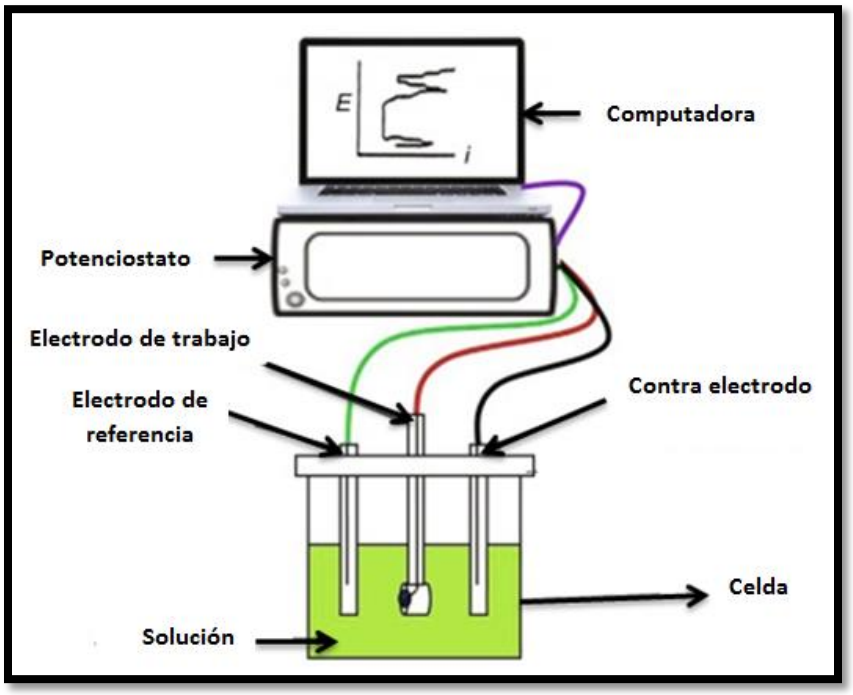


Figura 8. Ilustración de un potenciostato y un sistema de tres electrodos. Adaptado de (Nnamchi & Obayi, 2018).

De la Figura 8, se observa que el WE tiene contacto con el medio, ya que en su superficie ocurrirá una reacción de óxido-reducción. Después de aplicar al WE un cierto potencial, se comienzan una transferencia de electrones entre el electrodo y el medio. La corriente observada en el electrodo pasará a través del CE para mantener el equilibrio. Los materiales conductores como el platino y el grafito se utilizan generalmente como CE. El RE tiene un potencial conocido, pero no pasa corriente a través de él. Solo actúa como referencia al medir el potencial del WE (Nnamchi & Obayi, 2018).

Existe una gran variedad de RE, los más utilizados en soluciones acuosas son el electrodo de calomelano saturado (SCE) y el electrodo de cloruro de plata (Ag/AgCl) (Kelly, Scully, Shoesmith, & Buchheit, 2003).

Cuando se reportan mediciones del potencial electroquímico, es importante indicar el electrodo de referencia con el que se trabajó. Es posible realizar una conversión entre electrodos mediante los datos de la Tabla 2.

Tabla 2. Potencial de equilibrio a 25 °C de los electrodos de referencia más comúnmente usados (Roberge P. , 2008).

Nombre del electrodo	Condición	Potencial (V vs. SHE)
Estándar de hidrógeno (SHE)	ph=0	0.00
Cloruro de plata (Ag/AgCl)	0.1 M KCl	0.2881
	1.0 M KCl	0.235
	Saturado (KCl)	0.199
Calomelano	0.1 M KCl	0.3337
	1.0 M KCl	0.280
	Saturado (KCl)	0.241

1.13 Determinación de la velocidad de corrosión mediante la prueba Rp

La ecuación de Faraday se puede utilizar para calcular la velocidad de corrosión (Wong, Martin, & Rebak, 2006):

$$V_{corr} = k \frac{i_{corr}}{\rho} EW \tag{22}$$

donde k es un factor de conversión con valor de $3.27\,x10^{6}\ \mu m * g * A^{-1} * cm^{-1} * yr^{-1}$, ρ es la densidad del metal $[g/cm^{3}]$, EW es el peso equivalente $[g]$. Finalmente, i_{corr} se calcula con la prueba R_p o por curvas Tafel.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1 Estado del Arte

2.1.1 Acero

Durante los últimos 20 años, la producción de tuberías de acero ha tenido un papel importante para el desarrollo en el área de la metalúrgica. En la actualidad, la tendencia en la ingeniería de tuberías es la fabricación de tubos con gran diámetro, gasoductos de alta presión, tuberías submarinas con espesor grueso, tuberías resistentes a distintos entornos y principalmente, con una alta resistencia a la corrosivo (OCTAL, 2018). Por lo tanto, el acero debe contar con diversas características para su aplicación en procesos industriales.

Todos los aceros son principalmente, o más apropiadamente, aleaciones de hierro (Fe) y carbono (C), donde el contenido de carbono generalmente se encuentra en el rango de 0.05 hasta 1% y ocasionalmente se encuentra en el rango de 1 a 2 % (Maldonado Flores, 1996).

Uno o más elementos como, manganeso (Mn), fósforo (P), azufre (S), silicio (Si), entre otros, pueden ser requeridos para proporcionar al acero características especiales o propiedades para aplicaciones de ingeniería (Maldonado Flores, 1996).

Las aleaciones del acero que son objeto de estudio de esta investigación por su importancia industrial son las siguientes: AISI 1018, API-5L-X52, API-5L-X60.

2.1.2 Acero AISI 1018

El sistema AISI utiliza cuatro dígitos para designar la composición química de los aceros al carbono y las aleaciones. Este sistema se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Representación del sistema AISI (Total Materia, 2011) .

El primer dígito (1) de esta designación indica un acero al carbono; es decir, los aceros al carbono comprenden el grupo 1xxx en el sistema AISI y se subdividen en cuatro categorías debido a la variación de ciertas propiedades entre ellas. Estas categorías de acero al carbono se muestran en la Tabla 3. El segundo dígito de la serie indica la concentración del elemento principal en porcentaje (1 equivale a 1%). Finalmente, los dos últimos dígitos indican la cantidad de carbono que se encuentra en el acero (Total Materia, 2011).

Tabla 3. Sistema AISI para designar la composición química de los aceros al carbono.

Acero al carbono	10XX	Carbono liso, Mn 1.00% máx.
	11XX	Mecanizado libre de azufre.
	12XX	Mecanizado libre de azufre y fósforo.
	15XX	Carbono liso, Mn 1.00-1.65%.

Por lo tanto, el acero AISI 1018 es un acero al carbono, cuyo elemento principal se encuentra en un porcentaje inferior a 1% y con una cantidad de carbono de 0.18%.

El acero al carbono AISI 1018 es una aleación comúnmente disponible en todo el mundo y tiene diversas aplicaciones, como:

- Tiene muchos productos semielaborados y finales como barras, tubos y tuberías de acero.

- Es usado comúnmente en piezas de maquinaria como: ejes, husillos, varillas y ruedas dentadas
- Es usado en procesos de doblado, engarzado y estampado.
- Es ampliamente utilizado para accesorios, placas de montaje y espaciadores.
- Se utiliza para mejorar los procesos de perforación, mecanizado, roscado y punzonado (UNISTEEL, 2020).

Este acero se utiliza adecuadamente en aplicaciones que no necesitan alta resistencia de aceros aleados y alto contenido de carbono. La composición química del acero AISI 1018 se describe en la Tabla 4.

2.1.3 Acero API-5L

El tubo de acero API 5L es una micro aleación de acero baja en carbono o ultra baja en carbono. API significa Instituto Americano del Petróleo, mientras que 5L representa el estándar para las dimensiones, propiedades físicas, mecánicas y químicas del acero. Se caracterizan por su durabilidad, resistencia a la corrosión, y robustez. Estos aceros al carbono se utilizan exclusivamente para la transmisión de destilados de petróleo, gas y petróleo. La tubería de acero API 5L incluye diferentes grados de acero, los cuales generalmente son Grado B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80. La letra “X”, seguida de dos o tres dígitos equivalen al valor del límite elástico (en psi) multiplicado por 1000 (OCTAL, 2018). Por lo tanto, los aceros API 5L X52 y API 5L X60, tienen un límite elástico de 52,000 y 60,000 psi, respectivamente.

2.1.4 Acero API-5L-X52

La composición química del acero API-5L-X52 se describe en la Tabla 4. El acero tipo API 5L se utiliza en líneas de tubería para el transporte de petróleo y gas natural (OCTAL, 2018).

2.1.5 Acero API-5L-X60

La composición química del acero API-5L-X60 se describe en la Tabla 4. El acero API-5L-X60 es utilizado principalmente como material de tubería y tiene

aplicaciones en el transporte de agua, vapor y aceite (Trident Steel & Engg. Co., 2020).

Las diferencias entre ambos aceros API 5L son sus composiciones químicas, como se observa en la Tabla 4, y los valores del límite elástico, que es la tensión máxima que un material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes (Tenso Unitex, 2020). Por lo tanto, el acero 5L X60 es un material más elástico que el acero 5L X52.

Tabla 4. Composición química de los aceros estudiados (García Inzunza, et al., 2013) (Olivares, et al., 2008) (Loto, 2017) (Flores, et al., 2011) (Arellanes Lozada, et al., 2018) (Corrales M. , et al., 2019) (Odewunmi, et al., 2020) (Alhaffar M. , Umoren, Obot, Ali, & Solomon, 2019) (Umoren & Obot, 2014) (Haruna, Obot, Ankah, Sorour, & Saleh, 2018).

Elemento	Contenido (%)		
	AISI 1018	**API-5L-X52**	**API-5L-X60**
Carbono (C)	0.14-0.20	0.08-0.24	0.125-0.21
Manganeso (Mn)	0.4-0.90	1.06-1.4	1.04-1.83
Fósforo (P)	0.04 (Max)	0.018-0.025	0.012-0.014
Azufre (S)	0.05 (Max)	0.003-0.015	0.003-0.011
Silicio (Si)	-	0.05-0.45	0.19-0.52
Aluminio (Al)	-	0.0039	0.026-0.043
Niobio (Nb)	-	0.041	0.001-0.053
Cesio (Cs)	-	0.018	-
Cromo (Cr)	-	0.02	0.07-0.16
Níquel (Ni)	-	0.019-0.021	0.05-0.15
Vanadio (V)	-	0.054-0.092	0.03-0.078
Titanio (Ti)	-	0.003	0.01-0.015
Calcio (Ca)	-	0.0002	-
Boro (B)	-	0.0003	-
Molibdeno (Mo)	-	0.001	0.079-0.08
Cobre (Cu)	-	0.01	0.03-0.296
Wolframio (W)	-	-	0.134
Estaño (Sn)	-	-	0.081
Plomo (Pb)	-	-	0.03
Zinc (Zn)	-	-	0.03
Hierro (Fe)	Balance	Balance	Balance

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

3.1 Corrosión de aleaciones de hierro en ácido clorhídrico (HCl)

Acero AISI 1018

Diversos autores han evaluado la corrosión del acero AISI 1018 en solución de HCl 1M a temperatura ambiente en estado estacionario, empleando pruebas electroquímicas, tales como PDP, Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) y Modulación de Frecuencia Electroquímica (EFM); así como pruebas por pérdida de peso (WL por sus siglas en inglés) (Shaban, et al., 2020) (García Inzunza, et al., 2013) (Olivares, et al., 2008) (Olivares, et al., 2005). También se ha valorado el acero al carbono bajo diferentes condiciones de temperatura y concentración del ácido (Loto, 2017) (Flores, et al., 2011).

La curva de Tafel del acero AISI 1018 en solución de HCl obtenida por Flores et al. (2011) muestra un comportamiento tafeliano, es decir, tanto la rama catódica como la rama anódica presentan un comportamiento lineal de al menos una década de corriente a partir de ±80 mV respecto al potencial de corrosión (E_{corr}), como se observa en la Figura 10. Adicionalmente, la rama anódica (valores menos negativos) presenta un cambio de pendiente aproximadamente a -0.400 mV, el cual se puede explicar mediante la teoría del potencial mixto. Esta teoría establece que en el proceso de la corrosión puede ocurrir, simultáneamente, más de una reacción anódica y catódica. Además, postula que todos los electrones generados por las reacciones anódicas son consumidos por las reacciones catódicas.

En el mecanismo de corrosión del acero en un medio ácido, la principal reacción anódica, o de oxidación, es la del $Fe \rightleftarrows Fe^{2+} + 2e^{-}$. La reacción catódica, o de reducción, es la de $2H^{+} + 2e^{-} \rightleftarrows H_2$. Debido a la interacción entre ambas, la reacción de anódica será influenciada por la reacción catódica, de tal manera que el equilibrio se desplazará en el sentido anódico (→), cambiando su potencial de equilibrio. Lo mismo sucederá en la reacción catódica, debido a la influencia de la reacción anódica, el equilibrio se desplazará en el sentido catódico (←), variando también su potencial de equilibrio (Ugaz Lock & Díaz Tang, 1988).

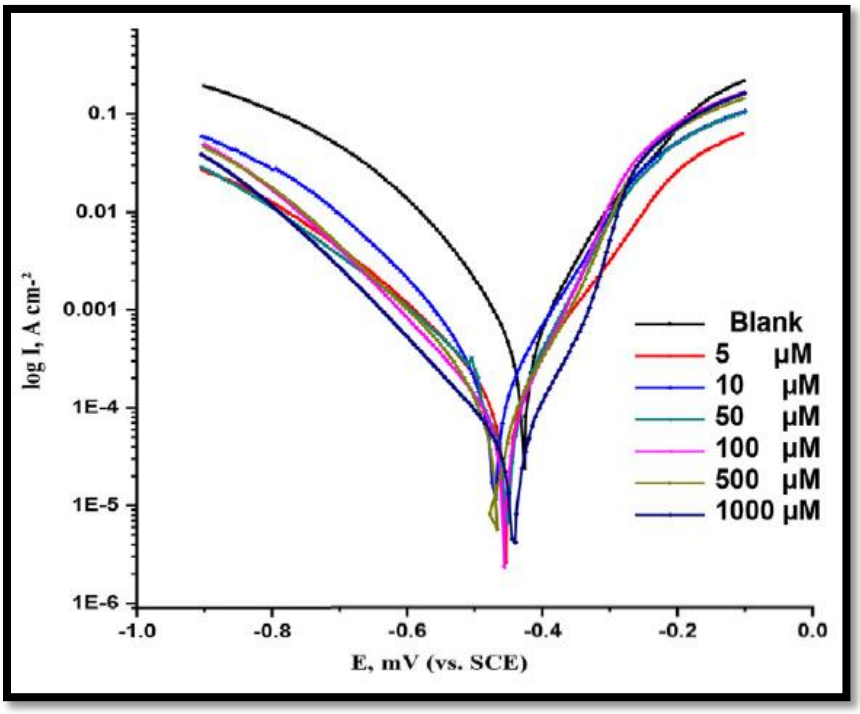


Figura 10. Curva de polarización potenciodinámica para el acero AISI 1018 en solución de HCl 1M a 25 °C, se indica en color negro (Shaban, et al., 2020).

A partir de la extrapolación lineal de las curvas de Tafel, los autores obtuvieron los parámetros electroquímicos, tales como la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), el E_{corr}, las pendientes catódica y anódica (β_a y β_c) y la velocidad de corrosión (V_{corr}). Estos valores se reportan en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros electroquímicos obtenidos de mediciones de polarización del acero AISI 1018 en HCl a diferentes concentraciones y temperaturas.

Parámetros	Shaban et al., 2020	García et al., 2013	Olivares et al., 2008	Olivares et al., 2005	Loto, 2017	Flores et al., 201)
Concentración (M)	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**0.5**
Temperatura (°C)	**25**	**25**	**25**	**25**	**30**	**25**
β_a (mV/dec)	110	119.3	179	114	9983	152
β_c (mV/dec)	146	163.1	190	138	6344	124
$-E_{corr}$ (mV)	427	358	496	508	403	559
i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	663	583	562	587	1460	249
Rp (Ω/cm^2)	41.1399	51.3846	71.3043	46.2399	44.00	119.2419
V_{corr} (mm/y)	**7.7005**	**6.7713**	**6.5274**	**6.8178**	**16.9300**	**2.8920**

Al comparar los resultados de Shaban (2020), García (2013), Olivares (2008) y (2005), los valores de β_a y β_c muestran una cercanía entre sí. Esto indica que los resultados de i_{corr} son congruentes, ya que a partir de las pendientes catódica y anódica se obtiene dicho valor. Por otra parte, si los valores de i_{corr} son cercanos también lo serán las V_{corr}, lo cual se confirma en los datos reportados en la Tabla 5. Respecto a los resultados de E_{corr}, se obtiene un valor promedio de 447.25 ± 169.38 mV. Además, se observa que los valores de E_{corr} cambian a potenciales más positivos al aumentar la concentración de ácido, lo que indica que la polarización ocurre principalmente en el ánodo, es decir la velocidad de corrosión está controlada anódicamente por la reducción de la velocidad de reacción de disolución de hierro metálico (Noor & Al-Moubaraki, 2008).

Por otro lado, la V_{corr} obtenida por Loto (2017), en la cual se evaluó la corrosión del acero AISI 1018 en HCl a una temperatura de 30°C, es mucho mayor al de Shaban (2020), García (2013), Olivares (2008) y (2005), los cuales emplearon las

pruebas electroquímicas a 25°C. Por lo tanto, se concluye que la V_{corr} tiene una tendencia a aumentar con la temperatura.

El valor de V_{corr} reportado por Flores y col. (2011), bajo la condición de concentración 0.5M de HCl, es menor al de los trabajos realizados a 1M de HCl. Se observa que la velocidad de corrosión está en función de la concentración del medio corrosivo, ya que a medida que se eleva la concentración del ácido también aumenta la cantidad de H^+ en el medio, estos favorecen la velocidad con la que se lleva a cabo la reacciones catódica y anódica, y por lo tanto, aceleran la velocidad de corrosión.

De los trabajos previamente citados, se puede concluir que la V_{corr} del acero AISI 1018 en solución de HCl 1M a una temperatura de 25°C, se encuentra en el rango de 6.9542 ± 0.51 mm/y, dicho parámetro se obtuvo con un intervalo de confianza del 95.45% de acuerdo con Spiegel & Stephens (2009).

Acero API 5L X52

En diferentes investigaciones, se ha evaluado mediante pruebas electroquímicas de PDP, la corrosión del acero API 5L X52 en solución de HCl 1M a distintas condiciones de temperatura y tiempos de inmersión (Ezpinoza, et al., 2018) (Daoud, Douadi, Issaadi, & Chafaa, 2013) (Arellanes Lozada, et al., 2015) (Arellanes Lozada, et al., 2018) (Corrales, Manh, & Arce, 2019).

La curva de Tafel del acero API 5L X52 en solución de HCl 1M obtenida por Arellanes Lozada y col. (2018) presenta un comportamiento tafeliano, como se observa en la Figura 11.

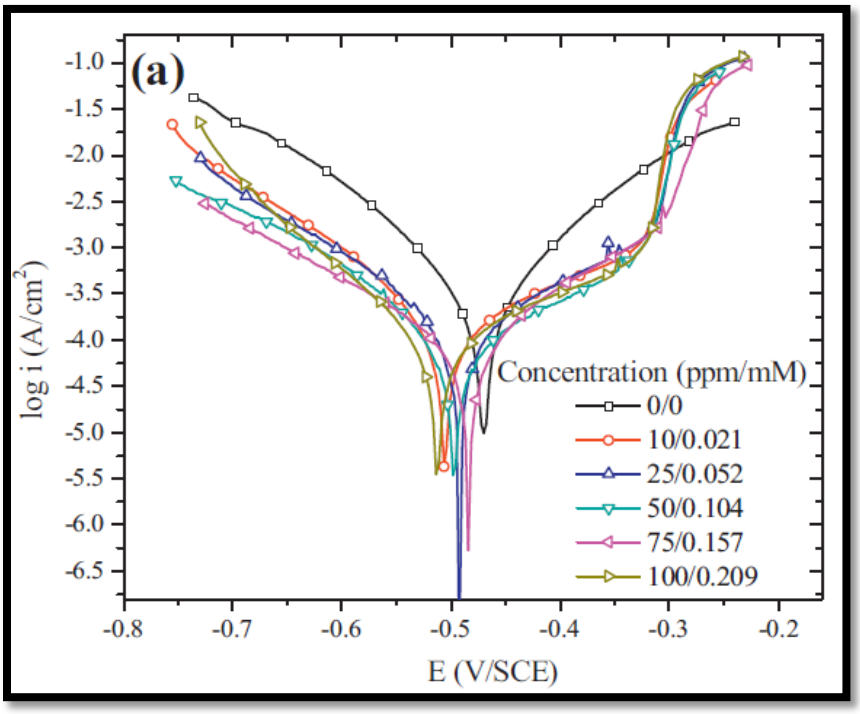


Figura 11. Curva de polarización potenciodinámica para el acero API 5L X52 en solución de HCl 1M a 25 °C, se indica en color negro (Arellanes Lozada, et al., 2018).

Como resultado de la extrapolación lineal de las curvas de Tafel, los autores obtuvieron los parámetros electroquímicos de la corrosión del acero API 5L X52 en solución HCl 0.5 y 1M, los cuales se muestran en la Tabla 6. Por otro lado, en la Tabla 7, se reportan los resultados de la corrosión del acero en HCl 1M, a las temperaturas de 25, 30, 40 y 50°C, con tiempos de inmersión de 0, 0.3, 4, 8 y 12 h.

Tabla 6. Parámetros electroquímicos obtenidos de mediciones de polarización del acero API 5L X52 en HCl 1 y 0.5 M a 25°C.

Parámetros	Espinoza et al., 2018	Arellanes et al., 2018	Daoud et al., 2014	Corrales et al., 2019	Corrales et al., 2019	Corrales et al., 2019
Concentración (M)	**1**	**1**	**1**	**0.5**	**0.5**	**0.5**
Temperatura (°C)	**25**	**25**	**22± 2**	**25**	**45**	**50**
β_a (mV/dec)	125.1	145	53.7	140	184	171
β_c (mV/dec)	173.4	146	91.7	77	81	79
$-E_{corr}$ (mV)	423	471	493	487	478	477
i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	530	688	498	453	764	995
Rp (ohm/cm^2)	59.6153	45.9739	40.2	47.6796	32.0063	23.6119
V_{corr} (mm/y)	**6.1557**	**7.9909**	**5.7841**	**5.2614**	**8.8736**	**11.5566**

Tabla 7. Parámetros electroquímicos obtenidos de mediciones de polarización del acero API 5L X52 en HCl 1M a diferentes temperaturas y tiempos de inmersión (Arellanes Lozada, et al., 2015) (Arellanes Lozada, et al., 2018).

Parámetros	Tiempos de inmersión (h)				
	0	0.3	4	8	12
Temperatura (°C)	**25**				
β_a (mV/dec)	-	145	-	-	-
β_c (mV/dec)	146	146	127	124	121
$-E_{corr}$ (mV)	471	471	470	479	471
i_{corr} (µA/cm^2)	688	688	608	313	409
V_{corr} (mm/y)	**7.9909**	**7.9909**	**7.0617**	**3.6353**	**4.7504**
Temperatura (°C)	**30**				
β_a (mV/dec)	-	138	-	-	-
β_c (mV/dec)	137	137	105	106	102
$-E_{corr}$ (mV)	449	449	405	411	420
i_{corr} (µA/cm^2)	897	838	226	317	355
V_{corr} (mm/y)	**10.4183**	**9.7331**	**2.6249**	**3.6818**	**4.1232**
Temperatura (°C)	**40**				
β_a (mV/dec)	-	132	-	-	-
β_c (mV/dec)	132	132	116	115	125
$-E_{corr}$ (mV)	426	426	397	421	431
i_{corr} (µA/cm^2)	988	988	426	835	1400
V_{corr} (mm/y)	**11.4753**	**11.4753**	**4.9478**	**9.6982**	**16.2605**
Temperatura (°C)	**50**				
βa (mV/dec)	-	-	-	-	-
βc (mV/dec)	154	-	155	147	86
-Ecorr (mV)	413	-	403	418	455
icorr (µA/cm2)	2015	-	3696	3377	383
Vcorr (mm/y)	**23.4036**	**-**	**42.9279**	**39.2228**	**4.4484**

En la Tabla 6, se muestra que los valores de la V_{corr} del acero API 5L X52 en HCl 1M tienen una variación, esto puede deberse a la condición aireada a la que se realizaron las diferentes pruebas. Se obtuvo un valor promedio de V_{corr} y el resultado es de 6.6436 ± 1.18 mm/y. Por otra parte, la V_{corr} del acero API 5L X52 en HCl 0.5M reportada por Corrales (2019) fue de 5.2614 mm/y, el cual es menor al promedio calculado en concentración 1M de HCl. Por lo tanto, se pude decir que la V_{corr} está en función de la concentración del ácido. Adicionalmente, las V_{corr} obtenidas por Corrales (2019) indican que un incremento en la temperatura genera un aumento en la V_{corr} del acero en HCl.

Por otro lado, en la Tabla 7 se observa que la V_{corr} del acero API 5L X52 en HCl 1M disminuye en los tiempos de inmersión de 0-8 h a 25°C. En cambio, a las temperaturas de 30 y 40°C se reporta el decremento de V_{corr} en los tiempos de 0-4 h. Además, se observa que en los tiempos de inmersión 0, 0.3 y 8h la velocidad de corrosión tiene una tendencia a aumentar con la temperatura.

Al comparar los valores del E_{corr} en la Tabla 6, se observa que el E_{corr} cambia a valores más positivos al aumentar la concentración de HCl, con excepción del valor de Daoud (2013), por lo que la polarización tiene lugar principalmente en el ánodo. Adicionalmente, lo valores de E_{corr} en la Tabla 7 muestran una tendencia a disminuir al aumentar la temperatura en el rango de tiempo de 0-4h.

De los trabajos previamente citados, se puede concluir que la V_{corr} del acero API 5L X52 en solución de HCl 1M a una temperatura de 25°C, se encuentra en un rango de 6.6436 ± 1.36 mm/y.

Acero API 5L X60

La corrosión del acero API 5L X60 en solución de HCl 1M a 25°C ha sido estudiada mediante pruebas electroquímicas de PDP y EIS por diferentes autores (Odewunmi, et al., 2020) (Alhaffar M. , Umoren, Obot, Ali, & Solomon, 2019) (Haruna, Saleh, Obot, & Umoren, 2019) (Umoren & Obot, 2014). Además, se ha valorado este acero al carbono en concentración de HCl 15%, es decir, a 4.4M (Haruna, Obot, Ankah, Sorour, & Saleh, 2018).

En la Figura 12, se presenta la curva de Tafel del acero API 5L X60 en solución de HCl 1M reportada por Odewunmi et al. (2020). Se observa un comportamiento tafeliano en la gráfica anteriormente mencionada.

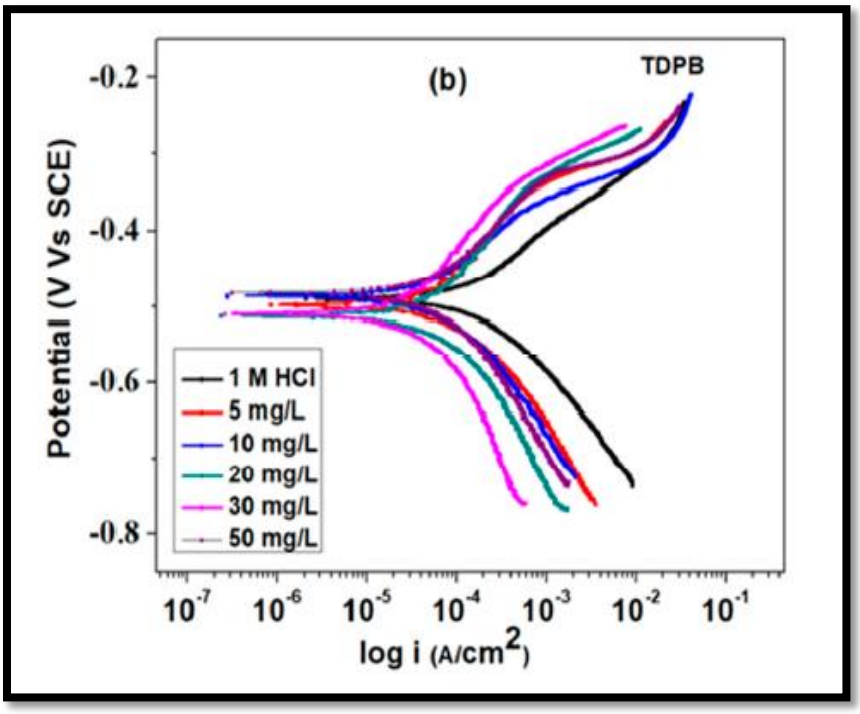


Figura 12. Curva de polarización potenciodinámica para el acero API 5L X60 en solución de HCl 1M a 25 °C, se indica en color negro (Odewunmi, et al., 2020).

En la Tabla 8 se presentan los parámetros electroquímicos obtenidos por los autores, como resultado de la extrapolación lineal de las curvas Tafel.

Tabla 8. Parámetros electroquímicos obtenidos de mediciones de polarización del acero API 5L X60 en HCl 1 y 4.4M.

Parámetros	Odewunmi et. al,2020	Alhaffar et. al, 2019	Haruna et. al, 2019	Umoren & Obot, 2014	Haruna et. al, 2018
Concentración (M)	**1**	**1**	**1**	**1**	**4.4**
Temperatura (°C)	**25**	**25**	**25**	**25**	**25**
β_a (mV/dec)	124.1	129.5	104.8	147.2	85.9
β_c (mV/dec)	118.1	112.6	116.7	110.5	124.7
$-E_{corr}$ (mV)	490	449	449	488	359
i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	167	158	181	110	1030
Rp (ohm/cm^2)	157.5444	189.6	132.6331	249.4796	21.4702
V_{corr} (mm/y)	**1.9396**	**1.8351**	**2.1022**	**1.2776**	**11.9631**

De los valores reportados por Odewunmi (2020), Alhaffar (2019), Haruna (2019) y Umoren (2014), se observa una cercanía en los datos de β_c. Sin embargo, el valor de β_a obtenido por Umoren (2014) es mayor al de las otras dos investigaciones. Por lo que, los resultados de i_{corr} y V_{corr} son menores en la investigación de Umoren (2014) en comparación al de los otros dos trabajos.

En relación con el E_{corr}, se reporta un valor promedio de 469 ± 45.20 mV a concentración de HCl 1M (Odewunmi, et al., 2020) (Alhaffar M. , Umoren, Obot, Ali, & Solomon, 2019) (Haruna, Saleh, Obot, & Umoren, 2019) (Umoren & Obot, 2014). Al igual que las aleaciones de acero API 5L X52 se observa que al incrementar la concentración de ácido la velocidad de corrosión es controlada anódicamente.

Por otro lado, en la investigación realizada por Haruna (2018) en la cual se evaluó la corrosión del acero API 5L X60 en HCl a una concentración de 4.4M, se reporta una V_{corr} mucho mayor a las de Odewunmi (2020), Alhaffar (2019), Haruna (2019)

y Umoren (2014), lo cuales realizaron las pruebas electroquímicas a concentración 1M de HCl. Se concluye que la V_{corr} tiene una tendencia a aumentar con la concentración del medio ácido.

De los trabajos previamente citados, se puede concluir que la V_{corr} del acero API 5L X60 en solución de HCl 1M a una temperatura de 25°C, se encuentra en un rango de 1.7886 ± 0.35 mm/y.

3.2 Corrosión de aleaciones de hierro en ácido sulfúrico (H_2SO_4)

Acero AISI 1018

Diferentes autores han estudiado la corrosión del acero AISI 1018 en presencia de H_2SO_4 1M a temperatura ambiente en estado estacionario, empleando pruebas electroquímicas, tales como PDP y WL (Likhanova, et al., 2010) (Likhanova, et al., 2011) (Olivares Xometl, et al., 2013). También se ha valorado este acero al carbono a diferentes temperaturas y concentraciones de H_2SO_4 (Loto, 2017) (Rodríguez, Olivares, Valladares, & González, 2018)

La curva de Tafel del acero AISI 1018 en solución de H_2SO_4 obtenida por Likhanova et al. (2011) muestra un comportamiento tafeliano, dicha gráfica se presenta en la Figura 13.

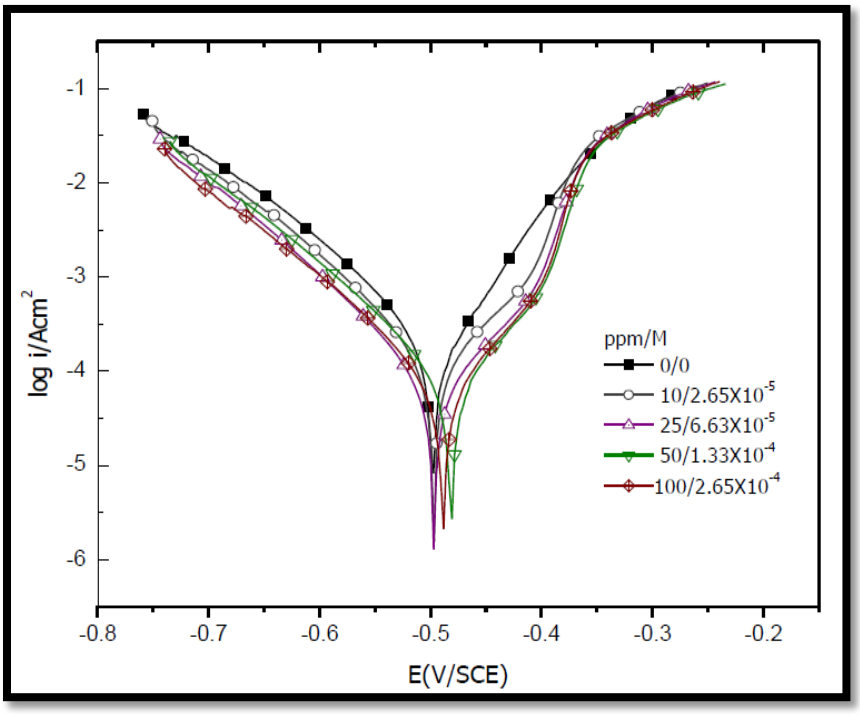


Figura 13. Curva de polarización potenciodinámica para el acero AISI 1018 en solución de H_2SO_4 1M a 25 °C, se indica en color negro (Likhanova, et al., 2011).

Mediante de la extrapolación lineal de las curvas Tafel, los autores reportaron valores de los parámetros electroquímicos, los cuales se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros electroquímicos obtenidos de mediciones de polarización del acero AISI 1018 en H_2SO_4 1M y diferentes temperaturas.

Parámetros	Likhanova et al., 2010	Likhanova et al., 2011	Olivares et. al., 2013	Loto, 2017	Rodríguez et. al., 2018
Concentración (M)	**1**	**1**	**1**	**1**	**0.5**
Temperatura (°C)	**22±2**	**25**	**25**	**30**	**25**
β_a (mV/dec)	119		124	9631	87
β_c (mV/dec)	160	125	108	6485	74
$-E_{corr}$ (mV)	526	497	511	319	445
i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	1497	1314	1863	2000	1010
Rp (Ω/cm^2)	19.8204	98	13.4715	842.49	17.2137
V_{corr} (mm/y)	**17.3871**	**15.2617**	**21.6381**	**23.2293**	**11.7308**

En la Tabla 9, se observa que los parámetros electroquímicos reportados por Likhanova (2010) y (2011), tienen una proximidad en i_{corr} y V_{corr}. Sin embargo, al compararlos con los valores de Olivares (2013), existe una diferencia tanto en i_{corr} como en V_{corr}. Esta variación de resultados puede deberse a la condición aireada a la que se realizaron las diferentes pruebas.

Por otra parte, al comparar la V_{corr} reportada por Rodríguez y col. (2019) con las V_{corr} en H_2SO_4 1M, se observa que la V_{corr} tiene una tendencia a aumentar con la concentración del ácido. Con respecto al E_{corr}, se observa que no se desplaza a un valor más positivo al incrementar la concentración de ácido, esto puede deberse a diversas interferencias en las pruebas electroquímicas.

Adicionalmente, la V_{corr} obtenida por Loto (2017), en la cual se evaluó la corrosión del acero AISI 1018 en H_2SO_4 1M a 30°C, es mucho mayor a los valores reportados a 25°C. Por lo tanto, la V_{corr} está en función de la temperatura.

De los trabajos previamente citados, se puede concluir que la V_{corr} del acero AISI 1018 en solución de H_2SO_4 1M a una temperatura de 25°C, se encuentra en un rango de 18.0956 ± 3.74 mm/y.

Acero API 5L X52

Diversas investigaciones han evaluado, por medio de pruebas electroquímicas de PDP y EIS, la corrosión del acero API 5L X52 en solución de H_2SO_4 1M y 25°C (Arellanes Lozada, et al., 2020) (Lozano, Mazario, Olivares-Xometl, Likhanova, & Herrasti, 2014) (Danaee, Gholami, RashvandAvei, & Maddahy, 2014) (Olivares-Xometl, et al., 2014) (Pérez Navarrete, Olivares Xometl, & Likhanova, 2010). Además, se ha evaluado este acero al carbono en H_2SO_4 0.5M y diferentes temperaturas (Corrales M. , et al., 2019).

En la Figura 14, se muestra la curva de Tafel del acero API 5L X52 en solución de H_2SO_4 obtenida por Olivares y col. (2014), se observa que presenta un comportamiento tafeliano.

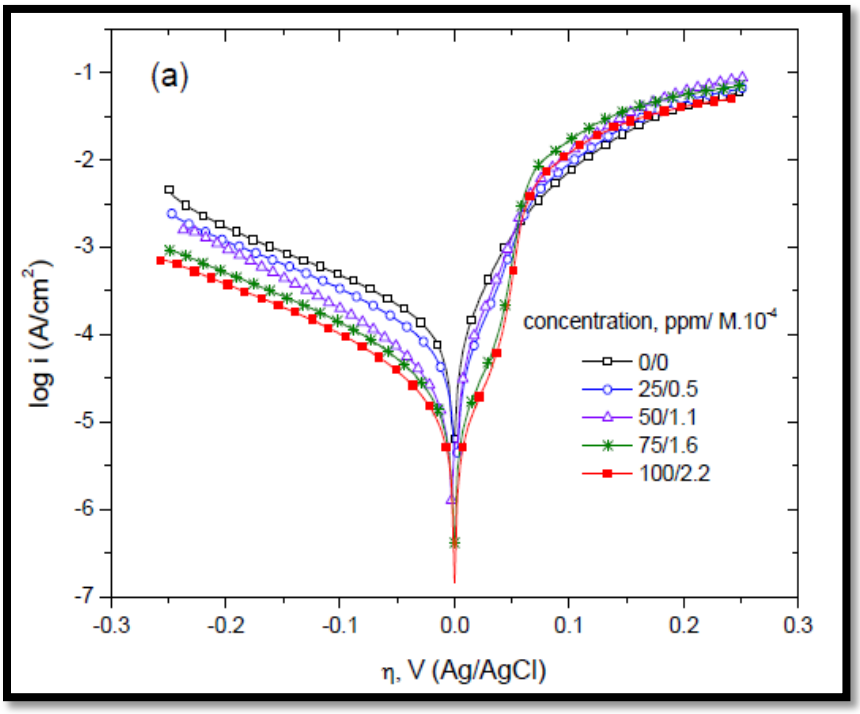


Figura 14. Curva de polarización potenciodinámica para el acero API 5L X52 en solución de H_2SO_4 1M a 25 °C, se indica en color negro (Olivares-Xometl, et al., 2014).

En la Tabla 10, se reportan los parámetros electroquímicos de la corrosión del acero API 5L X52 en solución H_2SO_4 1M. Por otro lado, en la Tabla 11 se presentan los valores obtenidos de la corrosión del acero en solución H_2SO_4 0.5M a diferentes condiciones de temperatura.

Tabla 10. Parámetros electroquímicos obtenidos de mediciones de polarización del acero API 5L X52 en H_2SO_4 1M a 25°C.

Parámetros	Arellanes et al., 2020	Danaee et al., 2014	Lozano et al, 2014	Olivares et al., 2014	Gholami et al. 2013	Pérez et al., 2010
Temperatura (°C)	**25**	**25**	**22± 2**	**25**	**25**	**25**
β_a (mV/dec)	45	40.7	54	48	40.7	24.4
β_c (mV/dec)	110	98.2	208	153	98.2	36.6
$-E_{corr}$ (mV)	406	440	470	427	440	349.9
i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	366	312	490	435	312	473.1
Rp (Ω/cm^2)	37.9371	40.2	38.0392	36.5190	40.2	13.4
V_{corr} (mm/y)	**4.2509**	**3.6237**	**5.6912**	**5.0523**	**3.6237**	**5.4949**

Tabla 11. Parámetros electroquímicos obtenidos de mediciones de polarización del acero API 5L X52 en H_2SO_4 0.5M a diferentes temperaturas.

Parámetros	Corrales et al., 2019			
Temperatura (°C)	**25**	**45**	**50**	**55**
β_c (mV/dec)	41	24	39	35
$-E_{corr}$ (mV)	474	433	465	423
i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	298	1189	2028	1670
V_{corr} (mm/y)	**3.4611**	**13.8098**	**23.5546**	**19.3965**

En la Tabla 10, los resultados reportados por diversos autores muestran una proximidad en los valores i_{corr}, así como en V_{corr}. Por otro lado, en la Tabla 11 los valores reportados por Corrales y col. (2019) muestran que la V_{corr} tiene una tendencia a aumentar con la temperatura en el rango de 25-50°C. Además, al comparar el valor de la V_{corr} a 25°C de Corrales (2019) con los resultados de la

Tabla 11, se puede concluir que la V_{corr} tiene una tendencia a aumentar con la concentración del ácido. Además, el valor promedio de E_{corr} es de 418.4 ± 45.2028 mV y no está en función de la temperatura (Danaee, Gholami, RashvandAvei, & Maddahy, 2014) (Olivares Xometl, et al., 2013). Los resultados de E_{corr} indican nuevamente que con el aumento de la concentración del ácido la polarización ocurre principalmente en el ánodo.

De los trabajos previamente citados, se puede concluir que la V_{corr} del acero API 5L X52 en solución de H_2SO_4 1M a una temperatura de 25°C, se encuentra en un rango de 4.8226 ± 0.77 mm/y.

Acero API 5L X60

En las investigaciones realizadas por Likhanova (2011), Olivares (2018) y (2020), se estudió la corrosión del acero AISI 1018 en solución de H_2SO_4 1M a temperatura ambiente en estado estacionario, empleando pruebas electroquímicas, tales como PDP y WL. Además, se ha valorado este acero al carbono en H_2SO_4 0.5M (Ciubotariu, Benea, & Bonora, 2010).

La curva de Tafel del acero API 5L X52 en solución de H_2SO_4 obtenida por Olivares y col. (2020) se presenta en la Figura 15, se observa que ésta muestra un comportamiento tafeliano.

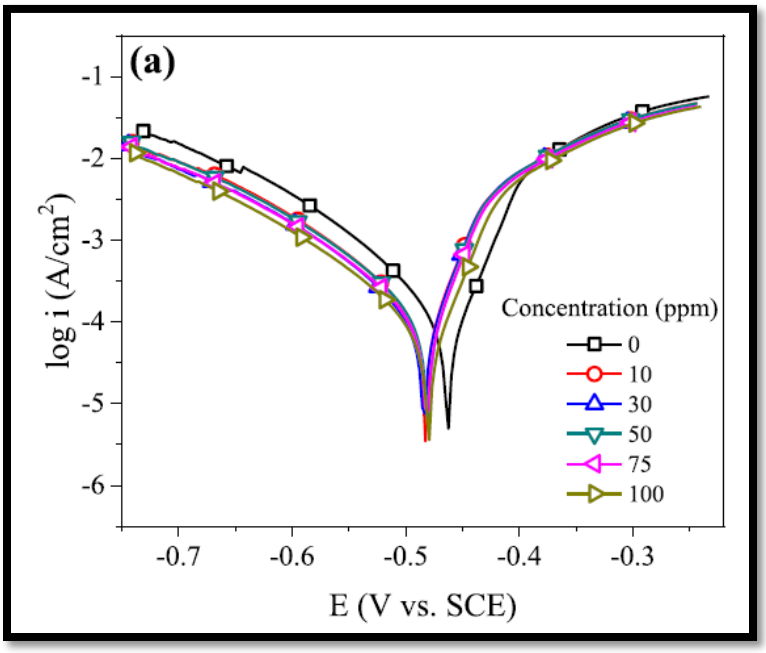


Figura 15. Curva de polarización potenciodinámica para el acero API 5L X60 en solución de H_2SO_4 1M a 25 °C, se indica en color negro (Olivares-Xometl, et al., 2020).

Como resultado de la extrapolación lineal de las curvas Tafel, los autores obtuvieron los parámetros electroquímicos, los cuales se reportan en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros electroquímicos obtenidos de mediciones de polarización del acero API 5L X60 en H_2SO_4 1 y 0.5M.

Parámetros	Olivares et. al, 2020	Likhanova et. al, 2019	Olivares et. al, 2018	Ciubotariu et. al, 2010
Concentración (M)	**1**	**1**	**1**	**0.5**
Temperatura (°C)	**25**	**25**	**25**	**25**
β_a (mV/dec)	145	145	145	100
β_c (mV/dec)	62	62	62	100
$-E_{corr}$ (mV)	458	462	462	0.005
i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	1293	1293	1293	0.775
Rp (Ω/cm^2)	14.6037	14.6037	14.6037	28050.4908
V_{corr} (mm/y)	**15.0178**	**15.0178**	**15.0178**	**0.009**

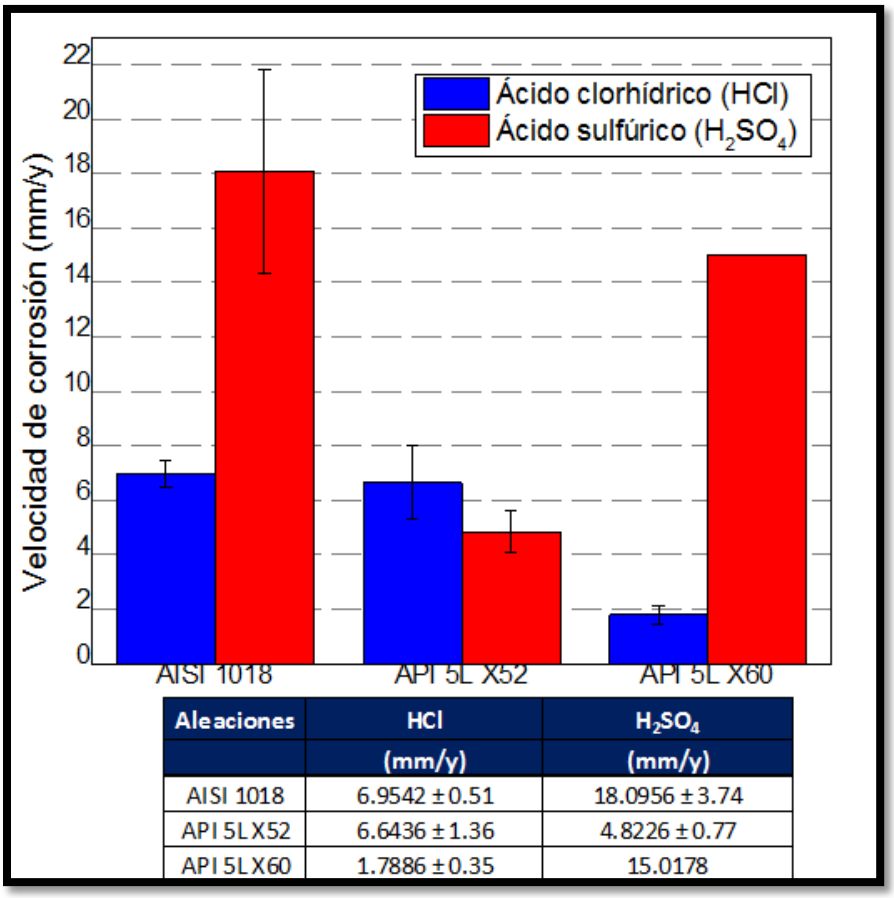
En la Tabla 12, se observa que los parámetros electroquímicos reportados por Olivares (2020), Likhanova (2019) y Olivares (2018) son idénticos. Por lo tanto, se puede concluir que la V_{corr} del acero API 5L X50 en solución de H_2SO_4 1M a una temperatura de 25°C, es de 15.0178 mm/y.

Por otro lado, Ciubotariu y col. (2010) obtuvieron parámetros electroquímicos al evaluar al acero API 5L X60 en solución de H_2SO_4 0.5M, los cuales se muestran en la Tabla 12. Al comparar las V_{corr} en las diferentes soluciones de ácido, se observa que el valor de la V_{corr} está en función de la concentración del medio corrosivo.

4. Discusión

4.1. Efecto de la composición química

Para poder determinar el efecto de la composición química en la velocidad de corrosión de las aleaciones de acero se presenta la Figura 16. La gráfica muestra el comportamiento de velocidad de corrosión en función del tipo de acero a una temperatura de 25 °C y en soluciones de HCl y H_2SO_4 una concentración de 1 M.



Aleaciones	HCl (mm/y)	H_2SO_4 (mm/y)
AISI 1018	6.9542 ± 0.51	18.0956 ± 3.74
API 5L X52	6.6436 ± 1.36	4.8226 ± 0.77
API 5L X60	1.7886 ± 0.35	15.0178

Figura 16. Velocidades de corrosión de las aleaciones AISI 1018, API 5L X52 y API 5L X60 en HCl y H_2SO_4 1M a 25°C.

La velocidad de corrosión de los aceros en diferentes ácidos depende de la composición y estructura del acero (Winston & Uhling, 2008). Para conocer el efecto de la composición química sobre la corrosión de los aceros, se consideraron únicamente los elementos en mayor concentración en las aleaciones, tales como C, Mn, P y S, ver Figura 17.

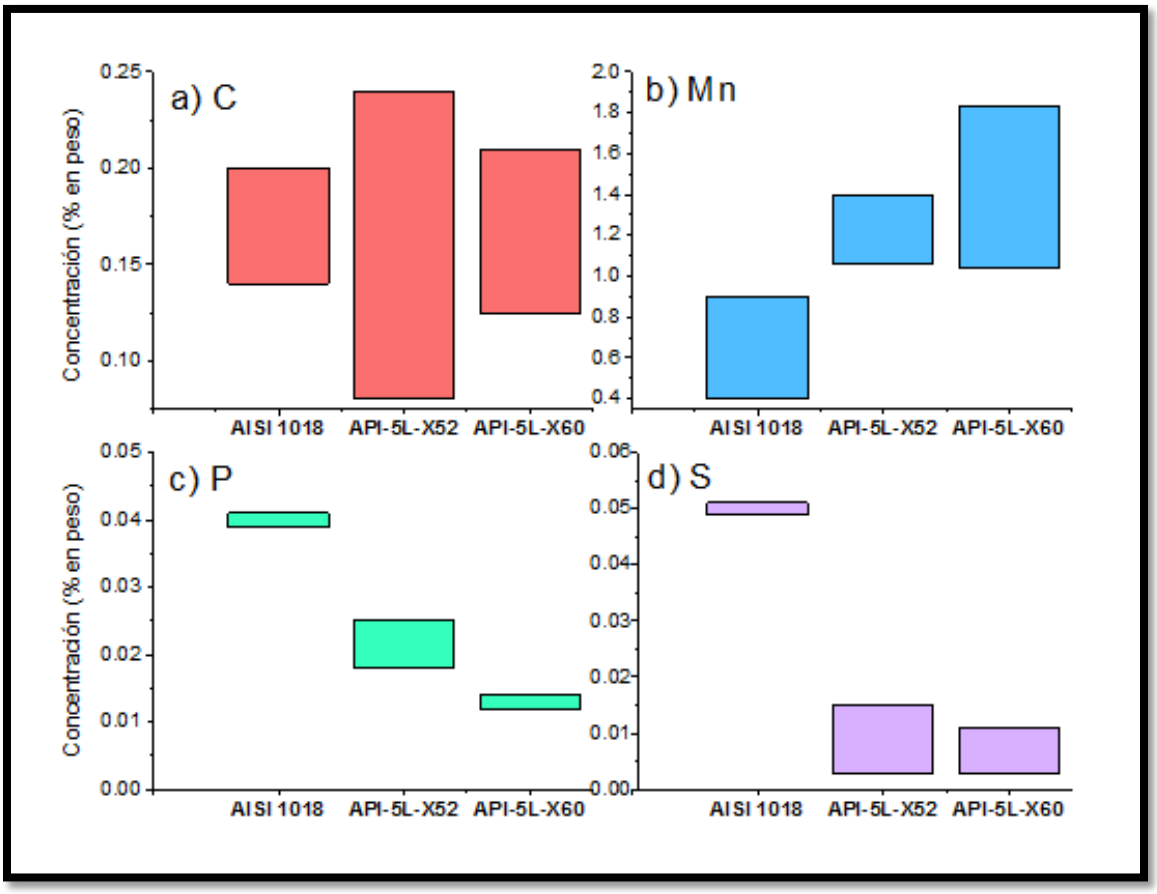


Figura 17. Cantidad de microaleantes de los aceros AISI 1018, API 5L-X52 y API 5L-X60: a) C, b) Mn, c) P y d) S.

En la Figura 17, se observa que la cantidad de C en las aleaciones AISI 1018, API 5L X52 y API 5L X60 se encuentra en un rango de 0.08-0.24%. El contenido de carbono en el acero tiene una gran influencia en la velocidad de corrosión en medios ácidos. En la investigación realizada por Damon (1941) se evaluó el efecto del contenido del C en la corrosión del acero en presencia de ácido. Cinco aceros con diferentes cantidades de carbono (0.06, 0.19, 0.37, 0.57, 0.84), se expusieron a 13 diferentes concentraciones de H_2SO_4 en el rango de 0.5 a 17.75 M y 25°C, Figura 18. En todos los casos, la velocidad máxima de corrosión del acero se obtuvo entre 5.5 y 6.5 M, siendo los aceros con mayor contenido de carbono los que presentaron mayor velocidad de corrosión. Además, se observa que todos los aceros a concentraciones de H_2SO_4 superiores a 9 M se volvieron pasivos en

ácido, debido a la formación una película pasiva de sulfato ferroso que protege la superficie metálica del ataque corrosivo y detiene la velocidad de corrosión.

Además, algunos autores han confirmado que la velocidad de corrosión del acero aumenta con el contenido de carbono, especialmente en el rango de 0.5-0.7%. La cantidad de Carbono óptima en el acero es de aproximadamente de 0.2 %, Figura 18, pues con este porcentaje la velocidad de corrosión es menor (Cleary & Greene, 1967) (Damon, 1941).

Al ubicar la cantidad de C de las tres aleaciones estudiadas en los gráficos de las Figuras 18 y 19, se observa que en promedio la cantidad de carbono para los tres aceros es cercana a 0.2 %, una concentración deseable que reduce la velocidad de corrosión del acero. El acero AISI 1018 presentó las velocidades de corrosión más altas, esto se relaciona con su concentración de carbono, la cual posee un mayor límite mínimo de 0.14% respecto a los aceros API.

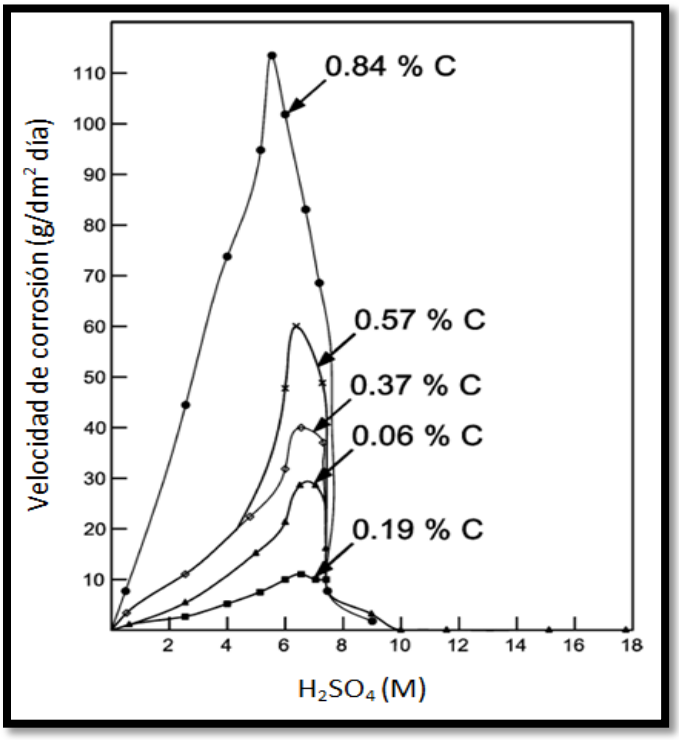


Figura 18. Gráfico de la relación entre el contenido de carbono y la velocidad de corrosión del acero en H_2SO_4 6.5M a 25 °C. Adaptado de (Damon, 1941).

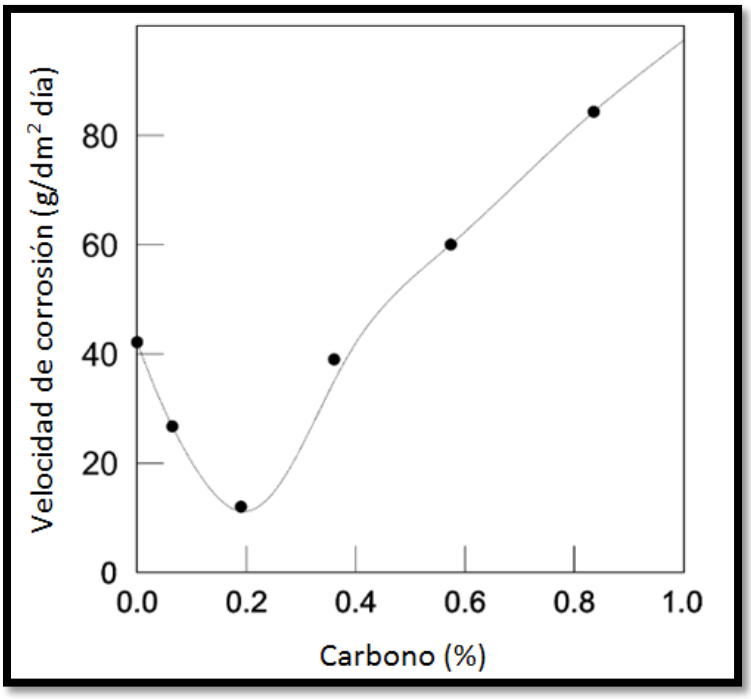


Figura 19. Gráfico de la relación entre el contenido de carbono y la velocidad de corrosión del acero en H_2SO_4 6.5M a 25 °C. Adaptado de (Damon, 1941).

Por otro lado, los elementos que tienen una mayor influencia en la V_{corr} de los aceros estudiados, son el fósforo y el azufre. El incremento del contenido tanto del azufre como del fósforo en el acero aumenta notablemente la velocidad de corrosión en medio ácido. Estos elementos tienden a disminuir la polarización anódica de modo que la velocidad de corrosión del hierro es estimulada por estos elementos tanto en sitios anódicos como catódicos (Winston & Uhling, 2008). En una investigación realizada por Kim y col. (2010) se analizó la influencia de la adición de P en la corrosión del acero al carbono en medio ácido. Se expusieron tres aceros al carbono con diferentes cantidades de fósforo (0.01, 0.05 y 0.1%) a una solución de H_2SO_4 al 10% en peso y temperatura ambiente. Los resultados indicaron que la adición de P aumenta la reacción de desprendimiento de hidrógeno catódico, debido al aumento de la actividad del hidrógeno de la superficie del acero. En la Figura 20 se observa el comportamiento del fósforo en la corrosión del acero.

De los tres aceros estudiados, el acero AISI 1018 es la aleación con un mayor contenido de P y S, los cuales se encuentran en 0.04 y 0.05%, respectivamente. Por lo tanto, las velocidades de corrosión serán mayores en esta aleación. Esto se confirma en la Figura 16, donde se observa que la V_{corr} en H_2SO_4 1M es mayor en el acero AISI 1018 que en las aleaciones API 5L X52 y API 5L X60.

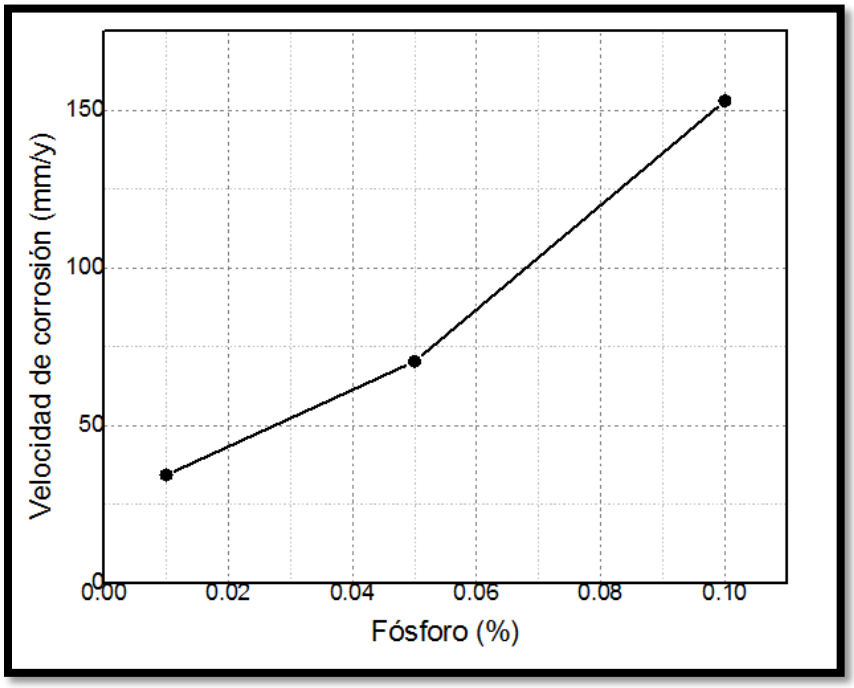


Figura 20. Gráfico de la relación entre el contenido de fósforo y la velocidad de corrosión del acero en H_2SO_4 al 10% a 25 °C.

Por otra parte, el manganeso es el segundo elemento en mayor cantidad que se encuentra en las tres aleaciones y tiene un efecto inhibidor de la corrosión del acero en medios ácidos en función del tiempo. De acuerdo con Kim & Kim (2015), los aceros con porcentajes de Mn de 5.0% muestra un efecto inhibidor con el tiempo. En el siguiente gráfico se muestra la relación entre el contenido de manganeso y la velocidad de corrosión del acero en H_2SO_4. Por lo anterior, es posible deducir que nuevamente el acero AISI 1018 al presentar la cantidad más baja de Mn tendría una mayor velocidad de corrosión.

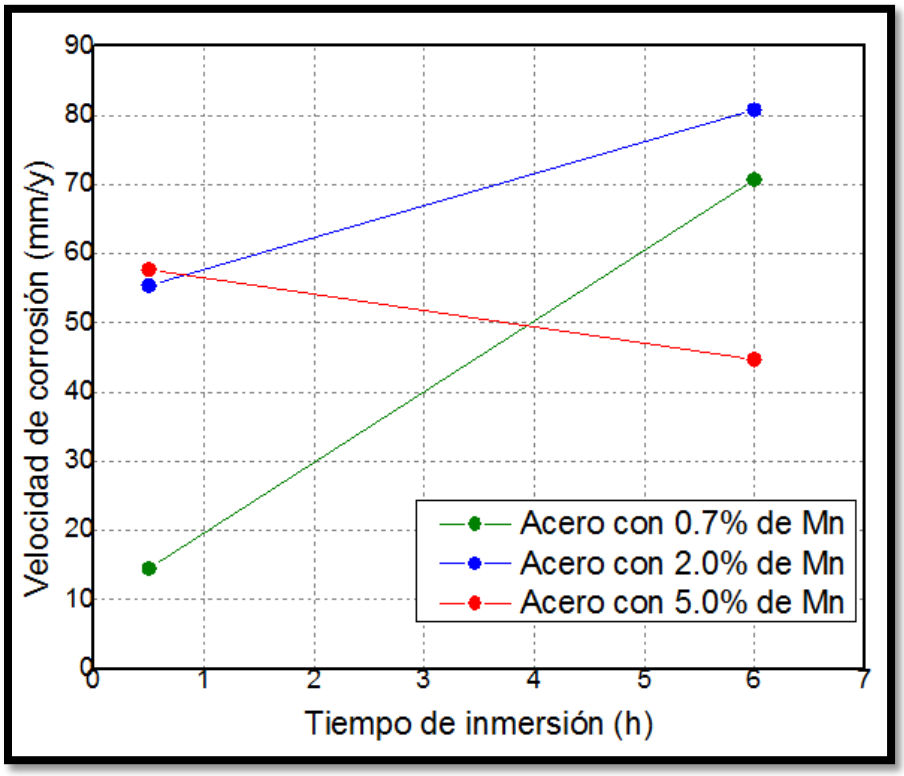


Figura 21. Gráfico de la relación entre el contenido de manganeso y la velocidad de corrosión del acero en H_2SO_4 en diferentes tiempos de inmersión.

4.2. Efecto del medio corrosivo

Como se muestra en la Figura 16, el rango de error de los valores de V_{corr} del acero API 5L X52 no permite asegurar que tipo de ácido produce una mayor velocidad de corrosión, sin embargo, la V_{corr} de las aleaciones AISI 1018 y API 5L X60 son notoriamente mayores en presencia de H_2SO_4 que en HCl. Se ha reportado que el HCl es un tipo de ácido más fuerte que el H_2SO_4 (Merck, 2020), como lo señalan sus valores de constantes de disociación (K_a), los cuales indica la tendencia a ceder un protón (Helmenstine, 2019). Mientras mayor sea K_a, el ácido será más fuerte. En la Tabla 14 se presentan las reacciones de disociación del HCl y el H_2SO_4 y su respectiva K_a. Se observa que el ácido sulfúrico tiene dos reacciones de disociación y por lo tanto, dos constantes K_a. Mientras, el valor de K_a del HCl es mayor al del H_2SO_4.

Tabla 14. Constantes de disociación (K_a) del HCl y H_2SO_4.

Sustancia	Disociación en agua	K_a
Ácido clorhídrico	$HCl \rightarrow H^+ + Cl^-$	$1.3x10^6$
Ácido sulfúrico	$H_2SO_4 \rightarrow H^+ + HSO_4^-$	$1.0x10^3$
Ion sulfato de hidrógeno	$HSO_4^- \rightarrow H^+ + SO_4^{2-}$	$1.3x10^{-2}$

A pesar de que el HCl es más fuerte, los resultados de diversos autores indican que el H_2SO_4 causa un mayor deterioro por corrosión del acero. De acuerdo a Al-zubidy (2014), el ácido sulfúrico es más corrosivo para los aceros al carbono que el ácido clorhídrico, debido a su naturaleza oxidante. Para que se lleve a cabo la reacción catódica del hidrógeno, es necesario un agente oxidante como lo son el H_2SO_4 y el HCl, ambos ácidos aceleran la velocidad de la reacción catódica, por lo tanto, también incrementa la reacción anódica y aumenta la velocidad de corrosión del acero.

Por otra parte, el H_2SO_4 al disociarse genera 2 H^+ respecto al HCl que genera solo 1 H^+, indicando que en una solución de H_2SO_4 hay una mayor cantidad de H^+, los cuales atacan la superficie metálica y provocan la pérdida del material produciendo un efecto más corrosivo en el acero respecto al ácido clorhídrico.

Por otro lado, el aumento de la velocidad de corrosión del acero a medida que disminuye el pH no se debe únicamente al aumento del desprendimiento de hidrógeno. De acuerdo a Winston & Uhling (2008), una mayor accesibilidad de oxígeno a la superficie del metal favorece a la eliminación de H_2, es decir, despolarización. Durante la reacción del metal con el ácido se desprende hidrógeno en estado gas, el cual recubre el cátodo y ralentiza la corrosión. La despolarización elimina este gas y forma agua. Debido a la despolarización, las soluciones ácidas que contienen oxígeno disuelto o están expuestas al aire son generalmente más corrosivas que los ácidos en ausencia de aire (Roberge P. , 2008).

Es importante mencionar que la mayoría de las pruebas electroquímicas no eliminan el oxígeno, es decir, son sistemas aireados, por lo que existe la presencia de oxígeno en la corrosión del acero. El oxígeno en pequeñas concentraciones en la superficie del metal aumenta la polarización catódica, disminuyendo así la corrosión, en cambio, en concentraciones más altas, el oxígeno actúa principalmente como despolarizador, aumentando la velocidad de corrosión (Winston & Uhling, 2008).

En la corrosión del acero en una solución de ácido que contiene oxígeno disuelto, son posibles dos reacciones catódicas: la evolución de hidrógeno y la reducción de oxígeno (Roberge P. , 2008), las cuales se presentan en las ecuaciones 23 y 24, respectivamente. Dado que hay dos reacciones catódicas que consumen electrones, aumenta la velocidad de corrosión del acero. En la Figura 22 se ilustran las reacciones electroquímicas que ocurren durante la corrosión del acero en presencia de ácido.

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \uparrow \quad (23)$$

$$O_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O \quad (24)$$

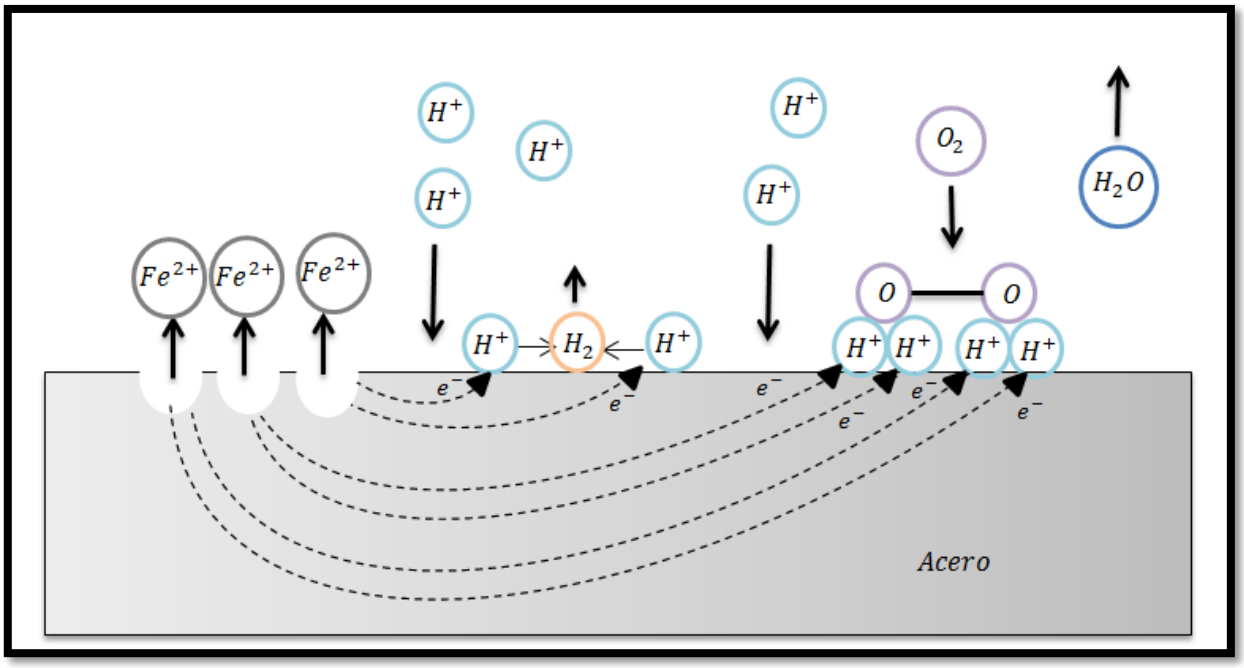


Figura 22. Reacciones electroquímicas que ocurren durante la corrosión del acero en presencia de ácido.

Otro aspecto que favorece la velocidad de corrosión del acero en H_2SO_4 es la solubilidad de los productos de corrosión generados. Cuando se expone el acero a soluciones de HCl y H_2SO_4 se llevan a cabo las siguientes reacciones:

$$2\,HCl + 2\,H_2O \rightarrow 2\,H_3O^+ + 2\,Cl^- \quad (25)$$

$$Fe(s) + 2\,H_3O^+ + 2\,Cl^- \rightarrow FeCl_2 + H_2 + 2\,H_2O \quad (26)$$

$$H_2SO_4 + 2\,H_2O \rightarrow 2\,H_3O^+ + SO_4^- \quad (27)$$

$$Fe(s) + 2\,H_3O^+ + SO_4^- \rightarrow Fe(SO_4) + H_2 + 2\,H_2O \quad (28)$$

Las reacciones 26 y 28 establecen que algunos de los productos generados por la corrosión del acero en HCl y H_2SO_4 son $FeCl_2$ y $FeSO_4$ respectivamente. La solubilidad a 25°C del $FeCl_2$ es de 65 g/100 g de H_2O y para el $FeSO_4$ a 25 °C es de 29.5 g/100 g de H_2O (Lide, 2003). Por lo tanto, los productos de corrosión en H_2SO_4 son más solubles en medio acuoso respecto a los generados en HCl, haciendo que la presencia de este último en el medio forme una capa de

productos de corrosión más estable y adherida a la superficie metálica, creando un bloqueo físico que retarda la trasferencia de masa de los iones agresivos al sustrato metálico, disminuyendo la velocidad de corrosión del acero.

4.3. Efecto de la concentración del ácido

Las Figuras 23 y 24 presentan el comportamiento de la V_{corr} de los aceros AISI 1018, API 5L X52 y API 5L X60 en diferentes concentraciones de HCl y H_2SO_4, respectivamente. Se observa que la velocidad de corrosión en todos los aceros al carbono incrementa con la concentración de ácido. La explicación a este fenómeno está relacionada con la concentración de protones en la solución: soluciones concentradas de ácido tienen mayor cantidad de protones que se adsorben a la superficie metálica y ocupan más sitios activos que aceleran el proceso corrosivo. Además, como se puede deducir del análisis del Diagrama de Pourbaix del acero en condiciones estándar, Figura 25, al incrementar el pH del medio, producido por el decremento de la concentración del ácido, el hierro pasa de un estado de corrosión a uno de pasivación en condiciones de circuito abierto.

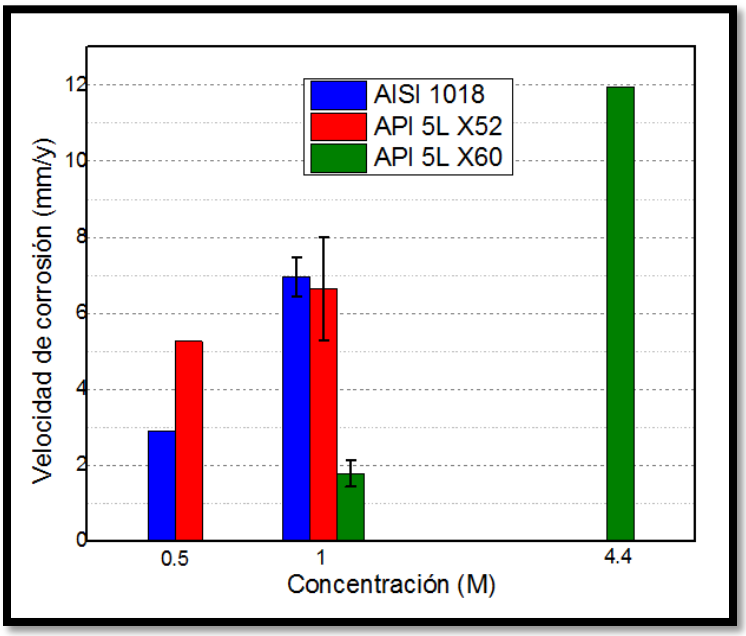


Figura 23. Comportamiento de la velocidad de corrosión de los aceros AISI 1018, API 5L X52 y API 5L X60 en diferentes concentraciones de HCl.

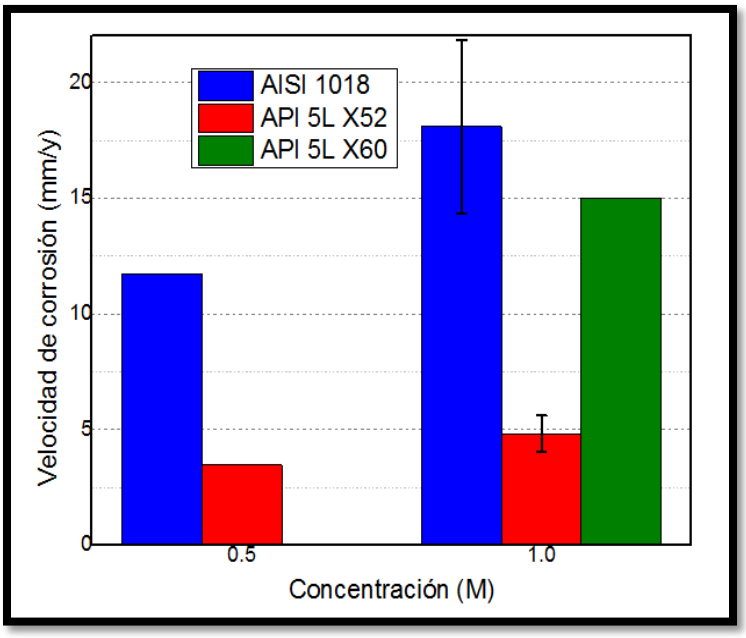


Figura 24. Comportamiento de la velocidad de corrosión de los aceros AISI 1018, API 5L X52 y API 5L X60 en diferentes concentraciones de H_2SO_4.

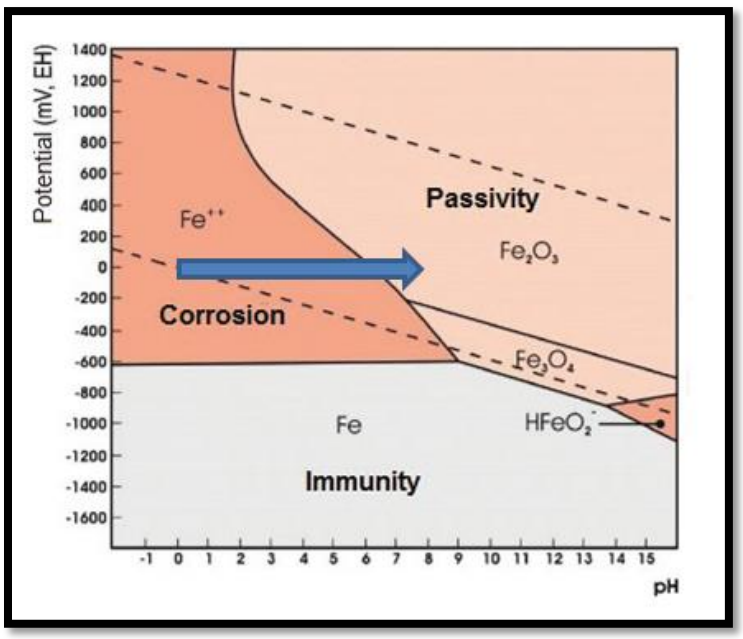


Figura 25. Diagrama de Pourbaix del hierro a 25ºC y 1 atm (Sousa, da Silva, Santana, & Véras Ribeiro, 2018).

4.4 Efecto de la temperatura

En las Figuras 26 y 27 presentan el efecto de la temperatura en la V_{corr} de los aceros AISI 1018, API 5L X52 y API 5L X60 en HCl y H_2SO_4, respectivamente. Los resultados confirman que el aumento de la temperatura genera una mayor velocidad de corrosión del acero, debido a que la temperatura incrementa la energía cinética de las reacciones y éstas se llevan a cabo con una mayor velocidad (Khaleel, Ateeq, & Ali, 2018).

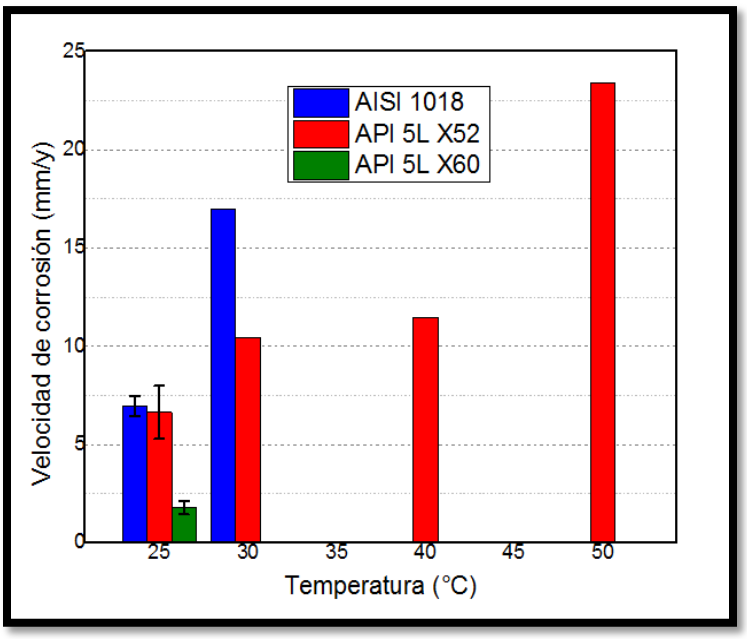


Figura 26. Comportamiento de la velocidad de corrosión de los aceros AISI 1018, API 5L X52 y API 5L X60 en HCl 1M y diferentes temperaturas.

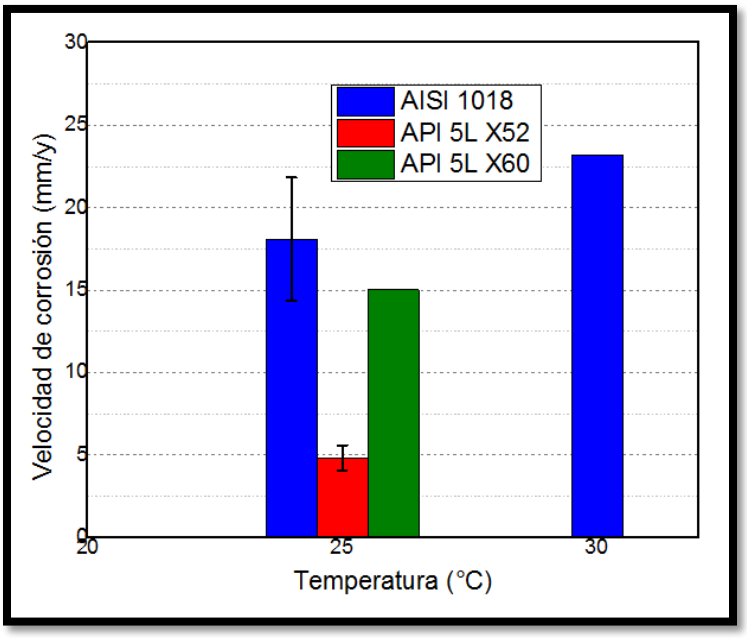


Figura 27. Comportamiento de la velocidad de corrosión de los aceros AISI 1018, API 5L X52 y API 5L X60 en H_2SO_4 1M y diferentes temperaturas.

CONCLUSIONES

- El contenido de carbono en el acero tiene una gran influencia en la velocidad de corrosión en medios ácidos. Sin embargo, la cantidad de C en las aleaciones AISI 1018, API 5L X52 y API 5L X60, se encuentra en una concentración cercana al 0.2% en la cual se reduce la velocidad de corrosión. Por lo tanto, el C tiene un efecto menor en la velocidad de corrosión de los aceros estudiados.
- Los elementos que tienen una mayor influencia en la corrosión ácida de los aceros AISI 1018, API 5L X52 y API 5L X60, son el fósforo y el azufre.
- Las velocidades de corrosión de los aceros estudiados en presencia de HCl 1M a 25°C son los siguientes: AISI 1018 (6.9542 ± 0.51 mm/y), API 5L X52 (6.6436 ± 1.36 mm/y) y API 5L X60 (1.7886 ± 0.35 mm/y).
- Por otro lado, las velocidades de corrosión de los aceros en presencia de H_2SO_4 1M a 25°C son: AISI 1018 (18.0956 ± 3.74 mm/y), API 5L X52 (4.8226 ± 0.77 mm/y) y API 5L X60 (15.0178 mm/y).
- El ácido sulfúrico es más corrosivo que el ácido clorhídrico para las aleaciones AISI 1018 y API 5L X60 a temperatura de 25°C debido a que el H_2SO_4 al disociarse genera más protones respecto al HCl, los cuales atacan la superficie metálica y provocan la pérdida del material produciendo un efecto más corrosivo en el acero.
- Se comprobó que la velocidad de corrosión está en función de la concentración de ácido, ya que las soluciones concentradas de ácido tienen mayor cantidad de protones que se adsorben a la superficie metálica y ocupan más sitios activos que aceleran el proceso corrosivo.
- La temperatura es otro factor que influye en la velocidad de corrosión del acero en medio ácido, ya que el incremento de temperatura aumenta la cinética de reacción y se llevan a cabo con mayor velocidad las reacciones.

BIBLIOGRAFÍA

Abdul, A., & Sanad, S. (1972). Effects of acid concentration, C-content and temperature on the corrosion rate of steel in HCl. *Corrosion Science, 12*, 313-324.

Alhaffar, M., Umoren, S., Obot, I., Ali, S., & Solomon, M. (2019). Studies of the anticorrosion property of a newly synthesized Green isoxazolidine for API 5L X60 steel in acid environment. *Journal of Materials Reasearch and Technology, 8*(5), 4399-4416.

Alhaffar, Umoren, S., Obot, I., & Ali, S. (2018). Isoxazolidine derivatives as corrosion inhibitors for low carbon steel in HCl solution: experimental, theoretical and effect of KI studies. *RSC Advances, 8*, 1764-1777, DOI: 10.1039/c7ra11549k.

Amparo, G. (2007). Conflictos ambientales amenazan la salud de la población y la biodiversidad del planeta. *Revista de derecho, 28*, 329-347.

Arellanes Lozada, P. (2020). Reunión en "General". México.

Arellanes Lozada, P., Díaz Jiménez, V., Hernández Cocoletzi, H., Nava, N., Olivares-Xometl, O., & Likhanova, N. (2020). Corrosion inhibition properties of iodide ionic liquids for API 5L X52 steel in acid medium. *Corrosion Science, 175*(2020), 108888. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108888.

Arellanes Lozada, P., Olivares Xometl, O., Likhanova, N., Lijanova, I., Ramírez Garnica, M., & Arce Estrada, E. (2015). Evaluation of the Corrosion Inhibiting Effect of an Ionic Liquid (N-dimethyl-N-di(cocoalkyl) Ammonium Methyl Sulfate) on API 5L X52 Steel in Hydrochloric Acid. *International Journal of Electrochemical Science, 10*(2015), 2776-2790.

Arellanes Lozada, P., Olivares Xometl, O., Likhanova, N., Lijanova, I., Vargas García, J., & Hernández Ramírez, R. (2018). Adsorption and performance of ammonium-based ionic liquids as corrosion inhibitors of steel. *Journal of Molecular Liquids, 265*(2018), 151-163.

Ávila , J., & Genesca, J. (1994). *Más alla de la herrumbre III Corrosión y medio ambiente.* México: Fondo de cultura económica.

Ávila, J., & Genesca, J. (1986). *Más alla de la herrumbre.* México: Fondo de cultura económica.

Berradja, A. (2019). Electrochemical Techniques for Corrosion and Tribocorrosion Monitoring: Methods for the Assesment of Corrosion Rates. DOI: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.86743.

Bilurbina, L., Liesa, F., & Iribarren, J. (2003). *Corrosión y protección.* España: Ediciones UPC.

Buchanan, R., & Stansbury, E. (2012). Electrochemical Corrosion. En M. Kutz, *Handbook of Environmental Degradation of Materials* (págs. 87-125.https://doi.org/10.1016/C2010-0-66227-4). William Andrew.

Charng, T., & Lansing, F. (1982). Review of Corrosion causes and corrosion control in a tecnical facility. *TDA Progress Report*, 42-69.

Ciubotariu, A., Benea, L., & Bonora, L. (2010). Corrosion studies of carbon steel X60 by electrochemical methods. *JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS, 12*(5), 1170-1175.

Cleary, H., & Greene, N. (1967). Corrosion properties of iron and steel. *Corrosion Science, 7*, 821-831.

Corrales, M., Manh, T. L., Cabrera, R., Medina, J., Lartundo, L., & Arce, E. (2019). Study of corrosion behavior of API 5L X52 steel in sulfuric acid in the presence of ionic liquid 1-ethyl 3-methylimidazolium thiocyanate as corrosion inhibitor. *Journal of Molecular Liquids, 289*, 111106.

Corrales, M., Manh, T., & Arce, E. (2019). Performance of (HEMIM)+ (CN)- and (DMIM)+ (Cl)- as corrosion inhibitor of API 5L X52 steel in HCl medium. *International Journal of Electrochemical Science, 14*(2019), 4420-4442. doi: 10.20964/2019.05.31.

Damon, G. (1941). Acid corrosion of steel: effect of carbon content on the corrodibility of steel in sulfuric acid. *Industrial an Engineering Chemistry, 33*(1), 67-69.

Danaee, I., Gholami, M., RashvandAvei, M., & Maddahy, M. (2014). Quantum chemical and experimental investigations on inhibitory behavior of amino–imino tautomeric equilibrium of 2-aminobenzothiazole on steel corrosion in H2SO4 solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 26*(2014), 81-94.

Daoud, D., Douadi, T., Issaadi, S., & Chafaa, S. (2013). Adsorption and corrosion inhibition of new synthesized thiophene Schiff base on mild steel X52 in HCl and H2SO4 solutions. *Corrosion Science, 79*(2014), 50-58.

Ezpinoza, A., Rodríguez, F., Juaristi, E., Escudero, M., Negrón, G., Ángeles, D., & Palomar, M. (2018). β-amino Acid Derived Triazols as Corrosion Inhibitors for API 5L X52 Steel Immersed in 1 M HCl. *International Journal of Electrochemical Science, 13*(2018), 7517-7531.

Flores, E., Olivares, O., Likhanova, N., Domínguez, M., Nava, N., Guzman, D., & Corrales, M. (2011). Sodium phthalamates as corrosion inhibitors for carbon steel in aqueous hydrochloric acid solution. *Corrosion Science, 53*(2011), 3899-3913. DOI:10.1016/j.corsci.2011.07.023.

García Inzunza, R., Valdez Salas, B., Shorr Wiener, M., Carrillo Beltran, M., Zlatev Koytchev, R., Stoytcheva Stilianova, M., . . . Terrazas Gaynor, J. (2013). Aqueous Extract of Creosote

Bush (Larrea tridentata) Leaves as Green Inhibitor for Carbon Steel in Hydrochloric Acid Solution. *8*(2013), 6433-6448.

Groysman, A. (2010). *Corrosion for Everybody.* Países Bajos: Springer.

Hansson, C. (2015). The impact of corrosion on society. *Metallurgical and Materials Transactions, 42*(A), 2956-61, DOI:10.1007/s11661-011-0703-2.

Haruna, K., Obot, I., Ankah, N., Sorour, A., & Saleh, T. (2018). Gelatin: A green corrosion inhibitor for carbon steel in oil well acidizing environment. *Journal of Molecular Liquids, 264*(2018), 515–525. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.058.

Haruna, K., Saleh, T., Obot, I., & Umoren, S. (2019). Cyclodextrin-based functionalized graphene oxide as an effective corrosion inhibitor for carbon steel in acidic environment. *Progress in Organic Coatings, 128*(2019), 157-167. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.11.005.

Helmenstine, A. (2019). *Acid Dissociation Constant Definition: Ka*. Obtenido de https://www.thoughtco.com/acid-dissociation-constant-definition-ka-606347

Kelly, R., Scully, J., Shoesmith, D., & Buchheit, R. (2003). *Electrochemical techniques in corrosion science and engineering.* Estados Unidos: CRC Press.

Khaleel, H., Ateeq, A., & Ali, A. (2018). The Effect of Temperature and Inhibitor on Corrosion of Carbon Steel in Acid Solution under Static Study. *International Journal of Applied Engineering Research, 13*(6), 3638-3647.

Kim, M., & Kim, J. (2015). Effect of Manganese on the Corrosion Behavior of Low Carbon Steel in 10 wt.% Sulfuric Acid. *International Journal of Electrochemical Science, 10*(2015), 6872-6885.

Kim, M., Lee, S., Kim, J., & Yoon, J. (2010). Effect of Phosphorus on the Corrosion Behavior of Carbon Steel in Sulfuric Acid. *CORROSION SCIENCE SECTION, 66*(12), 1-9.

Kirby, G. (1979). Corrosion Performane of Carbon steel. *Chem Eng*, 72.

Lide, D. (2003). *Handbook of Chemistry and Physics* (84 ed.). CRC Press.

Likhanova, N., Arellanes-Lozada, P., Olivares-Xometl, O., Hernández-Cocoletzi, H., Lijanova, I., Arriola-Morales, J., & Castellanos-Agila, J. (2019). Effect of organic anions on ionic liquids as corrosion inhibitors of steel in sulfuric acid solution. *Journal of Molecular Liquids, 279*(2019), 267-278. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.126.

Likhanova, N., Dominguez Aguilar, M., Olivares Xometl, O., Nava Entzana, N., Arce, E., & Dorantes, H. (2010). The effect of ionic liquids with imidazolium and pyridinium cations on the corrosion inhibition of mild steel in acidic environment. *Corrosion Science, 52*(2010), 2088-2097. doi:10.1016/j.corsci.2010.02.030.

Likhanova, N., Olivares-Xometl, O., Guzmán Lucero, D., Domínguez Aguilar, M., Nava, N., Corrales Luna, M., & Mendoza, C. (2011). Corrosion Inhibition of Carbon Steel in Acidic Environment by Imidazolium Ionic Liquids Containing Vinyl-Hexafluorophosphate as Anion. *International Journal of Electrochemical Science, 6*(2011), 4514-4536.

Loto, R. (2017). Corrosion Inhibition Performance of the Synergistic Effect of Rosmarinus officinalis and 5-Bromovanillin on 1018 Carbon Steel in Dilute Acid Media. *J Fail. Anal. and Preven, 17*(2017), 1031-1043. DOI 10.1007/s11668-017-0334-z.

Lozano, I., Mazario, E., Olivares-Xometl, O., Likhanova, N., & Herrasti, P. (2014). Corrosion behaviour of API 5LX52 steel in HCl and H2SO4 media in the presence of 1,3-dibencilimidazolio acetate and 1,3-dibencilimidazolio dodecanoate ionic liquids as inhibitors. *Materials Chemistry and Physics, 147*(2014), 191-197. http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.04.029.

Maldonado Flores, J. (1996). *Aceros y sus aplicaciones (Tesis de maestría).* Universidad Autónoma de Nuevo Leon, México.

Marcus, P. (2002). *Corrosion mechanisms in theory and practice.* Estados Unidos: Marcel Dekker.

May, E. (2017). *Chemical Composition of Steel*. (Bailey Metal Processing Limited) Retrieved 2020, from http://www.baileymetalprocessing.com/techmatters/blog-category-1/2017/09/28/chemical-composition-of-steel

McCafferty, E. (2010). *Introduction to corrosion science.* Estados Unidos: Springer.

Merck. (2020). *Acid and Base Chart — Table of Acids & Bases*. Recuperado el 12 de 2020, de https://www.sigmaaldrich.com/chemistry/stockroom-reagents/learning-center/technical-library/acid-base-chart.html

National Association of Corrosion Engineers (NACE). (1982). *Forms of Corrosion: Recognition and Prevention.* (C. Dillon, Ed.) Hoston, Texas, EU: NACE.

National Association of Corrosion Engineers (NACE) International. (2016). *International Measures of Prevention, Application, and Economic of Corrosion Technologies Study (IMPACT).* Houston,Texas, EU.: NACE International.

Nnamchi, P., & Obayi, C. (2018). Electrochemical Characterization of Nanomaterials. En S. Bhagyaraj, O. Oluwafemi, N. Kalarikkal, & S. Thomas, *Characterization of Nanomaterials* (págs. 103-127. https://doi.org/10.1016/C2016-0-01721-7). Woodhead Publishing.

Noor, E., & Al-Moubaraki, A. (2008). Corrosion Behavior of Mild Steel in Hydrochloric Acid Solutions. *International Journal of Electrochemical Science, 3*(2008), 806-808.

Northern Weldarc LTD. (2018). *Uses of Steel in Oil and Gas Industry*. (Rapid Boost Marketing) Retrieved 2020, from http://northern-weldarc.com/uses-steel-oil-gas-industry/

OCTAL. (2018). *Línea de tuberías API 5L Especificaciones*. Recuperado el 2020, de https://www.octalacero.com/norma-api-5l

Odewunmi, N., Mazumber, M., Ali, S., Aljeaban, N., Alharbi, B., Al-Saadi, A., & Obot, I. (2020). Impact of Degree of Hydrophilicity of Pyridinium Bromide Derivatives on HCl Pickling of X-60 Mild Steel: Experimental and Theoretical Evaluations. *Coatings, 10*(185).

Olivares Xometl, O., Álvarez Álvarez, E., Likhanova, N., Lijanova, I., Hernández Ramírez, R., Arellanes Lozada, P., & Varela Caselis, J. (2018). Synthesis and corrosion inhibition mechanism of ammonium-based ionic liquids on API 5L X60 steel in sulfuric acid solution. *Journal of Adhesion Science and Technology, 32*(10), 1092-1113, DOI: 10.1080/01694243.2017.1397422.

Olivares Xometl, O., Likhanova, N., Nava, N., Cabral Prieto, A., Lijanova, I., Escobedo Morales, A., & López Aguilar, C. (2013). Thiadiazoles as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in H2SO4 solutions. *International Journal of Electrochemical Science, 8*(2013), 735-752.

Olivares Xometl, Octavio; López Aguilar, Claudia; Herrasti, Pilar; Likhanova, Natalya; Lijanova, Irina; Martínez Palou, Rafael; Rivera Marquez, JA;. (2014). Adsorption and corrosion inhibition performance by three new ionic liquids on API 5L X52 steel surface in acid media. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 53*(23), 9534-9543.DOI: 10.1021/ie4035847.

Olivares, O., Likhanova, N., Domínguez Aguilar, M., Hallen, J., Zamudio, L., & Arce, E. (2005). Surface analysis of inhibitor films formed by imidazolines and amides on mild steel in an acidic environment. *Applied Surface Science, 252*(2006), 2139-2152. DOI:10.1016/j.apsusc.2005.03.178.

Olivares, O., Likhanova, N., Domínguez, M., Arce, E., Dorantes, H., & Arellanes, P. (2008). Synthesis and corrosion inhibition of α-amino acids alkylamides for mild steel in acidic environment. *Materials Chemistry and Physics, 110*(2008), 344-351. DOI:10.1016/j.matchemphys.2008.02.010.

Olivares-Xometl, O., Lijanova, I., Likhanova, N., Arellanes-Lozada, P., Hernández-Cocoletzi, H., & Arriola-Morales, J. (2020). Theoretical and experimental study of the anion carboxylate in quaternary-ammonium-derived ionic liquids for inhibiting the corrosion of API X60 steel in 1 M H2SO4. *Journal of Molecular Liquids, 318*(2020), 114075. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114075.

Olivares-Xometl, O., López-Aguilar, C., Herrastí-González, P., Likhanova, N., Lijanova, I., Martínez-Palou, R., & Rivera-Marquez, J. (2014). Adsorption and corrosion inhibition performance by three new ionic liquids on API 5L X52 steel surface in acid media. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1-33. DOI: 10.1021/ie4035847.

Pérez Navarrete, J., Olivares Xometl, O., & Likhanova, N. (2010). Adsorption and corrosion inhibition of amphiphilic compounds on steel pipeline grade API 5L X52 in sulphuric acid 1 M. *Journal of Applied Electrochemistry, 40*, 1605–1617. DOI:10.1007/s10800-010-0146-2.

Perry, R., & Green, D. (2012). *Manual del Ingeniero Químico* (4ta. Edición en español ed., Vol. IV). Impreso en España: McGraw Hil/Interamericana de Españal.

Roberge, P. (1999). *Handbook of Corrosion Engineering.* Estados Unidos: McGraw-Hill.

Roberge, P. (2008). *Corrosion Engineering Principles and Practice.* Estados Unidos: McGraw-Hill.

Rodríguez, A., Olivares, O., Valladares, M., & González, J. (2018). Effect of Green Corrosion Inhibition by Prunus persica on AISI 1018 Carbon Steel in 0.5M H2SO4. *International Journal of Electrochemical Science, 13*(2018), 3023 – 3049. doi: 10.20964/2018.03.40.

Salazar, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Tecnología en Marcha, 28*(3), 127-136.

Schweitzer, P. (2010). *Fundamentals of corrosion mechanisms, causes, preventative methods.* Estados Unidos: CRC Press.

Shaban, S., Elbhrawy, M., Fouda, A., Rashwan, S., Ibrahim, H., & Elsharif, A. (2020). Corrosion inhibition and surface examination of carbon steel 1018 via N-(2-(2-hydroxyethoxy)ethyl)-N,N-dimethyloctan-1-aminium bromide in 1.0 M HCl. *Journal of Molecular Structure, 1227*(2021), 129713. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129713.

Skoog, D., West, D., Holler, J., & Crouch, S. (2014). *Fundamentos de Química Analítica* (9na ed.). Impreso en México: Cengage Learning.

Sousa, M., da Silva, J., Santana, N., & Véras Ribeiro, D. (2018). Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete. *Intech*, 35-58.

Speller, F. (1951). *Corrosion Causes and Prevention.* Estados Unidos: McGraw-Hill.

Spiegel, M., & Stephens , L. (2009). *Estadística: Serie Schaum* (4a ed.). Impreso en México: McGraw Hill.

Talbot, D., & Talbot, J. (1998). *Corrosion science and technology.* Estados Unidos: CRC Press.

Tenso Unitex. (2020). *Límite elástico*. Recuperado el 10 de 2020, de http://www.tenso.es/utilidades/glosario.asp?termino=L%EDmite%20el%E1stico

Total Materia. (2011). *Introduction to the SAE-AISI Designation System Designation System*. Recuperado el 10 de 2020, de https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=333

Trident Steel & Engg. Co. (2020). *API 5L X60 PSL2 Seamless Pipe, API 5l Grade X60 Welded Pipe Suppliers*. Recuperado el 2020, de https://www.tridentsteel.co.in/api-5l-x60-pipe.html#:~:text=Primarily%2C%20our%20carbon%20steel%20API,convey%20water%2C%20steam%20or%20oil.

Ugaz Lock, A., & Díaz Tang, I. (1988). Principios de las técnicas electroquímicas en estudios de procesos de corrosión. *Revista de Química, II*(1), 23-31.

Umoren, S., & Obot, I. (2014). Synergistic inhibition between 1-octadecanethiol and iodide ions on X60 pipeline steel for corrosion protection. *Journal of Adhesion Science and Technology, 28*(20), 2054-2068, DOI: 10.1080/01694243.2014.943873.

UNISTEEL. (09 de 2020). *1018*. Obtenido de https://unisteel.elwd.com/product/1018/

Winston , R., & Uhling, H. (2008). *CORROSION AND CORROSION CONTROL: An Introduction to Corrosion Science and Engineering.* Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.

Wong, L., Martin, S., & Rebak, R. (2006). METHODS TO CALCULATE CORROSION RATES FOR ALLOY 22 FROM POLARIZATION RESISTANCE EXPERIMENTS. Vancouver, Canada: 2006 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference.