

Corrosión en aceros al Carbono N-80 en procesos de recobro mejorado con catalizadores
liposolubles

Mery Saray Paipa Gómez y Danna Camila Silva Torres

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Metalúrgica

Director

Darío Yesid Peña Ballesteros

Ph.D. en Corrosión

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Agradezco profundamente a Dios, fuente de inspiración, fuerza y guía, quien ha iluminado mi camino y me ha dado la perseverancia necesaria para superar cada desafío y alcanzar esta meta.

A mi mamá Mary Gómez, quien, con su amor infinito, sus palabras de aliento y su apoyo incondicional han sido la base sólida sobre la que he construido mis sueños. Gracias por cada sacrificio, cada consejo y cada muestra de confianza en mí, que han nutrido mi espíritu y me han motivado a seguir adelante. Su ejemplo de dedicación y entrega me inspira a ser mejor cada día.

A mi padre Silvano Paipa, cuyo ejemplo de integridad, esfuerzo y dedicación ha sido una inspiración constante en mi vida. Gracias por mostrarme, con tus acciones, el valor del trabajo duro y la importancia de nunca rendirse.

A mi novio Johan Camargo, cuya paciencia, comprensión y motivación constante han sido fundamentales en este proceso. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por ser mi compañero en los días largos, y por recordarme siempre la importancia de mantener el equilibrio entre el esfuerzo y la alegría.

Asimismo, quiero expresar mi sincero agradecimiento a los profesores de la escuela ingeniería metalúrgica, quienes con su dedicación, conocimientos y compromiso no solo me han guiado académicamente, sino también han sido una inspiración constante para crecer como profesional y como persona.

Esta dedicatoria es un pequeño homenaje a ustedes, quienes con su apoyo, cariño y enseñanzas han sido parte esencial de este logro. Es imposible expresar con palabras todo lo que representan en mi vida, pero quiero que sepan que este trabajo no habría sido posible sin ustedes.

Mery Saray Paipa Gómez

Dedicatoria

A Dios por todas bendiciones que me ha dado y ser mi guía a lo largo de mi vida. Se que todo lo que he conseguido ha sido gracias a su infinito amor.

Dedico especialmente este título a mi madre Dana Paola Torres León, estoy infinitamente agradecida por su apoyo y amor incondicional, sé que todo lo que soy es gracias a ti y tu esfuerzo inigualable por sacarme adelante. Gracias por tus oraciones que a diario me protegen y me llevan por el camino del bien. Por darme alas para poder llegar a donde me lo proponga. Este logro también es tuyo.

A mis hermanas Isabella y Saray, cada paso que he dado ha sido con ustedes en mi corazón. Que este logro sea un ejemplo de que con esfuerzo y dedicación todo es posible. Recuerden que siempre podrán contar conmigo.

A mis hermanas Karina, Paola y Yolima por el amor que me han dado desde pequeña y cuidarme en todo momento. Su aliento y amor me han dado fuerzas para alcanzar este logro.

A mi novio Juan Pablo por ser mi apoyo incondicional y mi mejor amigo. Gracias por cada palabra de aliento y por creer en mi en todo momento. Por tu amor y paciencia que hacen ver un rayito de luz en esos días no tan alegres. Gracias por ser mi compañero en este viaje.

Finalmente, a todos mis profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, quienes hicieron de este proceso académico un aprendizaje más ameno, valoro su esfuerzo y dedicación por cumplir su rol de docente de una manera inigualable, me siento muy honrada de haber pertenecido a la escuela de Ingeniería Metalúrgica, cada lección impartida me acompañara a lo largo de mi vida.

Danna Camila Silva Torres

Agradecimientos

Los autores de este libro expresan su agradecimiento a:

A la vicerrectoría de investigación y extensión por el apoyo financiero en este trabajo de grado, bajo el proyecto No. 3910

La Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia De Materiales.

El equipo de profesores y técnicos de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Gracias por inspirarnos a crecer, cuestionarnos y seguir adelante con determinación.

Grupo de investigación en corrosión y nuestro director de tesis Darío Peña B.

A nuestros compañeros de laboratorio José David Sánchez Villamizar y Alejandro Márquez Ortiz.

A M.Sc. Andrey caballero y Julián Sanabria compañeros del GIC.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos	13
3. Fundamento Teórico	14
3.1 Corrosión en la industria del petróleo y gas.....	14
3.2 Mecanismos de corrosión por CO ₂ y H ₂ S.....	15
3.3 Generalidades del acero API N-80Q.....	15
3.4 Uso del Nafteno de Hierro como catalizador liposoluble en la optimización de procesos de recobro mejorado y control de corrosión	16
3.4.1 Nafteno de Hierro como catalizadores liposolubles	16
3.4.2 Procesos de recobro mejorado	17
3.5 Técnica de Gravimetría Discontinua	18
3.6 Técnicas de caracterización de muestras	19
3.6.1 Microscopia electrónica de barrido.....	19
4. Metodología	20
4.1 Revisión bibliográfica.....	20
4.2 Determinación de las condiciones de estudio.	21
4.3 Selección de Crudos.....	21
4.4 Tipo de Acero.	21

4.5 Análisis de resultados.	22
4.6 Escritura del libro.....	22
4.7 Condiciones de los experimentos.....	24
4.8 Crudos de estudio y Catalizador	24
4.9 Equipos de laboratorio	25
5. Resultados y discusión de resultados	26
5.1 Cálculo de la velocidad de corrosión por medio de los análisis gravimétricos	27
5.1.1. Influencia de los crudos pesados en la corrosión del acero API N-80Q bajo condiciones de acuatermolisis catalítica	27
5.1.2 Cinética de corrosión en el acero N-80Q para los tres diferentes crudos	30
5.2 Análisis morfológico y composición de productor de corrosión por medio de SEM-EDS....	32
6. Conclusiones	39
7. Recomendaciones	40
Referencias Bibliográficas	41

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Composición química del acero API N-80Q	16
Tabla 2. Condiciones operacionales del estudio de investigación.....	24
Tabla 3. Caracterización de crudos	25

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Flujograma de la metodología.....	23
Figura 2. Reactor Tipo Batch.....	25
Figura 3. Partes del montaje para las pruebas.....	26
Figura 4. Velocidad de corrosión para el crudo A.....	28
Figura 5. Velocidad de corrosión para el crudo B.....	28
Figura 6. Velocidad de corrosión para el crudo C.....	29
Figura 7. Resultados de la velocidad de corrosión en mpy para las pruebas sin catalizador.....	30
Figura 8. Velocidad de corrosión en mpy para las pruebas con catalizador.....	31
Figura 9. Acero API N-80Q en estado de suministro.....	32
Figura 10. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM-EDS) del acero en estado de suministro	33
Figura 11. Microestructura del acero API N-80Q expuesto al proceso de acuatermólisis convencional y catalítica.....	34
Figura 12. EDS crudo A - Acuatermólisis Convencional.....	35
Figura 13. EDS crudo A - condiciones de Acuatermólisis Catalítica.....	35
Figura 14. EDS crudo B - Acuatermólisis Convencional.....	36
Figura 15. EDS crudo B - Acuatermólisis Catalítica.....	37
Figura 16. EDS crudo C - Acuatermólisis Convencional.....	38
Figura 17. EDS crudo C - Acuatermólisis Catalítica.....	38

Resumen

Título: Corrosión en aceros al carbono N-80Q en procesos de recobro mejorado con catalizadores liposolubles*

Autor: Mery Saray Paipa Gómez y Danna Camila Silva Torres**

Palabras Clave: Corrosión, acero N-80Q, recuperación mejorada, catalizadores liposolubles.

Descripción:

El presente estudio evaluó la cinética de corrosión de cupones de acero API N-80Q expuesto a tres diferentes composiciones de crudos colombianos (A, B y C) mediante la técnica de acuatermolisis catalítica utilizando nafteno de hierro. Los ensayos se realizaron en un reactor Batch, a 270°C y 600 psi, con tiempos de 10 h, 30 h, 60 h, y 120 h de exposición, que simulan condiciones operativas. Además, para la limpieza de las piezas se usó la norma ASTM G1-03.

La determinación de la velocidad de corrosión se realizó mediante la norma ASTM G31-12 donde se evidenció que la presencia del catalizador genera inicialmente una mayor oxidación (hasta 60 h) y después, una estabilización posiblemente generada por el aporte pasivo de magnetita (Fe_3O_4) y sulfuros (FeS en crudo C). Los resultados confirmaron que (a) la velocidad de corrosión se redujo de forma significativa después de 30 horas, alcanzando valores cercanos a 0 mpy a las 120 horas y (b) el crudo C mostró un comportamiento anómalo de ganancia de masa, que fue atribuida a la sinergia entre ácidos naftenicos y compuestos sulfurados.

La caracterización morfológica y composicional por microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS) mostró la formación de productos heterogéneos de corrosión (óxidos y sulfuros) sobre la superficie del acero con una distribución más homogénea en los ensayos catalíticos. El naftenato de hierro demostró potencial como inhibidor al promover la pasivación del metal, reduciendo la velocidad de corrosión en un 40-60% tras 100 h de exposición.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros Doctor en Corrosión

Abstract

Title: Corrosion of n-80 steel in recovery processes enhanced with fat-soluble iron naphthenate catalysts*

Authors: Mery Saray Paipa Gómez y Danna Camila Silva Torres**

Key Words: Corrosion, N-80Q steel, improved recovery, fat-soluble catalysts.

Description:

This study evaluated the corrosion kinetics of API N-80Q steel coupons exposed to three different compositions of Colombian crude oils (A, B and C) by means of the catalytic aquathermolysis technique using iron naphthene. The tests were carried out in a Batch reactor, at 270°C and 600 psi, with exposure times of 10 h, 30 h, 60 h, and 120 h, which simulate operating conditions. In addition, ASTM G1-03 was used for cleaning the parts.

The determination of the corrosion rate was carried out using the ASTM G31-12 standard, where it was shown that the presence of the catalyst initially generates a higher oxidation (up to 60 h) and subsequently, a possible stabilization by the passive contribution of magnetite (Fe₃O₄) and sulfides (FeS in crude C). The results confirmed that (a) the corrosion rate was significantly reduced after 30 h, reaching values close to zero mpy at 120 h and (b) crude C showed an anomalous mass gain behavior, which was attributed to the synergy between naphthenic acids and sulfide compounds.

Morphological and compositional characterization by scanning electron microscopy (SEM-EDS) showed the formation of heterogeneous corrosion products (oxides and sulfides) on the steel surface with a more homogeneous distribution in the catalytic tests. Iron naphthenate showed potential as an inhibitor by promoting metal passivation, reducing the corrosion rate by 40-60% after 100 h of exposure.

* Degree project

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros Doctor en Corrosión

Introducción

Históricamente, la corrosión ha sido un problema existente y reiterativo en la industria petrolera, como consecuencia de la continua exposición de los metales a ambientes agresivos, generando pérdidas económicas que se encuentran entre el 2 al 5% del PIB en países industrializados (Prado, s. f.). Ocupando en Colombia el 2.3% del PIB (Sotaquirá et al., s. f.), costos destinados a mantenimiento, prevención, análisis de fallas, etc.

Para la industria del petróleo la corrosión ha sido responsable de la gran mayoría de fallas presentadas a nivel estructural y de sus equipos, comprometiendo en gran medida la integridad estructural de equipos, tuberías, tanques, entre otros, lo cual ha influido directamente en la seguridad, y eficiencia operativa del sector (Toyo, s. f.). Teniendo en cuenta que muchas de las reservas de petróleo y gas se encuentran ubicadas en ambientes agresivos como explotaciones offshore, bosques tropicales y selvas, zonas árticas, regiones áridas, montañas, y petróleo en shale, zonas que, debido a los factores del medio y presiones extremas del sistema, desencadenan a lo largo del tiempo, procesos de ataque electroquímico, que dan campo al desarrollo de la corrosión.

El petróleo crudo y el gas natural son altamente corrosivos, por lo que, la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías para la prevención y mitigación de la corrosión en esta industria es importante, con el fin de prolongar la vida útil de las instalaciones, minimizando costos operativos, y mejorando la eficiencia de los procesos. El trabajo conjunto entre instituciones académicas, industrias y grupos de investigación, se centra en el desarrollo de avances y soluciones innovadores para el control y mitigación de este problema en la industria (Rodríguez, s. f.).

Técnicas como el recobro mejorado es un área de conocimiento que crece constantemente, debido a su necesidad en la industria petrolera actual, del mismo modo desempeña un papel fundamental en el balance energético mundial, mediante el incremento del factor de recobro de hidrocarburos en los yacimientos (Delgadillo et al., 2018), ya que factores como la presión, temperatura y la variabilidad en las viscosidades, son un reto para la industria. Mientras que la implementación de esta técnica maximiza la extracción profunda de los pozos, y reduce el impacto ambiental. La inyección de catalizadores liposolubles dentro del procesos de recobro mejorado modifica las propiedades fisicoquímicas del crudo, mejorando el movimiento del petróleo dentro y fuera del yacimiento, disminuyendo la tensión superficial de este, aumentando la dinámica del fluido, y el desplazamiento del crudo hacia los pozos de producción.

Este estudio se centra en evaluar el comportamiento corrosivo del acero N-80Q bajo condiciones de acuatermolisis catalítica en presencia de tres diferentes tipos de crudo, con el fin de determinar los principales factores que afectan su resistencia y durabilidad en la industria. Desarrollado en dos etapas dirigidas por un procedimiento experimental, utilizando un reactor Batch el cual hizo parte del montaje para la realización de las pruebas y su estudio posterior.

En el capítulo uno se habla acerca de los objetivos general y específicos que se llevaron a cabo en este trabajo de investigación, el capítulo dos cuenta con una revisión de fundamentos teóricos de la corrosión en la industria del petróleo y gas, generalidades del acero API N-80Q, Uso del Nafteno de Hierro como catalizador Liposoluble en la Optimización de procesos de Recobro mejorado y Control de Corrosión, Técnica de Gravimetría Discontinua, Técnicas de caracterización de muestras, y microscopia electrónica de barrido. La metodología presentada en el capítulo tres, se desarrolló en dos etapas, diseño de experimentos y cinética de corrosión. Para el capítulo cuatro se habla acerca de los resultados obtenidos gracias a la implementación de la

metodología planteada en el capítulo tres, finalmente las conclusiones y recomendaciones lo cual confirma que el uso de catalizadores liposolubles acelera los procesos de oxidación iniciales y contribuye a la formación de barreras protectoras que optimizan el desempeño del material en condiciones extremas. Como resultado se determinó que la corrosión del acero API N80-Q a 270 °C disminuye pasadas 30 horas en inyección de vapor, estabilizando el sistema después de 100 horas expuesto, gracias a la capa pasiva formada por la oxidación acelerada con el catalizador.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Determinar la velocidad de corrosión de un acero N-80Q en procesos de recobro mejorado con un catalizador liposoluble.

1.2 Objetivos específicos

Calcular la velocidad de corrosión del acero al carbono N-80 expuesto a tres diferentes crudos pesados.

Determinar el efecto del tiempo en la cinética de corrosión del acero N-80Q en los crudos pesados analizados.

Identificar los productos de corrosión formados en el acero N-80Q durante el proceso de acuatermólisis catalítica en crudos colombianos usando técnicas analíticas

3. Fundamento Teórico

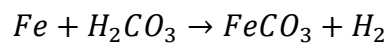
3.1 Corrosión en la industria del petróleo y gas

La corrosión es el desgaste o alteración de un material, como resultado de reacciones químicas y electroquímicas redox (Revie, 2008), la cual está estrechamente relacionada con el medio en el que se encuentra expuesto el material. Factores como la presión, temperatura, humedad, oxígeno, y sales, estimulan la presencia de corrosión en el material, ya que este tiende a alcanzar su estado natural, por un estado energético de menor potencial, el cual tiende a estabilizarse termodinámicamente (Javaherdashti, 2017).

En la industria del petróleo, la corrosión es un desafío debido a las constantes fallas en sus instalaciones y tuberías, en gran medida por la presencia de ácidos orgánicos y azufre que contiene los crudos pesados, expuestos a altas temperaturas y un flujo acelerado, lo que genera corrosión en sus tuberías (Peña, s. f.), por ende, su control es fundamental para garantizar la integridad y seguridad de las operaciones de exploración, producción, refinado y transporte de petróleo y gas; la presencia de corrosión en esta industria ocasiona paradas imprevistas, que reducen la productividad, generando grandes pérdidas para el sector petrolero, según la NACE los costos mundiales por corrosión se aproximan a los 2,5 millones de dólares anuales.

3.2 Mecanismos de corrosión por CO₂ y H₂S

Existe un tipo de corrosión que se produce en ambientes o en líneas de producción de petróleo y gas que transportan fluidos que contiene dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O) y sulfuro de hidrógeno (H₂S). Estos compuestos reaccionan con el metal, generando procesos electroquímicos que degradan los materiales. Entre ellos se puede generar la corrosión dulce la cual consiste que en presencia de agua y CO₂ forma ácido carbónico (H₂CO₃) (Vásquez de moya, 2023). La reacción general de la reacción es la siguiente:



La formación de carbonato de hierro puede generar una película protectora, sin embargo, en condiciones de alta turbulencia o baja pH, esta película procede a romperse, lo cual acelera el proceso de corrosión.

Por otro lado, se tiene la corrosión amarga que es corrosión por H₂S, es un tipo de corrosión ácida que se produce al reaccionar el sulfuro de hidrógeno con el hierro para formar sulfuro de hierro, FeS, el cual se adhiere a la superficie del acero en forma de polvo negro en escamas. No obstante, en presencia de agua se forma ácido sulfhídrico, H₂S, que es muy corrosivo, además que promueve la fragilización por hidrógeno, el cual es un fenómeno que reduce la ductilidad del acero y aumenta el riesgo de fracturas.

3.3 Generalidades del acero API N-80Q

Es un acero de medio carbono, usado principalmente en la industria del petróleo y gas, para la fabricación de tuberías de fondo de pozo y transmisión, así como líneas de flujo (Fouda et al., 2018), debido a su adaptabilidad a condiciones de alta presión y temperatura. Este acero cuenta

con un tratamiento térmico de temple y revenido (Barros, s. f.) que le aporta propiedades como tenacidad, resistencia al colapso y presión interna. Sus propiedades le permiten soportar temperaturas extremas y maximizar la conducción de calor. La presencia de H₂S y CO₂, lo hace vulnerable a la corrosión, por ende, es necesario el uso de recubrimientos o inhibidores que mitiguen estos daños. En la tabla 1 se muestra su composición elemental estándar.

Tabla 1.

Composición química del acero API N-80Q

Acero	C	S	Si	Mn	Ni	Cu	Cr
API N-80	0,255	<0.150	0,308	1,424	≤0,20	0.0081	0.011

Nota. Los datos fueron obtenidos del grupo GIC – UIS GUATIGUARA

3.4 Uso del Nafteno de Hierro como catalizador liposoluble en la optimización de procesos de recobro mejorado y control de corrosión

3.4.1 Nafteno de Hierro como catalizadores liposolubles

La acuatermólisis catalítica se da por la interacción de compuestos orgánicos y vapor de agua a altas temperaturas y presión en presencia de un catalizador (Arboleda et al., 2018), este actúa como mediador en la ruptura de enlace C-S, disminuyendo la viscosidad del crudo, permitiendo mayor movilidad y optimización en su extracción. La inyección de catalizadores liposolubles en este proceso mejora la eficiencia en los procesos de extracción en crudos pesados.

Su uso en el proceso de extracción crea una atmosfera que reduce la energía de activación lo suficientemente necesaria para generar cambios permanentes en las propiedades del crudo, se

afirma que los catalizadores liposolubles maximizan el contacto del agente químico con el crudo, propagando significativas modificaciones en sus propiedades fisicoquímicas del crudo (Chia, s. f.).

El nafteno de hierro es una mezcla de ácidos carboxílicos cíclicos derivados del petróleo y sales de hierro que actúan como inhibidor de corrosión, ante condiciones severas como en pozos de petróleo y gas, en aceros de bajo carbono como lo es el acero N-80Q, su uso favorece la formación de cristales esféricos de Magnetita (Fe_3O_4) en la superficie del acero, optimizando su rendimiento en condiciones adversas, ya que crea una superficie más uniforme y homogénea, protegiendo el metal y disminuyendo su velocidad de corrosión (García, 2023).

3.4.2 Procesos de recobro mejorado

El proceso de recobro mejorado se emplea con el fin de maximizar la recuperación de hidrocarburos presentes en los yacimientos que han sido previamente explotados mediante métodos convencionales o de recuperación primaria y que han agotado su capacidad de producción. El proceso de extracción se lleva a cabo mediante la inyección de distintos fluidos como productos químicos o surfactantes, agua, gases y vapor; los procesos que utilizan vapor inyectado como la acuatermólisis generan ambientes que benefician la corrosión a causa de la presencia de agua a altas temperaturas y la presencia de agentes químicos, así mismo reducen la viscosidad del crudo en un 97% (Arboleda et al., 2018), al inyectar vapor de agua aumenta la temperatura del yacimiento y estimula los mecanismo de recuperación necesarios para incrementar el factor de recobro recuperado por lo que en la actualidad se constituye como uno de los métodos más usados para la estimulación térmica de los yacimientos de petróleo.

La corrosión por CO₂ y H₂S en la industria del petróleo y gas, sigue siendo un tema central dada la necesidad de reducir los daños ocasionados por esta alteración, sus riesgos operativos y optimizar costos de producción, con el fin de tener mayor estabilidad en el sector (Cepeda, s. f.); además de esto los mecanismos de corrosión presentes se enfocan en la composición química de los fluidos que tienen contacto con el material, así como su entorno, en los cuales está presente la temperatura, la presión, y contaminantes ubicados en la zona aledaña a la pieza.

Diversos estudios han identificado estrategias que permitan mitigar este fenómeno, destacando entre ellas el uso de recubrimientos protectores, la adecuada selección e identificación de materiales resistentes a la corrosión antes de la fabricación de las piezas y la aplicación de inhibidores de corrosión que minimizan la pérdida del metal. Esta industria presenta normativas emitidas con el fin de llevar estrictos controles para prevenir la corrosión y garantizar la seguridad de los trabajadores, entre estas normativas se tiene a la NACE (AMPP) y las normas ISO, que garantizan una buena fuente de información para esta industria.

3.5 Técnica de Gravimetría Discontinua

El análisis gravimétrico es un método analítico de alta precisión que permite calcular la cantidad de un componente específico en una muestra mediante la medición de la diferencia entre su masa inicial y final; en este estudio se usó en los cupones de acero al carbono API N-80Q expuestos a la corrosión, analizando la pérdida o ganancia de masa del material, durante el tiempo expuesto a las condiciones establecidas.

Esta técnica se rige según la norma ASTM G1-03, la cual establece la correcta practica para la preparación, limpieza y evaluación de muestras de pruebas de corrosión.

El valor de la velocidad de corrosión se determina mediante la aplicación de la siguiente ecuación, obtenida de la norma ASTM G31-12:

$$mpy = \frac{(K)(W)}{(A)(T)(D)}$$

Donde:

K= constante; para mpy es: $3.45 * 10^6$

W= pérdida de masa en g

A= área en cm^2

T=tiempo expuesto en horas

D= densidad en $\frac{g}{cm^3} = 7,84 \frac{g}{cm^3}$

3.6 Técnicas de caracterización de muestras

Es el estudio detallado de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales antes y después de ser expuestos a algún procesos que ocasione una alteración en sus propiedades, se enfoca en facilitar el estudio de los fundamentos de estas técnicas, estableciendo criterios de selección con el fin de elegir la más adecuada, según la información que se desee obtener de un material, y ofrecer una valoración objetiva a sus limitaciones (Faraldos, s. f.). Las técnicas de caracterización usadas en este trabajo de investigación son:

3.6.1 Microscopia electrónica de barrido

Técnica de caracterización que permite conocer a gran profundidad la morfología, porosidad, estructura cristalina e identificar los productos químicos que conforman al material; al

realizar una prueba en el estado original del metal y después de la exposición a la prueba se pueden determinar ciertas condiciones que pueden comprometer su integridad, así mismo determinar el tipo de corrosión presente, su severidad y con el fin de diseñar mecanismos de ataque para su posible protección; esta técnica presenta cuenta con campo muy amplio, debido al uso de un haz de electrones de alta energía, en conjunto con su sistema de lentes que facilitan la focalización del haz, el cual incide sobre la muestra, que a su vez genera electrones que son detectados y convertido en una señal digital, encargada de generar la imagen captada (Clavijo, 2013).

4. Metodología

La metodología presentada a continuación se realizó con el fin de determinar la velocidad de corrosión de un acero N-80Q expuesto a condiciones experimentales que permiten cumplir con los objetivos propuestos en esta investigación.

4.1 Revisión bibliográfica.

Antes de iniciar con la parte experimental se realizó una exhaustiva investigación enfocado en los crudos, como afectan a los aceros, como se realiza el proceso de acuatermólisis catalítica y la información necesaria para realizar dicho experimento, incluidas las técnicas de caracterización utilizadas como SEM, EDS y el cálculo de la velocidad de corrosión por medio de análisis gravimétricos.

4.2 Determinación de las condiciones de estudio.

Con la información obtenido de la revisión bibliográfica se procedió a determinar las condiciones de estudio como el tiempo de 5, 30, 60, 120h, además de variar las condiciones a la que se va a exponer el acero, como lo sería pruebas en blanco (acuatermólisis convencional) o acuatermólisis catalítica para al final comparar sus resultados; con una presión de 600 psi y temperatura de 270 °C.

4.3 Selección de Crudos.

De acuerdo con la información adquirida se decidió llevar a cabo el experimento evaluando el efecto de tres diferentes crudos, los cuales son Crudo A (TECA), crudo B (HCT), crudo C (YARIGUIES); provenientes de, Puerto Nare, Barrancabermeja, Puerto Wilches, respectivamente.

4.4 Tipo de Acero.

Teniendo en cuenta que el acero API N-80Q es muy usado en la industria del petróleo y sometido a condiciones similares a las realizadas en este estudio, pero a gran escala, se llevó a cabo el experimento con este material, realizando la debida preparación conforme la norma ASTM G1-03, para una exhaustiva limpieza antes de someter el material a las condiciones de estudio determinadas.

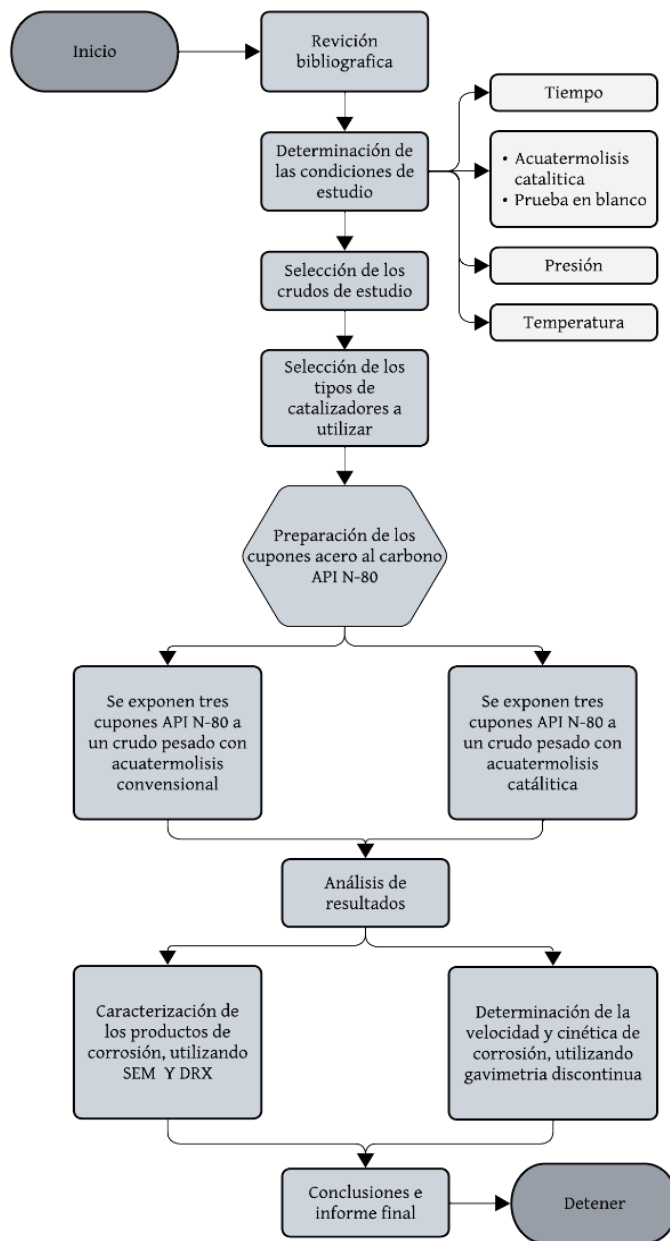
4.5 Análisis de resultados.

Según los datos obtenidos con cada una de las pruebas se realizó un exhaustivo análisis con el fin de determinar cuáles fueron las variables más influyentes durante cada prueba y la razón de sus resultados.

4.6 Escritura del libro.

Finalmente se elaboró las conclusiones adjuntando todo en el informe final.

Con el fin de cumplir los objetivos planteados, se dividirá la metodología en dos etapas; la primera etapa llamada diseño de experimentos, se realizará el estudio de los crudos, en donde se buscará las mejores condiciones de operación para cada crudo y con los resultados hallados realizar la etapa dos llamadas cinética de corrosión, en esta etapa se expondrá el acero N-80Q a los distintos crudos en distintos tiempos, el enfoque del presente trabajo se encuentra en la etapa dos, explicada en la ilustración 1.

Figura 1.*Flujograma de la metodología.*

4.7 Condiciones de los experimentos

Las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas que simulan el ambiente operativo de los procesos de recobro mejorado en la industria del petróleo. Se establecieron parámetros claves que aseguren la validez y aplicación en la industria de aquellos resultados. En la tabla 2 se resumen las condiciones de operación establecidas.

Tabla 2.

Condiciones operacionales del estudio de investigación

Prueba	Temperatura [°C]	Presión [psi]	Tiempo [h]	Catalizador	Tipo de crudo
<i>Acuatermólisis Convencional</i>	270	600	10-30-60-120	Prueba en blanco	A
					B
					C
<i>Acuatermólisis Catalítica</i>	270	600	10-30-60-120	Naftenato de Hierro	A
					B
					C

Nota. La tabla presenta las condiciones operacionales aplicadas al estudio de investigación en cada etapa.

4.8 Crudos de estudio y Catalizador

Se seleccionaron tres crudos pesados de diferentes zonas del territorio colombiano. Que se denominaran crudo A, B y C respectivamente; por otro lado, se agregó un catalizador de naftenato de hierro junto con agua destilada al 1%, con el fin de realizar el proceso de acuatermólisis catalítica. En la tabla 3 se presenta algunas propiedades fisicoquímicas de los crudos trabajados.

Tabla 3.*Caracterización de crudos*

CRUDO	° API
A	11.9
B	14.9
C	18.3

Nota. Caracterización de los crudos utilizados

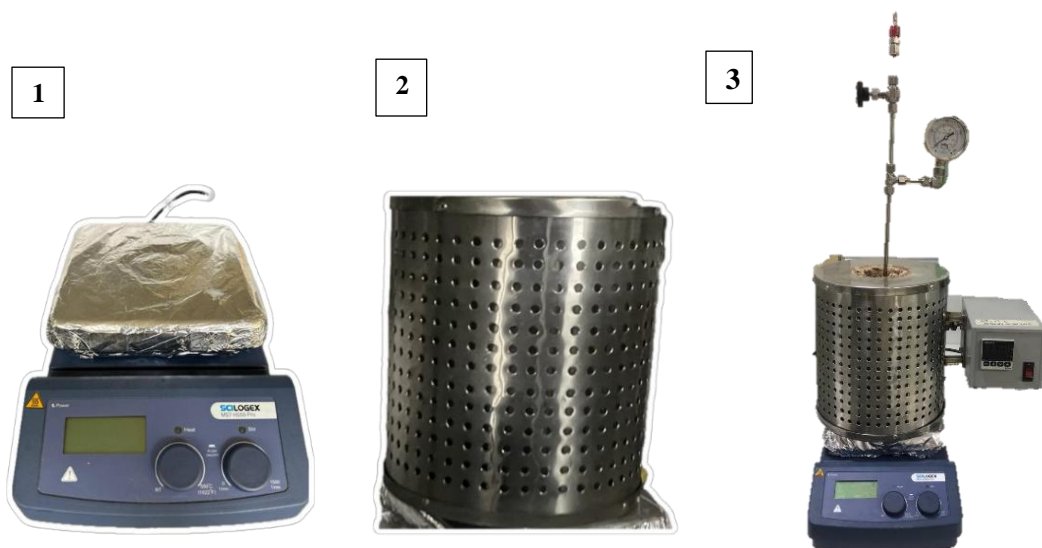
4.9 Equipos de laboratorio

Figura 2.*Reactor Tipo Batch**Nota.* La figura ilustra las partes del reactor tipo Batch: (1) Tapa con roscado interno y sello, (2)

Recipiente Cilíndrico, (3) Porta cuponera, (4) Montaje del Reactor

Figura 3.

Partes del montaje para las pruebas



Nota. La figura ilustra las partes del montaje para las pruebas: (1) placa calefactora con agitador magnético, (2) chaqueta de calentamiento, (3) montaje completo de las pruebas.

5. Resultados y discusión de resultados

En esta sección se presentan los análisis y resultados de las pruebas realizadas con el fin de determinar la velocidad de corrosión del acero N-80Q en procesos de recobro mejorado con un catalizador liposoluble, en presencia de tres diferentes crudos. Empezando con la primera parte donde se muestra los resultados obtenidos mediante el análisis de la velocidad de corrosión.

5.1 Cálculo de la velocidad de corrosión por medio de los análisis gravimétricos

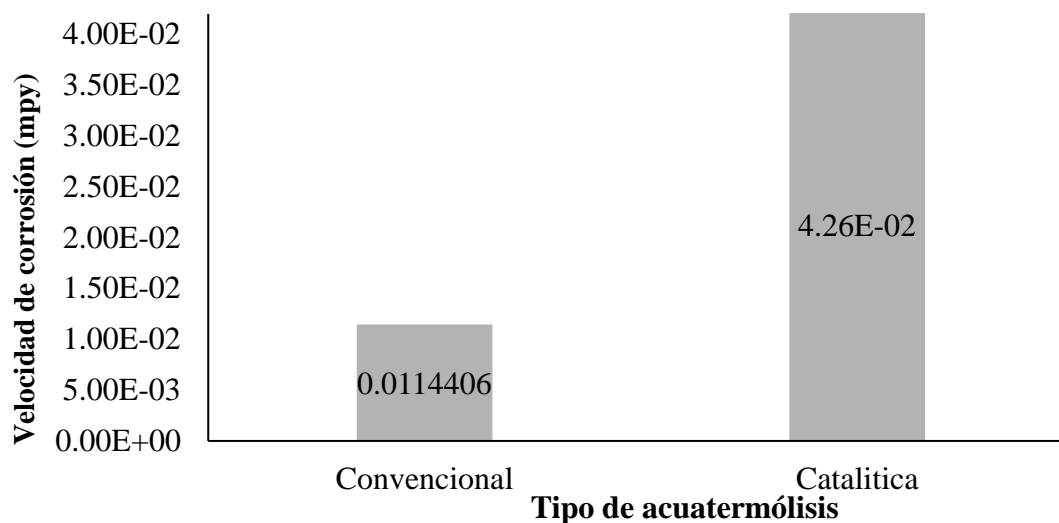
Por medio de los análisis gravimétricos regidos bajo la norma ASTM G1-03 se determinó la influencia de distintos factores como el tipo de crudo, la presencia del catalizador y los tiempos de exposición en la velocidad de corrosión del acero N-80Q, según las condiciones experimentales precisadas en la tabla 2.

5.1.1. Influencia de los crudos pesados en la corrosión del acero API N-80Q bajo condiciones de acuatermolisis catalítica

En las siguientes graficas se exponen la variación de velocidad de corrosión en el acero API N-80Q respecto a los diferentes crudos utilizados en las pruebas con condiciones a 270 °C, con una presión de 600 psi a un tiempo de 60 horas para que el catalizador interactúe con los crudos siendo un rango medio de tiempo.

Figura 4.

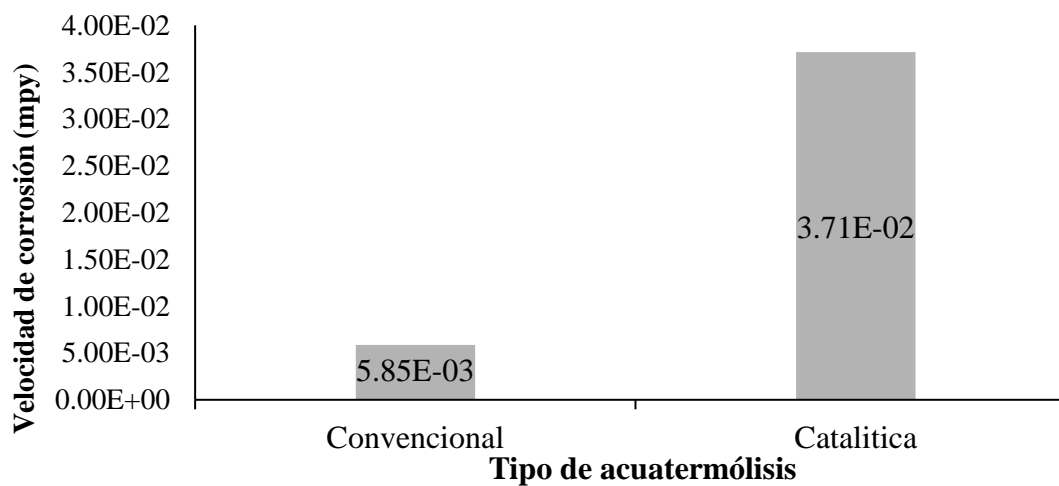
Velocidad de corrosión para el crudo A



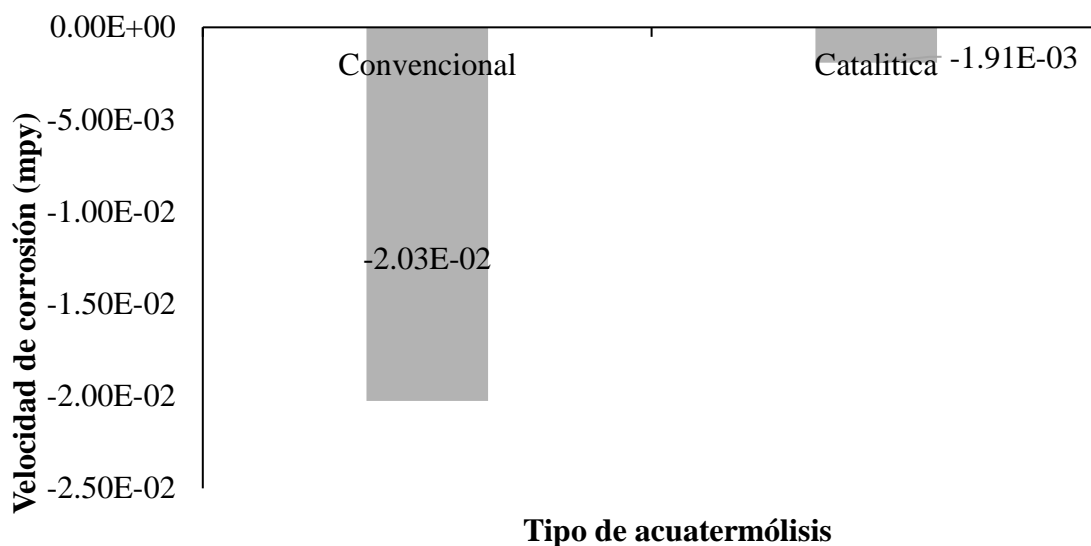
Nota. Velocidad de corrosión para el crudo A, la velocidad de corrosión en función del tipo de acuatermolisis.

Figura 5.

Velocidad de corrosión para el crudo B



Nota. Velocidad de corrosión para el crudo B, la velocidad de corrosión en función del tipo de acuatermolisis.

Figura 6.*Velocidad de corrosión para el crudo C*

Nota. Velocidad de corrosión para el crudo C, la velocidad de corrosión en función del tipo de acuatermolisis.

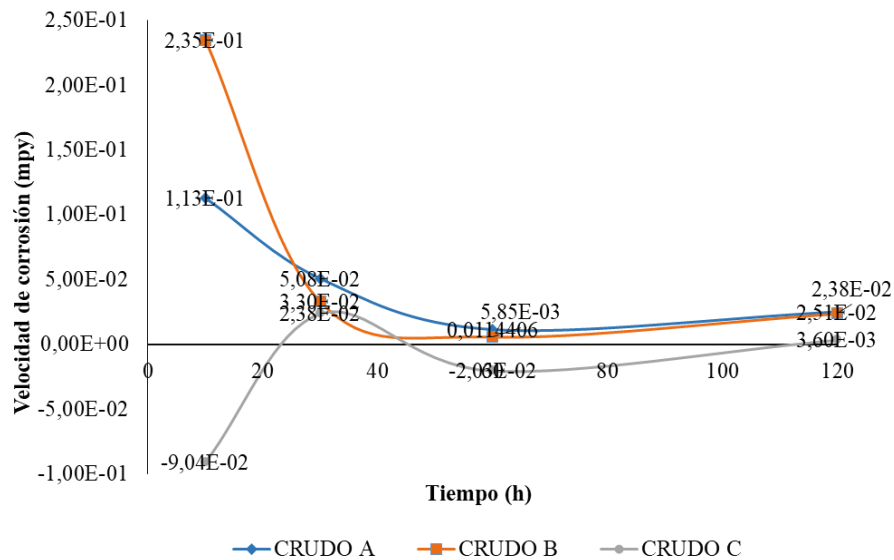
De acuerdo con las gráficas 1 y 2, a un tiempo de 60 horas, para los crudos A y B, la adición del catalizador incrementó significativamente la velocidad de corrosión lo que indica la acción de una activación oxidativa transitoria por un catalizador de hierro, seguida de la posible formación y deposición de capas de magnetita Fe_3O_4 en etapas posteriores (García, 2023). Por otro lado, en la gráfica 3, el crudo C mostró velocidades negativas, probablemente debido a la formación de sulfuros de hierro (FeS), resultado de su alto contenido de azufre en el crudo y la interacción sinérgica con los ácidos nafténicos (Baena, 2022). Estos resultados resaltan que compuestos de sulfuros al reaccionar con la superficie del metal forman sulfuros metálicos, complejos orgánicos y H_2S (Kanukuntla, V., 2008).

5.1.2 Cinética de corrosión en el acero N-80Q para los tres diferentes crudos

A continuación, se muestra el comportamiento del acero API N-80Q respecto a la velocidad de corrosión con el tiempo de exposición del cupón para los tres tipos de crudos a una temperatura de 270 °C a una presión de 600 psi.

Figura 7.

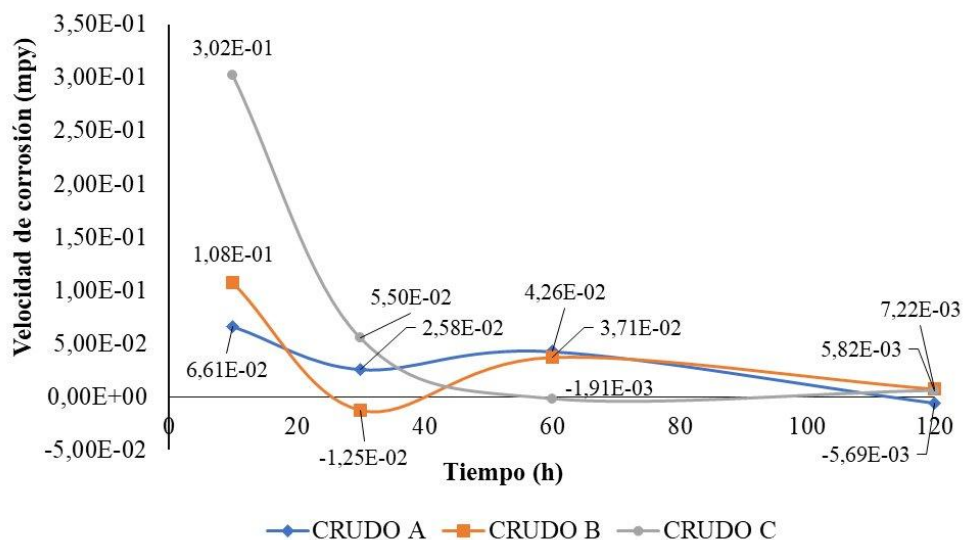
Resultados de la velocidad de corrosión en mpy para las pruebas sin catalizador



Nota. Velocidad de corrosión en los tres diferentes crudos, aplicando el proceso de acuatermólisis convencional.

Figura 8.

Velocidad de corrosión en mpy para las pruebas con catalizador



Nota. Velocidad de corrosión en los tres diferentes crudos, aplicando el proceso de acuatermolisis catalítica.

Como se observa en las gráficas 4 y 5, se observa que la velocidad de corrosión en los tres crudos disminuye después de las 30 horas en comparación de los resultados expuestos a 10 horas alcanzando valores similares de velocidad de corrosión, lo que sugiere que el efecto permanece homogéneo a largo plazo, esto debido a la formación de posibles productos de corrosión como óxidos de hierro y compuestos orgánicos depositados, los cuales hacen que la velocidad de corrosión disminuya y favorecen la estabilización de la superficie metálica. Se evidencia que, en el crudo C, se destaca por presentar un valor inicial negativo, indicando una posible protección temprana y menor corrosividad, aunque muestra un comportamiento irregular con fluctuaciones en masa durante las primeras horas antes de nivelarse con los demás crudos cerca de cero a las 120 horas.

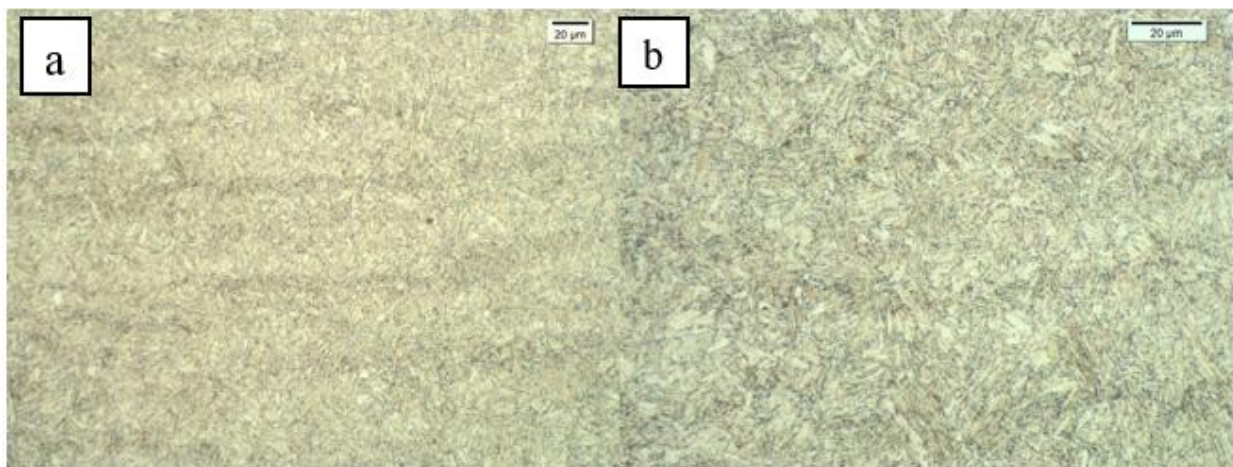
La grafica 5, demuestra que el naftenato de hierro, utilizado como catalizador, trabaja como posible inhibidor de corrosión, reduciendo la velocidad de corrosión. (García Murillo, 2023) donde se afirma que la presencia del catalizador reacciona con iones presentes en el ambiente y se observa un aumento de peso en los cupones, esto, debido a la formación de cristales esféricos de Magnetita (Fe_3O_4) en la superficie del material, demostrando que el catalizador podría estar produciendo reacciones de pasivación o precipitación de compuestos los cuales desfavorecen la corrosión.

5.2 Análisis morfológico y composición de productor de corrosión por medio de SEM-EDS

Con el fin de evaluar el efecto de la acuatermólisis catalítica en el acero API N-80Q se realizó el estudio de la morfología del metal en el Microscopio óptico, marca Olympus, modelo GX71, sin exposición.

Figura 9.

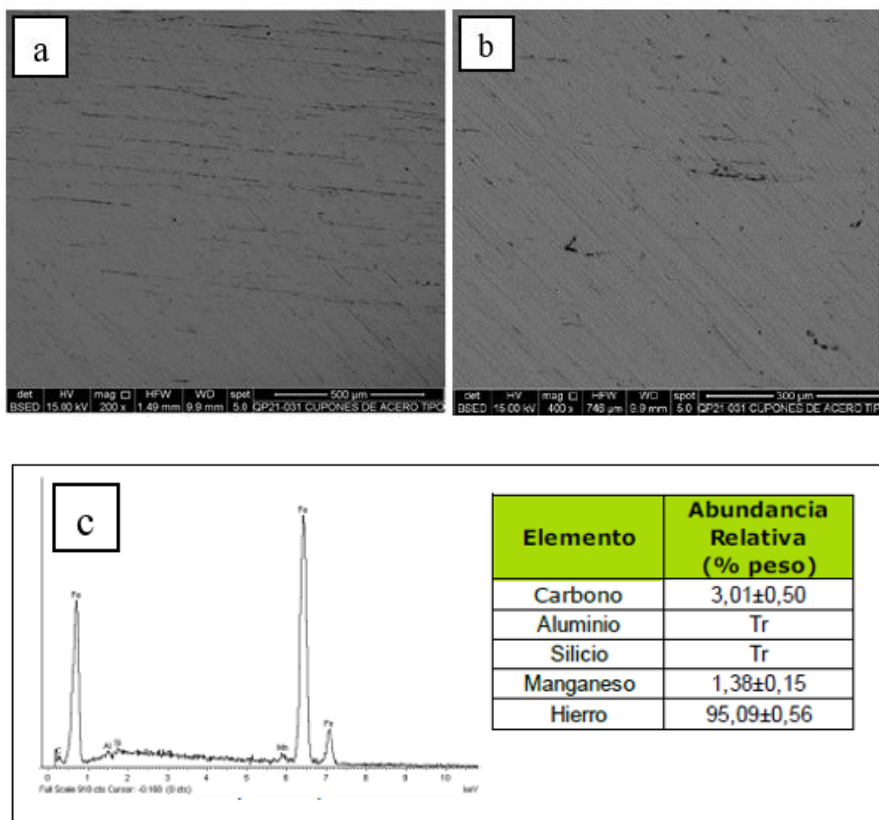
Acero API N-80Q en estado de suministro



Nota. a y b Microscopía óptica a 20 μm . Los datos fueron obtenidos por microscopía óptica en la Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de los Materiales UIS

Figura 10.

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS) del acero en estado de suministro



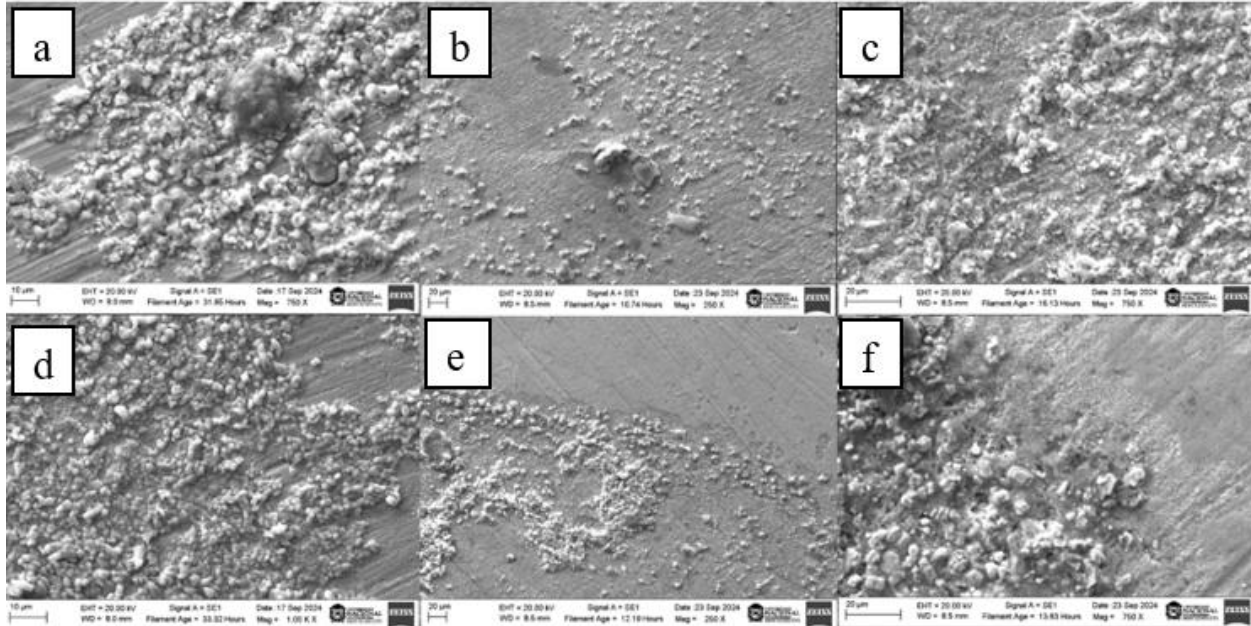
Nota. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) del acero en estado de suministro (a) 200X (b) 400X (c) Espectroscopia de energía dispersa (EDS); los datos fueron proporcionadas por el ICP - Ecopetrol S.A.

La microestructura presentada anteriormente en la ilustración 4 está constituida por martensita fina en listones, común en un acero de medio carbono, así mismo, se evidencia en la espectroscopia de energía dispersa la presencia de carbonos, aluminio, silicio, manganeso y hierro, composición cercana a la reportada en la tabla 1.

En las siguientes ilustraciones se visualiza los resultados de SEM del acero API N-80Q expuesto a acuatermólisis convencional y catalítica.

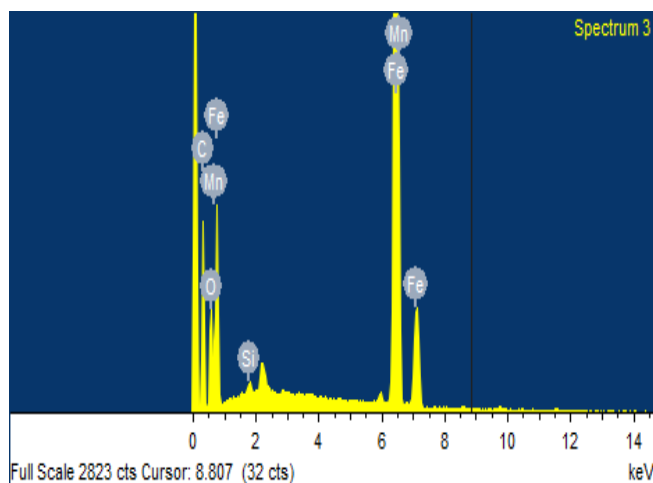
Figura 11.

Microestructura del acero API N-80Q expuesto al proceso de acuatermolisis convencional y catalítica



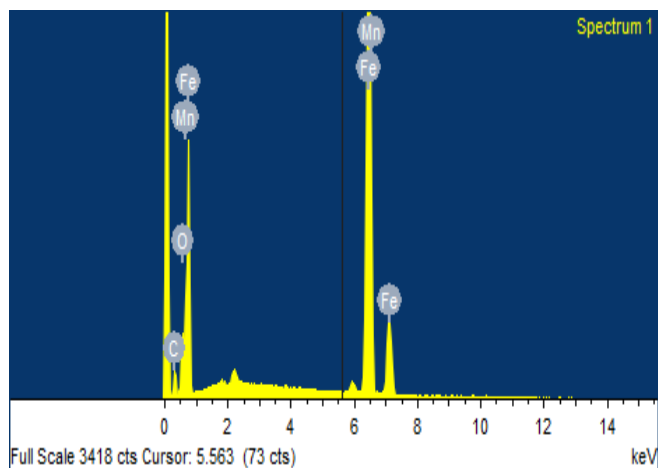
Nota. Los aumentos van de 10 µm y 20 µm; a, b y c en condición de acuatermolisis convencional, y d, e, f en condición de acuatermolisis catalítica. Las indicaciones a y d hace referencia el crudo A, la b y e al crudo B y la c y f al crudo C.

En la ilustración 6 se puede apreciar que todos los cupones expuestos presentan un cambio de textura superficial debido a los productos formados en su superficie, estos están distribuidos sobre el material como partículas redondeadas, con diferente tamaño y en distintas zonas aglomeradas, generando visualmente una textura rugosa. Mediante el análisis de EDS se pudo determinar un alto porcentaje de oxígeno sobre la superficie, lo que señala una formación de óxidos ferrosos. En los cupones expuestos a acuatermolisis catalítica se observa una mayor distribución de la capa dendrítica la cual se forma por partículas esféricas de Fe_3O_4 .

Figura 12.*EDS crudo A - Acuatermólisis Convencional*

Elemento	% en peso	At%
CK	28.79	59.38
OK	8.07	12.50
SiK	0.25	0.22
MnK	0.71	0.32
FeK	62.18	27.58

Nota. Resultados EDS Crudo A a condiciones de Acuatermólisis Convencional

Figura 13.*EDS crudo A - condiciones de Acuatermólisis Catalítica*

Elemento	% en peso	At%
CK	8.42	27.01
OK	5.73	13.78
MnK	1.17	0.82
FeK	84.68	58.39

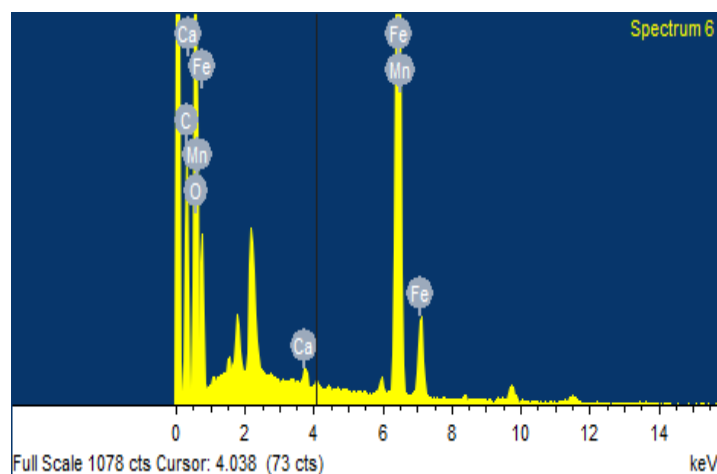
Nota. Resultados EDS Crudo A a condiciones de Acuatermólisis Catalítica

En la gráfica 6 se observan productos de carbono y oxígeno mostrando una alta presencia de compuestos orgánicos y óxidos mientras que en la gráfica 7 estos productos disminuyen

significativamente, sugiriendo una mayor ruptura de estructuras orgánicas, lo que sugiere la formación de capas protectoras de óxidos de hierro, por otro lado; el aumento de hierro puede estar relacionado al alto contenido de hierro presente en el catalizador (Naftenato de hierro), así mismo en la fase catalítica se presenta una mayor estabilización de productos, los cuales disminuyen la velocidad de corrosión.

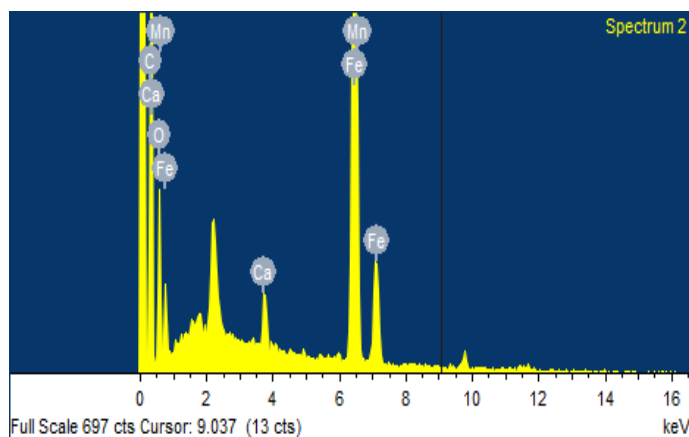
Figura 14.

EDS crudo B - Acuatermolisis Convencional



Elemento	% en peso	At%
CK	42.88	69.15
OK	12.59	15.25
CaK	1.11	0.54
MnK	0.16	0.06
FeK	43.26	15.00

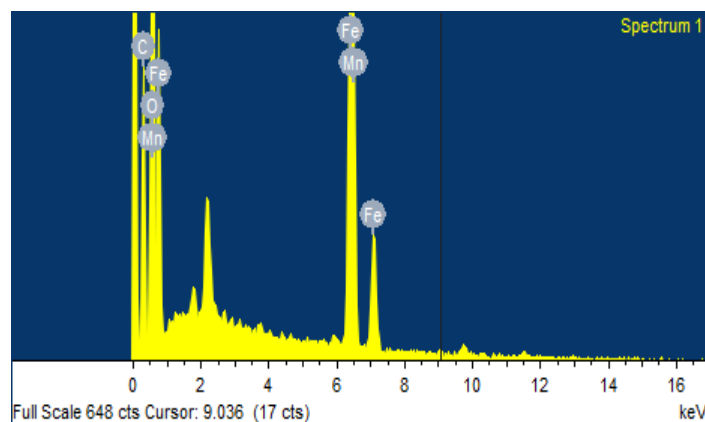
Nota. Resultados EDS Crudo B a condiciones de Acuatermolisis Convencional

Figura 15.*EDS crudo B - Acuatermolisis Catalítica*

Elemento	% en peso	At%
CK	22.85	38.59
OK	36.85	46.71
CaK	0.41	0.21
MnK	0.58	0.21
FeK	39.31	14.28

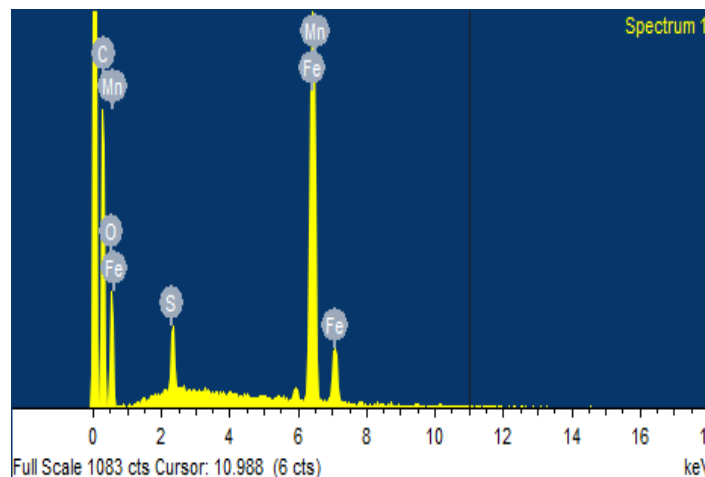
Nota. Resultados EDS Crudo B a condiciones de Acuatermolisis Catalítica

El crudo B presenta una notable disminución de carbono a presencia del catalizador, mientras se presenta aumento en elementos como el oxígeno y el fierros, lo que podría indicar una mayor formación de óxidos protectores y una menor exposición del metal al medio corrosivo, relacionando los datos de la gráfica 9, se determina que la corrosión es más agresiva al inicio en presencia del catalizador pero al pasar el tiempo, esta se estabiliza en niveles muy bajos debido a la formación de capas protectoras.

Figura 16.*EDS crudo C - Acuatermólisis Convencional*

Elemento	% en peso	At%
CK	20.44	36.19
OK	35.32	46.96
MnK	0.42	0.16
FeK	43.81	16.69

Nota. Resultados EDS Crudo C a condiciones de Acuatermólisis Convencional

Figura 17.*EDS crudo C - Acuatermólisis Catalítica*

Elemento	% en peso	At%
CK	43.41	68.74
OK	13.67	16.25
MnK	1.03	0.36
FeK	40.32	13.73
SK	1.56	0.93

Nota. Resultados EDS Crudo C a condiciones de Acuatermólisis Catalítica

En la gráfica 11, para el crudo C, se presenta un aumento significativo de carbono para el proceso de acuatermólisis catalítica, además presenta azufre lo cual podría indicar una posible

formación de una capa protectora de productos pasivantes como el FeS que disminuye la corrosión a largo plazo. La presencia de azufre, carbono, manganeso, calcio, entre otros hacen parte del material base.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos confirman que la presencia del catalizador en las pruebas de acuatermólisis catalítica ejercen un posible efecto inhibitor sobre la corrosión del acero N-80Q; este efecto se debe a los productos pasivantes generados en las pruebas como la magnetita (Fe_3O_4) y el FeS, este último se evidencia en las pruebas realizadas con el crudo C.

La naturaleza química del crudo desempeña un papel determinante en la interacción metal-crudo-catalizador, demostrando que su composición química puede modificar la velocidad y el mecanismo de corrosión. Así mismo, el catalizador facilitó la formación de una posible capa protectora de magnetita, la cual estabiliza el sistema tras tiempos prolongados de exposición para los crudos A y B; para el crudo C una estabilización más tardía y con presencia de azufre.

La velocidad de corrosión del acero API N80-Q a una temperatura de 270 °C disminuye pasadas 30 horas de exposición a condiciones de inyección de vapor. La adición de un catalizador al sistema aceleró los procesos de oxidación, favoreciendo la formación de una capa pasiva protectora. No obstante, se alcanzó un estado de pasivación estable al pasar las 100 horas de exposición.

Se observa por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido, la formación de productos corrosivos en los dos tipos de pruebas, convencional y catalítica, se observa una capa de partículas esféricas, de distintos tamaños y agrupados compuestos de óxidos y en el caso del crudo C, sulfuros, estos productos actúan como una barrera protectora en el metal, logrando una reducción en la velocidad de corrosión del acero N-80Q.

7. Recomendaciones

Se recomienda que la inyección del catalizador sea realizada de manera cíclica, ya que crea un equilibrio entre la eficiencia del proceso y la estabilidad del material. Disminuyendo la formación de productos de corrosión y beneficiando la integridad del acero.

Ampliar el análisis del crudo base de los productos formados en el proceso de acuatermolisis usando técnicas complementarias, con el fin de evaluar la cinética y entre estos y el acero API N-80Q.

Realizar las pruebas por más tiempo, con el fin de obtener resultados más confiables e identificar la estabilidad de la capa protectora a mayor tiempo de exposición.

Referencias Bibliográficas

- Aperador Chaparro, W., Bautista-Ruiz, J., & Vargas Uscátegui, A. (2015). Evaluación de la corrosión-erosión en aceros austeníticos y martensíticos. *Ciencia en Desarrollo*, 6(1), 17-24. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0121-74882015000100003&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Arboleda, J., Universidad Industrial de Santander, Castillo, Á., Universidad Industrial de Santander, Muñoz, S., & Universidad Industrial de Santander. (2018). Estudio de la acuatermolisis catalítica en procesos de upgrading de crudos pesados como método complementario en el recobro térmico de hidrocarburos. *Revista Fuentes el Reventón Energético*, 16(1), 57-69. <https://doi.org/10.18273/revfue.v16n1-2018005>
- Baena Jaimes, I. M. (2022). *Efecto de la Reactividad De Crudos Pesados Colombianos sobre la Corrosión del Acero al Carbono API P-110 en condiciones de Acuatermolisis Catalítica*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/11362>
- Barros, A. L. (2015). *Corrosão dos aços sae 1010, api k55 e api n80 na presença de co2 em condições de armazenamento geológico de carbono*. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
- Biezma Moraleda, M. V., & San Cristóbal Mateo, J. R. (2004). Análisis económico de la corrosión. *Ingeniería química*, 418, 93-96. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1065629>
- Biomorgi, J., Hernández, S., Marín, J., Rodríguez, E., Lara, M., & Vilorio, A. (2012). Evaluación de los mecanismos de corrosión presentes en las líneas de producción de crudo y gas

- ubicadas en el noreste de Venezuela. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32(1), 96-106. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0255-69522012000100012&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Cárdenas, L. J. S. (mayo de 2022). *Evaluación electroquímica de TrasarTrac102 como inhibidor de la corrosión en el acero API 5L X65 y su estudio teórico*. Universidad Veracruzana.
- Chia, L. M. S. (2023). *Evaluación de la colocación de un catalizador liposoluble en un proceso de mejoramiento de crudo pesado a condiciones de inyección de vapor*. Universidad Industrial de Santander.
- Clavijo, J. (2013). Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Elementos*, 3(3). <https://doi.org/10.15765/e.v3i3.420>
- David, H. V. A., & Miguel, O. C. A. (2018). *Optimización de la extracción de crudos pesados y extra pesados mediante inyección de gases licuados del petróleo en yacimientos no convencionales utilizando simulación de procesos*.
- De Moya, I. R. V. (2023). *Correlaciones para la predicción de corrosión por co₂-h₂o-h₂s en tuberías de producción de crudo*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Delgadillo Aya, C. L., Díaz Guardia, V. M., Maya Toro, G. A., Castro García, R. H., & Quintero Pérez, H. I. (2018). Metodología para la priorización de tecnologías emergentes de recobro mejorado químico. *Revista Fuentes el Reventón Energético*, 16(2), 41-53. <https://doi.org/10.18273/revfue.v16n2-2018003>
- Espinosa B, K. J. T. (s.f.). *Técnicas de recobro y recobro mejorado en yacimientos con crudos livianos, pesados y extrapesados*. Universidad de San Buenaventura Cartagena.

- Faraldos y Consuelo Goberna, M. (2011). *Técnicas de análisis y caracterización de Materiales* (M. Faraldos y Consuelo Goberna, Ed.). Consejo Superior de Investigaciones Científicas Madrid.
- Figueredo-Amaya, D.; Ortiz-Otálora, C. A. Vera-López, E & Vega-Triana, J. P.. (Julio 25 de 2013). *Estudio del desempeño ante la corrosión de los aceros N80, L80, L304, en medios agresivos CO2 y Cl*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 18(2), 7.
- Fouda, A. S., Elmorsi, M. A., Shaban, S. M., Fayed, T., & Azazy, O. (2018). Evaluation of N-(3-(dimethyl hexadecyl ammonio)propyl) palmitamide bromide as cationic surfactant corrosion inhibitor for API N80 steel in acidic environment. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 683-694. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.10.004>
- García Murillo, L. P. (2023). *Efecto del proceso de inyección de vapor con naftenato de hierro y nafta sobre la corrosión del acero al carbono API P110*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/14537>
- García, A. E. C. (2008). *Análisis de fallas que por efecto de la corrosión atmosférica se presentan en discos duros*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Javaherdashti, R. (2017). *Microbiologically Influenced Corrosion: An Engineering Insight*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44306-5>
- Melgarejo P., C. A., Muñoz M., L. F., Rey Cepeda, S. N., Vázquez Q., C., & Peña B., D. Y. (septiembre de 2007). Estudio de la velocidad de corrosión de un acero AISI-SAE 1020 en un sistema salmuera-aceite refinado-Co2-H2s por medio de un electrodo de cilindro rotatorio (ecr) y un simulador de flujo. *Scientia Et Technica*, XIII, 7.
- Mohammed, A., & Abdullah, A. (2018). *Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review*.
- My Scope (s.f.). *My Scope SEM* https://myscope.training/pdf/MyScope_SEM.pdf

My Scope Training (s.f.). *Adjusting the Image and Detector Controls - LFM*.

https://myscope.training/LFM_Adjusting_the_Image_and_Detector_Controls

Pedraza Yepes, C. A.; Higuera Cobos, O. F.; Monsalve Arias, M. J.; Cano Gómez, J. L. & Gutiérrez Peña, H. A. (2020). *Determinación de la agresividad de la corrosión atmosférica en aceros estructurales, acero galvanizado y acero inoxidable en la ciudad de Barranquilla y su área metropolitana*. (Universidad del Atlántico, ED.). Universidad del Atlántico.

Peña D. Y., González R., Quiroga H., Serna A. (Ed.). (23 de octubre de 2009). *Evaluación del efecto corrosivo de los crudos pesados sobre el acero 5CR-1/2MO utilizado en las unidades de destilación* (Vol. 23). Universidad Industrial de Santander.

Pérez Venera, A. M., Ariza Tarazona, M. C., Rodríguez Castelblanco, A. X., & Muñoz Martínez, S. F. (2017). Técnicas para el mejoramiento de la inyección continua de vapor. *El reventón energético*, 15(1), 109-117. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6371166>

Revie, R. W. (2008). *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. John Wiley & Sons.

Rodríguez, M. (2023, julio 13). Innovaciones en prevención y mitigación de la corrosión: Protegiendo activos de la industria petrolera. *INSPENET*.

Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Revista Tecnología en Marcha*, 28(3), 127-136. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0379-39822015000300127&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Sotaquirá G. R.; Panqueva A., J. H. y Andrade S., H. H. (2015). *Integración de metodologías de modelamiento para una aproximación sistémica a un problema en macroeconomía colombiana*. Universidad Industrial de Santander.