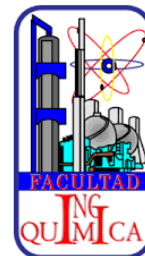




Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ingeniería Química
Colegio de Ingeniería en Materiales



“COMPORTAMIENTO DEL LÍQUIDO IÓNICO DIBROMURO DE 1,5-BIS(3-METILIMIDAZOLIO) PENTANO COMO INHIBIDOR DE CORROSIÓN DEL ACERO SAE 1010 EN H_2SO_4 Y HCL ”

T E S I S

Para obtener el título de:

Licenciado en Ingeniería en Materiales

Presenta:

Lizeth Selene Ortiz Reyes

Directora de tesis:

Dra. Paulina Arellanes Lozada

Codirector de tesis:

Dr. Octavio Olivares Xometl

H. Puebla de Zaragoza, diciembre 2022.



BUAP

"50 años de enseñanza y salud"

Oficio No. FIQ/DI/668/2022
Asunto: Registro de Tema de Tesis

C. LIZETH SELENE ORTIZ REYES
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA EN MATERIALES
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería en Materiales cuyo título es el siguiente:

"Comportamiento del líquido iónico dibromuro de 1,5 -bis (3- metilimidazolio)pentano como inhibidor de corrosión del acero SAE 1010 en H₂SO₄ y HCl"

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

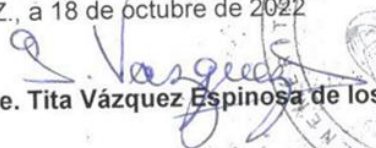
CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Directora de Tesis: Dra. Paulina Arellanes Lozada.
Co-Director: Dr. Octavio Olivares Xometl

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **UNICAMENTE POR UN AÑO**.

Atentamente
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., a 18 de octubre de 2022


M.I.C. Ma. Gpe. Tita Vázquez Espinosa de los Monteros
Directora

C.c.p. Directora de Tesis: Dra. Paulina Arellanes Lozada.
C.c.p. Co-Director: Dr. Octavio Olivares Xometl.
C.c.p. Archivo.

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C. P. 72590
01 (222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251

Agradecimientos

A mis padres, por proporcionarme la educación, por todo el sacrificio que hicieron y por haberme forjado como la persona que soy ahora, muchos de mis logros no serían posibles sin ustedes, incluyendo este. Me formaron con reglas y libertades, pero siempre me motivaron constantemente para alcanzar mis metas y anhelos. Gracias por cada día creer en mí y en mis expectativas.

A mis hermanos, tías y familia, por siempre apoyarme de todas las maneras posibles.

A Daniel, Marian, Karen, Ana y Miguel, por nunca dejarme sola y alentarme a seguir, apoyarme a pesar de todo y darme grandes experiencias, anécdotas y enseñanzas a lo largo de toda mi etapa universitaria.

A mi directora de tesis la Dra. Paulina Arellanes Lozada por su orientación, paciencia y tiempo dedicado y mi codirector el Dr. Octavio Olivares Xometl, por su apoyo y aportaciones a este trabajo.

A la Dra. Janette Arriola Morales y al Dr. Josué Jaime López Rodríguez, por el tiempo dedicado a la revisión y sugerencias durante el desarrollo de la tesis.

Gracias a la vida por este nuevo logro.

Resumen

El presente trabajo evalúa el líquido iónico derivado de imidazolio 1,5-bis(3-metilimidazolio) pentano (ImIL) como inhibidor de corrosión del acero SAE 1010 en soluciones de HCl y H₂SO₄ 1M como medios corrosivos. Las eficiencias de inhibición fueron obtenidas mediante pruebas de pérdida de peso. Los sistemas fueron evaluados a diferentes concentraciones y en lapsos de tiempo de 4,8 y 12h. Los resultados indicaron que el líquido iónico (IL) utilizado inhibe la corrosión del acero, indicando que la eficiencia de inhibición (EI) está en función de la concentración de inhibidor. Las eficiencias máximas de inhibición fueron de 93.28 en HCl y 57.99 en H₂SO₄, indicando una mejor inhibición en HCl. Las eficiencias altas se pueden atribuir a la estructura química del inhibidor y sus propiedades, logrando bloquear los sitios activos del acero y favoreciendo la formación de una capa protectora. Adicionalmente, se realizaron pruebas de análisis morfológico por medio de microscopía óptica, confirmando los resultados de las pruebas gravimétricas y la cuantificación de daños en ausencia y presencia del inhibidor. El proceso de adsorción, se determinó por el modelo teórico de isothermas de adsorción de Lagmuir implicando procesos de quimisorción y fisisorción para ambos sistemas corrosivos.

ÍNDICE

Resumen	IV
Lista de tablas	VII
Lista de figuras	VIII
Introducción	9
Capítulo 1. Marco teórico	11
1.1 Corrosión	11
1.2 Impacto económico de la corrosión	11
1.3 Corrosión electroquímica	12
1.4 Medio corrosivo	15
1.4.1 Medio corrosivo ácido	16
1.4.2 Ácido sulfúrico	16
1.4.2.1 Uso industrial	17
1.5 Técnicas empleadas para evaluar la corrosión	17
1.5.1 Técnicas de pruebas electroquímicas	20
1.5.2 Pérdida de peso	21
1.6 Métodos de control de la corrosión	21
1.6.1 Selección de material	21
1.6.2 Recubrimientos	22
1.6.3 Diseño	22
1.7. Inhibidores de corrosión (IC)	22
1.7.1 Clasificación de Inhibidores	23
1.8. Inhibidores en soluciones ácidas	25
1.9 Líquidos iónicos como inhibidores de corrosión	26
1.10 Estado del arte	28
1.10.1 Líquidos iónicos derivados de imidazol (ImILs) en HCl	28
1.10.2 Líquidos iónicos derivados de imidazol (ImILs) en H ₂ SO ₄	29
Capítulo 2. Metodología	30
2.1 Materiales	30
2.2 Análisis Microestructural	30
2.3 Preparación de soluciones de prueba	31

2.4 Pruebas de pérdida de peso.....	32
2.5 Evaluación del daño por corrosión.....	32
Capítulo 3. Resultados y discusión	33
3.1 Pérdida de peso y eficiencia de inhibición	33
3.2 Isotermas de adsorción	36
3.3 Análisis superficial	38
3.4 Análisis por Microscopía Óptica.....	40
4.Conclusiones	44
5. Bibliografía.....	45

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de los procesos de corrosión según diferentes criterios.....	12
Tabla 2. Soluciones y pH.	15
Tabla 3. Estudios y técnicas de investigación en la realización de análisis de falla por corrosión.....	18
Tabla 4. Información Imidazol.	28
Tabla 5. Composición del acero SAE 1010.....	30
Tabla 6. ImIL utilizado como inhibidor en el acero SAE 1010.	32
Tabla 7. Efecto de la concentración en la eficiencia de inhibición del acero SAE 1010 en medios ácidos HCl 1M.....	34
Tabla 8. Efecto de la concentración en la eficiencia de inhibición del acero SAE 1010 en medios ácidos H ₂ SO ₄ 1M.	35
Tabla 9. Parámetros termodinámicos de adsorción.	38

Lista de figuras

Figura 1. Componentes de una celda electroquímica de corrosión.	13
Figura 2. Requerimientos para una celda electroquímica de corrosión.	15
Figura 3. El pH de ambientes comunes.	16
Figura 4. Estructura de cationes para la formación de IL más usados.	27
Figura 5. Aniones más usados para la obtención de IL.	27
Figura 6. Probeta metálica empleada para análisis de pérdida de peso.	30
Figura 7. Micrografías de acero SAE 1010 atacada con nital al 2% y 30s a) 10, b) 50 y c) 100x.	31
Figura 8. Relación entre la pérdida de peso y la concentración de ImIL como inhibidor de corrosión en acero SAE 1010 en a) HCl y b) H ₂ SO ₄ 1 M.	33
Figura 9. Relación entre la velocidad de corrosión y concentración de ImIL como inhibidor de corrosión del acero SAE 1010 en a) HCl y b) H ₂ SO ₄ 1 M.	34
Figura 10. Relación entre la eficiencia de inhibición y concentración de ImIL como inhibidor de corrosión del acero SAE 1010 en a) HCl y b) H ₂ SO ₄ 1 M.	36
Figura 11. Isotermas de adsorción Langmuir en a) HCl y b) H ₂ SO ₄	37
Figura 12. Muestras de acero SAE 1010 después de someterse a inmersión en a) HCl y b) H ₂ SO ₄ 1 M durante 12 h antes de la limpieza ácida.	38
Figura 13. Muestras de acero SAE 1010 extraídas de H ₂ SO ₄ después de 12 h de inmersión con diferentes concentraciones de ImIL: a) 0 ppm, b) 25 ppm, c) 50 ppm, d) 75 ppm y e) 100 ppm.	39
Figura 14. Muestras de acero SAE 1010 extraídas de HCl después de 12 h de inmersión con diferentes concentraciones de ImIL: a) 0 ppm, b) 25 ppm, c) 50 ppm, d) 75 ppm y e) 100 ppm.	39
Figura 15. Muestra del acero SAE 1010 previo a pruebas gravimétricas.	40
Figura 16. Micrografías a 1000X del acero SAE 1010 a) y b) a 1M y c) y d) a 100ppm por 4h HCl 1M.	41

Introducción

En diferentes sectores industriales, el acero es uno de los materiales más utilizados debido a su bajo costo y buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, el uso de soluciones ácidas empleadas, como prácticas comunes en diferentes sectores industriales, tienen la finalidad de eliminar óxidos e incrustaciones en tuberías para el transporte de gas y petróleo, calderas, tanques de almacenamiento, tubos de condensadores, así como mejorar la eficiencia de los procesos de producción por medio de la acidificación de pozos petroleros, la limpieza y preparación de estructuras metálicas en donde las técnicas de limpieza ácida y decapado son indispensables para la obtención de superficies metálicas libres de óxido, causando una restricción en el uso del acero por causa del deterioro de sus propiedades físicas y químicas por el fenómeno de la corrosión, reduciendo su periodo de vida útil, (1; 2; 3; 4). La corrosión del acero es un problema de gran importancia, ya que genera grandes pérdidas que implican, costos de protección, gasto de energía, reemplazo de maquinaria deteriorada ocasionando retrasos en la productividad e incluso cierre de plantas de proceso causando un gran impacto económico (5). Recientes estadísticas presentaron cifras de 2.5 trillones de dólares en pérdida global causada por corrosión de metales (6). Para disminuir los efectos de la corrosión se tienen diferentes métodos, dentro de los que destaca el uso de inhibidores de corrosión (IC) por su costo relativamente bajo. El daño colateral resultante del proceso de corrosión es inevitable, sin embargo, el uso de IC, como método de control, logra reducir la velocidad de corrosión. Hoy en día algunos inhibidores altamente eficientes han provocado efectos ambientales en suelos, aguas y en la liberación de gases tóxicos, así como consecuencias negativas para la salud humana y debido a la demanda de las leyes ambientales y la química verde, el estudio de IC amigables con el ambiente ha sido un tema de interés para la comunidad científica, pues el uso de sustancias químicas empleadas en la industria ha provocado problemas de impacto negativo al medio ambiente y a la salud humana, mediante la generación de residuos tóxicos, alto consumo de energía y recursos no renovables (7). En las últimas décadas, el uso de líquidos iónicos como inhibidores de corrosión ha sido considerado una alternativa sobresaliente, debido a que estos compuestos son “amigables con el medio ambiente” y tienen excelentes propiedades de inhibición de la corrosión. Particularmente, los líquidos iónicos derivados de imidazolio presentan ventajas sobre otros líquidos iónicos, tales como bajo costo, no tóxicos, biodegradables, fuerte adsorción en metales y alta eficiencia de protección. El uso de IL como IC ha tenido gran importancia en la investigación, pues muestran un potencial prometedor para reemplazar a los IC tradicionales, debido a sus propiedades como presión de vapor despreciable, bajo punto de fusión, alta polaridad, baja toxicidad, alta estabilidad térmica y química, no inflamabilidad, alta conductividad iónica y una ventana alta de potencial electroquímico (6). La eficiencia de inhibición que tienen estos compuestos se ve relacionada con sus estructuras moleculares y su ambiente agresivo. En general, los inhibidores efectivos contienen heteroátomos como O, N, S y P, enlaces dobles y/o triples,

anillos aromáticos y/o heterociclos de N y cationes como amonio cuaternario e imidazolio (8; 1).

Por lo anterior, el presente trabajo evaluará el efecto en la velocidad de corrosión que tiene el líquido iónico dibromuro de 1,5-bis(3'-metilimidazolio) pentano como inhibidor de corrosión en el acero SAE 1010, así como la eficiencia que tiene bajo una simulación en estado estacionario en medios ácidos de HCl y H₂SO₄ 1M, llevándose a cabo por pruebas gravimétricas de pérdida de peso, análisis superficial inhibido y corroído y su proceso de adsorción.

Capítulo 1. Marco teórico

1.1 Corrosión

La corrosión es un proceso químico o electroquímico en el que un agente medioambiental ataca a un sólido, por lo general un metal, degradando la integridad de éste total o parcialmente (9). Desde un punto de vista termodinámico, si un sistema formado por un metal y el medio ambiente posee una energía libre positiva, es posible que tenga lugar la corrosión. La energía de un determinado sistema puede medirse en los términos de lo que se llama la energía libre y se pueden presentar tres casos: a) si la energía libre es positiva, el metal es activo y puede haber corrosión, este es el caso más frecuente entre los metales de uso común (hierro, aluminio, zinc); b) la energía libre es positiva, pero el metal en vez de presentar corrosión permanece aparentemente intacto, se dice que el metal es pasivo; la energía libre es cero o negativa, el metal es indiferente a los agentes agresivos habituales, no siendo posible ninguna reacción de corrosión, este es el caso de los metales nobles (10).

1.2 Impacto económico de la corrosión

La corrosión es un problema natural inevitable para la mayoría de los metales, que puede causar un gran daño al rendimiento y vida útil del material. Este fenómeno representa una gran amenaza a nivel industrial que involucra gran un impacto económico, así como de conservación de materiales y seguridad en diversas aplicaciones de ingeniería. El impacto que tiene la corrosión en la economía mundial es muy grande, por citar un ejemplo, más de \$ 220 mil millones de dólares se pierden por corrosión en los Estados Unidos cada año, según estudios gubernamentales e industriales. Este costo de corrosión es equivalente al 3 o 4% del Producto Nacional Bruto (PNB). Sin embargo, aproximadamente 15% o más, podría ahorrarse mediante la aplicación de la tecnología para prevenir y controlar la corrosión. En el Reino Unido, se estima que el coste de corrosión es del 4-5% del PNB. En Japón, el costo de la corrosión se estima en 5258 billones de yenes por año. Para la mayoría de las naciones industrializadas, el costo medio de la corrosión es del 3,5% al 4,5% del PNB (11).

Un informe en Estados Unidos dividió el costo de inversión por la corrosión en \$70 mil millones en costos evitables y costos inevitables. El costo evitable hace referencia a los que se han reducido mediante la aplicación de las prácticas de control de la corrosión. Los costos inevitables son los que requieren avances en nuevos materiales, tecnología y control de la corrosión. Los costos evitables representan alrededor de 15% del costo total de \$70 mil millones. Los costos de corrosión pueden además dividirse en costos directos e indirectos. Por mencionar algunos costos directos: costos de capital (piezas de repuesto, mufles de automóviles, líneas de agua, calentadores de agua), costos de control (mantenimiento, reparación, pintura) y costo de diseño (costo adicional de usar aleaciones

resistentes a la corrosión, recubrimientos protectores e inhibidores de corrosión). Por otra parte, los costos indirectos son: cierres de plantas (nucleares, de proceso, energía y refinerías), pérdida de producto, fugas (contenedores, tanques de almacenamiento, líneas de transporte de agua y aceite y tanques de combustible de tuberías) y deterioro de los alimentos debido a la corrosión en los contenedores (12). Uno de los principales sectores industriales afectados por este fenómeno es la industria petrolera. El costo de corrosión de las tuberías de transmisión de gas y líquido en EE. UU, supera los 7 mil millones de dólares estadounidenses (13). La corrosión en el acero al carbono representa aproximadamente el 20 % de la producción anual, lo cual representa una problemática de suma importancia (6).

1.3 Corrosión electroquímica

Existen diferentes tipos de corrosión de acuerdo a diferentes criterios como los que se enlistan en la Tabla 1 (14):

Tabla 1. Clasificación de los procesos de corrosión según diferentes criterios.

Mecanismo	Medio agresivo	Morfología	Acciones físicas
- Corrosión química o seca (oxidación directa) - Corrosión electroquímica o húmeda	- Atmosférica - De estructuras sumergidas - De estructuras enterradas - Por gases calientes - Por sales fundidas - Por ácidos	- Uniforme - Galvánica - Selectiva - Por picaduras - Intergranular - Fisuras bajo tensión	- Erosión-corrosión - Corrosión bajo tensión - Corrosión por frotamiento - Corrosión-fatiga

La corrosión como proceso electroquímico, consiste en la reacción de un metal en un medio agresivo que se transforma en un óxido u otro compuesto, por medio de una reacción de oxidación-reducción en un medio conductor (15). Es un proceso espontáneo que denota la existencia de una zona anódica (la que sufre corrosión), una zona catódica, un flujo de electrones y un electrolito, como se observa en la Figura 1.

Este tipo de corrosión ocurre con más frecuencia en un medio acuoso en el que hay iones presentes en agua, tierra o aire húmedo. En este proceso se crea un circuito eléctrico y el sistema forma una celda. La celda que provoca este proceso se conforma de tres componentes básicos: un ánodo, un cátodo y un electrolito (solución eléctricamente conductora).

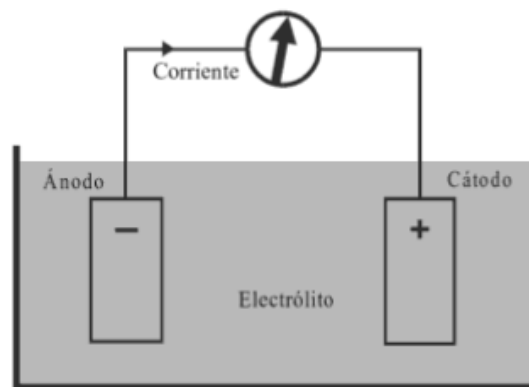


Figura 1. Componentes de una celda electroquímica de corrosión.

Para explicar cada uno de los componentes citados anteriormente es necesario definir algunos términos básicos. Un ion es un átomo o molécula que ha adquirido una carga eléctrica, un ion que lleva una carga positiva se llama catión y un ion que lleva una carga negativa se llama anión. Los compuestos, moléculas y átomos que no están cargados se denominan especies neutrales. Los electrones no se encuentran normalmente en soluciones acuosas ya que reaccionan con el agua; se mueven a través de conductores electrónicos que generalmente son cables metálicos. Los iones, sin embargo, son bastante estables en soluciones acuosas y pueden transportar carga a medida que se mueven a través de ellas (16).

Ánodo

El ánodo es generalmente donde ocurre la corrosión (se corroe). Da lugar a donde el metal se disuelve y pasa a la solución en forma de óxido o hidróxido, que se depositan en la superficie. En la superficie del metal, los átomos se disuelven generando iones metálicos y se produce la pérdida de peso. Las reacciones en el ánodo se denominan anódicas y son reacciones de oxidación; es decir, se pierden electrones (9).

Cátodo

Es la porción de superficie metálica que no se disuelve. En el cátodo, no se produce corrosión ni pérdida de peso, es la región de una celda eléctrica donde la corriente positiva ingresa desde el electrolito (13; 9). Sin embargo, se producen reacciones que son tan importantes para el funcionamiento de la celda de corrosión como las reacciones anódicas. Estas reacciones son reacciones catódicas o de reducción; es decir, ganan electrones.

Electrolito

El electrolito es el medio que transporta los electrones. Puede ser un volumen de líquido donde están sumergidos los electrodos o simplemente una capa condensada absorbida sobre la superficie del metal. La velocidad de corrosión está influenciada principalmente por la conductividad eléctrica del electrolito (15). Un electrolito líquido debe estar en contacto

tanto con el ánodo como con el cátodo, por lo general por contacto físico y tiene que ser conductor. Las soluciones de electrolitos conducen la electricidad debido a que los iones cargados pueden moverse a través de ellas.

Celdas electroquímicas

Una celda electroquímica puede accionar un dispositivo eléctrico externo (carga) o ser accionada por él (fuente de alimentación), dependiendo de las fuerzas electromotrices relativas aplicadas por la celda y el dispositivo. La corriente que fluye a través de una celda producirá una reacción electroquímica que sigue los principios de la estequiometría electroquímica. La fuerza electromotriz (*fem*) de la celda se denomina potencial reversible (E_{rev}). Una celda electroquímica se puede describir como galvánica, reversible o electrolítica:

- Una *celda galvánica* es una celda en la que fluye corriente, se produce energía y la reacción de la celda se desarrolla de manera espontánea.
- Una *celda electrolítica* es una celda en la que fluye corriente, se consume energía y la reacción de la celda que se impulsa es la inversa de la reacción espontánea de la celda.
- Una *celda reversible* es una celda en la que no fluye corriente (y por lo tanto no hay energía involucrada). La reacción de la celda en una celda reversible no es ni espontánea, ni no espontánea; se llama reversible porque un cambio infinitesimal en el potencial de la celda puede hacer que avance en cualquier dirección. Cuando las celdas están en condiciones reversibles, la diferencia de potencial, o *fem*, a través de ellas se puede medir sin ninguna pérdida (16).

La corriente continua de la celda de corrosión se mueve a través de la solución por un camino iónico y fluye del ánodo al cátodo por el movimiento de iones cargados en la solución. Los iones o cationes con carga positiva se mueven del ánodo al cátodo, y los iones o aniones con carga negativa se mueven desde el cátodo hacia el ánodo. Los electrones generados en el ánodo por reacciones de oxidación se mueven al cátodo, donde son consumidos por reacciones de reducción. En el cátodo, ocurren reacciones que consumen electrones, es decir, reacciones de reducción, y los electrones generados en el ánodo se consumen. La ruta electrónica es la ruta por la cual los electrones se mueven desde el ánodo al cátodo (9), como se observa en la Tabla 2.

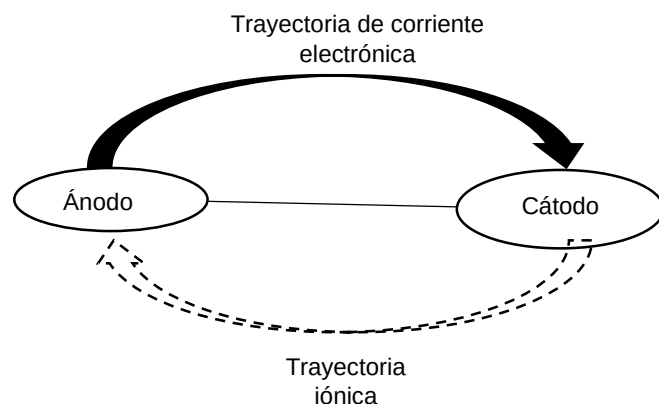


Figura 2. Requerimientos para una celda electroquímica de corrosión.

1.4 Medio corrosivo

La acidez o alcalinidad de un ambiente en combinación con sus características oxidantes / reductoras es de suma importancia para el comportamiento de corrosión resultante de varios materiales (9). Todos los ambientes son corrosivos hasta cierto punto, a continuación, se presentan los entornos corrosivos típicos: i) aire y humedad ii) agua dulce, destilada, salada y marina, iii) natural, urbano, marino e industrial y atmósferas, iv) vapor y gases, como cloro, v) amoníaco, vi) sulfuro de hidrógeno, vii) dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, viii) gases combustibles, ix) ácidos, x) álcalis y xi) suelos (13). En la industria se hace uso de medios corrosivos con pH diferentes, en la Tabla 2 se presentan ácidos fuertes, representados por pH bajos ($\text{pH} \leq 1$); y álcalis fuertes, representados por hidróxido de sodio e hidróxido de calcio a pH 14. El pH medido de varios ácidos y álcalis comunes es el siguiente:

Tabla 2. Soluciones y pH.

Solución	pH
Ácido Clorhídrico (1N)	0.1
Ácido sulfúrico (1N)	0.3
Ácido bórico (0.1N)	5.2
Bicarbonato de sodio (0.1 N)	11.6
Hidróxido de amonio (1 N)	11.6
Hidróxido de sodio (1N)	14

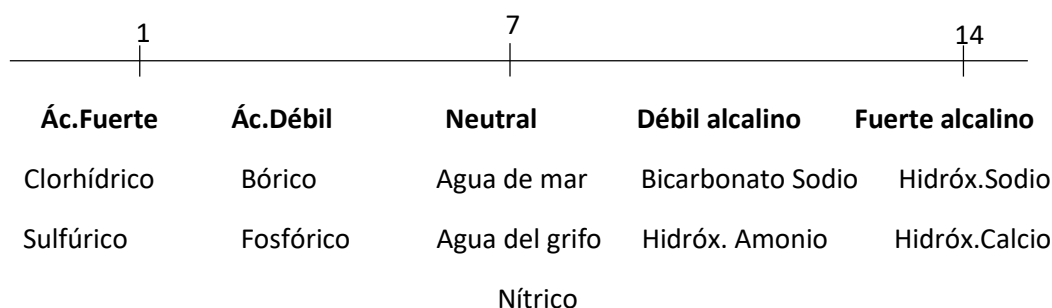
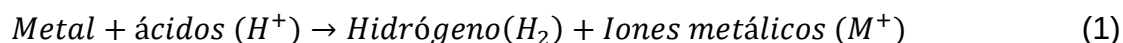


Figura 3. El pH de ambientes comunes.

1.4.1 Medio corrosivo ácido

Muchos de los grandes problemas de corrosión que se encuentran en las industrias de procesamiento involucran medios ácidos y éstos son naturalmente corrosivos. El proceso de corrosión de superficies metálicas en medio ácido se genera de la siguiente manera: el metal se disuelve en las áreas anódicas mediante la reacción de oxidación de los átomos metálicos convirtiéndose en iones metálicos en solución. La reacción de equilibrio de reducción en los cátodos es el consumo de iones de hidrógeno en el ácido con el desprendimiento de gas hidrógeno. La reacción general es:



La velocidad de oxidación o corrosión del metal frecuentemente se controla mediante la velocidad de la reacción de reducción. En un ácido concentrado con una alta concentración de iones de hidrógeno (H^+), existe una gran capacidad para consumir electrones y promover la reacción de corrosión (9). La respuesta de los aceros a estos ácidos está en función de la concentración de ácido y la temperatura. Los ácidos clorhídrico, sulfúrico y nítrico son ácidos fuertes, sin embargo, el comportamiento de corrosión del acero en ellos difiere ampliamente. Dos claves para comprender esta diversidad de comportamientos son el poder oxidante del ambiente ácido y la tendencia a la pasivación del acero en el ambiente.

1.4.2 Ácido sulfúrico

El ácido sulfúrico (H_2SO_4) es el ácido inorgánico de mayor volumen que se utiliza actualmente, y en general, se considera el producto químico industrial más importante. Los principales usos del H_2SO_4 son para la fabricación de fertilizantes, refinado de petróleo, producción de otros productos químicos, fabricación de rayón y otros textiles, decapado de acero y latón, refinado de metales, fabricación de pigmentos y colorantes, explosivos, fabricación de coque y productos de alquitrán, tintes y medicamentos, baterías de almacenamiento, producción de caucho natural y sintético y detergentes sintéticos (9).

La corrosividad del H_2SO_4 depende de muchos factores, en particular la temperatura y la concentración. Las concentraciones fuertes y de altas temperaturas presentan los mayores problemas, y pocos materiales, excepto el platino, el tantalio, el plástico fluorocarbonado y

el acero revestido, resisten entre 60 y un 98% de H_2SO_4 a 120 °C. Sin embargo, otras variables también influyen en la resistencia de los materiales al H_2SO_4 . La aireación o la presencia de agentes oxidantes, generalmente acelera la corrosión de metales y aleaciones, sin embargo, en las consideradas inoxidables se reduce, dependiendo de condiciones específicas del material y de la exposición al medio (9).

1.4.2.1 Uso industrial

El ácido sulfúrico es usado en diversas ramas industriales, en la industria química es necesario para la fabricación de productos químicos industriales. Muchos procesos en la industria química consumen o producen sustancias ácidas y a menudo se utilizan aleaciones o cerámicas resistentes a los ácidos como materiales de contención (17). También es muy común en la industria petroquímica, ya que se utiliza como catalizador para refinar el petróleo crudo. En la industria petroquímica se producen grandes cantidades de desechos ácidos peligrosos que contienen altas concentraciones de ácido sulfúrico (85–90 % en peso) y materia orgánica (8–14 % en peso). Este ácido se utiliza para eliminar los hidrocarburos insaturados y los sulfuros contenidos en el petróleo crudo, el gasóleo y otros productos derivados del petróleo. Según las estadísticas, en la refinación de petróleo, refinar una tonelada de crudo consume en promedio 1,08 kg de ácido sulfúrico (18).

También se aplica en procesos industriales como reactivo, solvente, regulador de pH, producto deseado o no y como deshidratador químico (17). En la industria de fertilizantes se relaciona principalmente con la producción de superfosfatos, fosfato y sulfato de amonio. De igual manera, se utiliza en la producción de explosivos como una de las materias primas, en minería y metalurgia se usa en procesos de enriquecimiento de mineral de cobre, en la industria de los detergentes y en la industria cosmética se usa para la producción de materias primas y productos semiacabados, así como peróxido de hidrógeno o fragancias (19). Además, el anodizado con ácido sulfúrico (SAA) se usa ampliamente para la protección contra la corrosión de aleaciones de aluminio que debido a su alta relación resistencia-peso, se usa ampliamente para aplicaciones sensibles al peso en la industria aeronáutica (20; 21).

1.5 Técnicas empleadas para evaluar la corrosión

Las técnicas aplicables al diagnóstico de fallas por corrosión incluyen las siguientes (22):

- Examen visual y microscópico de superficies corroídas y microestructura
- Análisis químico del metal, los productos de corrosión y el medio ambiente
- Métodos de evaluación no destructivos
- Pruebas de corrosión
- Pruebas mecánicas

En la Tabla 3 se proporciona una guía de algunos estudios y técnicas realizadas para el análisis de fallas por corrosión (9).

Tabla 3. Estudios y técnicas de investigación en la realización de análisis de falla por corrosión.

Estudio	Técnica	Descripción	Información proporcionada
Metalografía y fractografía	Microscopía óptica	Examen de una pequeña región o área de superficie no reparada y/o pulida y normalmente analizada entre 50 y 1000 aumentos. Consiste en una toma de muestras a granel .	Daños sub-superficiales (secciones transversales) incluyendo agrietamiento/ daño, ramificación y propagación de grietas, etc. Características microestructurales (metalografía).
	<i>Microscopía Electrónica Transmisión (MET)</i>	Examinación de secciones muy delgadas y finas de la superficie a través de la cual se transmiten los electrones . Aumento de 2000X a 40000X.	Características microestructurales (cristalografía y defectos), superficie(fractura).
	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	Características microestructurales, incluida la cristalografía y la estructura defectuosa. Las superficies deberán ser eléctricamente conductoras.	Superficie y caras de fractura. Microestructura, características (metalografía) y relación entre estructura y daños. Distribución de porosidad, huecos y grietas.
	Química analítica clásica	Gravimétrico/volumétrico/absorción /electroquímica/colorimétrica/técnicas de absorción atómica.	Composición química cuantitativa.
	Espectroscopía de emisión	Registro en una placa fotográfica del espectro visual y ultravioleta producido por el destello de una muestra sólida o por la introducción de una solución en un plasma. Comparación las densidades espectrales con un estándar.	Composición química cualitativa/cuantitativa o composición química local. Constituyentes mayores y menores.

Continuación de Tabla 3...

Análisis químico	Espectrografía de masas	Registro en una placa fotográfica del espectro producido después de ionizar una muestra sólida y acelerar los iones a través de un campo magnético. Comparando las densidades espectrales con un estándar.	Composición química cuantitativa a granel y constituyentes menores.
	Espectroscopía electrónica	Análisis de otros fotoelectrones o electrones emitidos por una superficie excitada por rayos-x o un haz de electrones (técnicas conocidas como espectroscopía de fotoelectrones por rayos-X (XPS) o espectroscopía de electrone Auger (AES).	Análisis químico cuantitativo de capas atómicas más externas de las superficies.
	Difracción de electrones	Dispersión de la transmisión de electrón a través de una película delgada o reflejada desde una superficie sólida (desde 50Å de profundidad) por una red cristalina en un µm de área muestreada.	Identificación de estructura y/o fases cristalinas.
	Difracción de rayos x	Incidencia de rayos-x en una muestra sólida y detección de ángulo de difracción.	Análisis cuantitativo de fase cristalina.
Ensayos mecánicos	Ensayo de tracción	Carga de muestra en tensión a una tasa de carga o de flexión conocida. Normalmente la prueba se lleva a cabo a baja tasa de deformación y a presión y temperatura ambiente.	Límite y módulo elástico, prueba de tensión, resistencia a la tracción máxima y deformación.
	Prueba de impacto	Muestra (generalmente con muescas previas) cargada a alta velocidad de deformación. Las pruebas se pueden realizar en un rango de temperaturas (bajas). Energía absorbida en falla por impacto registrada.	Temperatura de transición dúctil frágil

	Tenacidad a la fractura	Aplicación de una carga de tracción a una muestra previamente entallada y / o fisurada de dimensiones de fisura conocidas. Carga máxima y / o desplazamiento de apertura de grietas .	Propiedades mecánicas de la fractura elástica lineal y propiedades de la fractura elástica-plástica.
	Ensayo de dureza	Macro: hendidura de la superficie de la muestra mediante un penetrador estándar (pirámide, bola o cono) bajo carga conocida, normalmente en el rango de 1 a 3000 kg f. Micro: similar pero con penetradores piramidales de diamante bajo carga en el rango de 0,001 a 3,5 kg f.	Dureza expresada como carga dividida por el área de indentación real o proyectada o en una escala de acuerdo a la profundidad de la hendidura.

1.5.1 Técnicas de pruebas electroquímicas

Las técnicas electroquímicas se logran en un periodo de tiempo corto y las mediciones se pueden hacer con rapidez (22; 23; 24). La técnica más empleada es la polarización electroquímica.

Polarización electroquímica

Polarización electroquímica (usualmente llamada “polarización”) es el cambio en el potencial de los electrodos debido al flujo de una corriente. Existen 3 tipos de polarización:

- 1) *Polarización de activación* es la polarización causada por una reacción de electrodos lenta.
- 2) *Polarización de concentración* es la polarización causada por cambios en la concentración de los reactantes en productos cerca de la superficie de un electrodo.
- 3) *Polarización óhmica* es la polarización causada por las gotas IR en solución o a través de películas superficiales, tales como óxidos (o sales) (12).

El análisis de polarización es un método destructivo para probar las propiedades electroquímicas de las aleaciones. Dado que la condición de corrosión de la muestra cambiará durante la polarización, una vez que la muestra esté polarizada, no podrá volver a su estado de corrosión original antes del análisis de polarización (25).

Los métodos de prueba electroquímicos implican la determinación de propiedades de interfaz específicas que se pueden dividir en tres categorías:

1. Diferencia potencial en la interfaz: El potencial en una interfaz de corrosión surge de la polarización mutua de las semirreacciones anódicas y catódicas que constituyen la reacción de corrosión general. El potencial es intrínsecamente el parámetro más fácilmente

observable, con el modelado adecuado de su valor en relación con la termodinámica de un sistema, puede proporcionar la información más útil sobre el estado de un sistema.

2. Tasa de reacción como densidad de corriente: Las densidades de corriente anódica y catódica parciales no se pueden medir directamente a menos que se separen a propósito en un par bimetálico. Polarizando un metal sumergido en una solución, es posible estimar una corriente neta para la polarización anódica y para la polarización catódica, a partir de la cual se puede deducir una densidad de corriente de corrosión.

3. Impedancia de superficie: Una interfaz corroída también se puede modelar para todas sus características de impedancia, revelando así mecanismos sutiles que no son visibles por otros medios. La espectroscopia de impedancia electroquímica está ahora bien establecida como una técnica poderosa para investigar procesos de corrosión y otros sistemas electroquímicos (16).

1.5.2 Pérdida de peso

La técnica de pérdida de peso es la más utilizada a nivel laboratorio e industrial, consiste en exponer una muestra con dimensiones y peso conocidos, en un medio ambiente determinado durante un periodo de exposición, esto con la finalidad de medir su degradación. Generalmente estas pruebas requieren un periodo más largo de exposición a diferencia de otras. Las muestras de metal previamente pesadas se retiran de la solución del medio ambiente a varios intervalos de tiempo, y se determina la pérdida de peso debido a la corrosión metálica (por unidad de área de la muestra), quedando así la velocidad de corrosión como un valor en función del tiempo de exposición. Para que este método sea preciso, cualquier producto sólido de corrosión debe ser removido de la superficie del metal. Los productos de corrosión herméticos y adherentes se pueden eliminar por métodos químicos o electroquímicos que suelen ser específicos del metal o de la aleación que se está probando (26; 27; 28).

1.6 Métodos de control de la corrosión

Con el paso del tiempo se han desarrollado métodos para controlar la corrosión, a continuación, se mencionan algunos:

1.6.1 Selección de material

Cada metal y aleación tiene un comportamiento de corrosión único e inherente que puede variar desde la alta resistencia de los metales nobles, a la baja resistencia a la corrosión de los metales activos. Además, la resistencia a la corrosión de un metal depende en gran medida del entorno al que está expuesto, es decir, la composición química, la temperatura, la velocidad, etc. A menudo, existen materiales en competencia que pueden cumplir con los requisitos de corrosión, y el proceso de selección de materiales se convierte en uno para determinar cuál de los materiales candidatos proporciona la solución más económica para el servicio en particular. La consideración de la resistencia a la corrosión es a menudo tan importante en el proceso de selección como las propiedades mecánicas de la aleación.

Una solución común a un problema de corrosión es sustituir una aleación con mayor resistencia a la corrosión por la aleación que se ha corroído.

1.6.2 Recubrimientos

Un recubrimiento es una capa que se aplica a un objeto para aislarlo o protegerlo del medio que lo rodea, mejorando cualidades superficiales del objeto. Además de la resistencia a la corrosión, desgaste y ralladuras, es utilizado para mejorar el aspecto de la pieza y a su vez, para darle propiedades adicionales al sustrato, como es el caso de los adhesivos, la conducción o aislamiento eléctrico, y la fotosensibilidad en las películas. Se pueden dividir en dos grandes grupos: metálicos y no metálicos (orgánicos e inorgánicos).

Recubrimientos Metálicos. El concepto de aplicar un recubrimiento de metal más noble sobre un metal activo aprovecha la mayor resistencia a la corrosión del metal noble. Un ejemplo de este sistema es el acero galvanizado, donde el recubrimiento de zinc se corroe preferentemente y protege el acero.

Recubrimientos orgánicos. Además de aislar el metal del medio ambiente corrosivo, forman una capa de barrera para sofocar la corrosión, el recubrimiento orgánico puede contener inhibidores de corrosión. Existen muchas formulaciones de recubrimientos orgánicos, al igual que una variedad de procesos de aplicación para elegir para un producto o condición de servicio determinada. Los revestimientos inorgánicos incluyen esmaltes de porcelana, revestimientos de cemento de silicato de fraguado químico, revestimientos y revestimientos de vidrio y otras cerámicas resistentes a la corrosión, al igual que los recubrimientos orgánicos, los recubrimientos inorgánicos para aplicaciones de corrosión sirven como recubrimientos de barrera.

1.6.3 Diseño

La aplicación de principios de diseño racionales puede eliminar muchos problemas de corrosión y reducir en gran medida el tiempo y el costo asociados con el mantenimiento y la reparación de la corrosión. La corrosión a menudo ocurre en espacios muertos o grietas, estas áreas se pueden eliminar o minimizar con el proceso de diseño. Donde sea posible el agrietamiento por corrosión bajo tensión, pueden diseñarse los componentes para operar a niveles de tensión por debajo del umbral de tensión para el agrietamiento (9).

1.7. Inhibidores de corrosión (IC)

Un inhibidor de corrosión (IC) es una sustancia química o una combinación de sustancias que cuando está presente en el medio ambiente, reduce significativamente o sofoca por completo las reacciones electroquímicas responsables de la degradación superficial de las aleaciones metálicas (29). Así como algunas especies químicas (por ejemplo, la sal) promueven la corrosión, otras especies químicas inhiben la corrosión. Tienen una amplia aplicación para suprimir o mitigar el proceso de corrosión de los metales en diferentes campos, desde sectores industriales hasta materiales de construcción y tratamientos de

superficies para el patrimonio cultural (30). Pueden ser compuestos orgánicos o inorgánicos y normalmente se disuelven en ambientes acuosos.

Los mecanismos de inhibición pueden ser bastante complejos, en el caso de las aminas orgánicas, el inhibidor se adsorbe en sitios anódicos y catódicos y sofoca la corriente de corrosión. Otros inhibidores afectan específicamente al proceso anódico o catódico. Algunos promueven la formación de películas protectoras sobre la superficie del metal. Se favorece el uso de inhibidores en sistemas cerrados donde la concentración necesaria de inhibidor se mantiene más fácilmente y se tienen una buena circulación, de modo que se asegura una concentración adecuada y controlada (9). Se pueden incorporar en un revestimiento protector o en una imprimación para el revestimiento.

Los inhibidores reducen la tasa de oxidación anódica, reducción catódica, o ambos: éstos mismos forman una película protectora en la superficie del metal. Se ha reportado que los inhibidores se adsorben en la superficie del metal, ya sea por adsorción física o quimisorción. La adsorción física es el resultado de las fuerzas electrostáticas entre los iones orgánicos y la superficie del metal cargada eléctricamente. Mientras que la quimisorción es la transferencia o compartición de la carga de la molécula del inhibidor a la superficie del metal, formando un enlace de tipo coordinado (31).

Los inhibidores se pueden clasificar en muchas maneras según: naturaleza química (sustancias orgánicas o inorgánica), características (compuestos oxidantes y no oxidantes) y campo técnico de aplicación (decapado, limpieza ácida, desincrustación, sistemas de agua de refrigeración, etcétera).

La eficiencia de un inhibidor se puede expresar mediante la siguiente ecuación (Hsissou et al., 2020):

$$EI(\%) = \frac{(W_{corr}^0 - W_{corr})}{W_{corr}^0} \times 100 \quad (2)$$

donde W_{corr}^0 y W_{corr} es la velocidad de corrosión del sistema desinhibido e inhibido, respectivamente.

En general, la eficiencia de un inhibidor incrementa con un aumento en la concentración, y a menudo, entre diferentes inhibidores y el entorno que se está controlando. Las consideraciones de costo, toxicidad, disponibilidad y cuidado al medio ambiente son de considerable importancia.

1.7.1 Clasificación de Inhibidores

Los inhibidores han sido clasificados de forma diferente por varios autores, a continuación, se describen los tipos de inhibidores más comunes:

Pasivante (anódico)

Los inhibidores de pasivación provocan un gran cambio anódico del potencial de corrosión, lo que obliga a la superficie metálica a entrar en el rango de pasivación. Hay dos tipos de inhibidores pasivantes: aniones oxidantes, como cromato, nitrito y nitrato, que pueden pasivar el acero en ausencia de oxígeno y los iones no oxidantes, como fosfato, tungstato y molibdato, que requieren la presencia de oxígeno para acero pasivado. Estos inhibidores son los más eficaces y, por tanto, los más utilizados. Los basados en cromato son los inhibidores menos costosos y se usaban hasta hace poco en una variedad de aplicaciones (por ejemplo, sistemas de recirculación-enfriamiento de motores de combustión interna, rectificadores, unidades de refrigeración y torres de enfriamiento). Se consideran peligrosos, porque a concentraciones insuficientes pueden conducir a un ataque localizado acelerado cuando las concentraciones caen por debajo de los límites mínimos en sitios desprotegidos, así como causar picaduras. Por esta razón, es fundamental que se controle la concentración de inhibidor (7).

Catódico

Los inhibidores catódicos reducen la corrosión al disminuir la velocidad de reacción de reducción de la celda de corrosión electroquímica. Esto se hace bloqueando los sitios catódicos por precipitación. Por ejemplo, los iones de calcio, magnesio y zinc precipitarán hidróxidos en sitios catódicos a medida que el ambiente local se vuelve más alcalino debido a la reacción de reducción en estos sitios. A medida que aumenta el pH, se produce la precipitación de hidróxido. Pueden proporcionar inhibición mediante tres mecanismos diferentes: como venenos catódicos, como precipitados catódicos y como captadores de oxígeno. Estos inhibidores son eficaces cuando reducen la velocidad de la reacción catódica. El arsénico, el bismuto y el antimonio, que se denominan venenos catódicos, pues reducen la velocidad de reacción de reducción de hidrógeno y, por lo tanto, disminuyen la velocidad de corrosión general. Otros inhibidores catódicos eliminan las especies reducibles del medio ambiente. La eliminación de oxígeno del ambiente corrosivo disminuirá significativamente la velocidad de corrosión (9). Los captadores de oxígeno ayudan a inhibir la corrosión al prevenir la despolarización catódica causada por el oxígeno (16).

Orgánico

A veces se observan efectos tanto anódicos como catódicos en presencia de inhibidores orgánicos, pero como regla general, los inhibidores orgánicos afectan a toda la superficie de un metal en corrosión cuando están presentes en concentración suficiente. Los inhibidores orgánicos, generalmente denominados formadores de película protectora hidrófoba en la superficie del metal, proporcionan una barrera a la disolución del metal en el electrolito. Su eficiencia depende de la composición química, su estructura molecular y sus afinidades por la superficie del metal. Debido a que la formación de películas es un proceso de adsorción, la temperatura y la presión en el sistema son factores importantes.

Los inhibidores orgánicos se adsorberán de acuerdo con la carga iónica del inhibidor y la carga en la superficie. La fuerza del enlace de adsorción es el factor dominante para los inhibidores orgánicos solubles. Debido a que la superficie metálica cubierta es proporcional a los concentrados de inhibidor, la concentración del inhibidor en el medio es crítica. Para cualquier inhibidor específico en cualquier medio dado, existe una concentración óptima.

De precipitación

Los inhibidores de precipitación son compuestos que provocan la formación de precipitados en la superficie del metal, proporcionando así una película protectora. Los inhibidores más comunes de esta categoría son los silicatos y los fosfatos. Sin embargo, la protección no siempre es confiable y depende en gran medida del pH y de un índice de saturación que depende de la composición y temperatura.

Volátiles

Los inhibidores de corrosión volátiles (VCIs), también llamados inhibidores de fase de vapor (VPIs), son compuestos químicos que tienen presiones de vapor relativamente altas y que se adsorben en las superficies metálicas. Una vez adsorbidos, pueden neutralizar la humedad, promover la formación de películas pasivas o proteger mediante la formación de una película general en la superficie (9). Una precaución es que los inhibidores de la fase de vapor son específicos del metal y si se usan con el metal incorrecto, pueden provocar un ataque acelerado. La protección es más eficaz en espacios cerrados con poca ventilación.

1.8. Inhibidores en soluciones ácidas

La corrosión de metales en soluciones ácidas puede ser inhibida por una amplia gama de sustancias, como iones haluro, monóxido de carbono y muchos compuestos orgánicos, particularmente aquellos que contienen elementos de los Grupos V y VI de la Tabla periódica (nitrógeno, fósforo, arsénico, oxígeno, azufre y selenio). Los compuestos orgánicos que contienen enlaces múltiples, especialmente enlaces triples, son inhibidores eficaces. En general, se acepta que el paso principal en la acción de los inhibidores en soluciones ácidas es la adsorción sobre la superficie del metal, que generalmente está libre de óxido en soluciones ácidas. El inhibidor adsorbido actúa para retardar los procesos de corrosión electroquímica catódica y / o anódica.

Los inhibidores de la corrosión en solución ácida pueden interactuar con los metales y afectar la reacción de corrosión de varias formas, algunas de las cuales pueden ocurrir simultáneamente. A menudo no es posible asignar un único mecanismo de acción general a un inhibidor porque el mecanismo puede cambiar con las condiciones experimentales. Por lo tanto, el mecanismo de acción predominante de un inhibidor puede variar con factores como su concentración, el pH del ácido, la naturaleza del anión del ácido, la presencia de otras especies en la solución, el grado de reacción para formar inhibidores

secundarios y la naturaleza del metal. El mecanismo de acción de los inhibidores con el mismo grupo funcional puede variar adicionalmente con factores tales como el efecto de la estructura molecular sobre la densidad electrónica del grupo funcional y el tamaño de la porción de hidrocarburo de la molécula (16).

1.9 Líquidos iónicos como inhibidores de corrosión

El uso de IC se ha enfocado mayormente en la eficiencia que pueden proporcionar, sin embargo, factores como costos, estabildades químicas, térmicas y dinámicas, las regulaciones ambientales y el impacto en la salud han limitado actualmente el uso de IC convencionales, lo que ha incrementado la búsqueda de nuevas selecciones de Inhibidores con altas eficiencias y bajo impacto medioambiental (32). Entre estos compuestos, los IC “verdes” o “amigables con el ambiente”, son productos químicos no tóxicos y aceptados por las leyes ambientales, ya que causan daños insignificantes o nulos, como es el caso de los líquidos iónicos (IL). Los IL son en un principio sales que están compuestos por un catión (especie cargada positivamente) orgánico y un anión (especie cargada negativamente) orgánico o inorgánico, con puntos de fusión inferiores a 100 °C y propiedades fisicoquímicas únicas que han hecho posible su destacada aplicación en diferentes campos científicos. Su función como inhibidores de corrosión ha sido un tema de gran relevancia debido a las propiedades que pueden poseer como son: alta eficiencia de inhibición, estabilidad química y térmica, baja toxicidad y buena solubilidad química, por mencionar algunas (33) (34) (35). Su impacto en cuanto a aplicaciones de almacenamiento y conversión de energía electroquímica fueron causadas principalmente por su presión de vapor despreciable y por su estabilidad térmica. El diseño de nuevos IL para su aplicación como inhibidores se realiza de acuerdo a las propiedades químicas de los grupos funcionales tales como heteroátomos de alta electronegatividad, largas cadenas alquílicas y dobles o triples enlaces (36; 37).

Cationes

El catión del líquido iónico es generalmente una estructura orgánica de baja simetría, orgánicos, voluminosos, que poseen débiles interacciones intermoleculares y bajas densidades de carga. El centro catiónico implica con mayor frecuencia un nitrógeno o fósforo con carga positiva. Los cationes de IL más utilizados son el amonio, el colonio, el piridinio, el pirrolidinio y el fosfonio, donde los aniones pueden ser orgánicos o inorgánicos, en la Figura 4 se muestra la estructura de cada uno de ellos (38; 39; 7). Sobre la base del catión, los IL se pueden dividir en seis grupos: (1) cationes heterocíclicos de cinco miembros, (2) cationes heterocíclicos de seis miembros y fusionados con benzo, (3) cationes a base de amonio, fosfonio y sulfonio, (4) cationes de imidazolio funcionalizados y (5) cationes quirales.

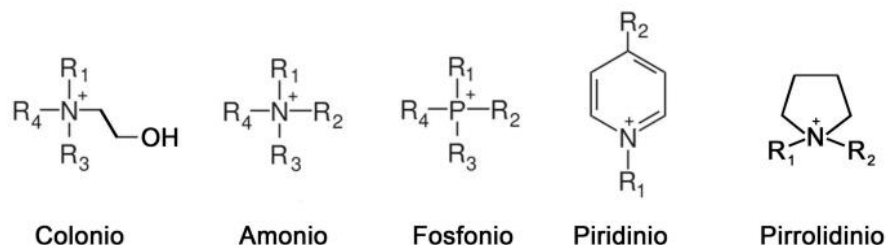


Figura 4. Estructura de cationes para la formación de IL más usados.

Aniones

Los aniones que forman líquidos iónicos a temperatura ambiente suelen ser compuestos inorgánicos u orgánicos débilmente básicos que tienen una carga negativa difusa o protegida, como los mostrados en la Figura 5 (7).

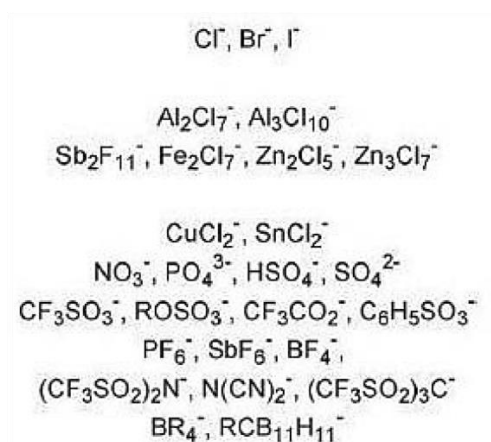
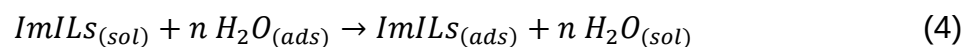
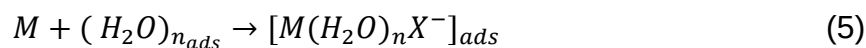


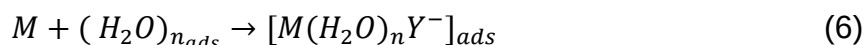
Figura 5. Aniones más usados para la obtención de IL.

Los ImILs como IC, reemplazan las moléculas de agua que ya están adsorbidas en la superficie del metal, bloqueando los sitios activos de la superficie metálica (40):

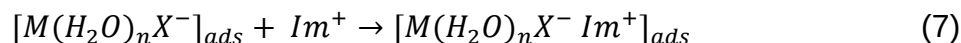


Donde n son las moléculas bipolares de agua reemplazadas por una molécula de inhibidor. El proceso de adsorción de los aniones del medio corrosivo "X⁻" y aniones de ImILs "Y⁻" ocurren en la superficie del metal, sin embargo, al tener una mayor concentración de iones X⁻, ocurre la disolución del metal en el medio corrosivo, obteniendo que Ec. 5 sea mayor que Ec. 6.





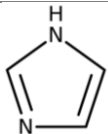
Pese a estas especies cargadas aniónicamente, éstas atraen al catión imidazol (Im^+) cargado positivamente por fuerzas electrostáticas formando una monocapa sobre la superficie metálica. Teniendo la adsorción de especies cargadas aniónicas $[M(H_2O)_n X^-]_{ads}$ y la parte catiónica de ImILs.



1.10 Estado del arte

La presencia de un anillo imidazol (Tabla 4) en el catión de IL ha funcionado sobresalientemente como componente que mejora la eficiencia de inhibición a la corrosión de metales y aleaciones evaluados en medios ácidos (41; 8; 4).

Tabla 4. Información Imidazol.

Nombre	Estructura	Peso molecular	Punto de fusión
Imidazol $C_3H_4N_2$		68.077 g/mol	90.5 °C

1.10.1 Líquidos iónicos derivados de imidazol (ImILs) en HCl

Gurjar *et. al.* (2021), presentaron un trabajo en donde indican que las EI de diferentes ILs se encuentra en un rango de 63.95%-99.6% en acero al carbono (40). Indican también que estos valores son función de la concentración de ILs. Por otra parte, Zhang *et. al.* (2021), evaluaron tres ILs de imidazolio dimérico conectado por bipyridilo como IC de acero al carbono N80 en un medio de HCl 1M a 25 °C, y reportaron una eficiencia de inhibición de hasta el 96.3%, mostrando que la longitud de cadena en el grupo alquilo es de suma importancia para obtener una mayor eficiencia de inhibición (3). Haque *et. al.* (2020), realizaron un estudio de líquidos iónicos derivados de imidazolio como inhibidores de corrosión en acero al carbono, usando HCl 1M como medio corrosivo a una temperatura de 303 K y un tiempo de inmersión de hasta 30 h. Los heteroátomos principales presentes en lo grupos funcionales fueron oxígeno (Z1) y azufre (Z2), en el primer caso, la máxima eficiencia obtenida fue de 94.86 % a 50 ppm, y en el segundo caso de 2 ppm con un 94.59 %, ambos inhibidores exhibieron una buena inhibición. Sin embargo, el IL Z2 mostró mejor rendimiento a una concentración más baja en comparación con el Z1 (42). Otro estudio en HCl 1M fue el realizado por Subasree y Arockia (2020), quienes emplearon dos ImILs para evaluar el efecto sobre la corrosión en acero dulce variando la temperatura y la concentración: Bromuro de 3-hexadecil-1-metil-1H-imidazol-3-io $[C_{16}M_1Im][Br]$ y Bromuro

de 3-hexadecil-1,2-dimetil-1H-imidazol-3-io [$C_{16}M_2Im$] [Br]. Para el primer compuesto se obtuvo una eficiencia de inhibición mínima de 45.7% a 328 K y una máxima de 90.67% a 298 K y para el segundo compuesto se obtuvo una mínima de 46.48% y máxima de 95.35%, ambas a 298 K. Se concluyó que la eficiencia incrementa con el aumento de la concentración, disminuyendo así la velocidad de corrosión; en cuanto a la variación de temperatura, la eficiencia disminuyó hasta una temperatura alcanzada de 328K, los autores sugirieron que se produjo una adsorción física entre los inhibidores y el acero (1).

1.10.2 Líquidos iónicos derivados de imidazol (ImILs) en H_2SO_4

Los ImILs también han presentado resultados sobresalientes en medio acuoso de H_2SO_4 , como el estudio realizado por Gurjar *et. al.* en 2021, quienes reportaron eficiencias de inhibición de 69.9% a 99.62% en acero dulce (40). Por otra parte, Zeng *et al.* (2021), evaluaron tres ImILs como IC (bromuro de 1-propil-3-metilimidazolio ([PrMIm]Br), bromuro de 1-aminopropil-3-metilimidazolio ([APMIm]Br) y Ditribromuro de 1,4-bis(3-metilimidazolio-1-il)butano ([BMImB]Br₂). Los autores indican que [APMIm]Br muestra una mayor eficiencia a temperaturas cercanas a la ambiente alcanzando un mayor rendimiento a diferencia de los otros dos evaluados (84.5%), sin embargo, cuando la temperatura de la solución de ataque supera los 313 K, la eficiencia de inhibición de [BMImB]Br₂ (85.2 % a 323 K) es notablemente mayor que la de [APMIm]Br y [PrMIm]Br. Indican que este comportamiento se debe a un proceso de quimisorción de [BMImB]Br₂ en la superficie del acero, pues con el aumento de la temperatura, aunque aumenta el movimiento térmico entre las moléculas, los enlaces químicos son más fuertes y exhiben así un rendimiento superior de inhibición de la corrosión (43). De igual manera, Ramkumar y Nalini (2019), evaluaron 3,4-dimetoxifenil-2-imidazolio (DMP2I) y 4-metoxivinil-2-imidazolio (MV2I) variando la concentración de 40-200 ppm y 2-20 pmm respectivamente en un medio de 0.5 M de H_2SO_4 ; el tiempo de inmersión fue de 0.5 - 24 h, obteniendo así eficiencias de inhibición de 19.2% (0.5 h) -93.4% (6 h) y 18.42% (1/2 h) – 82.36% (3 h) para DMP2I y MV2I, respectivamente. Concluyeron que la eficiencia en estos compuestos puede deberse al par solitario de electrones en el átomo de nitrógeno y los electrones pi del anillo aromático, lo que resulta en la adsorción de los compuestos en la superficie del metal. Por consiguiente, a mayor concentración incrementa la eficiencia de inhibición en el metal (44). Finalmente, Corrales *et al.* (2019), evaluaron en acero API 5L X52 a 0.5 M el tiocianato de 1-etilo y 3-metilimidazolio (EMIM)⁺ (SCN)⁻, en un tiempo de inmersión de 120 h a diferentes concentraciones y obtuvieron una eficiencia máxima de 90.1% a 75 ppm. Los autores concluyen que, a mayor concentración de inhibidor, la velocidad de corrosión disminuye, obteniendo así una eficiencia mayor a concentraciones crecientes (45).

Capítulo 2. Metodología

2.1 Materiales

El sustrato metálico utilizado en este estudio fue el acero SAE 1010, cuya composición química se muestra en la Tabla 5 (46).

Tabla 5. Composición del acero SAE 1010.

Elemento	C	Mn	P	S	Fe
% peso	0.08-0.13	0.30-0.60	0.040 máx.	0.050 máx.	Remanente

Las probetas metálicas presentaron las siguientes dimensiones aproximadas: 37.5 x 12.5 x 0.3 mm. Las muestras se perforaron por un extremo para sujetarlas con hilo de teflón y suspenderlas en la solución corrosiva, a fin de tener un área superficial metálica totalmente expuesta en el medio corrosivo, como se muestra en la Figura 6.

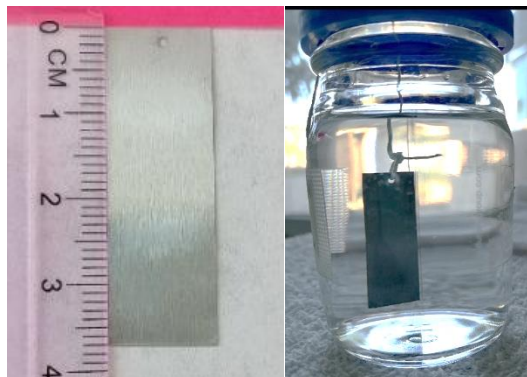


Figura 6. Probeta metálica empleada para análisis de pérdida de peso.

La preparación de las muestras previo a evaluación fue la siguiente: las placas metálicas se desbastaron con lijas de papel de SiC de número 600-2000, posteriormente, se lavaron con agua destilada y jabón, enjuagaron con agua desionizada, isopropanol y acetona, y finalmente se secaron a flujo de aire frío.

2.2 Análisis Microestructural

A fin de analizar la microestructura del acero SAE 1010, se realizó el ataque químico de las muestras pulidas con un acabado espejo. La solución de ataque fue Nital al 2 %, preparada con 98% de alcohol metílico y 2 % de ácido nítrico, ambos reactivos grado reactivo. La superficie metálica se analizó con un microscopio metalográfico Nikon eclipse MA100 a 10, 50 y 100x. La Figura 7 muestra la superficie de acero SAE 1010 tras someterse a inmersión

en nital al 2 % durante 30 s. Se observa una microestructura característica de acero por la presencia de perlita (granos oscuros) y ferrita (granos claros) (47).

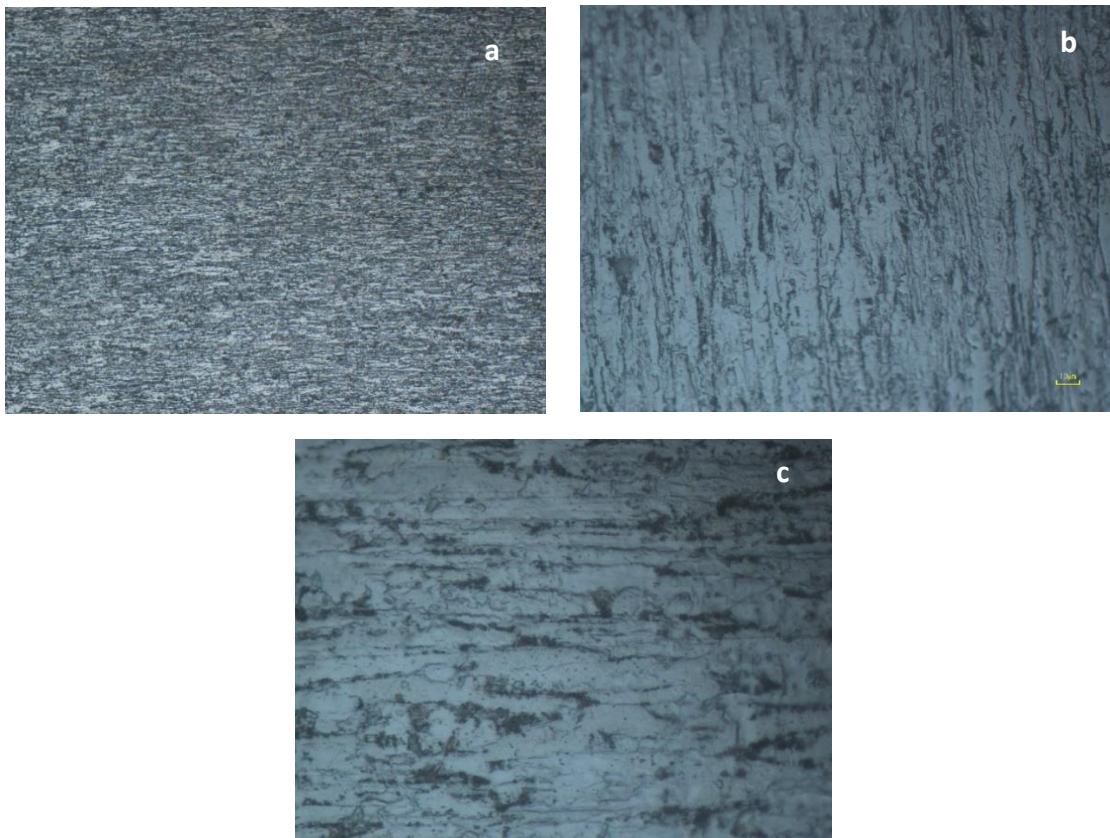


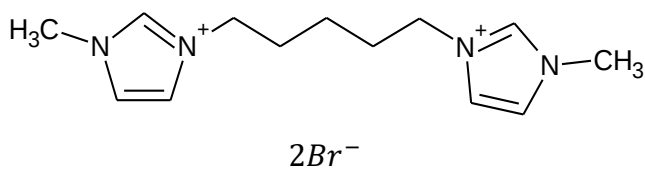
Figura 7. Micrografías de acero SAE 1010 atacada con nital al 2% y 30s a) 10, b) 50 y c) 100x.

2.3 Preparación de soluciones de prueba

Los medios corrosivos de evaluación fueron soluciones de ácido clorhídrico (HCl) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) ambas 1 M. Estas soluciones se prepararon con agua destilada y ácidos grado reactivo de alta pureza: HCl de 37% y H₂SO₄ de 97%.

El inhibidor de corrosión utilizado fue el líquido iónico 1,5-bis(3'-metilimidazolio) pentano (ImIL), cuya estructura se presenta en la Tabla 6. Para valorar la efectividad del ImIL, primero se preparó una solución base de 1000 ppm de ImIL en isopropanol, para posteriormente hacer diferentes disoluciones de 25, 50, 75, y 100 ppm.

Tabla 6. ImIL utilizado como inhibidor en el acero SAE 1010.

Nombre	Estructura	Peso molecular
Dibromuro de 1,5-bis(3'-metilimidazol)pentano	 <chem>CN1C=CN1CCCCC[N+]1=CNC=C1.[Br-].[Br-]</chem>	394.15

2.4 Pruebas de pérdida de peso

Las pruebas de pérdida de peso se realizaron de acuerdo con la norma ASTM G1-03 (48). Las muestras se prepararon como se describió previamente; previo al análisis, se pesaron con una balanza analítica con una lectura de 0.1 mg (4 decimales) y midieron sus dimensiones de largo, ancho y grosor, con un vernier digital. Después, se sometieron a inmersión en el medio corrosivo a la temperatura de $25 \pm 1^\circ \text{C}$ y a diferentes tiempos de inmersión en el medio ácido de 4, 8 y 12 horas. Posterior al tratamiento, cada muestra se sustrajo e inmediatamente se sumergió en solución ácida pura durante 4 segundos, para eliminar los productos de corrosión generados en la superficie. Las muestras se sometieron a inmersión en agua destilada para eliminar exceso de solución de limpieza, y se repitió el ciclo de lavado y enjuague. Finalmente, las probetas se midieron y pesaron nuevamente para obtener el valor de pérdida de peso generada durante el proceso de corrosión. Todas las mediciones se realizaron por triplicado para obtener un valor promedio y asegurar la reproducibilidad de los experimentos.

2.5 Evaluación del daño por corrosión

Tras obtener los datos de la prueba de pérdida de peso, se calculó la velocidad de corrosión de las probetas metálicas mediante la siguiente ecuación (48):

$$\text{Velocidad de corrosión} = \frac{(K * W)}{A * T * D} \quad (8)$$

donde K es un valor constante de $8.76 \times 10^4 \text{ mm/y}$, W es la masa perdida en g, A es el área en cm^2 , T es el tiempo de exposición en h, D es la densidad de acero en g/cm^3 . La efectividad del ImIL como IC se determinó mediante el cálculo de la eficiencia del inhibidor de la ecuación 2.

Capítulo 3. Resultados y discusión

3.1 Pérdida de peso y eficiencia de inhibición

La Figura 8 muestra la relación de concentración de ImIL como función de la pérdida de peso del acero a los diferentes tiempos de inmersión y medios ácidos. Se observa en ambas gráficas, que la interacción de cualquier sistema corrosivo con la superficie metálica provoca una pérdida de peso del acero, producida principalmente por la reacción anódica de hierro, al ser el principal elemento metálico en la aleación de acero, de acuerdo con:



Además, el incremento de la concentración de inhibidor provoca una disminución en la pérdida de peso del acero SAE 1010, indicando que independientemente del tiempo de inmersión, el ImIL actúa como IC del acero en medio ácido.

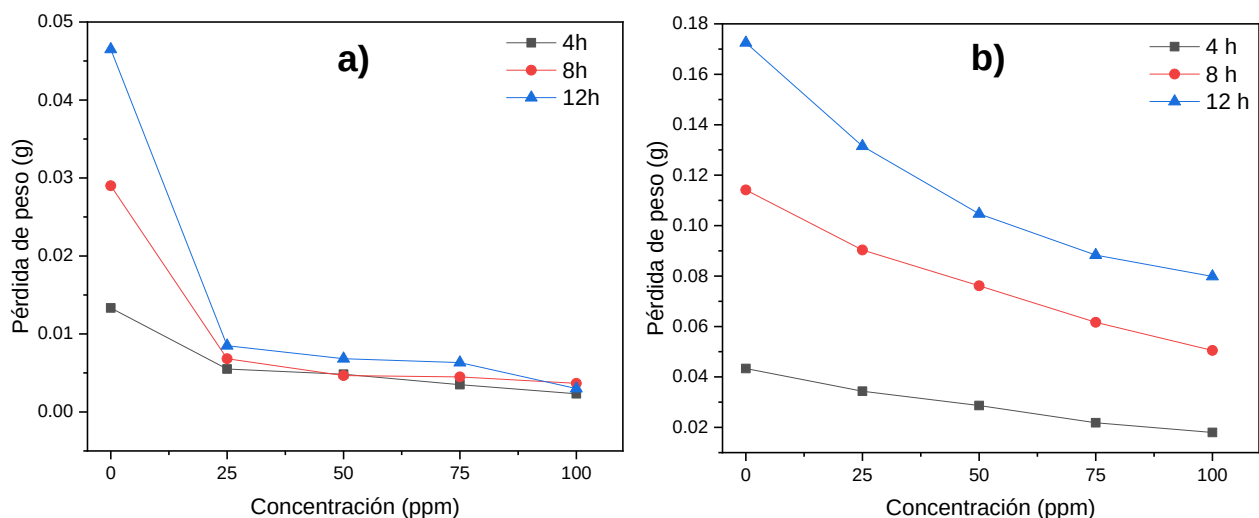


Figura 8. Relación entre la pérdida de peso y la concentración de ImIL como inhibidor de corrosión en acero SAE 1010 en a) HCl y b) H₂SO₄ 1 M.

La Figura 9 muestra los valores de velocidad de corrosión obtenidos por la técnica de pérdida de peso a diferentes concentraciones del ImIL durante diferentes intervalos de tiempo y medios corrosivos. La relación directamente proporcional entre la pérdida de peso y la velocidad de corrosión es evidente en el análisis de las Figuras 8 y 9. En donde, con el incremento de concentración de ImIL, la velocidad de corrosión disminuye. Los valores obtenidos de pérdida de peso y velocidad de corrosión para la solución de HCl y H₂SO₄ 1 M se encuentran reportados en la Tabla 6 y 7, respectivamente.

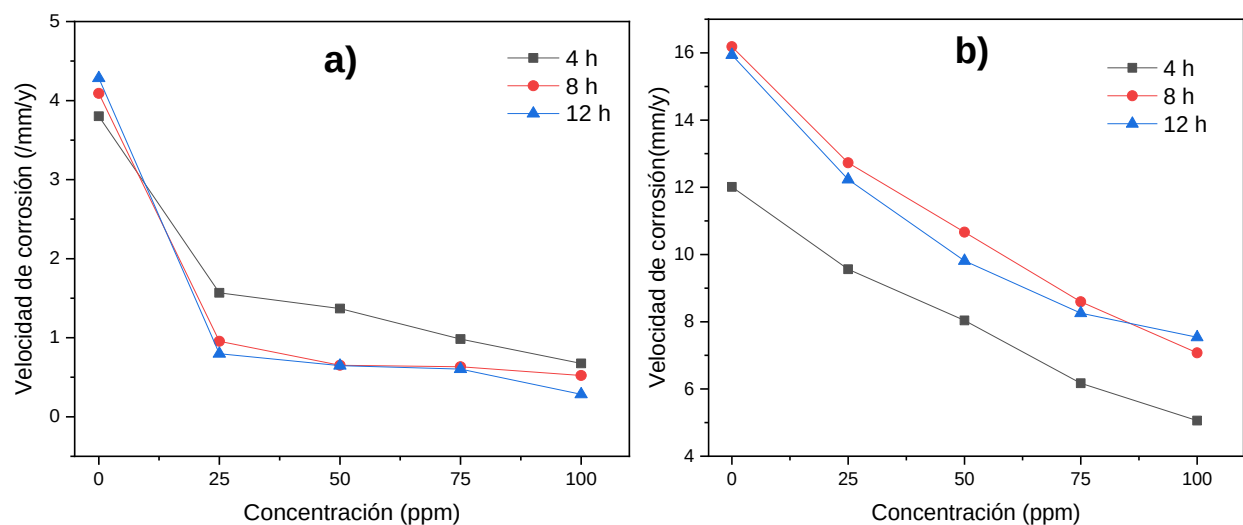


Figura 9. Relación entre la velocidad de corrosión y concentración de ImIL como inhibidor de corrosión del acero SAE 1010 en a) HCl y b) H₂SO₄ 1 M.

Tabla 7. Efecto de la concentración en la eficiencia de inhibición del acero SAE 1010 en medios ácidos HCl 1M.

Tiempo (h)	Concentración (ppm)	Velocidad de corrosión (mm/y)	Pérdida de peso (g)	EI en HCl (%)
4	0	3.8023	0.01333	
	25	1.56872	0.00550	58
	50	1.36932	0.00483	64
	75	0.9838	0.00350	73.92
	100	0.67557	0.00233	82.14
8	0	4.09167	0.02900	
	25	0.95497	0.00683	76.83
	50	0.65134	0.00466	84.05
	75	0.63319	0.00450	84.23
	100	0.52324	0.00366	86.76
12	0	4.28429	0.04650	
	25	0.79783	0.00850	81.35
	50	0.64658	0.00683	84.67
	75	0.60317	0.00633	85.74
	100	0.2843	0.00300	93.28

Tabla 8. Efecto de la concentración en la eficiencia de inhibición del acero SAE 1010 en medios ácidos H_2SO_4 1M.

Tiempo (h)	Concentración (ppm)	Velocidad de corrosión (mm/y)	Pérdida de peso (g)	EI en H_2SO_4 (%)
4	0	12.01198	0.04333	
	25	9.5604	0.03433	20.46
	50	8.03797	0.02867	33.25
	75	6.17063	0.02183	48.90
	100	5.06082	0.01800	57.99
8	0	16.18494	0.11417	
	25	12.72757	0.09033	21.90
	50	10.66463	0.07617	34.78
	75	8.59414	0.06167	47.45
	100	7.07374	0.05050	57.06
12	0	15.93762	0.17250	
	25	12.23286	0.13150	23.78
	50	9.81092	0.10467	39.37
	75	8.25785	0.08833	48.26
	100	7.53748	0.07983	52.95

Se observa en las Tablas 7 y 8 que las velocidades de corrosión del acero SAE 1010 son mayores en el medio de H_2SO_4 respecto a HCl, en los sistemas en ausencia y presencia de ImIL. Indicando que el acero SAE 1010 es más susceptible al daño por corrosión por los iones sulfato (SO_4^{2-}) respecto a los iones cloro (Cl^-), como se ha reportado en diferentes estudios (49).

La Figura 10 muestra el efecto de la concentración sobre la eficiencia de inhibición del acero SAE 1010 en soluciones de HCl y H_2SO_4 , donde se observa un incremento en el porcentaje de eficiencia de inhibición conforme incrementa la concentración. Se observa un rango de eficiencia mayor para los sistemas en HCl respecto a H_2SO_4 , confirmando el efecto más corrosivo de los iones sulfato. Los valores de eficiencia de inhibición máximos para los sistemas de HCl y H_2SO_4 fueron de 93.28 y 57.99 %, respectivamente. En las pruebas, con HCl se tiene una mayor eficiencia del ImIL con el tiempo de inmersión. Sin embargo, para el sistema de H_2SO_4 no hay un comportamiento definido del tiempo de inmersión en la EI.

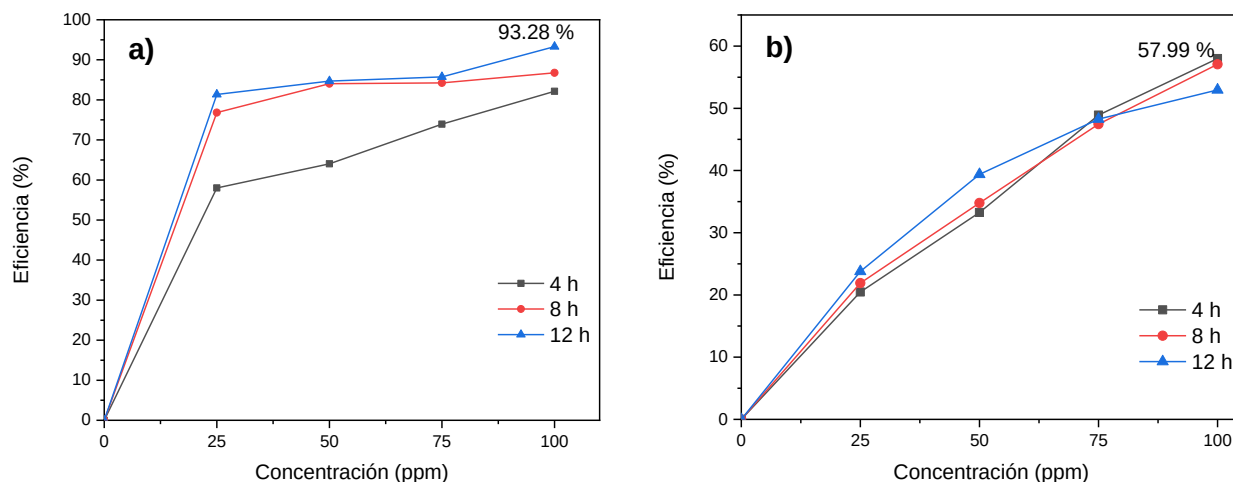


Figura 10. Relación entre la eficiencia de inhibición y concentración de ImIL como inhibidor de corrosión del acero SAE 1010 en a) HCl y b) H₂SO₄ 1 M.

El efecto de inhibición a la corrosión de ImIL en los sistemas evaluados está relacionado con su estructura química, como estudios reportados (50; 44; 51; 52; 43). La presencia del derivado de imidazol y el átomo de nitrógeno podrían generar enlaces covalentes con los átomos de hierro, propiciando la adsorción del ImIL en la superficie del metal (53).

3.2 Isotermas de adsorción

Con el fin de obtener información respecto al tipo de adsorción del inhibidor estudiado, se utilizó el modelo teórico de Langmuir (ecuación 10) lo cual dicta la formación de una monocapa protectora (2).

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = C_{inh} + \frac{1}{K_{ads}} \quad (10)$$

$$\theta = \frac{EI\%}{100} \quad (11)$$

Donde C_{inh} es la concentración de inhibidor, K_{ads} constante de equilibrio de adsorción en el proceso y θ es el grado de superficie cubierta, calculada por la ecuación 11.

Con base a los datos de superficie cubierta obtenidos con la eficiencia de inhibición por pérdida de peso, se obtuvieron las gráficas de C_{inh}/θ vs C_{inh} mostradas en la Figura 11. Mediante el ajuste de regresión lineal se obtuvo el valor de K_{ads} por medio de la intersección de la recta dado que:

$$y = mx + b \quad (12)$$

Entonces:

$$b = \frac{1}{K_{ads}} \quad (13)$$

La energía libre de Gibbs de adsorción se determinó por la ecuación 14, donde R es la constante universal de los gases ideales (kJ/mol), T es temperatura del sistema corrosivo (K), 55.55 es la concentración molar del agua en solución ácida (mol/L) (52).

$$\Delta G_{ads} = -RT \ln(55.5 K_{ads}) \quad (14)$$

Los valores de ΔG_{ads} nos dice la interacción que tiene la superficie del metal con el inhibidor y acorde a la literatura, los valores de -20 kJ/mol o menores indican una interacción electrostática entre la superficie metálica cargada y las moléculas orgánicas cargadas en la mayor parte de la solución (fisisorción); mientras que valores del orden de -40 kJ/mol o mayores implican la transferencia de carga entre la molécula del inhibidor y la superficie del metal para formar un enlace covalente coordinado (quimisorción) (54). Por lo tanto los valores en el rango de -20 a -40 kJ/mol indican que el inhibidor se adsorbe por ambos mecanismos, comportándose como inhibidor mixto (2).

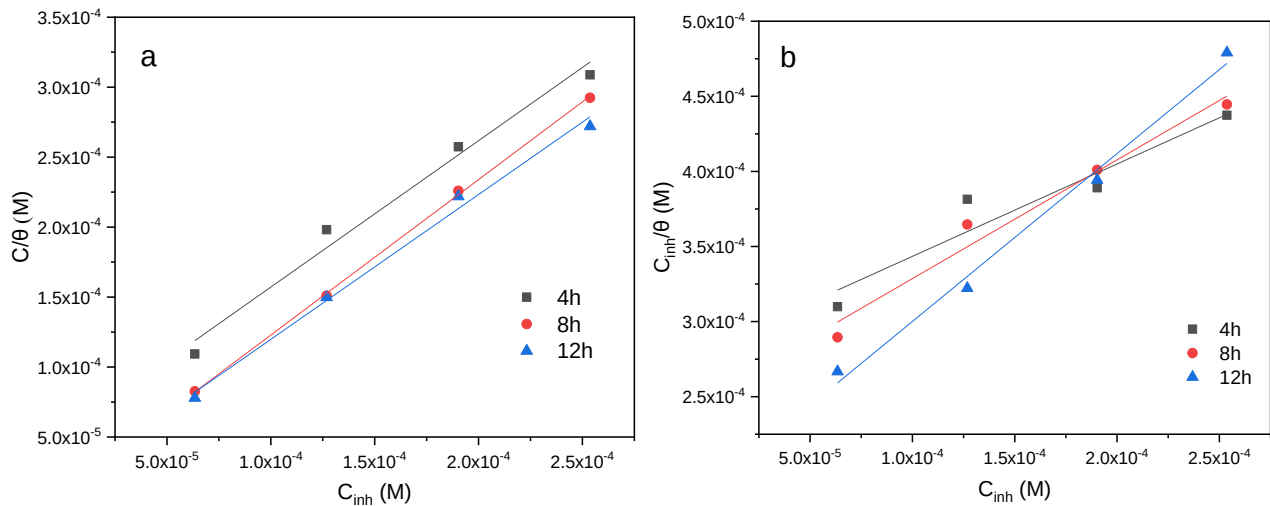


Figura 11. Isotermas de adsorción Langmuir en a) HCl y b) H_2SO_4 .

La figura 11 muestra los datos experimentales resultantes por el método teórico de adsorción de Langmuir. Observando que para ambos sistemas se presentó un ajuste lineal pues los valores obtenidos del coeficiente de correlación lineal (R_2) resultaron cerca de la unidad como se muestra en la Tabla 9, lo que sugiere que las moléculas del inhibidor forman una monocapa en la superficie del metal y teniendo así fácilmente una adsorción en la superficie del metal.

Tabla 9. Parámetros termodinámicos de adsorción.

Medio	Tiempo (h)	m	b	R ²	K _{ads} (mol ⁻¹)	ΔG _{ads} (kJ/mol)
HCl	4	1.0370	0.0000540	0.9831	18523.59	-34.31
	8	1.1107	0.0000118	0.9995	84630.29	-38.08
	12	1.0313	0.0000169	0.9933	59265.22	-37.19
H ₂ SO ₄	4	0.6152	0.0002819	0.9177	3547.20	-30.21
	8	0.7907	0.0002495	0.9725	4007.36	-30.21
	12	1.1180	0.0001883	0.9915	5311.36	-31.21

En la Tabla 9 se muestran los valores obtenidos para ΔG_{ads} , que van de -34.31 a 38.08 kJ/mol para al HCl y -30.21 a -31.21 kJ/mol para el H₂SO₄, se puede asumir que las moléculas del inhibidor son adsorbidas por un proceso de adsorción mixta sobre la superficie del acero SAE 1010 y previenen la reacción entre el ácido y la superficie del metal formando una capa entre metal-inhibidor, protegiendo así la superficie metálica, reduciendo los sitios activos expuestos al medio agresivo. Los valores negativos de ΔG_{ads} y los valores altos de K_{ads} conducen a la espontaneidad del proceso de adsorción y la estabilidad de la capa adsorbida en el acero (51).

3.3 Análisis superficial

La Figura 12 presenta las muestras de acero SAE 1010 posterior a la inmersión en HCl y H₂SO₄ 1 M y previamente al proceso de limpieza ácida. La figura 12 b) del sistema en H₂SO₄ presenta una coloración más oscura respecto a la figura 12 a) correspondiente al HCl, indicando que las muestras con mayor daño corrosivo y más desgaste de material fueron las empleadas en H₂SO₄.

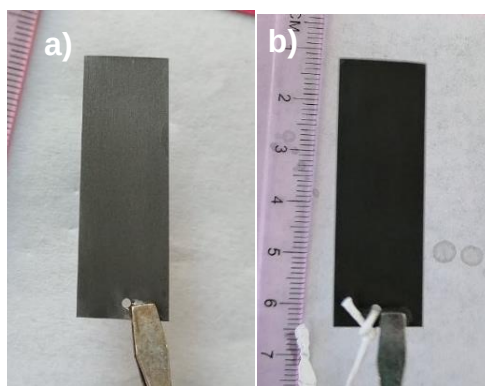


Figura 12. Muestras de acero SAE 1010 después de someterse a inmersión en a) HCl y b) H₂SO₄ 1 M durante 12 h antes de la limpieza ácida.

Las Figuras 13 y 14 muestran las placas de acero SAE 1010 después de 12 h de inmersión en H₂SO₄ y HCl a distintas concentraciones de 1mIL, respectivamente. Se observa que las

muestras de acero en H_2SO_4 tienen una coloración más oscura respecto a los sistemas en HCl . Asimismo, un mayor daño por corrosión es evidente a concentraciones bajas de ImIL en ambos ácidos. Mientras que el acero sometido a corrosión con concentraciones de 75 ppm y 100 ppm de ImIL mantiene su coloración metálica característica, señal de un daño por corrosión menor.

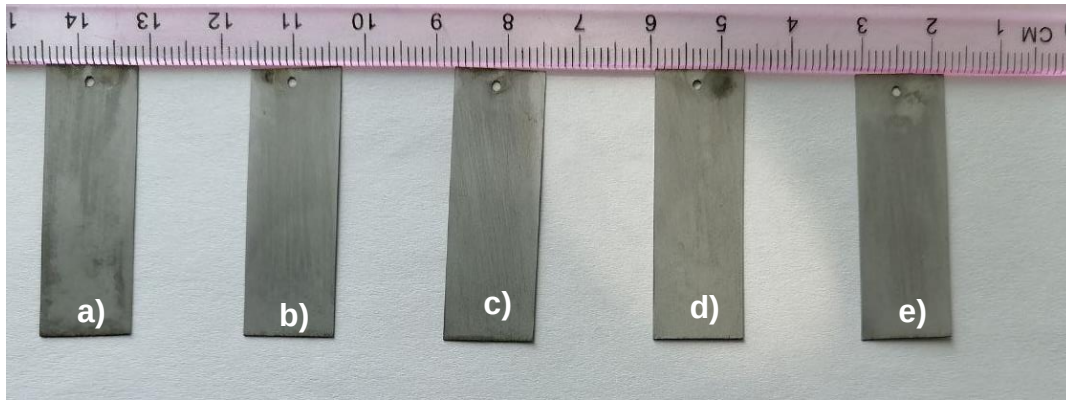


Figura 13. Muestras de acero SAE 1010 extraídas de H_2SO_4 después de 12 h de inmersión con diferentes concentraciones de ImIL: a) 0 ppm, b) 25 ppm, c) 50 ppm, d) 75 ppm y e) 100 ppm.

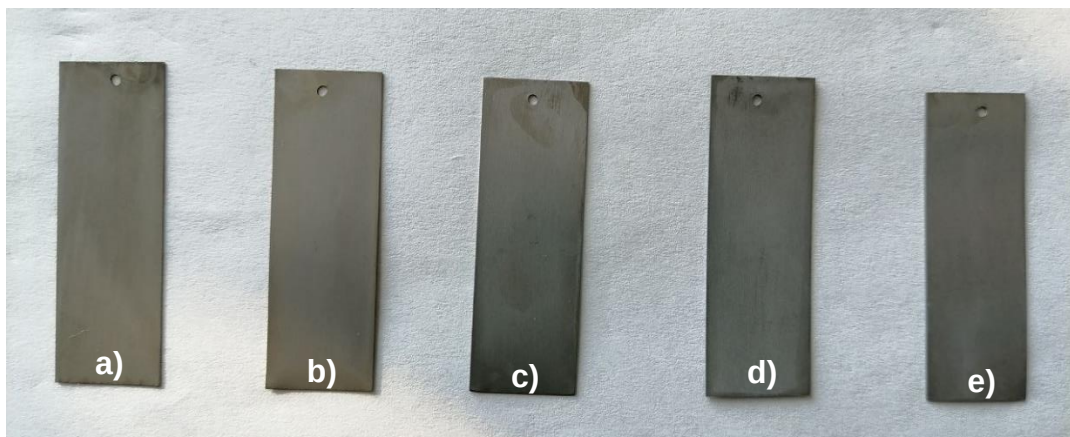


Figura 14. Muestras de acero SAE 1010 extraídas de HCl después de 12 h de inmersión con diferentes concentraciones de ImIL: a) 0 ppm, b) 25 ppm, c) 50 ppm, d) 75 ppm y e) 100 ppm.

3.4 Análisis por Microscopía Óptica

En la Figura 15 ,se muestra una micrografía a 1000X del material en blanco de acero SAE 1010 antes de la exposición al medio ácido, mostrando un acabado uniforme en la superficie.

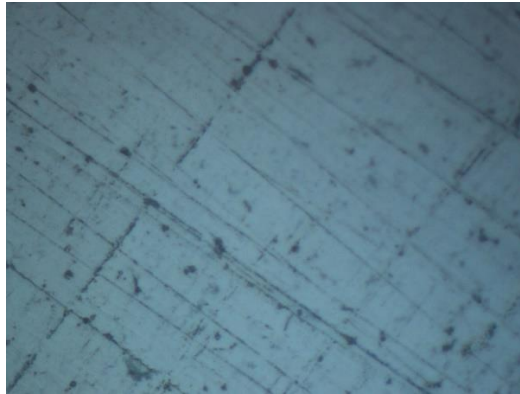
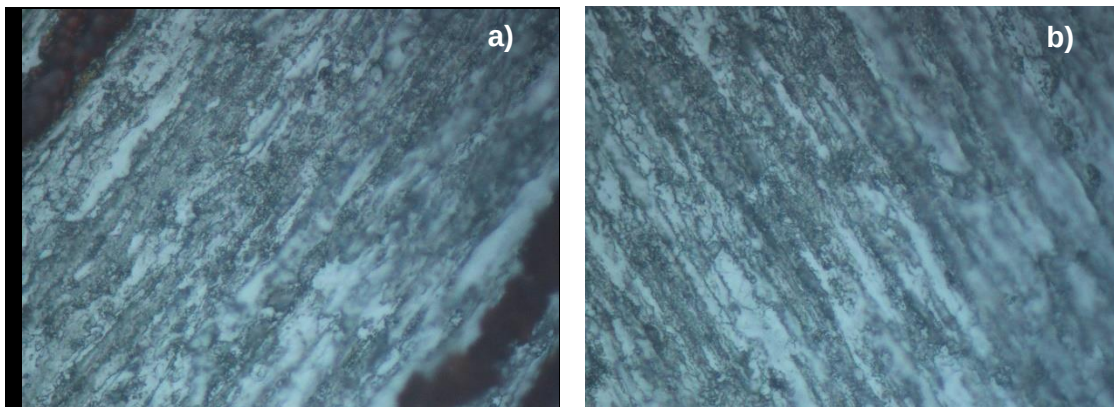


Figura 15. Muestra del acero SAE 1010 previo a pruebas gravimétricas.

La figura 16 muestra la morfología de la superficie del acero SAE 1010 corroído durante 4 h en HCl 1M en ausencia y presencia de inhibidor a una temperatura de 25°C. De acuerdo con las imágenes obtenidas, se observa que la superficie del acero en ausencia de inhibidor muestra una mayor superficie corroída debido a productos de corrosión adheridos a la superficie. Por otra parte, cuando se añade inhibidor al medio corrosivo, se nota un cambio en la apariencia superficial del acero y se observa una superficie más limpia comparado con la de ausencia del inhibidor, en la cual los productos de corrosión son depositados sobre la superficie del acero.



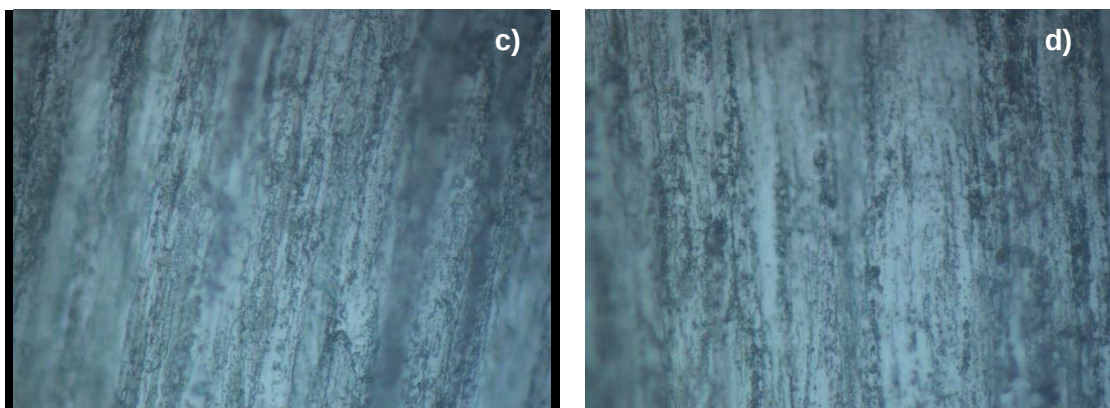
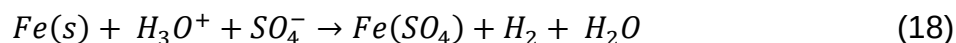
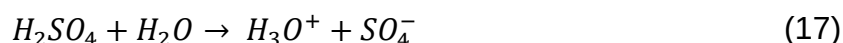
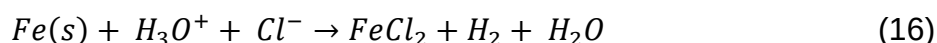


Figura 16. Micrografías a 1000X del acero SAE 1010 a) y b) a 1M y c) y d) a 100ppm por 4h HCl 1M.

En cuanto a las reacciones obtenidas por la exposición del acero en los medios ácidos empleados, son las siguientes (55):



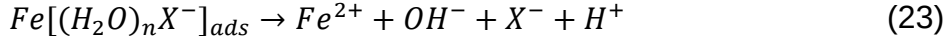
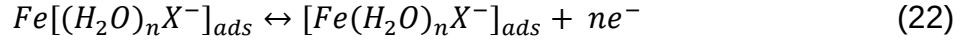
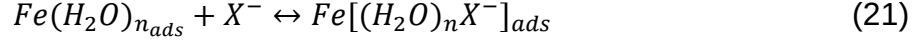
En donde los productos obtenidos por la corrosión en el acero son $FeCl_2$ para el medio de HCl y $FeSO_4$ para H_2SO_4 . De igual manera, la formación de hidróxido de hierro $Fe(OH)_2$ se favorece debido a la presencia de oxígeno en las soluciones:



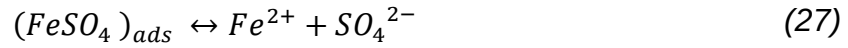
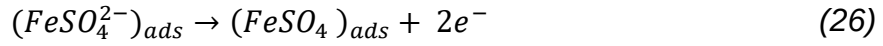
Para el mecanismo de adsorción, en la reacción catódica existe una competencia entre el ion hidronio (H_3O^+) y el catión del inhibidor ($ImIL^+$) generando complejos que bloquean los sitios activos, restringiendo la interacción de H_3O con Fe (Ec.36) y retardando la evolución del H_2 , mientras que para la anódica se tiene una competencia entre Cl y SO_4 (X^-) adsorbidos y el anión Br_2 (Y^-) del inhibidor, ocurriendo posteriormente la estabilización de los aniones Br_2 con las interacciones de $ImIL^+$, formando complejos de $FeBr_2^- ImIL^+$ sobre los sitios anódicos, resultando un bloqueo en los sitios activos (40; 56; 57).

A continuación, se muestran las reacciones en ausencia y presencia de inhibidor para la parte anódica (56):

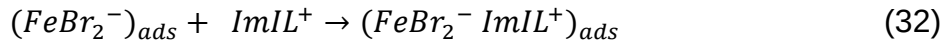
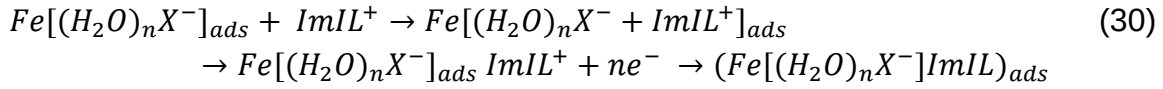
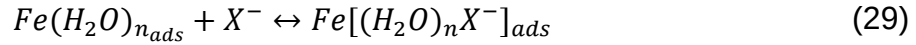




Siendo las siguientes reacciones responsables de la pérdida de masa:

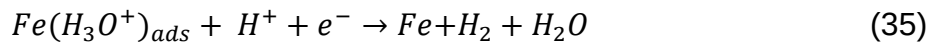
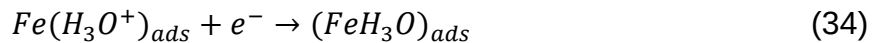


Y con inhibidor:

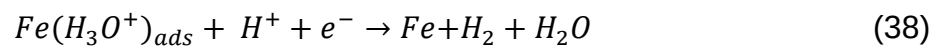
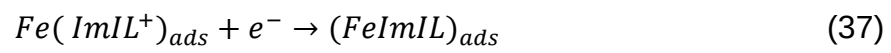
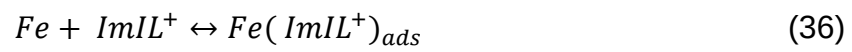


Para esta parte, las reacciones anódicas se llevan a cabo por el ataque de los X^- al acero formando especies que son adsorbidas en la superficie $FeCl_2$ y $Fe(SO_4)$.

En cuanto a la parte catódica sin inhibidor:



Con inhibidor:



4. Conclusiones

Los resultados de las pruebas de pérdida de peso indicaron que la adición del dibromuro de 1,5-bis(3'-metilimidazol) pentano en medios ácidos (sulfúrico y clorhídrico) disminuye la pérdida de peso y velocidad de corrosión del acero SAE 1010, indicando que este líquido iónico funciona con inhibidor de corrosión en medio ácido.

La velocidad de corrosión presentó un comportamiento inversamente proporcional con la concentración de ImIL, mientras que en HCl la mayor eficiencia se obtuvo a tiempos de inmersión mayores, en H₂SO₄ a tiempos menores.

La eficiencia de inhibición máxima del ImIL fue de 93.28 % a 100 ppm por 12 h en HCl y 57.99 % a 100 ppm por 4 h en H₂SO₄. Además, los resultados de análisis superficial y por microscopía óptica posteriores al proceso de corrosión del acero en presencia de ImIL, indican que se produce un menor daño por corrosión superficial con la adición del inhibidor en ambos medios.

Mediante el ajuste a la isoterma de adsorción de Langmuir se obtuvieron valores para la ΔG_{ads} que van de -30.21 a -38.08 kJ/mol los cuales corresponden a un proceso de fisisorción y quimisorción para ambos medios ácidos, teniendo un comportamiento como inhibidor mixto.

5. Bibliografía

1. *Imidazolium based ionic liquid derivatives; synthesis and evaluation of inhibitory effect on mild steel corrosion in hydrochloric acid solution.* J., Subasree N. & Arockia. India : Heliyon, 2020, Vol. 6. e03498.
2. *Enhanced inhibitive performance of fluoro-substituted imidazolium-based ionic liquid for mild steel corrosion in hydrochloric acid at elevated temperature.* K. Zhang, W. Yang, Y.Chen, B.Xu, X.Yin, y H. Zuo. Nanjing : Springer, 2018, J Mater Sci, Vol. 53, págs. 14666-14680.
3. *Dimeric imidazolium ionic liquids connected by bipyridyl as a corrosion inhibitor for N80 carbon steel in HCl.* Juantao Z., Minjian K. , Jiangtao F., Chengxian Y. ,Danping L., Lei F., Quibin C., y Honglai L. 2021, Vol. 344. 117962.
4. *Corrosion inhibition properties of iodide ionic liquids for API 5L X52 steel in acid medium.* Paulina Arellanes-Lozada, Víctor Díaz-Jiménez, H. Hernández-Cocoletzi, Noel Nava, Olivares-Xometl O. y Natalya V. Likhanovab. s.l. : ELSEVIER, 2020, Corros. Sci., Vol. 175.
5. *Electrochemical characterization and surface morphology techniques for corrosion inhibition—a review.* Sharma S., Ganjoo R., Thakur A. & Ashish Kumar. 2022, Chemical Engineering Communications, págs. 1-36.
6. *Adsorption and inhibition behavior of imidazolium tetrafluoroborate derivatives as green corrosion inhibitors for carbon steel.* Y., Tian G. & Kaitao. 195, s.l. : Journal of Molecular Modeling, 2021, Vol. 27.
7. *Líquidos iónicos: propiedades fisicoquímicas y aplicación potencial en el mejoramiento de crudos pesados.* Díaz, J.C. , Martínez R.R. y Barrero,R. 1, s.l. : ION, 2012, Vol. 25, págs. 61-87.
8. *Corrosion inhibition of mild steel in acidic media by [BMIm]Br ionic liquid.* Es'haghi, H. Ashassi-Sorkhabi y M. s.l. : ELSEVIER, 2009, Materials Chemistry and Physics, Vol. 114, págs. 267–271.
9. J.R. Davis. *Corrosion Understanding the basics.* Ohio : ASM International, 2000.
10. Rodríguez, M.A.Veloz. *"Mecanismos de corrosión de acero al carbón en una solución amortiguadora de ácido acético, cloruros y H₂S".* México : Tesis doctoral UAMI, 2003.
11. H.H, Uhlig. *Corrosion and Corrosion Control.* New York : John Wiley and Sons, 1985.
12. E.McCafferty. *Introduction to Corrosion Science.* New York : Springer + Business Media, 2010.
13. Ahmad, Zaki. *Principles of corrosion engineering and corrosion control.* Massachusetts : Elsevier, 2006.

14. Fernández, J.A. Gonzalez. *Control de la corrosión: Estudio y medidas por técnicas electroquímicas*. Madrid : Grafipren.S.A, 1989. págs. 22-24.
15. Bilurbina L., Liesa F. ,Iribanen J. *Corrosión y protección*. Barcelona : UPC, 2003.
16. R.Roberge, Pierre. *Handbook of corrosion engineering*. New York : McGraw-Hill, 2000.
17. *Acid-resistant organic coatings for the chemical industry: a review*. Buhl V., Dam-Johansen K., Frankær S. y Søren K. 279-306, s.l. : Journal of Coatings Technology and Research, 2017, Vol. 14.
18. *The Recycling of Acid Wastewater with High Concentrations of Organic Matter: Recovery of H₂SO₄ and Preparation of Activated Carbon*. Xingyun H., Linghao K.,Feng Z.,Xianjia P. 183, Beijin,China : WATER MDPI, 2021, Vol. 14.
19. PCC group. [En línea] 9 de 05 de 2020. <https://www.products.pcc.eu/es/blog/acido-sulfurico-sangre-corrosiva-de-la-industria/>.
20. *Impact of the anodizing duration on the surface morphology and performance of A2024-T3 in a model corrosive medium*. C. Girginov, S. Kozhukharov, M. Milanec, M. Machkova. 137-144, s.l. : Mater Chem Phys, 2017, Vol. 198.
21. *Macroscopic and local filming behavior of AA2024 T3 aluminum alloy during anodizing in sulfuric acid electrolyte*. M. Curioni, M. Saenz de Miera, P. Skeldon, G. Thompson, J. Ferguson. 8, s.l. : Journal of The Electrochemical Society, 2008, Vol. 155.
22. *Electrochemical corrosion testing techniques. Process industries corrosion. The theory and the practice*. EL., Liening. 85-122., s.l. : NACE, 1986.
23. *Electrochemical techniques in corrosion: status; limitations and needs*. GS., Frankel. s.l. : Journal of ASTM, 2008, Vol. 5.
24. *Employment of electrochemical sensors for determination of in-situ corrosion rate in wells water*. Orozco V., Almeraya F. , Gaona C. ,Borunda A., y Martínez A. Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.
25. *Mechanisms investigation of cathodic-anodic coupling reaction of Zr-H₂O at 360 °C by long-term in-situ electrochemical polarization analyses* . Jingjing Liao, Wei Zhang,Junson Zhang ,Fei Xu. China : Corrosion Science , 2021.
26. J.O, Alvarado. *Selección electroquímica de compuestos orgánicos como inidores de corrosión en medio ácido*. [Tesis] Hidalgo : Universidad Autónoma de Hidalgo, Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, 2006.
27. E.McCafferty. Chapter 7. Kinetics of Corrosion. *Introduction to Corrosion Science*. s.l. : Springer, 2010, pág. 132.
28. Skoog D.A., West M.D. Introducción al análisis gravimétrico. *Introducción a la química analítica*. s.l. : Reverté, 1986, pág. 67.

29. *Electrochemical action of Citrus reticulata and Pelargonium oil concentrates on 1018 carbon steel corrosion in anionic solution.* Roland Tolulope Loto, Temitayo Ikuerowo, Sophia Ifezue. 2238-7854, Ota, Ogun State, Nigeria : Journal of Materials Research and Technology, 2021, Vol. 16.
30. 8044:2015, Standard ISO. *Corrosion of Metals and Alloys.* s.l. : Basic Terms and Definitions, 2015.
31. Schaweitzer, A.Philip. *Fundamentals of Corrosion. Mechanisms,Causes and Preventative Methods.* NW : CPC Press, 2010.
32. *Ionic liquids as green and sustainable corrosion inhibitors for metals and alloys: An Overview.* Chandrabhan V., Eno E. Ebenso, . Quraishi M. s.l. : Journal of Molecular Liquids, 2017, Vol. 233, págs. 403-414.
33. *Chapter 8 - Recent improvements in the extraction, cleanup and quantification of bioactive flavonoids.* A. Vijaya Bhaskar Reddy, M. Moniruzzaman ,V.Madhavi, Jafariah Jaafar. 197-223, s.l. : Studies in Natural Products Chemistry, 2020, Vol. 66.
34. Victor L. Martins, Roberto M. Torresi. *Ionic liquids in electrochemical energy storage.* s.l. : Curr. Opin. Electrochem., 2018.
35. *EEffect of organic anions on ionic liquids as corrosion inhibitors of steel in sulfuric acid solution.* Natalya V. Likhanova, P. Arellanes-Lozada, O. Olivares-Xomet,H. Hernández-Cocoletzi ,Irina V. Lijanova ,Janette Arriola-Morales ,, J.E. Castellanos-Aguila. 267-278, 2019, Vol. 279.
36. *Ionic Liquids with Carboxylic-Acid-Derived Anions Evaluated as Corrosion Inhibitors under Dynamic Conditions.* 2655 – 2671, Likhanova V. , Arellanes P.,Olivares O.,Lijanova I.,Arriola J.,Mendoza J.C., y Corro G. : Int. J. Electrochem. Sci, 2019, Vol. 14.
37. 5, s.l. : Allerton Press, Inc. , 2015, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, Vol. 51, págs. 491-500.
38. *Tribological behavior of ammonium-based protic ionic liquid as lubricant additive.* P., Guo H. & Iglesias. 169-178, s.l. : Friction, 2021, Vol. 9.
39. *Thermophysical Properties of Two Ammonium-Based Protic Ionic Liquids.* Bhattacharjee A., Coutinho J. , Freire M. y Carvalho P. 703-717, s.l. : J Solution Chem, 2015, Vol. 44.
40. *Performance of imidazolium based ionic liquids as corrosion inhibitors in acidic medium: A review.* Gurjar S., Sushil S. , Sharma A. Y Ratnani S. India : Applied Surface Science Advances, 2021, Vol. 6.
41. *Inhibition effect of 1-ethyl-3-methylimidazolium dicyanamide against steel corrosion.* Tunç Tüken, Filiz Demir, Nur Kıcıır, Gökmen Sığırıcık y Mehmet Erbil. s.l. : ELSEVIER, 2012, Vol. 59, págs. 110–118.

42. Polar group substituted imidazolium zwitterions as eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in acid solution. Haquea J., Srivastava V., Quraishib M., Chauhan D., Lgaz H. & Chung M. 108665, 2020, Corrosion Science, Vol. 172.
43. Three imidazole ionic liquids as green and eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in sulfuric acid medium. Zeng X., Zheng X, Guo L., Xu Q., Huang H. & Bochuan Tan. 2020, Journal of Molecular Liquids, Vol. 324.
44. Enhanced corrosion resistance of mild steel in sulphuric acid medium by imidazole derivative: Experimental and computational studies. D., Ramkumar S & Nalini. 2019, Materials Today: Proceedings, Vol. 18, págs. 1696–1708.
45. 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. M.Corrales, T. Manh, R.Cabrera, J.V. Medina, L.Lartundo y E.M. Arce. s.l. : Journal of Molecular Liquids, 2019, Vol. 289.
46. The corrosion of carbon steel in oil-in-water emulsions under controlled hydrodynamic conditions. Quiroga Becerra H., C. Retamoso y D. Macdonald. s.l. : PERGAMON, 2000, Corros. Sci., Vol. 42, págs. 561-575.
47. Theme, Astra WordPress. Materials today. [En línea] 13 de February de 2022. https://materials-today.com/1010-steel/#Microstructure_of_1010_Steel.
48. ASTM G1-03. Standard Practice for Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. PA : ASTM International West Conshohocken, 2011.
49. Inhibition of the corrosion of steel in HCl, H₂SO₄ solutions by bamboo leaf extract. Xianghong Li, Shuduan Deng, Hui Fu. Corrosion Science : s.n., 2012, Vols. 62, 163-175.
50. Experimental and theoretical studies on some selected ionic liquids with different cations/anions as corrosion inhibitors for mild steel in acidic medium. S. Yesudass, O. Olasunkanmi, Indra Bahadur, M. Kabanda, I.B. Obot y E. Ebenso. s.l. : ELSEVIER, 2016, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 000, págs. 1-17.
51. Corrosion Inhibition and Adsorption Behavior of Some Cationic Surfactants on Carbon Steel in Hydrochloric Acid Solution. A. S. Fouda, M. A. Migahed, A. A. Atia y I. M. Mousa. 22, Switzerland : Springer, 2016, Vol. 2.
52. Azoisonicotinohydrazide derivative as carbon steel corrosion inhibitor in 1 M H₂SO₄: potentiostatic, adsorption isotherm and surface studies. E. Salman, A. Balakit y B. Jasim. 3, Babylon : s.n., 2019, Int. J. Corros. Scale Inhib., Vol. 8, págs. 539–548.
53. Adsorption behavior of 8,9-bis(4 (dimethyl amino)phenyl)benzo[4,5]imidazo[1,2-a]pyridine-6,7-dicarbonitrile on mild steel surface in 1 M HCl. Quraishi, Chandrabhan Verma y M.A. s.l. : ELSEVIER, 2017, Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences, Vol. 22, págs. 55–61.

54. ANÁLISIS DEL PROCESO DE CORROSIÓN DE UN ACERO API X100 INMERSO EN SALMUERA NACE MEDIANTE RUIDO ELECTROQUÍMICO A CONDICIONES DE FLUJO TURBULENTO. A., Enrique Cabrera. s.l. : Universidad Veracruzana, 202, TESIS MAESTRÍA.

55. COMPORTAMIENTO CORROSIVO EN DIFERENTES ALEACIONES DE HIERRO EN MEDIOS ÁCIDOS. A., Morales. s.l. : BUAP, 2021, TESINA.

56. *The effect of ionic liquids with imidazolium and pyridinium cations on the corrosion inhibition of mild steel in acidic environment.* Likhanova N., Domínguez-Aguilar M., Olivares-Xometl O., Nava-Entzana N., Arce E. , y Dorantes H. s.l. : Elsevier, 2010, Corros. Sci., Vol. 52, págs. 2088–2097.

57. EVALUACIÓN DE LÍQUIDOS IÓNICOS DERIVADOS DE IMIDAZOL PARA INHIBIR LA CORROSIÓN DEL ACERO API X52 EN MEDIO ÁCIDO BAJO CONDICIONES DE FLUJO LAMINAR". V., DIAZ JIMENÉZ. s.l. : BUAP, 2019, TESIS MAESTRÍA.

