



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN METALURGIA Y
MATERIALES

“DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE
CORROSIÓN ASISTIDA POR FLUJO (FAC) EN ZONAS
DE CAMBIO DE DIRECCIÓN EN TUBERÍAS DE
TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS PARA EL
ACERO API 5L X65”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN METALURGIA Y MATERIALES

P R E S E N T A

JOSÉ ENRIQUE VELA LÓPEZ

DIRECTORES DE TESIS

DRA. MANUELA DÍAZ CRUZ
DR. MARCO ANTONIO DOMINGUEZ AGUILAR



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas
DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO ACADÉMICO



1936-2016
AÑOS IPN

T-162-16

Ciudad de México, a 10 de noviembre del 2016.

Al C. Pasante:
JOSÉ ENRIQUE VELA LÓPEZ

Boleta:
2012320912

Carrera:
IMM

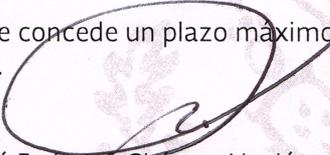
Generación:
2011-2015

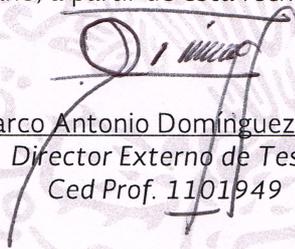
Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica a través de este Departamento autoriza que los C. **Dra. Manuela Díaz Cruz** y el **Dr. Marco Antonio Domínguez Aguilar**, sean asesores en el tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Individual**, con el título y contenido siguiente:

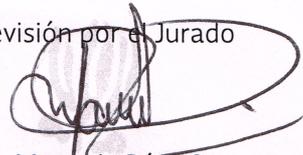
“Determinación de la velocidad de corrosión asistida por flujo (FAC) en zonas de cambio de dirección en tuberías de transporte de hidrocarburos para el acero API 5L X65”.

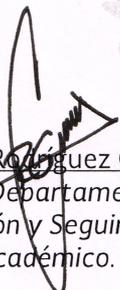
Resumen.
Introducción.
I.- Marco teórico.
II.- Desarrollo experimental.
III.- Resultados y discusión.
Conclusiones.
Referencias.
Apéndice.

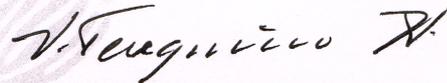
Se concede un plazo máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el Jurado asignado.


Dr. José Federico Chávez Alcalá
Presidente de la Academia de
Siderurgia y Fundición.


Dr. Marco Antonio Domínguez Aguilar
Director Externo de Tesis
Ced Prof. 1101949


Dra. Manuela Díaz Cruz
Directora Interno de Tesis
Ced. Prof. 1635871


Ing. César Rodríguez Guerrero
Jefe del Departamento de
Evaluación y Seguimiento
Académico.


Ing. Víctor Manuel Feregrino Hernández
Subdirector Académico

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas
DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO ACADÉMICO



1936-2016
AÑOS IPN

T-162-16

Ciudad de México, a 12 de diciembre de 2016

Al C. Pasante:
JOSÉ ENRIQUE VELA LÓPEZ
PRESENTE

Boleta:
2012320912

Carrera:
IMM

Generación:
2011-2015

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:

“Determinación de la velocidad de corrosión asistida por flujo (FAC) en zonas de cambio de dirección en tuberías de transporte de hidrocarburos para el acero API 5L X65”.

encontramos que el citado Trabajo de **Tesis Individual**, reúne los requisitos para autorizar el Examen Profesional y **PROCEDER A SU IMPRESIÓN** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.

Atentamente
JURADO


Dra. Maribel Leticia Saucedo Muñoz
Presidente


Dr. José Federico Chávez Alcalá
Secretario


Dra. Manuela Díaz Cruz
1er. Vocal


Dra. Araceli Ezeta Mejía
2do. Vocal


Dr. Marco Antonio Domínguez Aguilar
3er. Vocal

c.c.p.- Expediente
CRG/rcr

Agradecimientos

A mi madre

Agradezco a Teresa López Gutiérrez, por ser una madre incondicional a pesar de todo, por la confianza y oportunidad que me dio día a día para ser una mejor persona.

A mi tío

Agradezco a José Ángel López Gutiérrez por ser el padre que me apoyo en todo momento en ámbito personal y laboral, por ser ese gran ejemplo de superación.

A mi esposa

Verónica Ruelas Castillo por ser la persona que me brindo su amor a pesar de todo y apoyarme en todo momento teniendo palabras de apoyo y una sonrisa y por darme la satisfacción de ser un padre.

A mi hija

Renata que con una sonrisa me motiva a ser un gran ejemplo de vida para ella, que contara con todo mi apoyo y amor. Te Amo.

A mis hermanas

Liliana Vela López y Ana Cecilia López Gutiérrez por su apoyo en todo momento, así como a mis sobrinos Ximena Morales y Diego Escobar por tener una sonrisa para mí.

A mis directores de tesis y sinodales

Dra. Manuela Díaz Cruz, gracias por todo el apoyo brindado en el trabajo y en lo personal, gracias por todo el tiempo brindado, conocimientos pero sobre todo tener esa gran paciencia.

Al Dr. Marco Antonio Domínguez Aguilar por su tiempo, su conocimiento y paciencia en esta investigación.

Dra. Maribel Saucedo, Dr. Federico Chávez y Dra. Araceli Ezeta.

Al IPN

Por su apoyo y brindarme la oportunidad de pertenecer a distinguida institución.

A mis amigos de la licenciatura y al equipo FAC.

Miguel Garay, Omar Salinas, Rene Rosas, Iván González, Marco Palomo, Verónica Cruz, Verónica Aguilar, Euridice Florescano, Dr. Arturo Cervantes Tobón, y todo el equipo FAC.

Dedicatoria

A mis padres

Teresa López Gutiérrez y José Ángel López Gutiérrez

A mi esposa

Verónica Ruelas Castillo

A mi hija

Renata Vela Ruelas

A mis hermanas

Ana Cecilia López Gutiérrez y Liliana Vela López

A mis sobrinos

Ximena Morales López y Diego Escobar Vela

A mis directores de tesis

Dra. Manuela Díaz Cruz

Dr. Marco Antonio Domínguez Aguilar

A mis amigos y compañeros Metalúrgica

Índice

Lista de figuras	iv
Lista de tablas	vi
Resumen	vii
Introducción	viii
Capítulo 1	1
Marco teórico	1
1.1 Corrosión.....	1
1.2 Factores que afectan la resistencia a la corrosión.....	3
1.2.1 Factores Termodinámicos.....	3
1.2.2 Factores Electroquímicos.....	4
1.2.3 Factores Metalúrgicos.....	5
1.2.4 Factores Ambientales.....	6
1.3 Clasificación de la Corrosión.....	7
1.4 Corrosión Asistida por Flujo (FAC).....	9
1.4.1 Parámetros que afectan la velocidad de la FAC.....	11
1.5 Corrosión por H ₂ S.....	11
1.6 Tipos de Flujo.....	12
1.6.1 Factores que influyen en la formación de los regímenes de flujo.....	14
1.7 Número de Reynolds.....	14
1.8 Tipos de aceros grado API 5L empleados en la transportación por ductos de hidrocarburos.....	15
1.8.1 Componentes de acero grado API 5L para medios amargos.....	17
Capítulo 2	18
Desarrollo experimental	18
2.1 Equipo Experimental.....	19
2.2 Cámara de impacto.....	20
2.3 Probetas para las pruebas electroquímicas.....	20
2.4 Equipo para pruebas electroquímicas (determinación de la velocidad de corrosión).	21
2.5 Preparación del medio corrosivo.....	22

2.6	Técnica electroquímica de la resistencia a la polarización lineal (Rp).....	23
2.7	Caracterización de los productos de corrosión.....	24
2.8	Limpieza ultrasónica.....	25
Capítulo 3		26
Resultados y discusión		26
3.1	Caracterización microestructural del acero API 5L X65.	26
3.2	Análisis de la velocidad de corrosión para 8 l/min en ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°	27
3.3	Caracterización de los productos de corrosión para una velocidad de flujo de 8 l/min mediante Microscopia Electrónica de Barrido.....	29
3.3.1	MEB a una velocidad de flujo de 8 l/min.	29
3.4	Análisis de los productos de corrosión por EDS y mapeo de los elementos presentes en los productos de corrosión para el acero API 5L X65 para 8 l/min en los ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°	31
3.4.1	Mapeo de los elementos presentes.....	31
3.4.2	Análisis puntual para una velocidad de flujo de 8 l/min.....	33
3.5	Análisis de la velocidad de corrosión para 18 l/min en ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°	34
3.6	Caracterización de los productos de corrosión para una velocidad de flujo de 18 l/min mediante Microscopia Electrónica de Barrido.	35
3.6.1	MEB a una velocidad de flujo de 18 l/min.	35
3.7	Análisis de los productos de corrosión por EDS y mapeo de los elementos presentes en los productos de corrosión para el acero API 5L X65 para 18 l/min en los ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°	37
3.7.1	Mapeo de los elementos presentes en los productos de corrosión.....	38
3.7.2	Análisis puntual para una velocidad de flujo de 18 l/min.....	40
3.8	Difracción de Rayos X (DRX).....	42
3.8.1	Difractogramas para el acero API 5L X65 a 8 l/min.....	43
3.8.2	Difractogramas para el acero API 5L X65 a 18 l/min.....	46
3.9	Resultados del análisis de la superficie de los cupones después de la limpieza.....	49
3.10	Análisis comparativo del acero API 5L X-65 con respecto a los aceros API 5L.....	52
3.10.1	Efecto de la velocidad de corrosión para el ángulo de 60° y a 8 l/min.	52
3.10.2	Efecto de la velocidad de corrosión para el ángulo de 90° y a 18 l/min.	53
Conclusiones		55
Referencias		56

Apéndice A	60
Apéndice B	61
Apéndice C	62

Lista de figuras

Figura 1.	Mecanismo electroquímico de corrosión al interior de la tubería.	2
Figura 2.	Diagrama de la clasificación de los tipos de corrosión.	8
Figura 3.	Mecanismo de la corrosión asistida por flujo.	10
Figura 4.	Superficie sometida a FAC en un flujo de una fase.	10
Figura 5.	Superficie sometida a FAC en un flujo multifásico.	11
Figura 6.	Tipos de flujo (a) flujo laminar (b) flujo turbulento.	13
Figura 7.	Diagrama esquemático del desarrollo experimental.	18
Figura 8.	Diagrama esquemático del equipo experimental.	19
Figura 9.	Cámara de impacto con la placa de impacto para a) 30°, b)60° y c) 90°.	20
Figura 10.	Arreglo de los cupones configuración lineal tipo pines.	21
Figura 11.	Equipo de potencióstato y programa utilizado.	22
Figura 12.	Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6300.	24
Figura 13.	Difractómetro de Rayos X Focus D8.	24
Figura 14.	Baño ultrasónico.	25
Figura 15.	Microestructura del acero API 5L X65.	26
Figura 16.	Velocidad de corrosión para una velocidad de flujo de 8 l/min con ángulos de impacto de 30°, 60° y 90° a un tiempo de 8 horas en un acero API 5L X65.	28
Figura 17.	Micrografías de la superficie de los cupones de acero API 5L X65 a 25X, 50X y 300X magnificaciones en los ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°.	30
Figura 18.	Mapeo de elementos químicos del acero API 5L X65 con ángulo de impacto a 30°, 60° y 90° con una velocidad de flujo de 8 l/min.	32
Figura 19.	Análisis puntual del acero API 5L X65 en un ángulo de impacto de 60° a 1500X magnificaciones.	33
Figura 20.	Velocidad de corrosión para una velocidad de flujo de 18 l/min con ángulos de impacto de 30°, 60° y 90° a un tiempo de 8 horas en un acero API 5L X65.	34
Figura 21.	Micrografías de la superficie de los cupones de acero API 5L X65 a 25X, 50X y 300X magnificaciones en los ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°.	35
Figura 22.	Micrografía de la superficie del cupón de acero API 5L X65 a 1500X magnificaciones para el ángulo de 30° a 18 l/min.	36
Figura 23.	Micrografías de la superficie del cupón de acero API 5L X65 a a)1500X y b)4000X magnificaciones para el ángulo de 90° a 18 l/min.	37
Figura 24.	Mapeo de elementos químicos del acero API 5L X65 con ángulo de impacto a 30°, 60° y 90° con una velocidad de flujo de 18 l/min.	39
Figura 25.	Análisis puntual del acero API 5L X65 en un ángulo de impacto de 30° a 300X magnificaciones.	40
Figura 26.	Análisis puntual del acero API 5L X65 en un ángulo de impacto de 60° a 300X magnificaciones.	41
Figura 27.	Análisis puntual del acero API 5L X65 en un ángulo de impacto de 90° a 1500X magnificaciones.	42

Figura 28.	Difractograma de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X65 para el ángulo de 30° con una velocidad de flujo de 8 l/min	43
Figura 29.	Difractograma de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X65 para el ángulo de 60° con una velocidad de flujo de 8 l/min	44
Figura 30.	Difractograma de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X65 para el ángulo de 90° con una velocidad de flujo de 8 l/min	45
Figura 31.	Difractograma de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X65 para el ángulo de 30° con una velocidad de flujo de 18 l/min	46
Figura 32.	Difractograma de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X65 para el ángulo de 60° con una velocidad de flujo de 18 l/min	47
Figura 33.	Difractograma de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X65 para el ángulo de 90° con una velocidad de flujo de 18 l/min	48
Figura 34.	Micrografía de la superficie de los cupones de acero API 5L X65 colocados a 30°, 60° y 90° a una velocidad de flujo de 8 l/min.	50
Figura 35.	Micrografía de la superficie de los cupones de acero API 5L X65 colocados a 30°, 60° y 90° a una velocidad de flujo de 18 l/min.	51
Figura 36.	Velocidad de corrosión para una velocidad de flujo de 8 l/min con un ángulo de impacto de 60° a un tiempo de 8 horas en tres aceros grado API.	53
Figura 37.	Velocidad de corrosión para una velocidad de flujo de 18 l/min con un ángulo de impacto de 90° a un tiempo de 8 horas en tres aceros grado API.	54

Lista de tablas

Tabla 1.	Régimen de flujo de acuerdo al número de Reynolds.	15
Tabla 2.	Requerimientos de tensión uniaxial para PSL 1.	16
Tabla 3.	Requerimientos de tensión uniaxial para PSL 2.	16
Tabla 4.	Requerimientos químicos para PSL 1 en % peso.	17
Tabla 5.	Requerimientos químicos para PSL 2 en % peso.	17
Tabla 6.	Salmuera de acuerdo con la Norma NACE 1 D-196.	22
Tabla 7.	Condiciones experimentales.	23
Tabla 8.	% Fases del acero API 5L X65 en la parte superior interna.	27
Tabla 9.	Composición química del acero API 5L X65 en % peso.	27
Tabla 10.	Composición de los productos de corrosión distribuidos sobre la superficie en los ángulos de 30°, 60° y 90° con una velocidad de flujo de 8 l/min, en % peso.	31
Tabla 11.	Composición del análisis puntual en ángulo de impacto de 60° del acero API 5L X65.	33
Tabla 12.	Composición de los productos de corrosión distribuidos sobre la superficie en los ángulos de 30°, 60° y 90° con una velocidad de flujo de 18 l/min, en % peso.	38
Tabla 13.	Composición del análisis puntual en ángulo de impacto de 30° del acero API 5L X65.	40
Tabla 14.	Composición del análisis puntual en ángulo de impacto de 60° del acero API 5L X65.	41
Tabla 15.	Composición del análisis puntual en ángulo de impacto de 90° del acero API 5L X65.	42
Tabla 16.	Análisis comparativo de los productos de corrosión formados en la superficie del acero API 5L X65 en un ángulo de impacto de 30°, 60° y 90°.	49

Resumen

La corrosión asistida flujo (FAC) se lleva a cabo en ductos y tuberías que transportan hidrocarburos la cual se ve afectada por los factores de operación tales como altas temperaturas, presión, concentración de fluido y el tipo de flujo.

Se ha observado que las zonas más susceptibles donde se presenta el fenómeno de FAC son los cambios de dirección como codos, tees y otros accesorios. Los codos son uno de los elementos más importantes en el transporte de hidrocarburos en tuberías por la influencia que tienen tanto el ángulo de impacto así como la velocidad de flujo.

Por lo cual el siguiente estudio tiene como objetivo evaluar la velocidad de corrosión mediante la técnica electroquímica de Resistencia a la Polarización Lineal (R_p) del acero grado API 5L X65 mediante el uso de modelo físico denominado cámara de impacto, variando el ángulo de inclinación de 30° , 60° y 90° . El medio corrosivo es salmuera saturada con H_2S a 1 Bar con velocidades de flujo de 8 l/min (1.05 m/s) y 18 l/min (2.36 m/s).

Los productos de corrosión formados se caracterizaron mediante técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Difracción de Rayos X (DRX) para la determinación de las fases cristalinas formadas por los mismos.

Los resultados muestran que el mejor comportamiento con respecto a la velocidad de corrosión se obtuvieron para el ángulo de 60° a 8 l/min y 90° a 18 l/min. Con respecto a la caracterización de los productos de corrosión se tiene la presencia de una mezcla de óxidos y sulfuros, siendo magemita cúbica (Fe_2O_3) la especie que mayor se presenta en todos los casos de estudio. Por otro lado, las especies cristalinas marcasita órtorrómbica (FeS_2) y mackinawita tetragonal (FeS) llevan a cabo la labor protectora de dicha mezcla.

Introducción

La corrosión es uno de los principales problemas que afectan el desempeño e integridad de los materiales. A principios del 2012, PEMEX dio a conocer los fundamentos de la corrosión para difundir en todo el sector petroquímico los métodos de combate a la corrosión [1]. La industria petrolera presenta una variedad de ambientes corrosivos ya que el crudo y el gas comúnmente presentes contienen H₂S y CO₂ o una combinación de ambos, los cuales promueven el proceso de corrosión [2-3].

La solubilidad de los sulfuros y carbonatos no siempre dependen de las concentraciones de H₂S y CO₂ de la presión y de la temperatura del sistema ya que otros parámetros tales como los hidrodinámicos pueden generar patrones y velocidades de flujo que ocasionan esfuerzos sobre las capas de protección (constituidas por óxidos y sulfuros), removiéndolas y generando así un fenómeno de corrosión denominado corrosión asistida por flujo (FAC) [4].

La FAC es un problema en los sistemas de tubería que presentan altas velocidades de flujo y fuertes cambios de dirección. Existen relativamente pocos estudios del FAC en sistema de tubería que transportan hidrocarburos con H₂S y CO₂ [5-6].

El tema de FAC ha generado interés en los investigadores y la problemática que representa la industria, actualmente se han realizado experimentaciones basadas en modelos físicos en combinación con el efecto del flujo los cuales resultan ser una herramienta útil para reproducir los fenómenos reales del proceso [7].

Por lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la velocidad de corrosión y la caracterización de los productos de corrosión que se forman en la superficie del acero API 5L X65 en un cámara de impacto variando el ángulo de impacto y velocidad del fluido con la finalidad de evaluar este tipo de acero y poderlo comparar con los que comúnmente son utilizados para el transporte de hidrocarburos.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1 Corrosión.

La corrosión se define como la destrucción o el deterioro de un metal debido a la reacción con su entorno.

A causa de este fenómeno los metales pierden su estado elemental y retornan al estado combinado (formando los minerales, como los óxidos, los sulfuros, carbonatos, etc.) de origen. Los componentes químicos de los productos de corrosión presentan la misma composición química de los minerales. Es necesario tener claro que la corrosión involucra un cambio químico, físico y electroquímico [8].

Una definición más apropiada se refiere como el deterioro espontáneo de un material metálico y de sus propiedades físicas y mecánicas a consecuencia de un ataque químico o reacciones electroquímicas complejas entre el material y el medio ambiente que lo rodea. Siempre que la corrosión este originada por una reacción química, la velocidad a la cual tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la salinidad del fluido y las propiedades de los metales en cuestión. [11]

El fenómeno de corrosión puede darse de manera rápida o lenta, donde en el caso de los metales es de forma lenta. Por lo tanto, el estudio de corrosión se basa en el análisis y cálculo de la velocidad con la que se deterioran los metales y las maneras en que puede ser controlada [8-10].

El mecanismo electroquímico es por el cual se corroen los metales. Este mecanismo ocurre en la presencia de dos regiones llamadas anódicas y catódicas, así como un electrolito. La reacción anódica es donde se llevan a cabo reacciones de oxidación liberándose electrones, es la región donde la integridad del ducto se ve afectada por el fenómeno de corrosión. La reacción catódica es donde se llevan las reacciones de reducción en las que los electrones liberados en la zona anódica, son aceptados todo esto en presencia de un electrolito [8-9].

En la corrosión de metales en contacto directo con soluciones acuosas los átomos que se encuentran en la superficie del metal entran a la solución como iones metálicos y es aquí donde se da el mecanismo electroquímico en donde los electrones migran a través del metal a un sitio donde se está llevando a cabo la reacción [8-10].

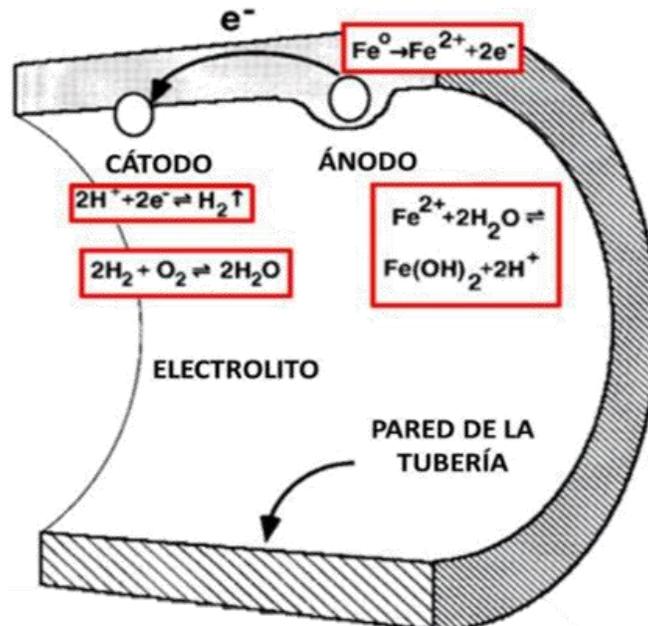
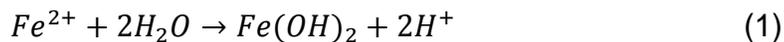
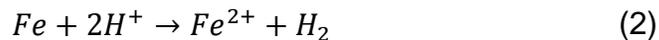


Figura 1. Mecanismo electroquímico de corrosión al interior de la tubería.

En la Figura 1 muestra el mecanismo electroquímico se observa con el ataque del interior de una tubería base Fe en contacto con una solución acuosa. Cuando el Fe es diluido por el agua ocurre una reacción en donde se desprende gas hidrógeno y el Fe disuelto forma una solución de hidróxido de Fe (II). Esta reacción se expresa en la Ec. (1)



Señalando que el ion oxígeno no se involucra totalmente en la reacción, la Ec. 1 se simplifica como se muestra en la Ec. (2)



Por lo tanto, el Fe reacciona con los iones de hidrógeno de la solución de agua para formar iones Fe y gas hidrogeno. Examinando la Ec. (2), se puede observar que durante la reacción el Fe se oxida formando iones de Fe y los iones hidrógeno se reducen a hidrógeno gaseoso. Por lo anterior, la Ec. (2) se sub-divide en las Ecs. (3) y (4):



Reacción de reducción (Reacción Catódica):



Las Ecs. (3) y (4) son reacciones parciales, que ocurren simultáneamente y a la misma velocidad en la superficie del metal. Es aquí donde se observa el intercambio de electrones entre una zona anódica que libera electrones y una zona catódica la cual los acepta, todo esto en presencia de un electrolito. Lo anterior justifica uno de los principios básicos más importantes de la corrosión: Durante la corrosión metálica la velocidad de oxidación es igual o equivalente a la velocidad de reducción, hablando de un mecanismo electroquímico [8].

1.2 Factores que afectan la resistencia a la corrosión.

La resistencia a la corrosión y la resistencia química dependen de muchos factores, pero los factores más importantes para el entendimiento y control de la corrosión son la termodinámica y la electroquímica. La naturaleza electroquímica de la corrosión se puede ilustrar por medio de la reacción de hierro con el oxígeno. Cuando el metal es oxidado se verifica una pérdida de electrones (ánodo), mientras, en otro lado del sistema se verificará una ganancia de electrones o mejor se reducirá (cátodo). Para esto se requerirá de un electrolito suficientemente conductivo para que se verifique la reacción y disponer las especies oxidantes y un metal que facilitara la conductividad para el paso de los electrones y el material a oxidarse. Según Fontana [8] estos son los factores más importantes: los termodinámicos, electroquímicos, metalúrgicos y ambientales.

1.2.1 Factores Termodinámicos.

La termodinámica ha sido aplicada a estudios de corrosión por muchos años, indica si una reacción puede ocurrir espontáneamente o no, pero, como la termodinámica no toma en cuenta el factor tiempo, nada se puede decir sobre la velocidad de la corrosión. Para ello se utiliza el concepto de Energía Libre de Gibbs y el de potencial de celda. La energía libre de Gibbs es el cambio de energía de un sistema, es una medida directa de su capacidad de producir trabajo. Si el cambio de energía libre de un estado a otro es negativo, indica pérdida de energía libre en la dirección del sistema.

Si se desea la posibilidad de que una reacción de corrosión ocurra espontáneamente bajo ciertas condiciones reales, se deben conocer los cambios energéticos asociados con la reacción. La energía que poseía el metal y antes después de corroerse.

1.2.2 Factores Electroquímicos.

Estos factores son los considerados fundamentales en el desarrollo del proceso de corrosión ya que, al ser definido como un proceso electroquímico, involucra de manera esencial, la producción continua de un flujo de electrones, siendo ese gobernado por factores del tipo electroquímico como:

- Reacciones electroquímicas: son aquellas que producen o consumen electrones. Está compuesta por dos tipos de reacciones:
 - Reacciones anódicas o de oxidación: son aquellas que producen electrones y las especies aumentan su estado de oxidación.
 - Reacciones catódicas o de reducción: son aquellas que consumen electrones y las especies disminuyen su estado de oxidación. Durante los procesos de corrosión las reacciones anódicas o catódicas son reacciones simultáneas y dependen una de la otra; si se producen reacciones anódicas se producen también reacciones catódicas; por lo tanto, es posible reducir la corrosión si se reduce una de las reacciones. Mientras haya más reacciones catódicas o procesos que consuman electrones, la velocidad total será mayor.
- Polarización: es el proceso mediante el cual dos materiales con potenciales diferentes con respecto al hidrógeno, al estar conectados comienzan un proceso de corrosión hasta alcanzar el equilibrio. Se pueden distinguir dos formas de polarización. ^[12]
 1. Polarización por concentración o difusión: este proceso se encuentra sujeto a las leyes de transferencia de masa. Se presenta cuando el proceso corrosivo es controlado por la difusión de iones (H^+) desde la solución hasta el cátodo y la posterior adsorción en el mismo de la burbuja de hidrógeno formada, restándole superficie de reacción. Este proceso es afectado directamente por la velocidad de fluido.

-
2. Polarización por activación: es el proceso electroquímico que está controlado por la secuencia de reacciones que ocurren en la interface entre la superficie del metal y el electrolito. Primero la especie a ser reducida en el cátodo debe ser absorbida por la superficie antes de que cualquier reacción pueda suceder; después viene la transferencia del electrón a la especie, resultando en la reducción; luego de dos átomos de hidrógeno se combinan para formar una burbuja de hidrógeno molecular.
- Pasivación: es la pérdida de la reactividad química que experimentan algunos metales y aleaciones bajo ciertas condiciones particulares del medio ambiente. Esta propiedad favorece la disminución de las reacciones de corrosión, y considerado un caso particular de polarización por activación. Cuando alcanza este estado de pasividad sobre la superficie del metal se forma una película protectora estable aunque no siempre tiene este comportamiento estable por encima de ciertas condiciones de oxidación y es destruida eventualmente al ser expuesta a un ambiente corrosivo severo.

1.2.3 Factores Metalúrgicos.

Tienen gran importancia sobre la velocidad de corrosión. En muchos casos la estructura metalúrgica de las aleaciones, puede ser controlada para reducir el ataque corrosivo.

Entre los factores metalúrgicos que pueden afectar la resistencia a la corrosión se tiene:

- Microestructura: es la que determina las propiedades mecánicas de los metales e indirectamente sus propiedades de resistencia a ambientes corrosivos. En el estudio de la corrosión, se ha dado mucha importancia a este aspecto, observándose que varias muestras de un mismo material con diferentes microestructuras poseen diversos grados de resistencia a la corrosión. Cuando el metal es solidificado y enfriado se crean bordes entre los granos del metal, estos límites de grano son áreas de mucha energía y son los sitios más activos químicamente; es por lo anterior que son atacados más rápidamente que la misma cara del grano cuando son expuestos a ambientes corrosivos.

-
- Aleaciones: son mezclas de dos o más metales que se utilizan para cambiar las propiedades mecánicas, físicas y de resistencia a la corrosión de un material. Se pueden distinguir dos tipos de aleaciones:
 1. Aleaciones homogéneas: este tipo de aleaciones son más resistentes a la corrosión porque no existe acoplamiento galvánico entre los granos del metal; son dúctiles y tienen menos resistencia a los esfuerzos.
 2. Aleaciones heterogéneas: este tipo de aleaciones son menos dúctiles y resistentes a la corrosión, debido a que generan pares galvánicos entre los granos del material induciendo de esta manera al desarrollo del proceso de corrosión.

 - Zonas de imperfección: se manifiestan como interrupciones en las cadenas de átomos de carbono que forman el cristal. Aparecen por la presencia de un átomo impuro o por estar en el lugar equivocado. Estas zonas y los límites de grano del metal son los puntos más susceptibles a la corrosión.

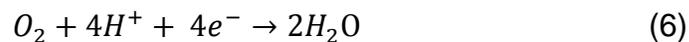
1.2.4 Factores Ambientales.

Los factores ambientales tienen relación directa con las condiciones predominantes en el medio ambiente al que se encuentran expuestos los materiales. Se pueden mencionar los siguientes factores:

- Presencia de Oxígeno y Oxidantes: el efecto de la presencia de oxígeno y de oxidantes durante el proceso depende del medio y del metal involucrado en la reacción. Durante el proceso de corrosión las reacciones de oxidación se encuentran controladas por las reacciones de reducción, es decir, la producción y consumo de electrones son iguales. En general la presencia de estos elementos aumenta la velocidad de la reacción de corrosión, con excepción de aquellos metales que se encuentran en estado pasivo. Este principio permite explicar porque una solución ácida que contiene oxígeno disuelto es más corrosiva que la misma solución libre de oxígeno ^[5-13]. La Ec. (5) expresa la reacción catódica en ausencia de oxígeno. Mientras que la reacción catódica en presencia de oxígeno se representa en la Ec. (6)



En presencia de oxígeno la reacción catódica se expresa de la siguiente manera:



Se puede observar que, en presencia de oxígeno, el ánodo tiene que reaccionar dos veces más para producir los electrones necesarios para la reacción de reducción, esto quiere decir que se incrementan las reacciones en el ánodo, el cual se deteriora más rápidamente aumentando las velocidades de corrosión. Este mismo efecto puede observarse en presencia de oxidantes.

- Temperatura: en la mayoría de los procesos de corrosión al igual que en casi todas las reacciones químicas, un aumento en la temperatura produce un incremento en las velocidades de reacción. Esta también tiene efectos secundarios mediante su influencia sobre la solución del aire, que es la sustancia oxidante más común que influye en la corrosión ^[14]. La temperatura provoca también efectos específicos cuando un cambio en ésta induce cambios de fase lo que se produce una segunda fase corrosiva.

1.3 Clasificación de la Corrosión.

El fenómeno de la corrosión puede presentarse de distintas maneras, por lo cual pueden clasificarse mediante los siguientes factores ^[9-15].

1. Naturaleza de la sustancia corrosiva: la corrosión se puede clasificar como húmeda o seca, la primera se genera con humedad o un líquido, mientras que, para la segunda, las reacciones se generan con gases a altas temperaturas.
2. Mecanismo de corrosión: engloba las reacciones electroquímicas y las químicas.
3. Apariencia del metal corroído: puede presentarse de forma uniforme, atacando toda la superficie del material o localizada, donde solo pequeñas áreas se ven afectadas.

La Figura 2 muestra la clasificación de la corrosión por su apariencia, la cual se divide en dos grupos: Corrosión generalizada y Corrosión localizada. En esta investigación se estudia la Corrosión Asistida por Flujo (FAC) por sus siglas en ingles).

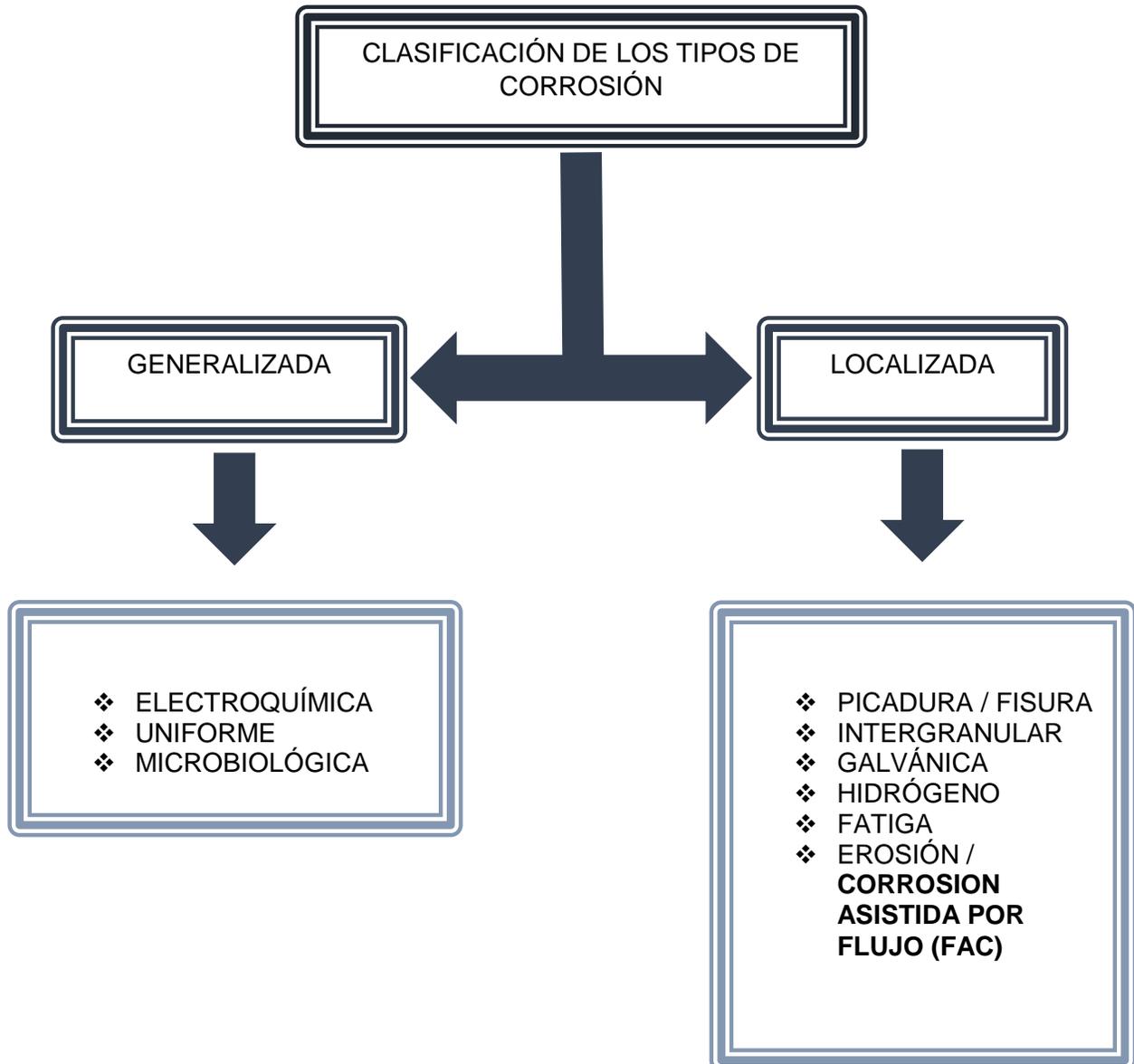


Figura 2. Diagrama de la clasificación de los tipos de corrosión

1.4 Corrosión Asistida por Flujo (FAC).

Es importante hacer hincapié en la diferencia que existe entre la corrosión por erosión y la corrosión asistida por flujo FAC por sus siglas en inglés, (Flow Assited Corrosion), ya que es muy común que ambos términos se utilicen como sinónimos o dentro de un mismo contexto. La corrosión por erosión se da cuando el movimiento del medio corrosivo sobre la superficie metálica incrementa la velocidad de ataque debido a desgaste o abrasión mecánica. Esta acción abrasiva puede erosionar la película, además, un fluido incrementa su carácter erosivo si contiene burbujas o partículas sólidas en suspensión. La corrosión por erosión suele presentarse especialmente en codos, ángulos y cambios bruscos de diámetro, en general posiciones donde el fluido cambia de dirección y suele convertirse en turbulento.

La corrosión asistida por flujo (FAC) no involucra el impacto de partículas, burbujas o cavitación, las cuales ocasionan un desgaste mecánico en la superficie (frecuentemente en forma de cráter). En contraste con la erosión mecánica, la corrosión asistida por flujo involucra la disolución de óxidos normalmente poco solubles, al combinar la electroquímica, la química del agua y los fenómenos de transferencia de masa.

En FAC también conocida como corrosión acelerada por flujo, la película protectora de óxido se disuelve o se impide la formación de esta película, lo que permite la corrosión de la superficie no protegida. Por lo tanto, la corrosión acelerada de flujo puede ser definido como la corrosión, influenciado por la transferencia de masa, entre una película de óxido en disolución y un fluido que fluye.

La FAC se produce desde velocidades relativamente bajas, involucrando flujo laminar y turbulento. La película protectora de la superficie es disuelta por el movimiento del fluido tan rápido como se forma. Por lo tanto, la disolución de la película de óxido protectora y un ataque electroquímico están ocurriendo simultáneamente, resultando en la continua pérdida de material. ^[16-29]

La Figura 3 muestra el mecanismo mediante el cual se lleva a cabo la corrosión asistida por flujo. Donde está constituido por 5 fases principalmente donde ocurre lo siguiente ^[17].

1. Inicia con un fluido en movimiento sobre la superficie del metal.
2. Se forma una capa protectora en la superficie del metal.
3. La capa es removida debido a la velocidad de flujo.
4. Se forma una nueva capa sobre la superficie expuesta.

-
5. Continúa así la remoción y formación de la capa de óxido provocando el adelgazamiento del metal.

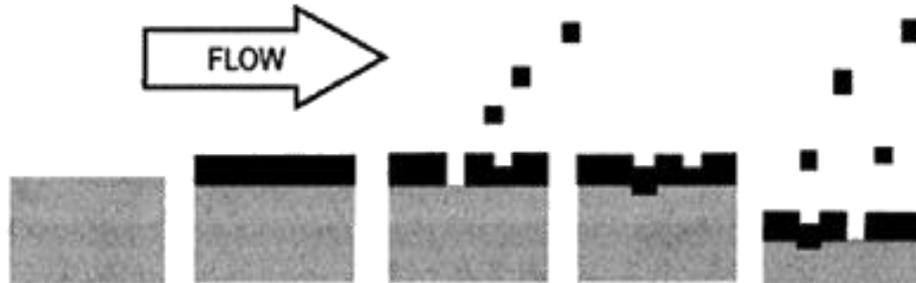


Figura 3. Mecanismo de la Corrosión Asistida por Flujo.

Los patrones que la FAC deja sobre la superficie con la que ha tenido contacto son: [17].

- En flujos de una sola fase: produce una apariencia similar a una piel de naranja la cual se muestra en la Figura 4.
- En flujos de dos fases o multifásicos: produce una apariencia similar a “rayas de tigre” como se muestra en la Figura 5.

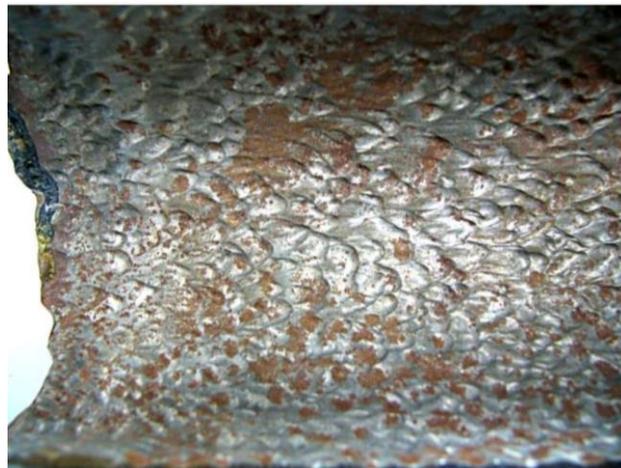


Figura 4. Superficie sometida a FAC en un flujo de una fase.



Figura 5. Superficie sometida a FAC en un flujo multifasico.

1.4.1 Parámetros que afectan la velocidad de la FAC.

La corrosión asistida por flujo tiene lugar bajo parámetros que determina la tasa de desgaste de material que está establecido por: ^[8-9]

- ♦ pH
- ♦ Oxígeno presente
- ♦ Temperatura
- ♦ Tipo de flujo
- ♦ Tiempo de exposición

1.5 Corrosión por H₂S.

La corrosión del hierro y acero en soluciones que contienen sulfuro de hidrógeno (H₂S) ha sido estudiada extensivamente debido al efecto acelerador de la corrosión del H₂S en presencia de soluciones neutras y ácidas.

Películas de corrosión por H₂S. Existen diferentes clases de sulfuros de hierro. Una forma amorfa de FeS y ocho formas cristalinas diferentes: mackinawita, pirrotita, pirita, marcasita, triolita, greigita, smitita y FeS cúbico. De estas formas cristalinas, solamente la pirita, marcasita y triolita existen en relación estequiométrica ^[18-19]. El producto de corrosión que se obtiene en los sistemas con H₂S es el sulfuro de hierro (FeS), éste durante su formación tiende a ubicarse preferencialmente en las

regiones perlíticas y la corrosión o máximo deterioro se presenta en la zona ferrítica [20].

La corrosión del acero en presencia de H₂S se conoce como corrosión amarga, la cual puede presentarse en condiciones de pH, neutro, alcalino o ácido y puede ocurrir muy

rápidamente y terminar en una considerable pérdida metálica en un tiempo muy corto. [21-22]

El mecanismo bajo el cual se puede asumir en cuatro etapas: [22]

Etapa I

El sulfuro de hidrógeno gaseoso se disuelve en agua donde ocurre una doble disociación (dependiendo del pH), como se muestra a continuación:



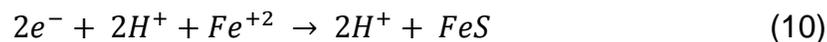
Etapa II

La disolución del hierro en la interface metal/ electrolito:



Etapa III

Los productos de las reacciones (Ec. 8) (Ec. 9) se combinan para formar el sulfuro de hierro:



1.6 Tipos de Flujo.

El movimiento de los fluidos puede clasificarse de muchas maneras, según diferentes criterios y según sus diferentes características. A continuación, se describen brevemente algunos tipos de flujo [23].

- Flujo laminar. El flujo laminar se caracteriza porque el movimiento de las partículas del fluido se produce siguiendo trayectorias bastantes regulares, separadas y perfectamente definidas dando la impresión de que se tratara

de láminas o capas más o menos paralelas entre sí, las cuales se deslizan suavemente unas sobre otras de manera ordenada, sin que exista mezcla macroscópica o intercambio transversal entre ellas.

La ley de Newton de la viscosidad es la que rige el flujo laminar, establece la relación existente entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación angular. La acción de la viscosidad puede amortiguar cualquier tendencia turbulenta que pueda ocurrir en el flujo laminar. Se determina que hay flujo laminar cuando el número de Reynolds es menor a 2000; este patrón de flujo existe a velocidades más bajas que la crítica.

En situaciones que involucren combinaciones de baja viscosidad, alta velocidad o grandes caudales, el flujo laminar no es estable, lo que hace que se transforme en flujo turbulento.

- Flujo transicional. También llamado flujo crítico, existe cuando el caudal se incrementa después de estar en flujo laminar hasta que las láminas comienzan a ondularse y romperse en forma brusca y difusa. Se determina cuando el número de Reynolds tiene valores entre 2000 y 4000.
- Flujo turbulento. Este tipo de flujo es el que más se presenta en la práctica de ingeniería. Existe a velocidades mayores a la crítica, cuando hay un movimiento irregular e indeterminado de las partículas del fluido en direcciones transversales a la dirección principal de flujo. Es determinado cuando el número de Reynolds tiene valores mayores a 4000.

En este tipo de flujo, las partículas del fluido pueden tener tamaños que van desde muy pequeñas, del orden de unos cuantos millares de moléculas, hasta las muy grandes, del orden de millares de pies cúbicos en un gran remolino dentro de un río o en una ráfaga de viento.

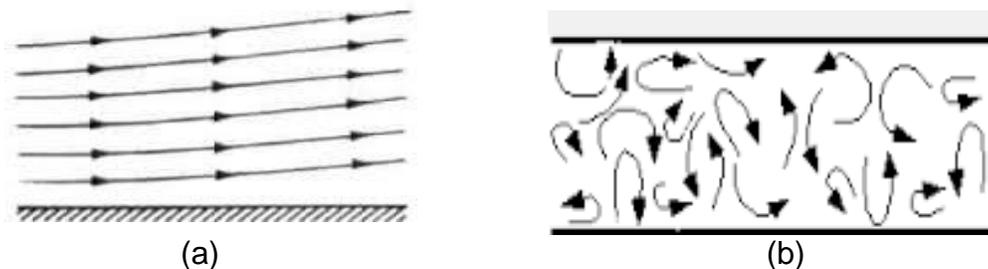


Figura 6. Tipos de flujo (a) flujo laminar (b) flujo turbulento.

1.6.1 Factores que influyen en la formación de los regímenes de flujo.

Los factores principales que influyen en el régimen de flujo en una tubería de flujo bifásico, son:

- ♦ Condiciones o variables de operación, tales como la presión y el caudal de cada uno de los fluidos.
- ♦ Diferencias de propiedades físicas, tales como densidad y viscosidad y en las velocidades de flujo de dos fases.
- ♦ Variables geométricas, como el diámetro y el ángulo de inclinación o perfil de elevación de la línea de transferencia.
- ♦ Dirección de flujo (ascendente, descendente u horizontal) y orientación de la tubería (horizontal, vertical o inclinada).

Es importante mencionar que, en un flujo bifásico en condición estable, régimen de flujo en un sitio dado de la tubería constante. Sin embargo, al cambiar las características de flujo de la mezcla bifásica pueden ocurrir diferentes regímenes de flujo en sitios diferentes en la misma tubería ^[11].

1.7 Número de Reynolds.

Es una relación de las fuerzas de inercia y las fuerza de viscosidad, el cual se calcula mediante la Ec. (11):

$$Re = \frac{\rho * D * v}{\mu} \quad (11)$$

Donde:

Re	Número de Reynolds.
ρ	Densidad (lb/ft ³).
D	Diámetro interno (ft).
V	Velocidad de flujo (ft/s).
μ	Viscosidad (lb/ft-s).

La Tabla 1 muestra los valores del Número de Reynolds, así como el régimen al que pertenecen.

Tabla 1. Régimen de flujo de acuerdo al número de Reynolds.

Régimen de flujo	Número de Reynolds
Laminar	$Re \leq 2100$
Transición	$2100 < Re < 4000$
Turbulento	$Re \geq 4000$

1.8 Tipos de aceros grado API 5L empleados en la transportación por ductos de hidrocarburos.

Los aceros grado API 5L son utilizados en la industria petroquímica, debido a la presencia de mediros corrosivos, tanto amargos (H_2S) como dulces (CO_2), los cuales se asemejan en cuanto a composición química y propiedades mecánicas a los que son empleados en la construcción de tanques separadores, entre otros. La característica principal de estos aceros es el bajo contenido de carbono.

Un acero se considera acero al carbono cuando para sus elementos aleantes, tales como cromo, cobalto, níquel titanio, vanadio, zirconio, manganeso o cualquier otro elemento no se especifica el contenido mínimo requerido; además de que el contenido máximo de magnesio, silicio y cobre, no excede el 1.65%, 0.6% y 0.6%, respectivamente [24].

Dentro de los aceros al carbono, existe una división donde el contenido de carbono se encuentra en menor porcentaje, conocidos como aceros bajo carbono, donde el máximo elemento es de 0.3%; donde existe una subdivisión, teniendo los aceros ultra bajo carbono con un contenido máximo de 0.03% y niveles bajos de silicio y manganeso, los aceros descarburizados con un contenido menor al 0.005% de carbono. Los aceros bajo carbono con un contenido de entre 0.004% 0.15% son utilizados para la fabricación de carrocerías de automóviles; acero dulce, con un contenido de 0.15% a 0.3% de carbono, se emplea en tuberías, puentes y edificios [24-25].

Hoy en día, la fabricación de tuberías para la industria petrolera se lleva a cabo el estándar API (American Petroleum Institute) [26].

Esta clasificación de aceros cumple con los requerimientos detallados en el apartado 6 de la especificación API 5L, donde se mencionan aspectos como composición química y propiedades mecánicas.

Para los aceros grado API 5L, se establecen los requisitos necesarios en contenido de carbono equivalente, de tenacidad, resistencia a la tensión y máximo esfuerzo de cedencia. Las Tablas 2 y 3 muestran las especificaciones de los aceros para PSL 1 y PSL 2 respectivamente (Specification for Line Pipe).

Tabla 2. Requerimientos de tensión uniaxial para PSL 1.

Grado	Esfuerzo de cedencia MPa (psi)		Esfuerzo de tensión MPa (psi)		Elongación (%)
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
X65	450 (65 300)	600 (87 000)	535 (77 600)	760 (110 200)	A
X70	485 (70 300)	635 (92 100)	570 (82 700)	760 (110 200)	A

Tabla 3. Requerimientos de tensión uniaxial para PSL 2.

Grado	Esfuerzo de cedencia MPa (psi)		Esfuerzo de tensión MPa (psi)		Elongación (%)
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
X65M	450 (65 300)	600 (87 000)	535 (77 600)	760 (110 200)	A
X70M	485 (70 300)	635 (92 100)	570 (82 700)	760 (110 200)	A
X70M	555 (80 500)	705 (102 300)	625 (90 600)	825 (119 700)	A

La elongación mínima (A) en 2 in (50.8 mm) se determina con las Ecs. (12) y (13)

$$\text{Unidades del Sistema Inglés} \quad e = 625\,000 \frac{A^{0.2}}{U^{0.9}} \quad (12)$$

$$\text{Unidades del Sistema Internacional} \quad e = 1\,944 \frac{A^{0.2}}{U^{0.9}} \quad (13)$$

Donde:

- e Elongación mínima en 2 in (50.8) en %, redondeado al porcentaje más cercano
- A Área de la muestra a la que se le aplica la fuerza de tensión.
- U Esfuerzo mínimo de tensión final especificado en psi (MPa).

1.8.1 Componentes de acero grado API 5L para medios amargos.

La estrategia de la industria para la fabricación de aceros resistentes a la corrosión en medios amargos, es la eliminación de inclusiones de sulfuro de manganeso, reduciendo la cantidad de azufre y agregando calcio para dar una forma esférica a los sulfuros [27]. Actualmente los procesos de fabricación ofrecen bajos niveles de inclusiones de forma esférica y baja o nula segregación, previniendo el agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC).

La composición química de los aceros empleados dentro de la industria petrolera grado API 5L, debe ser de acuerdo con la composición que se encuentra en la Tabla 4 para PSL 1 y Tabla 5 para PSL 2.

Tabla 4. Requerimientos químicos para PSL 1 en % peso.

Grado	C max	Mn Max	P max	S max
X65	0.26	1.45	0.030	0.030
X70	0.26	1.65	0.030	0.030

Tabla 5. Requerimientos químicos para PSL 2 en % peso.

Grado	C max	Mn max	P max	S max	Si max
X65M	0.12	1.60	0.025	0.015	0.45
X70M	0.12	1.70	0.025	0.015	0.45
X70M	0.12	1.85	0.025	0.015	0.45

Capítulo 2

Desarrollo experimental

Con el estudio y la evaluación que tiene un efecto del cambio de dirección en las tuberías que transporta hidrocarburo en donde se presenta el fenómeno de la Corrosion Asistida por Flujo, el desarrollo experimental de la investigación consiste en una prueba electroquímica. La Figura 7 muestra el diagrama de la investigación.

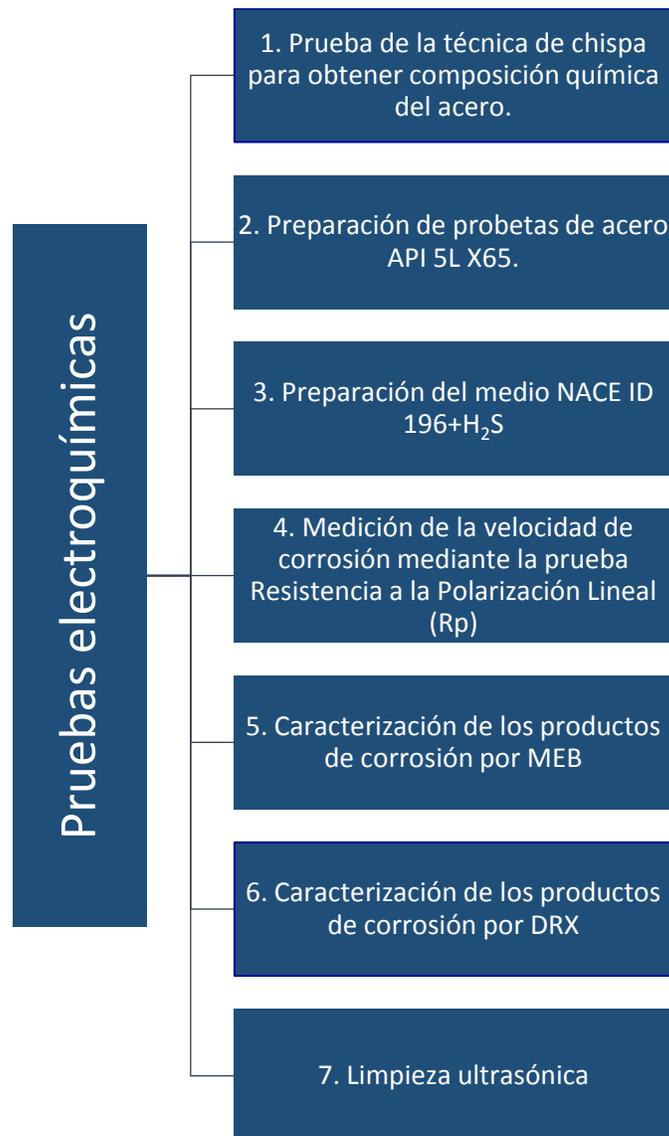


Figura 7. Diagrama esquemático del desarrollo experimental.

2.1 Equipo Experimental.

El equipo experimental que se utiliza para la presente investigación se muestra en la Figura 8, el cual consiste en una cámara de impacto, fabricada de acrílico transparente cuyo espesor es de 5 mm. Se recircula el medio que consta de una salmuera preparada la cual está basada en la norma NACE 1D-196^[28] adicionándole 1382.7 ppm de H₂S, este medio es almacenado en un tanque de polietileno. Con el uso de un rotámetro se controla los caudales del fluido para la presente investigación los cuales son de 8 l/min y 18 l/min. Por medio de un abomba centrífuga de 0.5 HP se hace pasar el fluido atreves del circuito que se muestra en la Figura 8^[35], desde el tanque de almacenamiento hasta la parte superior de la cámara de impacto donde se localiza una boquilla de 0.5 cm de diámetro la cual permite que le medio corrosivo impacte en cada una de las probetas empleadas. El caudal se regula con una llave de paso y se fija por medio de un rotámetro en el valor a emplear en cada uno de los casos a estudiar, es decir a 8 l/min y 18 l/min. El fluido se recircula de manera continua hasta el final de cada una de las pruebas realizadas.

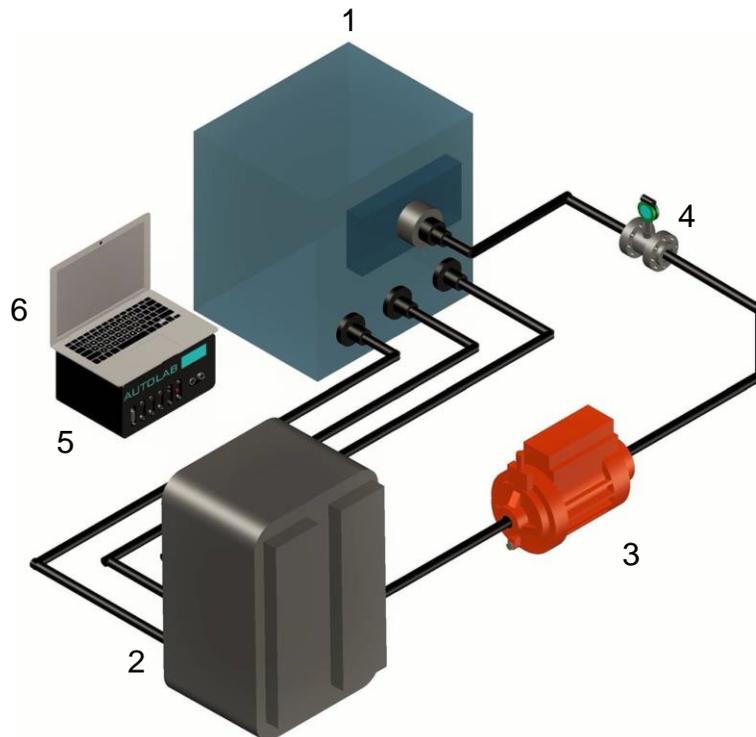


Figura 8. Diagrama esquemático del equipo experimental.

A continuación, se enlista el equipo que se utiliza en la presente investigación:

1. Cámara de impacto.
2. Tanque de almacenamiento.
3. Bomba de 0.5 HP de potencia.
4. Rotámetro.
5. Potenciostato/Galvanostato PARSTAT 2263/263A.
6. Laptop con el programa Power Suite.

2.2 Cámara de impacto.

La Figura 9 muestra la cámara de impacto y los porta muestras (placas de impacto) para los ángulos de 30°, 60° y 90° donde se lleva a cabo el montaje de los cupones de acero API 5L X65 a estudiar. Los ángulos se consideran a partir de las evaluaciones realizadas por distintos autores como Uchida ^[29-30].

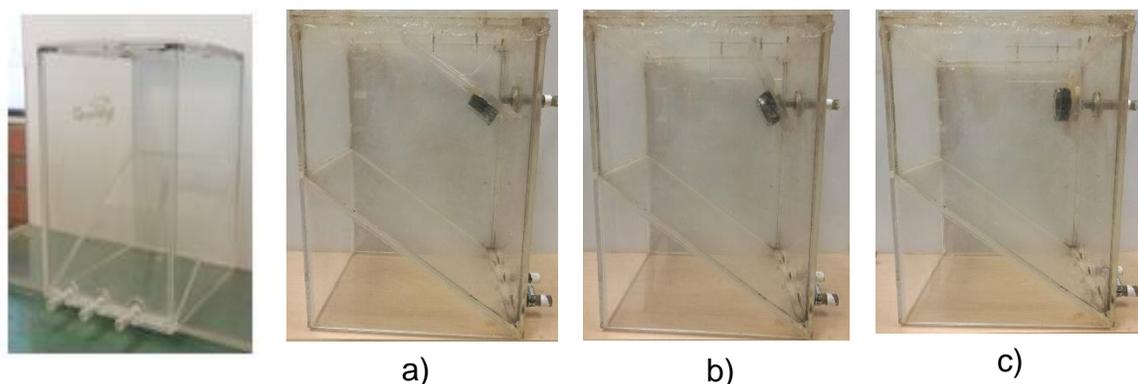


Figura 9. Cámara de impacto con la placa de impacto para a) 30°, b) 60° y c) 90°.

2.3 Probetas para las pruebas electroquímicas.

Se maquinan cupones de acero API 5L X65 de acuerdo a las siguientes dimensiones: 1 x 0.5 x 1 cm, con un área de exposición de 0.5 cm².

Se colocan las probetas dentro de la cámara de impacto en cada uno de los porta muestras según el ángulo a estudiar, para poder determinar en cada caso la velocidad de corrosión, mediante la técnica electroquímica de la resistencia a la polarización lineal (Rp).

En la Figura 10 se muestra el arreglo de los cupones montados en resina (configuración lineal tipo pines), para determinar la velocidad de corrosión, en este tipo de arreglo el acero 316 inoxidable realiza la función de electrodo de referencia (ER) y el acero API 5L X65 como electrodo de trabajo (ET) y electrodo auxiliar (EA). Los cupones una vez colocados en resina epoxica se desbastan hasta tener una superficie plana con una lija 600, haciendo además una conexión adecuada con alambre de cobre (soldado al cupón) con el fin de generar un contacto eléctrico con el Potenciostato/Galvanostato y obtener con esto una lectura confiable para el valor de la velocidad de corrosión.

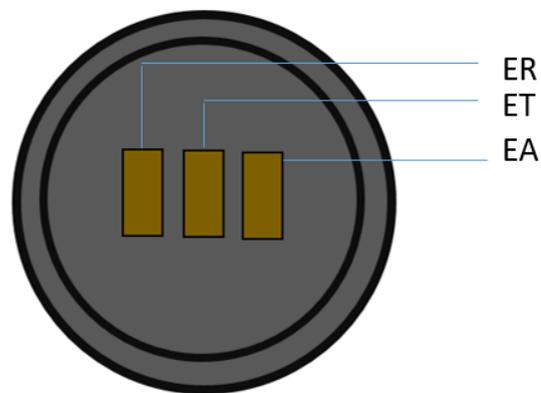


Figura 10. Arreglo de los cupones configuración lineal tipo pines.

2.4 Equipo para pruebas electroquímicas (determinación de la velocidad de corrosión).

La Figura 11 muestra el equipo utilizado para la prueba electroquímica denominada Resistencia a la Polarización Lineal (R_p), el cual consta de:

1. Laptop con la interfase para el Potenciostato/Galvanostato.
2. Potenciostato/Galvanostato.
3. Programa "Power Suite" para obtener los datos de velocidad de corrosión y potencial de corrosión.



Figura 11. Equipo de potenciostato y programa utilizado.

2.5 Preparación del medio corrosivo.

Para evaluar la velocidad de corrosión del sistema, se hace uso de una salmuera saturada con H₂S (1382.7 ppm de H₂S que equivalen a 1 bar de presión), la cual estará en contacto con los cupones de acero API 5L X65. La Tabla 6 muestra las cantidades necesarias para preparar la salmuera de acuerdo a la norma NACE 1D-196.

Tabla 6. Salmuera de acuerdo con la Norma NACE 1D-196.

Compuesto	g/l
NaCl	106.57
CaCl ₂ *2H ₂ O	4.47
MgCl ₂ *6H ₂ O	2.06
Agua destilada	Aforar a un litro
pH	4

La cantidad de salmuera necesaria para el circuito experimental es de 10 litros por lo cual, se preparan 9 partes de salmuera de acuerdo a la Tabla 6, por una de keroseno, es decir una relación 9:1. Se realiza una agitación constante hasta no tener presencia de sales de manera visual, esto lleva alrededor de diez minutos aproximadamente. Para generar H₂S se agregan sulfuro de sodio y ácido acético respectivamente para tener el grado de saturación ya mencionado.

La Tabla 7 muestra las condiciones experimentales para determinar la velocidad de corrosión mediante la técnica de la resistencia a la polarización lineal (Rp).

Tabla 7. Condiciones experimentales.

Velocidad del medio	8 l/min (1.05 m/s) 18 l/min (2.36 m/s)
Concentración de H₂S	1 Bar (1382.7 ppm,)
Angulo de inclinación	30° 60° 90°
Tiempo	8 horas

2.6 Técnica electroquímica de la resistencia a la polarización lineal (Rp).

Las velocidades de corrosión se determinan con la técnica de resistencia a la polarización lineal mediante el software Power Suite de Princeton Applied Research, se realizan a +/- 20 mV por encima y por debajo del potencial de corrosión, con una velocidad de barrido de 0.16 mV/s.

2.7 Caracterización de los productos de corrosión.

Después de las pruebas electroquímicas, los productos de corrosión que se forman en la superficie de los cupones se caracterizan mediante Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Difracción de Rayos X (DRX).

La Figura 12 muestra el equipo que se utiliza para la caracterización de los productos de corrosión, el cual es un Microscopio Electrónico de Barrido marca JOEL JSM-6300 que se opera a 20 kV, 220 μ A y una distancia de trabajo de +/- 39 mm.



Figura 12. Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6300.

La Figura 13 muestra el Difractómetro marca Focus D8, el cual emplea una radiación de Cu $K\alpha$, cuyas condiciones de operación para este trabajo son de 35 kV en un intervalo de 2θ de 20° a 100° , con incrementos de 0.02° a temperatura ambiente.



Figura 13. Difractómetro de Rayos X Focus D8.

2.8 Limpieza ultrasónica.

Para evaluar si existe o no un daño superficial (disolución de metal o picado) en la superficie de cada uno de los cupones de acero API 5L X65 se lleva a cabo una limpieza o remoción de los productos de corrosión. Se lleva a cabo esta limpieza con el uso de una solución compuesta por HCl, agua destilada y el reactivo hexametileno-tetramina ^[31] mismo que se emplea en el análisis de fractura de superficie.

La Figura 14 muestra el equipo utilizado para realizar la limpieza ultrasónica.



Figura 14. Baño ultrasónico.

Capítulo 3

Resultados y discusión

3.1 Caracterización microestructural del acero API 5L X65.

Se llevó a cabo la caracterización microestructural del acero API 5L X65, para determinar las fases presentes en el acero las cuales se presentan en la Figura 15. De manera general se identifican dos fases: la ferrita (fase clara) y la perlita (fase oscura).

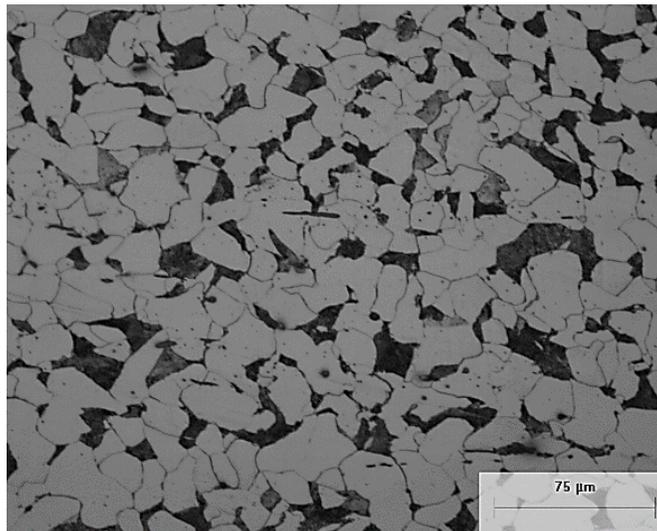


Figura 15. Microestructura del acero API 5L X65.

De igual manera, se realizó un estudio de % de fases presentes en la microestructura del acero, cuyo resultado se muestra en la Tabla 8, este análisis se efectuó en la sección superior interna del tubo.

Tabla 8. % Fases del acero API 5L X65 en la parte superior interna.

Acero sección superior interna	% Ferrita	% Perlita	Tamaño de grano (ASTM)
API 5L X65	78.55	21.45	8

La Tabla 9 muestra la composición química del acero obtenida mediante la técnica de chispa en un espectrofotómetro. Se observa que el contenido de manganeso es significativo por tal motivo contribuye a la formación de perlita.

Tabla 9. Composición química del acero API 5L X65 en % peso.

Acero	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Ni	Fe
API 5L X65	0.154	1.357	0.231	0.023	0.014	0.061	0.001	0.022	98.0

3.2 Análisis de la velocidad de corrosión para 8 l/min en ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°.

Con la finalidad de evaluar el efecto que tiene el medio corrosivo, la velocidad del flujo y la superficie del material en un ángulo de impacto de 30°, 60° y 90°, se prepararon cupones de un acero API 5L X65.

En la Figura 16 se muestran los resultados de la velocidad de corrosión en función del tiempo de exposición para los ángulos de 30°, 60° y 90° en un medio corrosivo. De manera general se observa un incremento de la velocidad de corrosión independientemente del ángulo de impacto.

Sin embargo, conforme transcurre el tiempo la velocidad de corrosión disminuye específicamente para los ángulos de 30° y 60°, siendo más notorio para el ángulo de 60°. Este comportamiento se debe a una mayor formación de los productos de corrosión y así como a una mayor adherencia de los mismo.

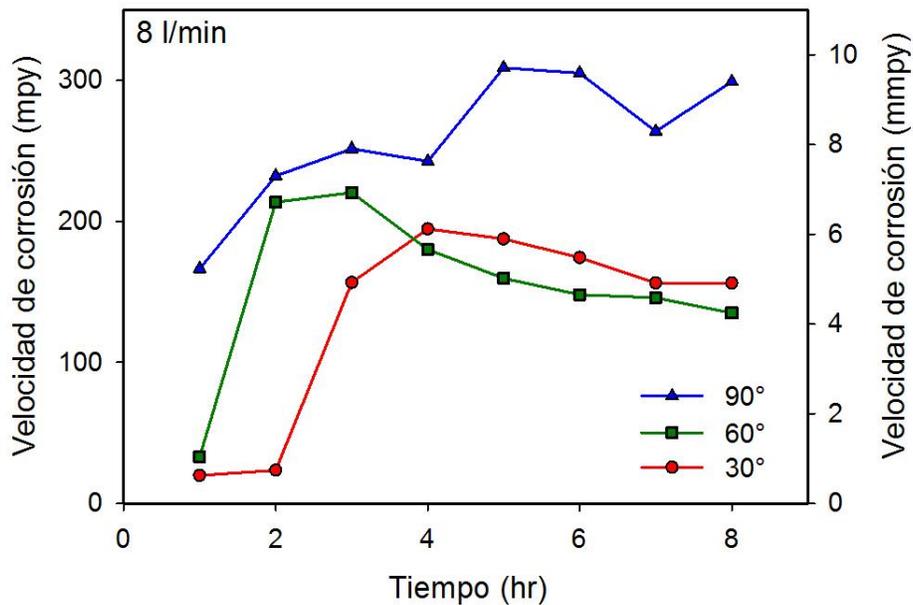


Figura 16. Velocidad de corrosión para una velocidad de flujo de 8 l/min con ángulos de impacto de 30°, 60° y 90° a un tiempo de 8 horas en un acero API 5L X65.

3.3 Caracterización de los productos de corrosión para una velocidad de flujo de 8 l/min mediante Microscopia Electrónica de Barrido.

De acuerdo a las investigaciones de Seal ^[32] existen tres tipos o morfologías para clasificar los productos de corrosión, los cuales son:

1. Cactus.
2. Capullo o botón de rosa.
3. Dentado (forma irregular).

La caracterización de los productos de corrosión formados en la superficie del acero API 5L X65 se realiza mediante la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), con el fin de identificar el tipo de morfología y el efecto que puede tener el flujo sobre los cupones.

3.3.1 MEB a una velocidad de flujo de 8 l/min.

La Figura 17 muestra la superficie de los cupones del acero API 5L X65 a diferentes magnificaciones para los diferentes ángulos de impacto. Se observa que a menores magnificaciones (25X) las superficies de 30° y 60° son uniformes con respecto a 90°. A 50X se observan zonas con aglomeración de productos de corrosión especialmente para 30° y 90° y por ende un incremento de la velocidad de corrosión tal como se muestra en la Figura 16. A 300X se observa que los productos de corrosión presentan una morfología tipo dentada lo cual provoca que el fluido presente una mayor interacción con los mismos y por ende se tenga un mayor desprendimiento provocando el incremento de la velocidad de corrosión.

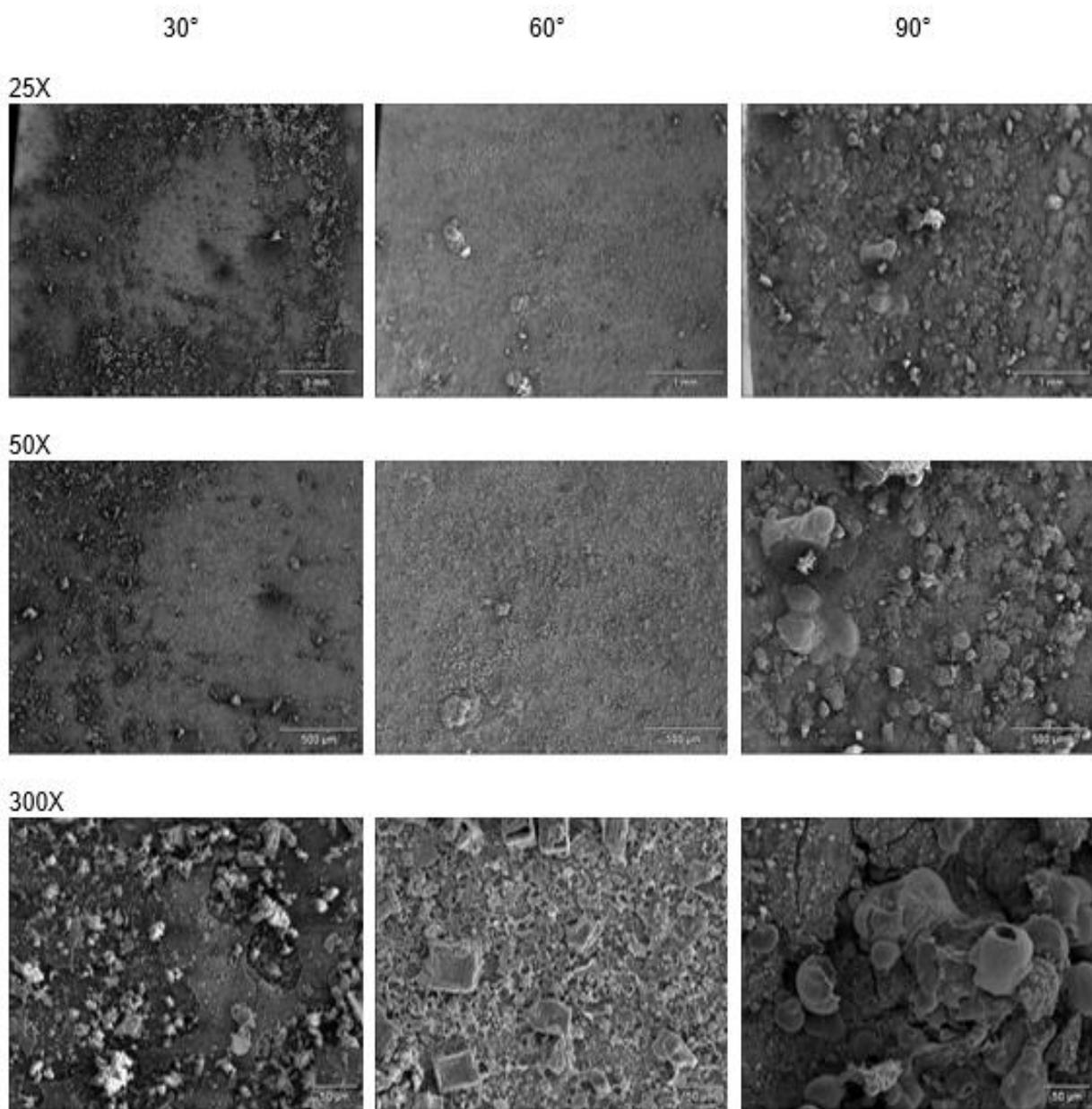


Figura 17. Micrografías de la superficie de los cupones de acero API 5L X65 a 25X, 50X y 300X magnificaciones en los ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°.

3.4 Análisis de los productos de corrosión por EDS y mapeo de los elementos presentes en los productos de corrosión para el acero API 5L X65 para 8 l/min en los ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°.

De acuerdo a la Tabla 10 se muestra que existe una mayor proporción de cloro y sodio lo que sugiere la presencia de sales en la superficie del cupón debido a la salmuera utilizada, especialmente para el cupón de 60°. También se observa la presencia de hierro, oxígeno y azufre lo que origina una combinación de óxidos y sulfuros.

Tabla 10. Composición de los productos de corrosión distribuidos sobre la superficie en los ángulos de 30°, 60° y 90° con una velocidad de flujo de 8 l/min, en % peso.

Angulo de contacto	30°	60°	90°
Elemento	% peso	% peso	% peso
C	18.44	25.96	18.25
O	22.22	23.45	18.69
Na	-	17.94	-
Mn	-	-	0.78
Si	0.37	0.47	-
S	6.01	1.96	3.49
Cl	0.33	6.33	0.72
Ca	-	1.57	-
Zn	5.47	2.84	3.02
Cu	-	4.51	9.31
Fe	46.59	14.96	45.74
Total	100	100	100

3.4.1 Mapeo de los elementos presentes.

La Figura 18 muestra la distribución del hierro, oxígeno y azufre presentes en la superficie para los tres ángulos de impacto, siendo el hierro y el oxígeno los que se encuentran en casi toda la superficie. El azufre se encuentre mejor distribuido para el ángulo de 60° lo que sugiere que los productos de corrosión formados están distribuidos de manera uniforme, lo cual refleja en una disminución de la velocidad de corrosión (Figura 16).

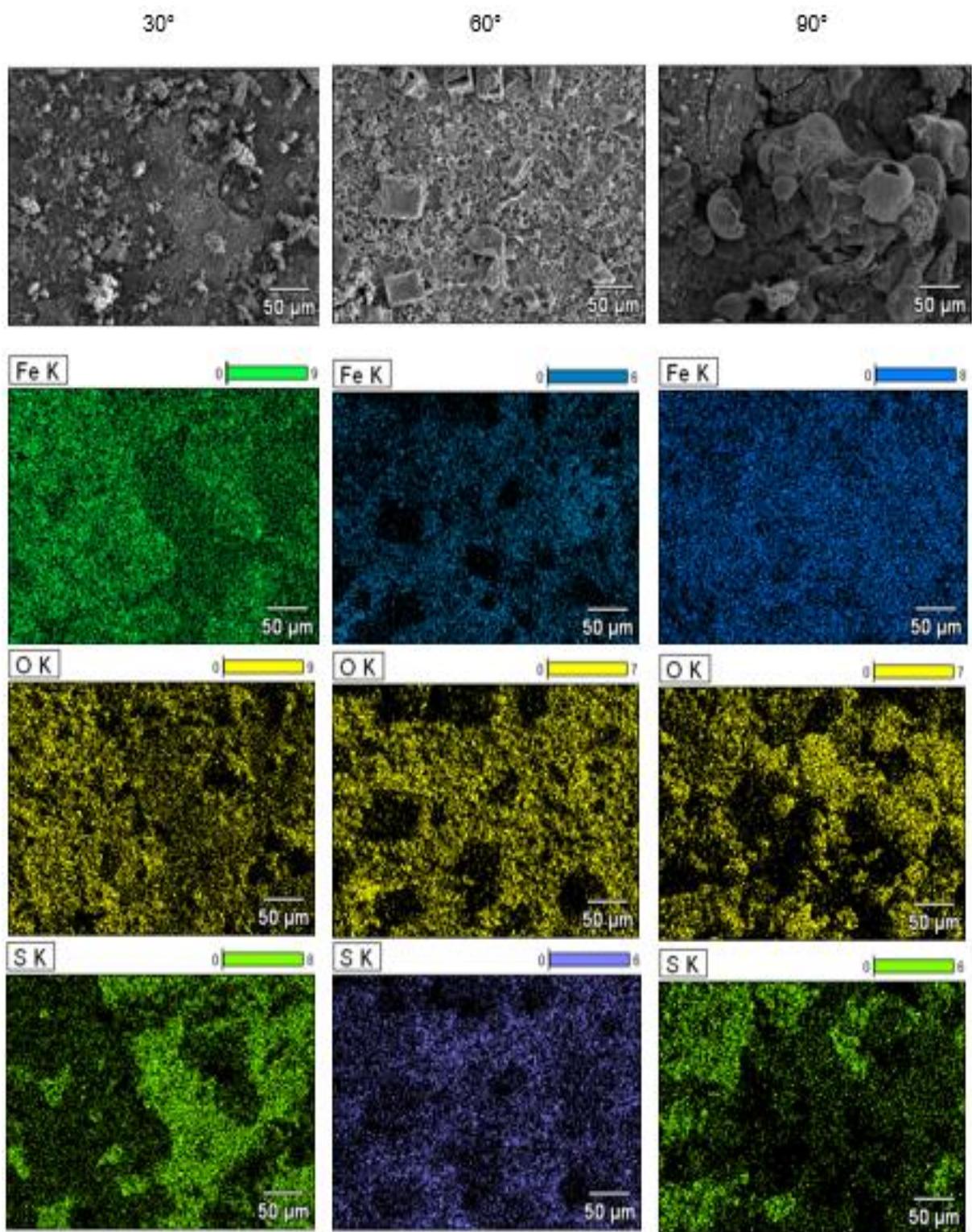


Figura 18. Mapeo de elementos químicos del acero API 5L X65 con ángulo de impacto a 30°, 60° y 90° con una velocidad de flujo de 8 l/min.

3.4.2 Análisis puntual para una velocidad de flujo de 8 l/min.

La Figura 19 y Tabla 11 muestra el análisis puntual realizado a la superficie del acero API 5L X65 para un ángulo de 60° y velocidad de flujo de 8 l/min. En ambos puntos se observa una mayor presencia de oxígeno en comparación con el azufre lo que conlleva a una mayor presencia de óxidos y por ende un incremento de la velocidad de corrosión debido a que estos son menos adherentes (Figura 16).

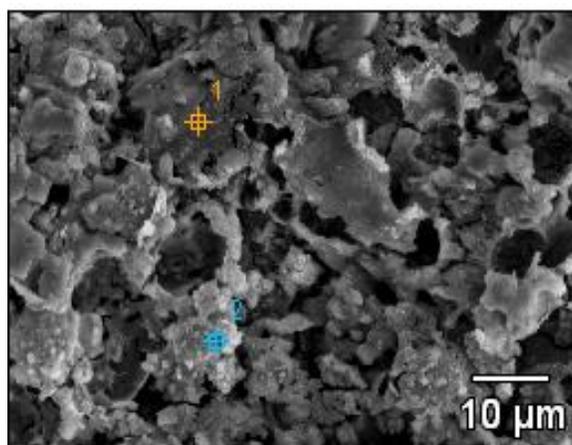


Figura 19. Análisis puntual del acero API 5L X65 en un ángulo de impacto de 60° a 1500X magnificaciones.

Tabla 11. Composición del análisis puntual en ángulo de impacto de 60° del acero API 5L X65.

% peso	C	O	Na	Si	S	Cl	Ca	Fe	Cu	Zn
Punto 1	28.29	19.71	17.50	0.36	4.12	0.50	1.63	16.79	5.91	5.19
Punto 2	27.46	29.47	14.44	0.84	2.17	0.73	2.45	19.95	2.50	-

3.5 Análisis de la velocidad de corrosión para 18 l/min en ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°.

En la Figura 20 se muestran los resultados de la velocidad de corrosión en función del tiempo de exposición para los ángulos de 30°, 60° y 90° en un medio corrosivo. De manera general se observa un incremento de la velocidad de corrosión independientemente del ángulo de impacto. Sin embargo, conforme transcurre el tiempo la velocidad de corrosión disminuye específicamente en los ángulos de 30° y 90°, teniendo un mejor comportamiento para el ángulo de 90°. Este comportamiento se debe a una mayor adherencia de los productos de corrosión.

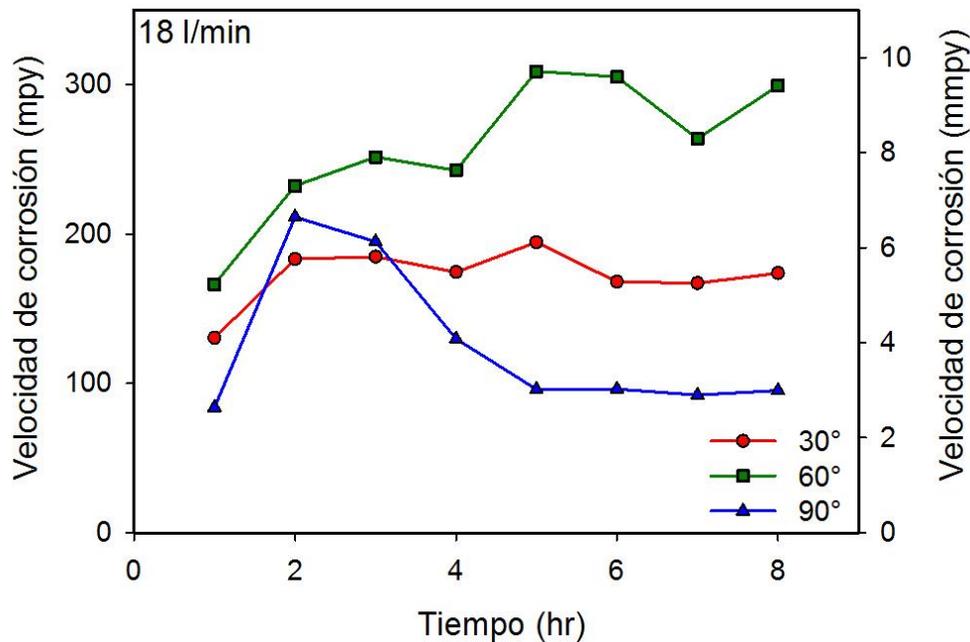


Figura 20. Velocidad de corrosión para una velocidad de flujo de 18 l/min con ángulos de impacto de 30°, 60° y 90° a un tiempo de 8 horas en un acero API 5L X65.

3.6 Caracterización de los productos de corrosión para una velocidad de flujo de 18 l/min mediante Microscopia Electrónica de Barrido.

3.6.1 MEB a una velocidad de flujo de 18 l/min.

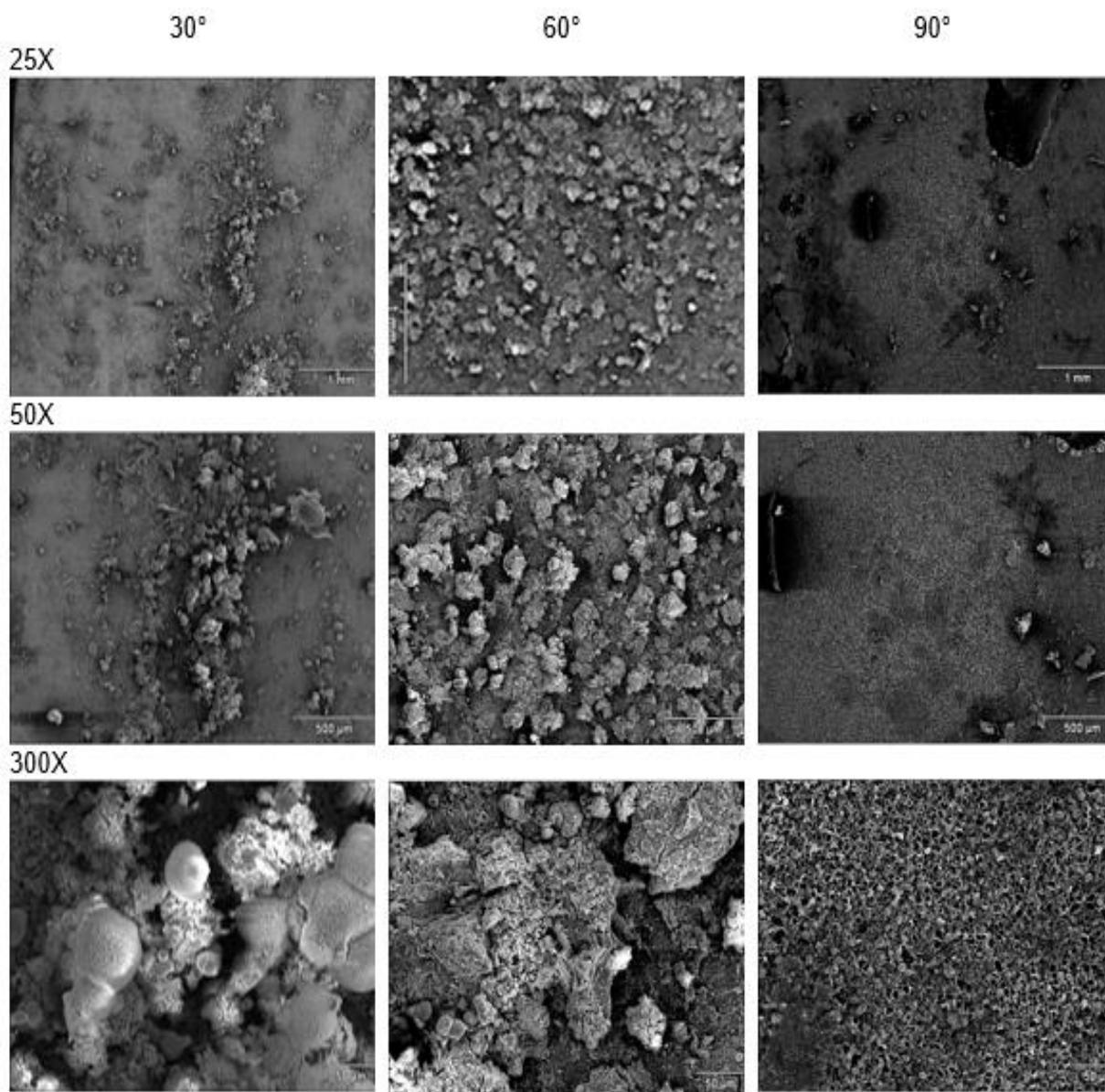


Figura 21. Micrografías de la superficie de los cupones de acero API 5L X65 a 25X, 50X y 300X magnificaciones en los ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°.

La Figura 21 muestra la superficie de los cupones de acero API 5L X65 a diferentes magnificaciones para los ángulos de impacto. Se observa que a menores magnificaciones (25X) las superficies de 30°, 60° y 90° son uniformes, presentando en algunas zonas aglomerados. A 50X se observan zonas de mayor aglomeración especialmente para 30° y 60° y por ende un incremento en la velocidad de corrosión como se muestra en Figura 20, este comportamiento se corrobora a 300X magnificaciones ya que para estos ángulos existe un mayor desprendimiento de los productos de corrosión. Otra característica que se observa a esas magnificaciones es que presentan una morfología de tipo dentado a primera vista.

Para corroborar la presencia de un tipo dentado se obtuvo una imagen a 1500X magnificaciones observando que el producto de corrosión formado resulta ser de tipo cactus e irregular tal como se observa en la Figura 22.

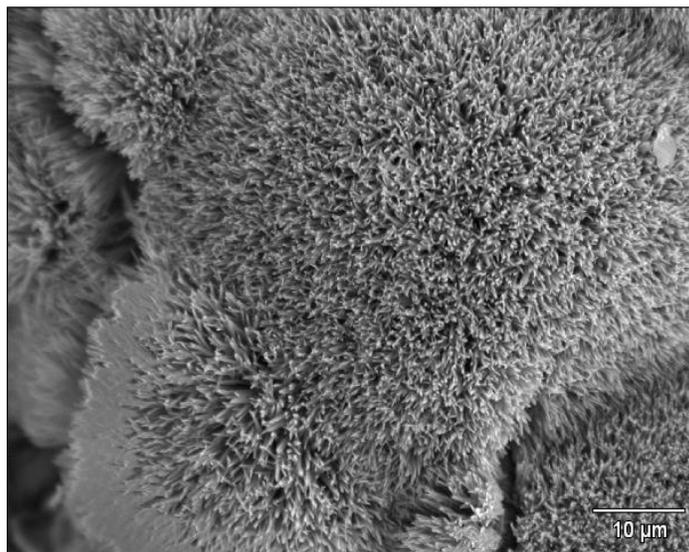


Figura 22. Micrografía de la superficie del cupón de acero API 5L X65 a 1500X magnificaciones para el ángulo de 30° a 18 l/min.

La Figura 23 detalla los productos de corrosión presentes para el ángulo de 90° donde se muestra una distribución uniforme en la superficie teniendo una morfología de tipo botón de rosa, pero también se observan productos de corrosión con un a morfología de laminilla. Este tipo de morfología favorece la disminución de la velocidad de corrosión tal como se muestra en la Figura 20. Este comportamiento se debe a que este tipo de morfología presenta una mayor resistencia al desprendimiento debido al paso del fluido ya que resulta ser más compacto y de mayor adherencia.

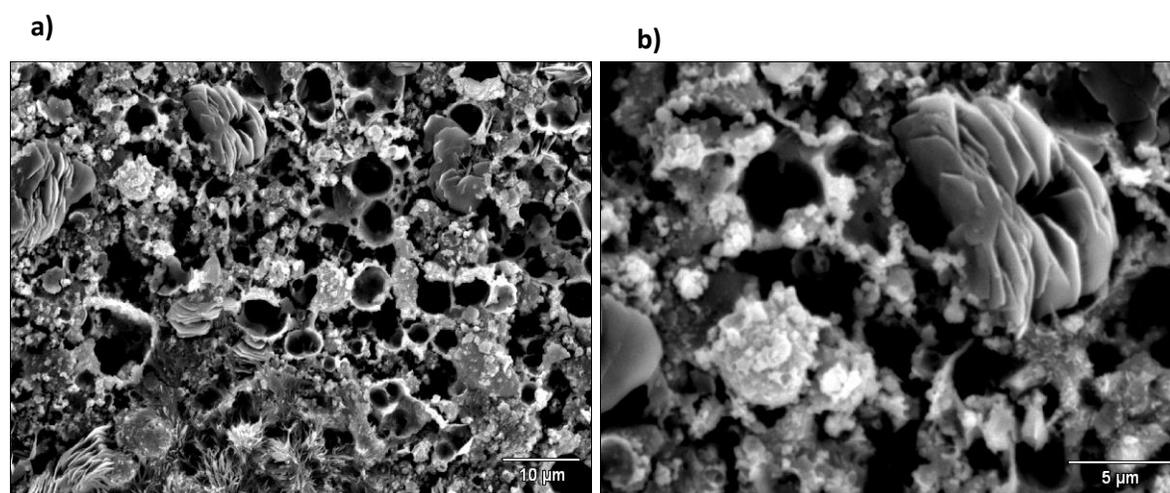


Figura 23. Micrografías de la superficie del cupón de acero API 5L X65 a a)1500X y b) 4000X magnificaciones para el ángulo de 90° a 18 l/min.

3.7 Análisis de los productos de corrosión por EDS y mapeo de los elementos presentes en los productos de corrosión para el acero API 5L X65 para 18 l/min en los ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°.

En la Tabla 12 se muestra que existe una mayor proporción de hierro, oxígeno y en el caso del ángulo de 30° se tiene la presencia de azufre lo cual sugiere una formación de óxidos y sulfuros.

Tabla 12. Composición de los productos de corrosión distribuidos sobre la superficie en los ángulos de 30°, 60° y 90° con una velocidad de flujo de 18 l/min, en % peso.

Ángulo de contacto	30°	60°	90°
Elemento	% peso	% peso	% peso
C	43.40	20.33	15.49
O	23.33	21.90	22.11
Na	6.32	1.59	18.71
Mn	-	1.06	-
Si	0.43	-	3.72
S	0.91	-	-
Cl	0.44	1.12	-
Ca	0.21	-	0.89
Zn	-	2.95	6.81
Cu	0.77	-	1.83
Fe	24.19	51.05	30.44
Total	100	100	100

3.7.1 Mapeo de los elementos presentes en los productos de corrosión.

La Figura 24 muestra la distribución del hierro, oxígeno y cloro presentes en la superficie para los tres ángulos de impacto, siendo el hierro y el oxígeno los que se encuentran distribuidos en casi toda la superficie. El cloro se encuentra distribuido para los ángulos de 30° y 60° de manera uniforme debido al medio utilizado (salmuera, Tabla 12).

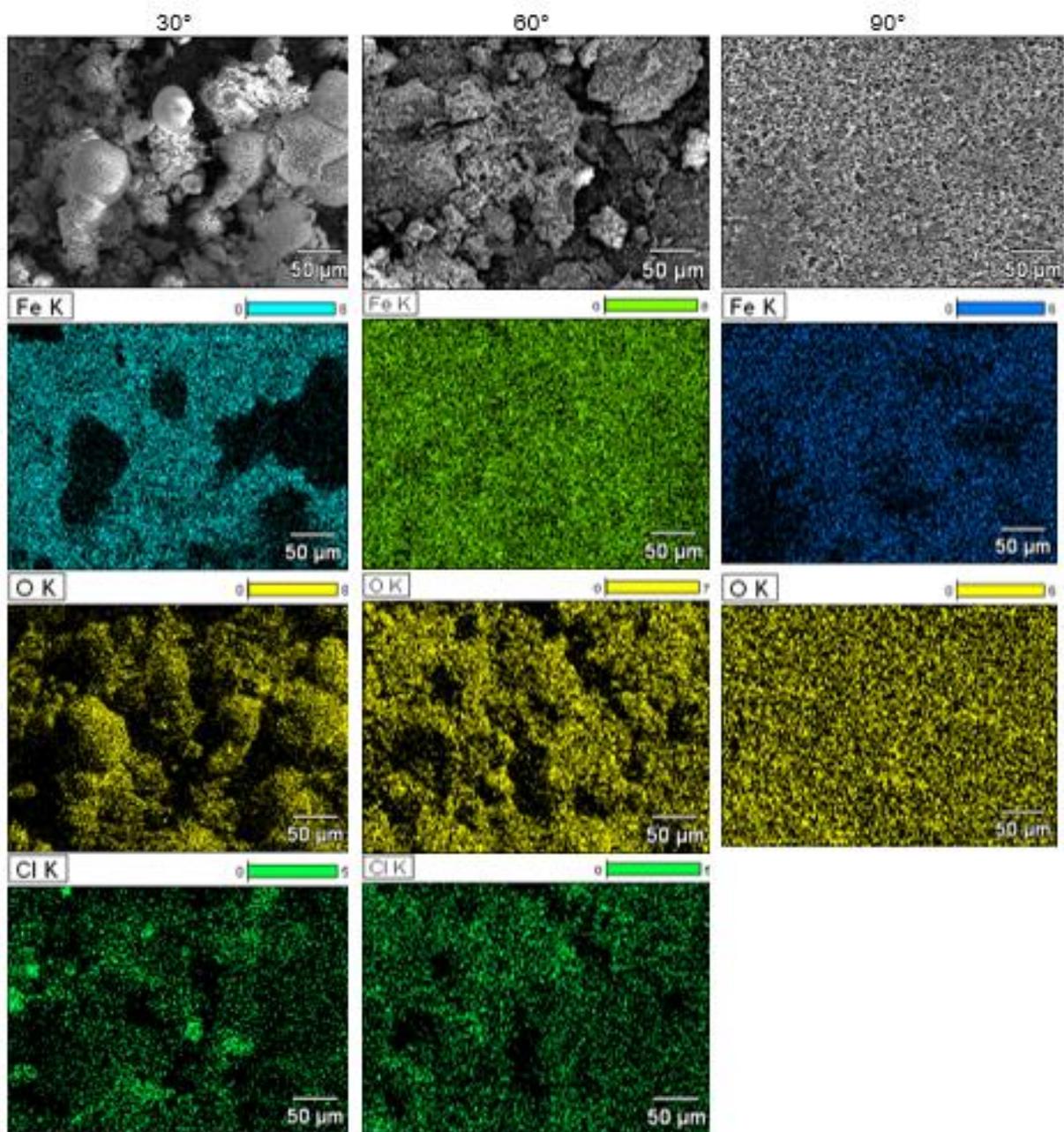


Figura 24. Mapeo de elementos químicos del acero API 5L X65 con ángulo de impacto a 30°, 60° y 90° con una velocidad de flujo de 18 l/min.

3.7.2 Análisis puntual para una velocidad de flujo de 18 l/min.

La Figura 25 y Tabla 13 muestran el análisis puntual realizado para un ángulo de 30°. En el punto uno y tres se observa mayor presencia de oxígeno lo cual sugiere la presencia de óxidos en comparación al punto 1 el cual tiene una mezcla de óxidos y sulfuros.

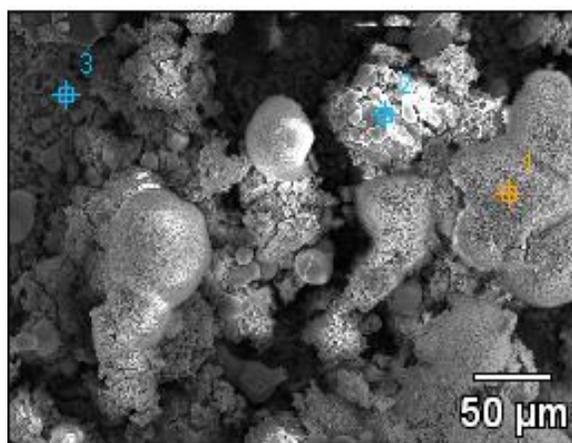


Figura 25. Análisis puntual del acero API 5L X65 en un ángulo de impacto de 30° a 300X magnificaciones.

Tabla 13. Composición del análisis puntual en ángulo de impacto de 30° del acero API 5L X65.

% Peso	C	O	Na	Si	S	Cl	Ca	Fe	Mn
Punto 1	18	32.41	37.82	0.01	4.99	-	-	6.77	-
Punto 2	20.11	22.17	1.16	0.36	-	2.05	-	53.63	0.51
Punto 3	10.35	16.99	3.16	1.28	-	-	0.25	66.96	1

La Figura 26 y Tabla 14 muestra el análisis puntual realizado para el ángulo de 60°. Se observa que los productos formados en los puntos uno y dos corresponden a óxidos y en el punto tres se tiene una mezcla de óxidos y sulfuros.

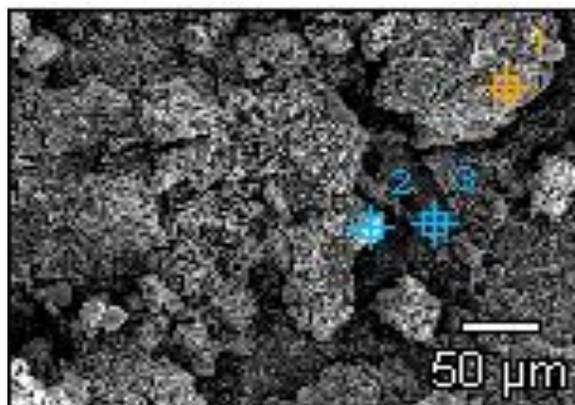


Figura 26. Análisis puntual del acero API 5L X65 en un ángulo de impacto de 60° a 300X magnificaciones.

Tabla 14. Composición del análisis puntual en ángulo de impacto de 60° del acero API 5L X65.

% Peso	C	O	Si	S	Cl	Mn	Fe	Zn
Punto 1	19.96	26.56	0.16	-	0.99	0.68	51.65	-
Punto 2	20.09	27.64	0.52	-	0.80	0.75	50.19	-
Punto 3	-	27.90	0.36	5.89	-	0.88	52.71	12.27

La Figura 27 y Tabla 15 muestran que en los dos puntos analizados se tiene una mayor presencia de oxígeno, lo que conlleva a una mayor formación de óxidos, distribuidos de manera uniforme en la superficie. A este comportamiento se le atribuye la disminución de la velocidad de corrosión tal como se observa en la Figura 20.

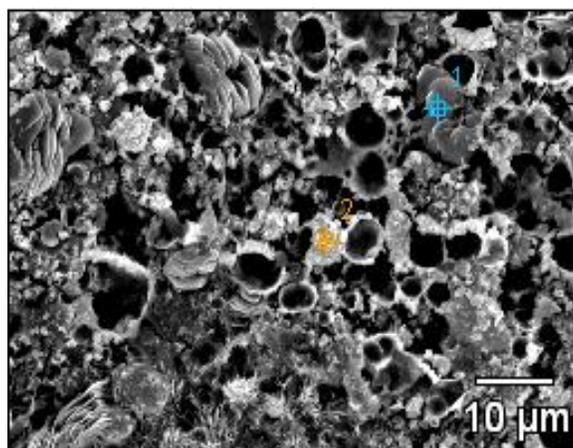


Figura 27. Análisis puntual del acero API 5L X65 en un ángulo de impacto de 90° a 1500X magnificaciones.

Tabla 15. Composición del análisis puntual en ángulo de impacto de 90° del acero API 5L X65.

% Peso	C	O	Na	Si	Ca	Fe	Zn
Punto 1	-	18.67	45.80	3.05	2.38	21.57	8.53
Punto 2	3.66	23.21	14.30	6.64	0.92	43.31	7.96

3.8 Difracción de Rayos X (DRX).

La caracterización de las especies cristalinas presentes en los productos se realizó mediante Difracción de Rayos X en un difractómetro D8 Focus.

3.8.1 Difractogramas para el acero API 5L X65 a 8 l/min.

La Figura 28 muestra la identificación de las especies cristalinas de los productos de corrosión, observando una mezcla de óxidos y sulfuros donde predominan los óxidos específicamente la magemita cúbica. Por otro lado, se tiene la presencia de marcasita ortorrómbica y mackinawita tetragonal en menor proporción. Como existe una mayor proporción de óxidos los cuales son menos protectores se tiene un incremento de la velocidad de corrosión tal como se observa en la Figura 16.

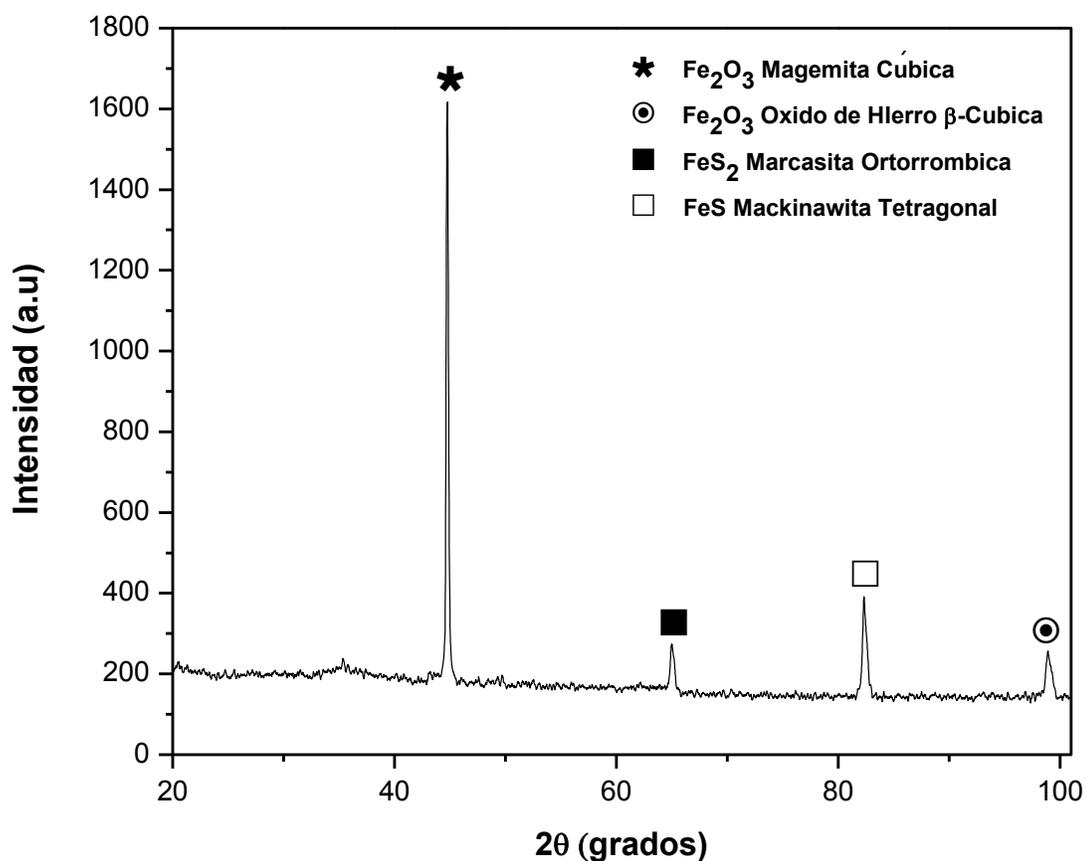


Figura 28. Difractograma de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X65 para el ángulo de 30° con una velocidad de flujo de 8 l/min.

La Figura 29 muestra una mayor gama de especies cristalinas en los productos de corrosión para el ángulo de 60° a 8 l/min, donde la magemita cubica predomina quien en combinación con la troilita hexagonal y mackinawita tetragonal realiza una mejor labor protectora de acuerdo a Pengpeng [19]. Estos dos últimos productos resultan ser más eficientes para disminuir la velocidad de corrosión lo cual corrobora la disminución de la velocidad de corrosión se muestra en la Figura 16.

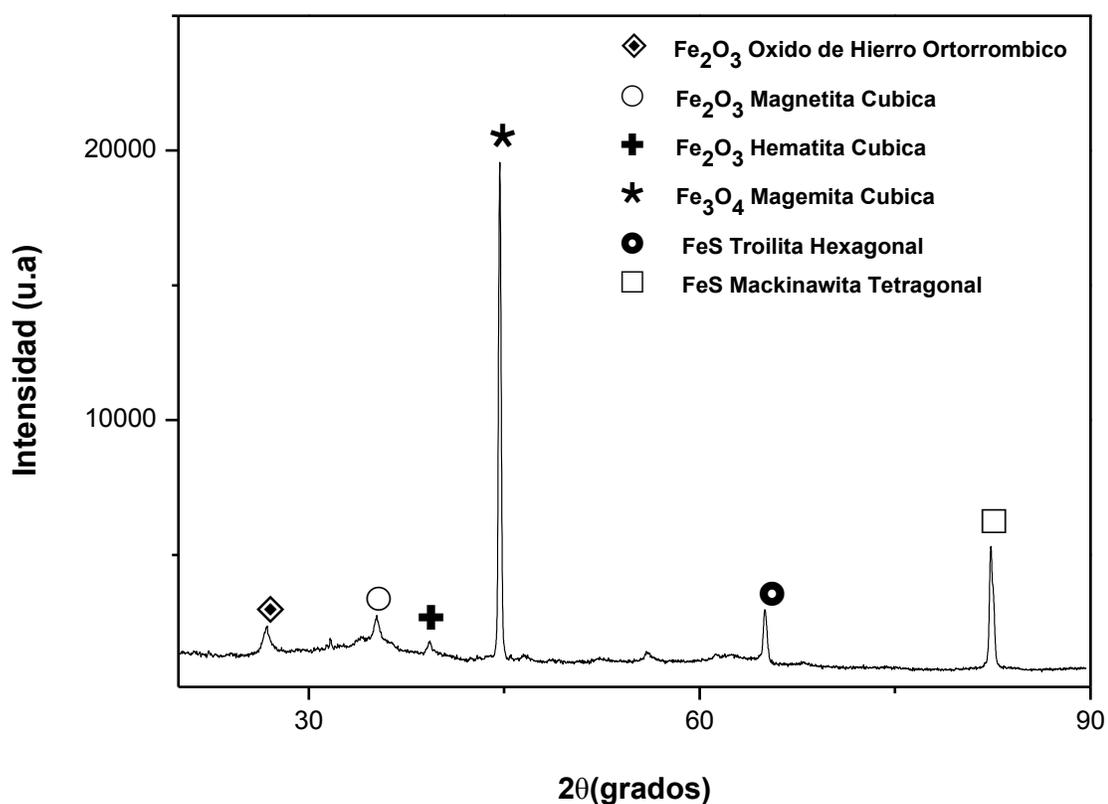


Figura 29. Difractograma de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X65 para el ángulo de 60° con una velocidad de flujo de 8 l/min.

De acuerdo a la Figura 30 para el ángulo de 90° se tiene una mayor presencia de óxidos en comparación con los sulfuros y por ende un incremento de la velocidad de corrosión debido a la poca adherencia de los mismos (Figura 16) aunado a la morfología que presenta la cual corresponde a un tipo dentado la cual es susceptible a un mayor desprendimiento debido al paso del fluido.

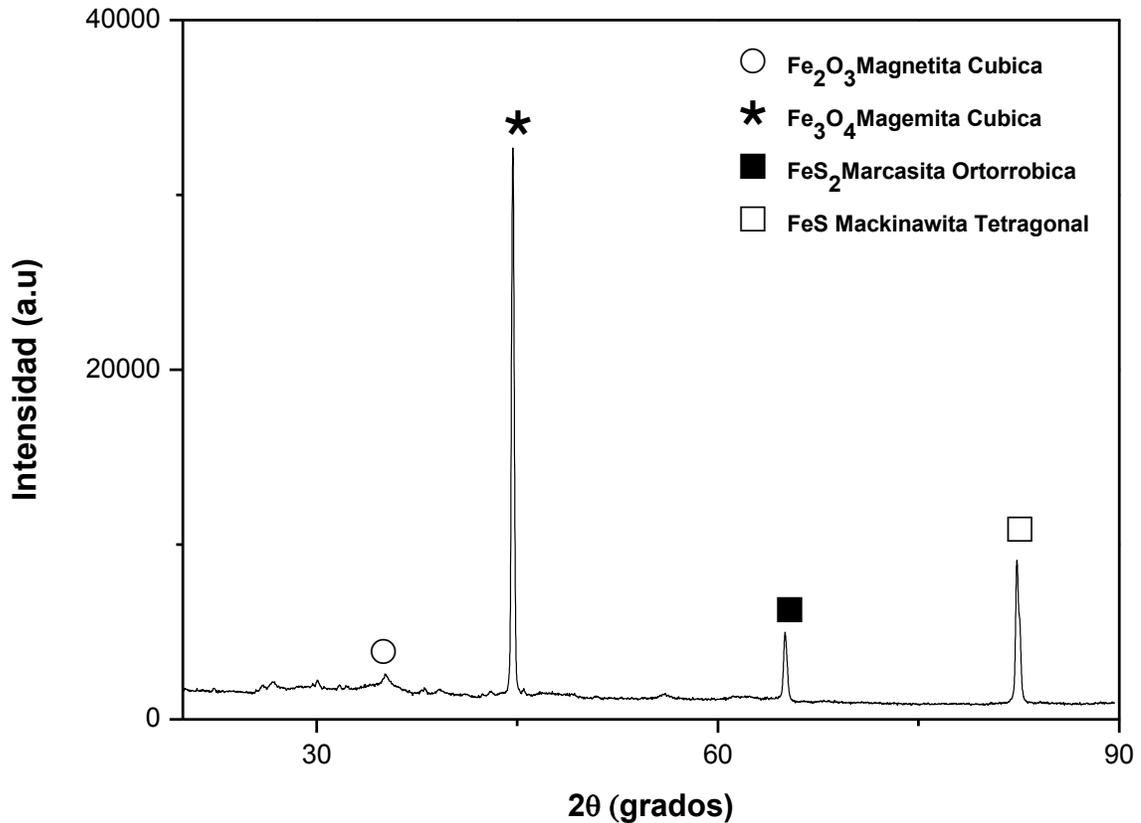


Figura 30. Difractograma de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X65 para el ángulo de 90° con una velocidad de flujo de 8 l/min.

3.8.2 Difractogramas para el acero API 5L X65 a 18 l/min.

La Figura 31 muestra una mayor gama de sulfuros, sin embargo, es más significativa la presencia de óxidos, lo cual provoca un incremento de la velocidad de corrosión debido a la poca adherencia de los mismos, tal como se observa en la Figura 20. Los productos presentan una morfología de tipo dentado lo cual como ya se mencionó favorece el desprendimiento de los mismos por la mayor acción del fluido.

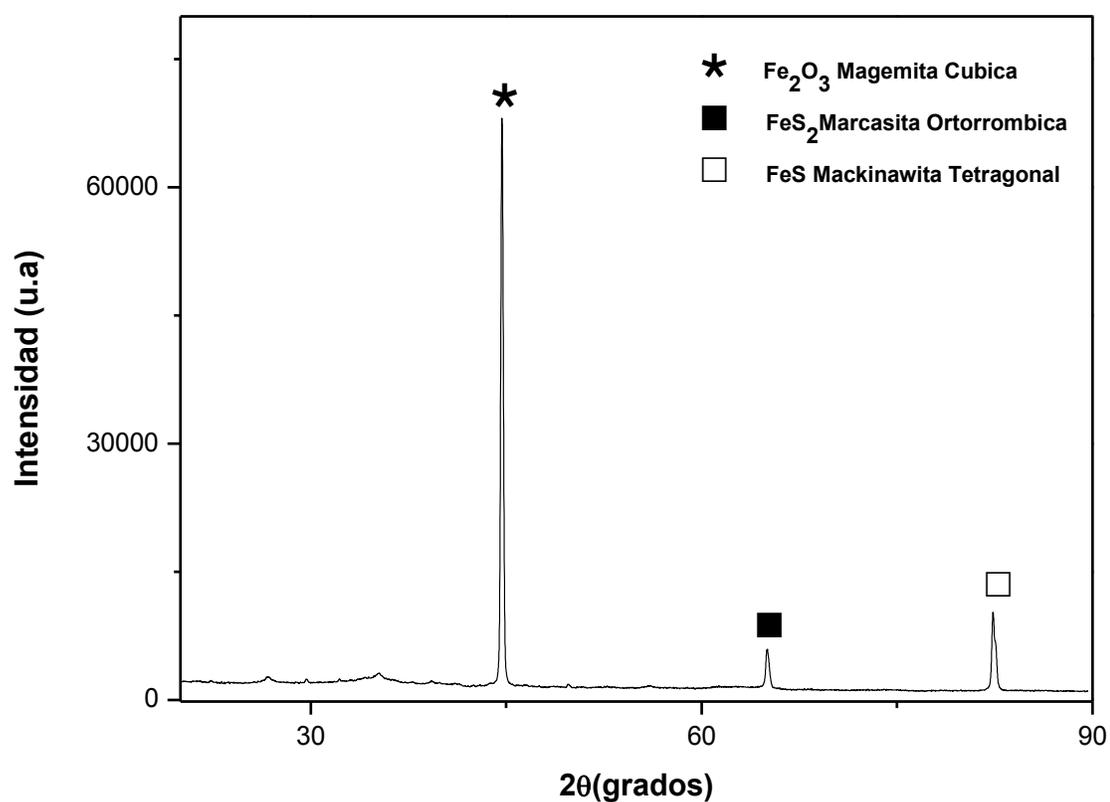


Figura 31. Difractograma de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X65 para el ángulo de 30° con una velocidad de flujo de 18 l/min.

El mejor comportamiento de la velocidad de corrosión (Figura 20) para el ángulo 60° se atribuye a la formación de mayores especies cristalinas formadas en la superficie tal como se observa en la Figura 32.

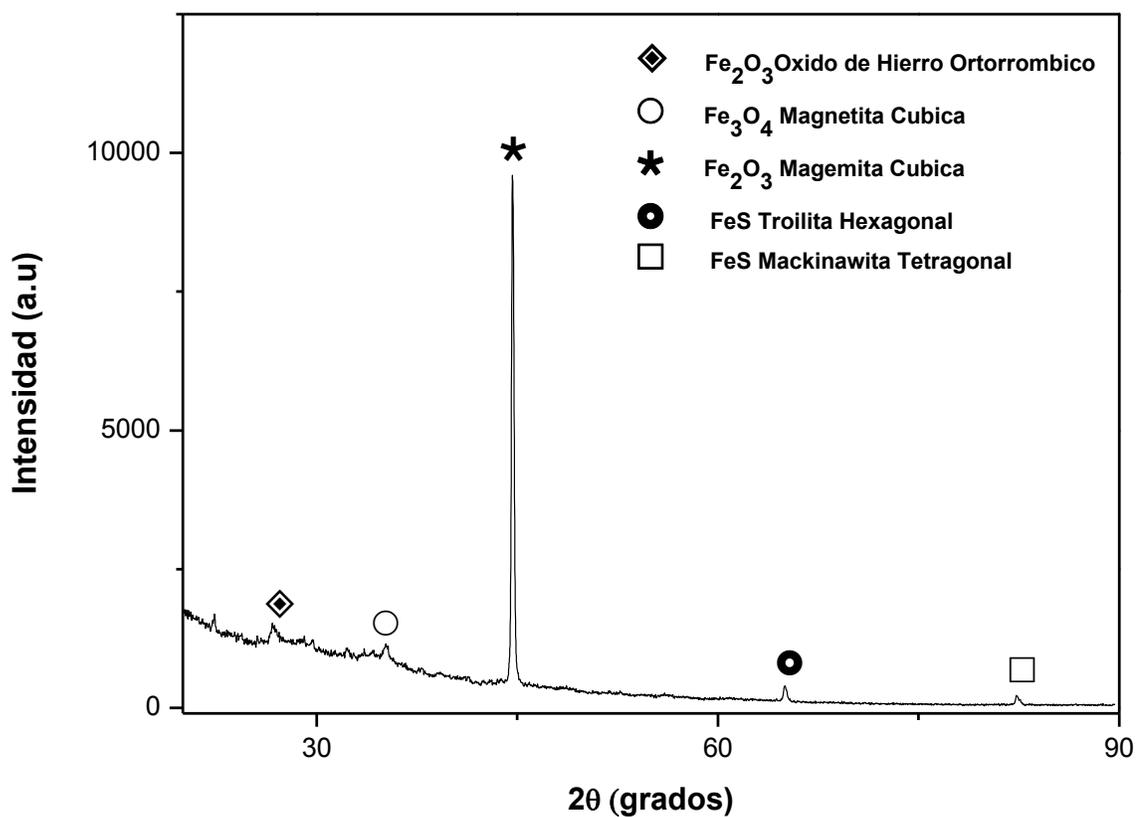


Figura 32. Difractograma de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X65 para el ángulo de 60° con una velocidad de flujo de 18 l/min.

La Figura 33 muestra los productos de corrosión para el ángulo de 90° a 18 l/min donde se tiene una mayor predominancia de sulfuros principalmente marcasita ortorrómbica y mackinawita tetragonal, siendo la mackinawita tetragonal la base precursora ^[19] donde crecen los productos de corrosión y la marcasita ortorrómbica se asume como un producto de corrosión coadyuvante en el control de la velocidad de corrosión ^[33], tal como se muestra en la Figura 20.

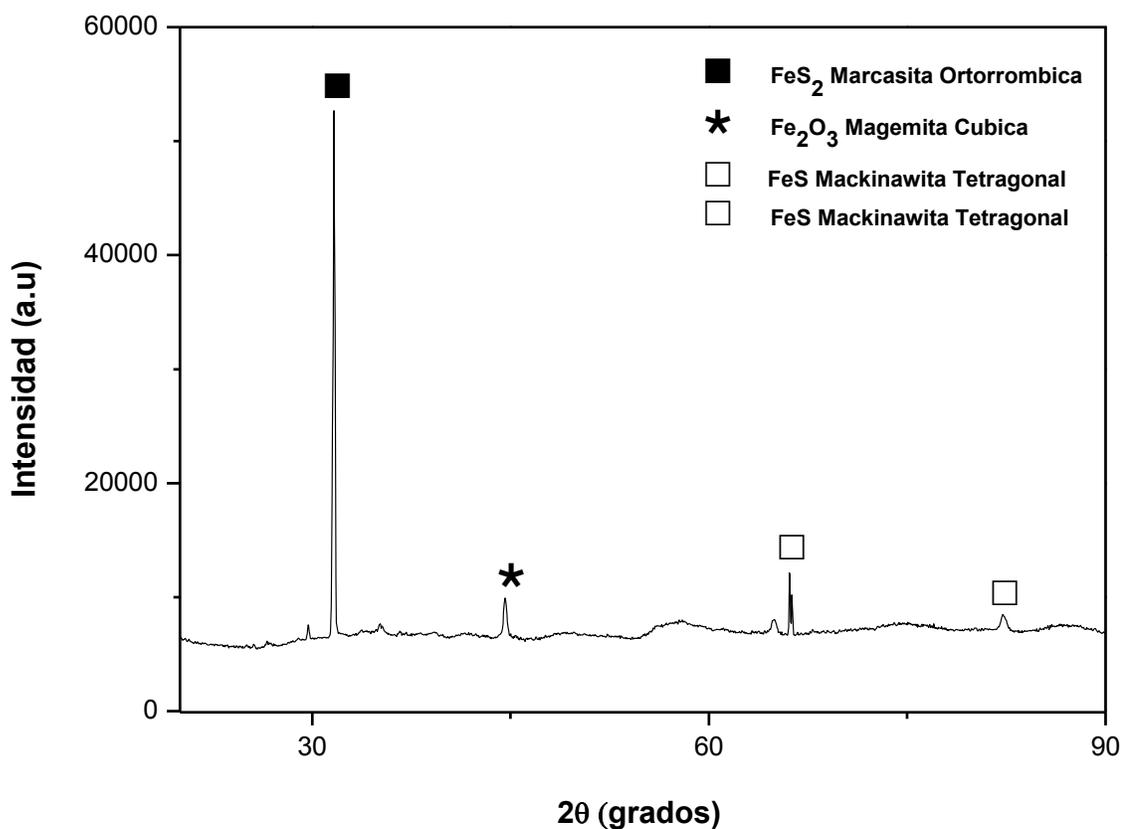


Figura 33. Difractograma de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X65 para el ángulo de 90° con una velocidad de flujo de 18 l/min.

En la Tabla 16 se muestra una comparación general de las especies cristalinas formadas en los productos de corrosión del acero API 5L X65 para diferentes condiciones utilizadas durante la presente investigación.

Tabla 16. Análisis comparativo de los productos de corrosión formados en la superficie del acero API 5L X65 en un ángulo de impacto de 30°, 60° y 90°.

Acero API 5L X65						
Producto de corrosión	8 l/min			18 l/min		
	30°	60°	90°	30°	60°	90°
Magemita Cubica (Fe_2O_3)	X	X	X	X	X	X
Óxido de Hierro β -Cubica (Fe_2O_3)	X					
Marcasita Ortorrómbica (FeS_2)	X		X	X		X
Mackinawita Tetragonal (FeS)	X	X	X	X	X	X
Óxido de Hierro Ortorrómbico (Fe_2O_3)		X			X	
Magnetita Cubica (Fe_2O_3)		X	X		X	
Hematita Cubica (Fe_2O_3)		X				
Troilita Hexagonal (FeS)		X			X	

Una mayor presencia de óxidos favorece el incremento de la velocidad de corrosión y la presencia de sulfuros la disminuye debido a la mayor acción protectora que presentan. ^[19-33]

3.9 Resultados del análisis de la superficie de los cupones después de la limpieza.

Después de someter los cupones a una remoción de los productos de corrosión mediante un baño ultrasónico con el uso del reactivo hexameten-tetramina en solución de agua destilada y ácido clorhídrico, el cual ha sido utilizado como reactivo de limpieza ^[31]. Se realizó la caracterización de la superficie de los cupones con el microscopio electrónico de barrido (MEB) con la finalidad de analizar el tipo de ataque o daño generado en la superficie del acero API 5L X65.

En la Figura 34 muestra la remoción de los productos de corrosión para un flujo de 8 l/min a 25X magnificaciones, donde se observan remanentes de los productos de corrosión, a 50X magnificaciones se aprecia una mayor adherencia de los productos de corrosión. Finalmente, a 1500X magnificaciones se aprecia una disolución de la fase ferrítica con presencia de remanentes de los productos de corrosión.

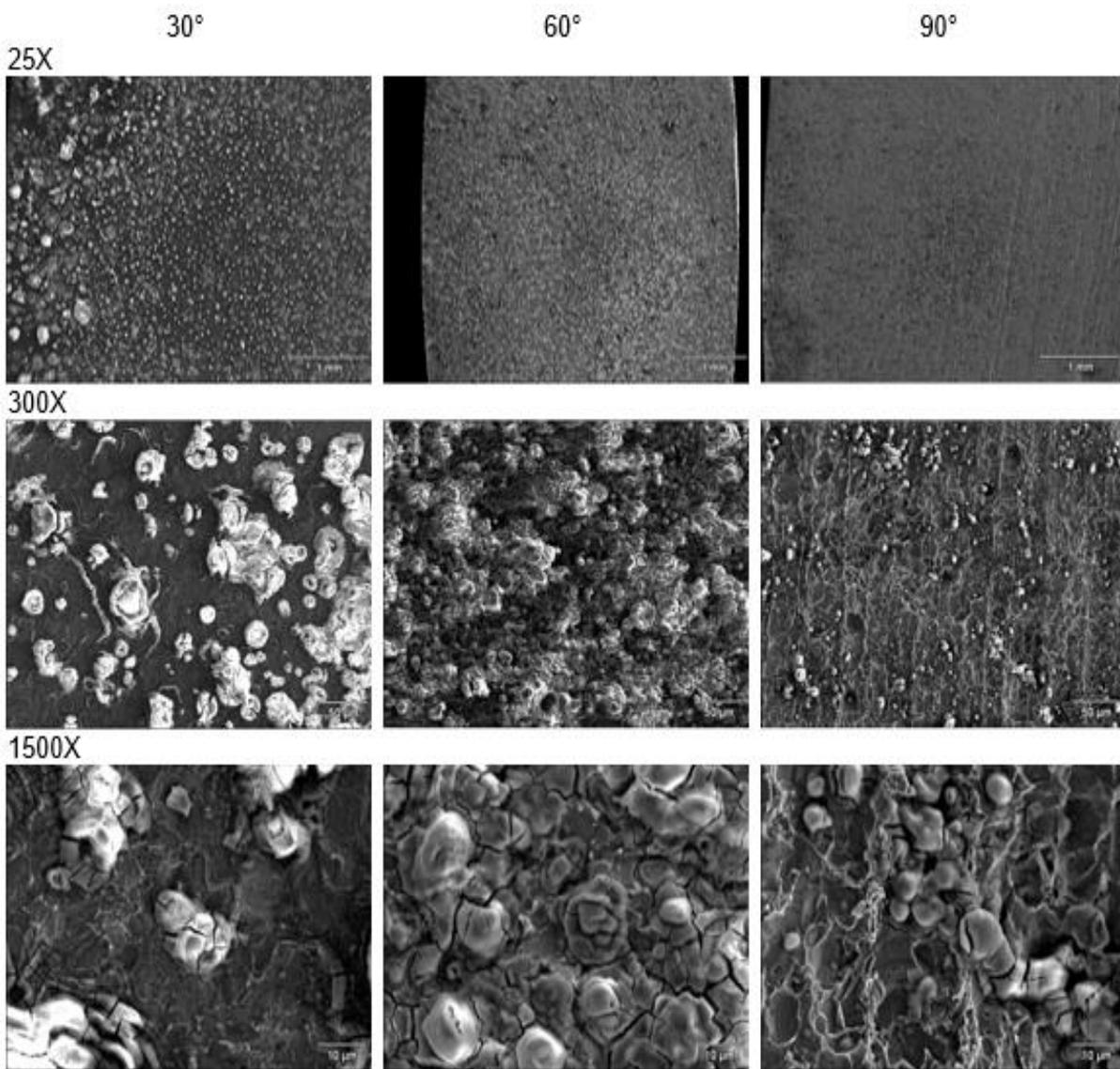


Figura 34. Micrografía de la superficie de los cupones de acero API 5L X65 colocados a 30°, 60° y 90° a una velocidad de flujo de 8 l/min.

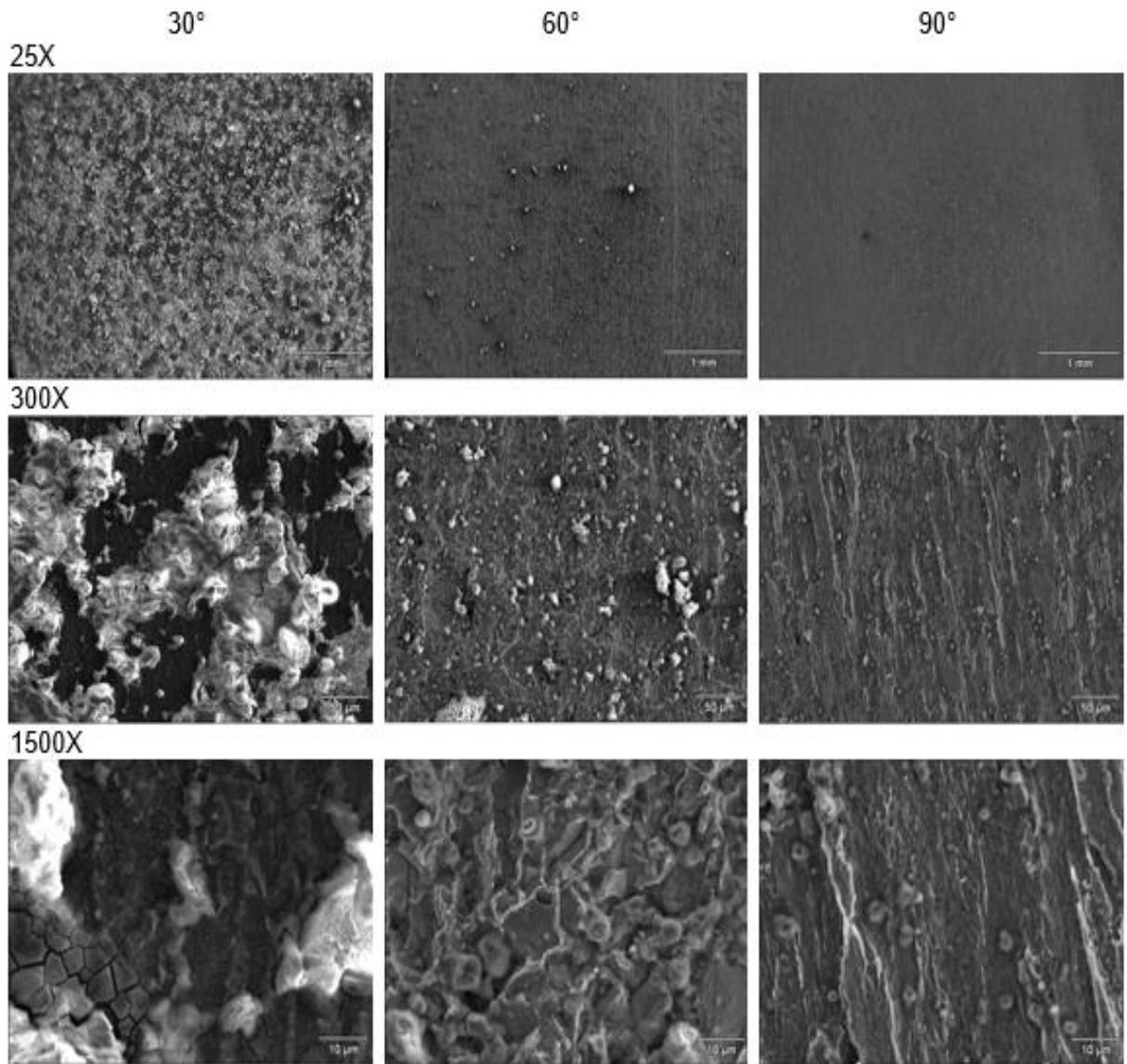


Figura 35. Micrografía de la superficie de los cupones de acero API 5L X65 colocados a 30°, 60° y 90° a una velocidad de flujo de 18 l/min.

La Figura 35 muestra los cupones que estuvieron sometidos a una velocidad de flujo de 18 l/min después de la remoción de los productos de corrosión formados. A 25X magnificaciones se observan remanentes de los productos de corrosión, teniendo una mayor presencia a 30°. A 300X y 1500X magnificaciones, se observa a detalle el ataque sobre la superficie y una mayor disolución del acero específicamente para los ángulos de 60° y 90°. Por otro lado, se observa un daño superficial causado por picaduras debido a una mínima presencia de estas.

3.10 Análisis comparativo del acero API 5L X-65 con respecto a los aceros API 5L.

De acuerdo a los resultados obtenidos por el grupo de trabajo ^[35-36] se decide hacer una comparación con los resultados obtenidos con los aceros API 5L X70 (tradicional) y API 5L X70 NG (nueva generación) para evaluar el mejor comportamiento con respecto a la velocidad de corrosión a las mismas condiciones experimentales.

3.10.1 Efecto de la velocidad de corrosión para el ángulo de 60° y a 8 l/min.

En la Figura 36 se muestran los resultados de la velocidad de corrosión en función del tiempo de exposición en un medio amargo (H₂S). De manera general se observa que los aceros X65 y X70 NG presentan un incremento de la velocidad de corrosión, pero hasta cierto tiempo de exposición, ya que conforme transcurre el tiempo de exposición la velocidad de corrosión tiende a disminuir. Para el caso de X70 T la velocidad de corrosión tiende a disminuir, presentando un mejor comportamiento a estas condiciones (8 l/min y 60°). Este comportamiento se atribuye a una mayor gama de especies cristalinas de los productos de corrosión siendo mayor proporción la presencia de sulfuros.

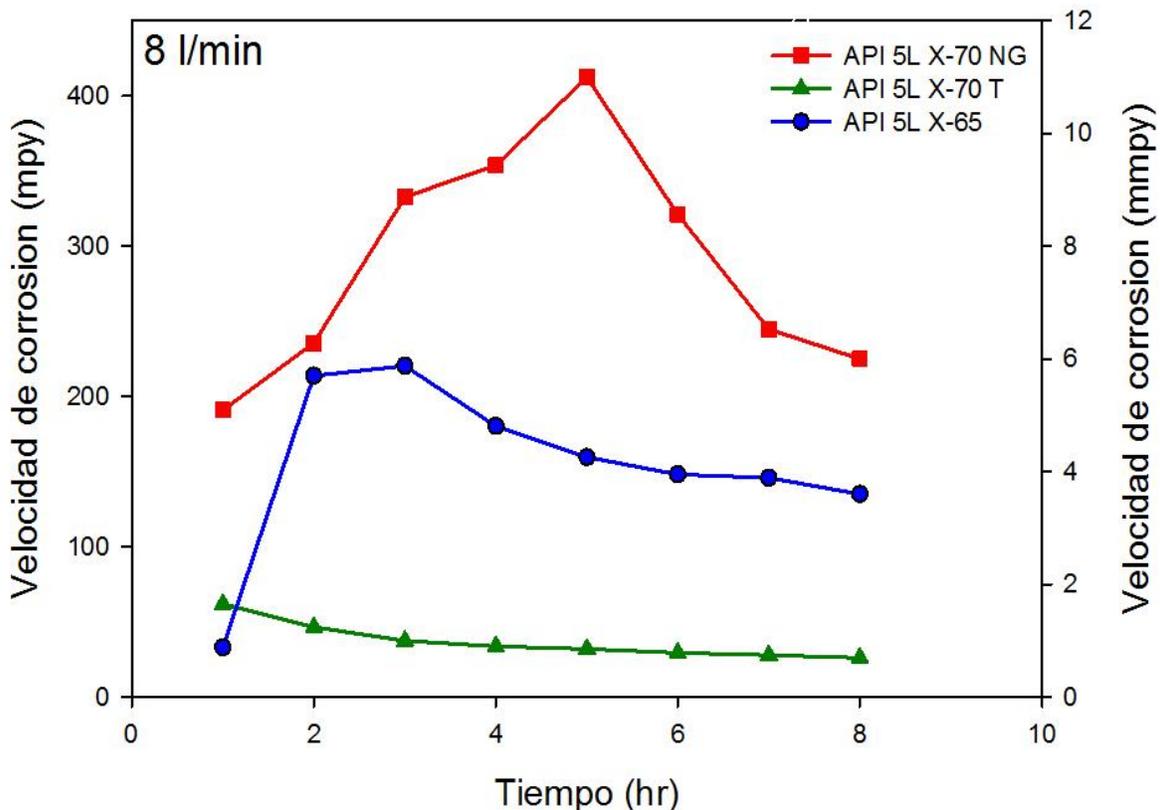


Figura 36. Velocidad de corrosión para una velocidad de flujo de 8 l/min con un ángulo de impacto de 60° a un tiempo de 8 horas en tres aceros grado API.

3.10.2 Efecto de la velocidad de corrosión para el ángulo de 90° y a 18 l/min.

En la Figura 37 muestra de manera general un incremento de la velocidad de corrosión independientemente del acero. Sin embargo, conforme transcurre el tiempo, el acero que tiene un mejor comportamiento es el acero API 5L X-65, sin embargo, al final de la prueba el acero API 5L X-65 y 70 T coinciden en un punto a las ocho horas donde la velocidad de corrosión es de 95.4276 mpy donde casi las velocidades de corrosión son las mismas. Este comportamiento se atribuye a que ambos aceros tienden a formar mayor presencia de sulfuros los cuales resultan ser productos más adherentes y por ende proporcionan una mayor protección.

A pesar que el acero X70 NG es de los aceros de última generación por el bajo contenido de carbono este no presenta un buen comportamiento, debido a que forma principalmente óxidos como productos de corrosión los cuales resultan ser menos adherentes y protectores.

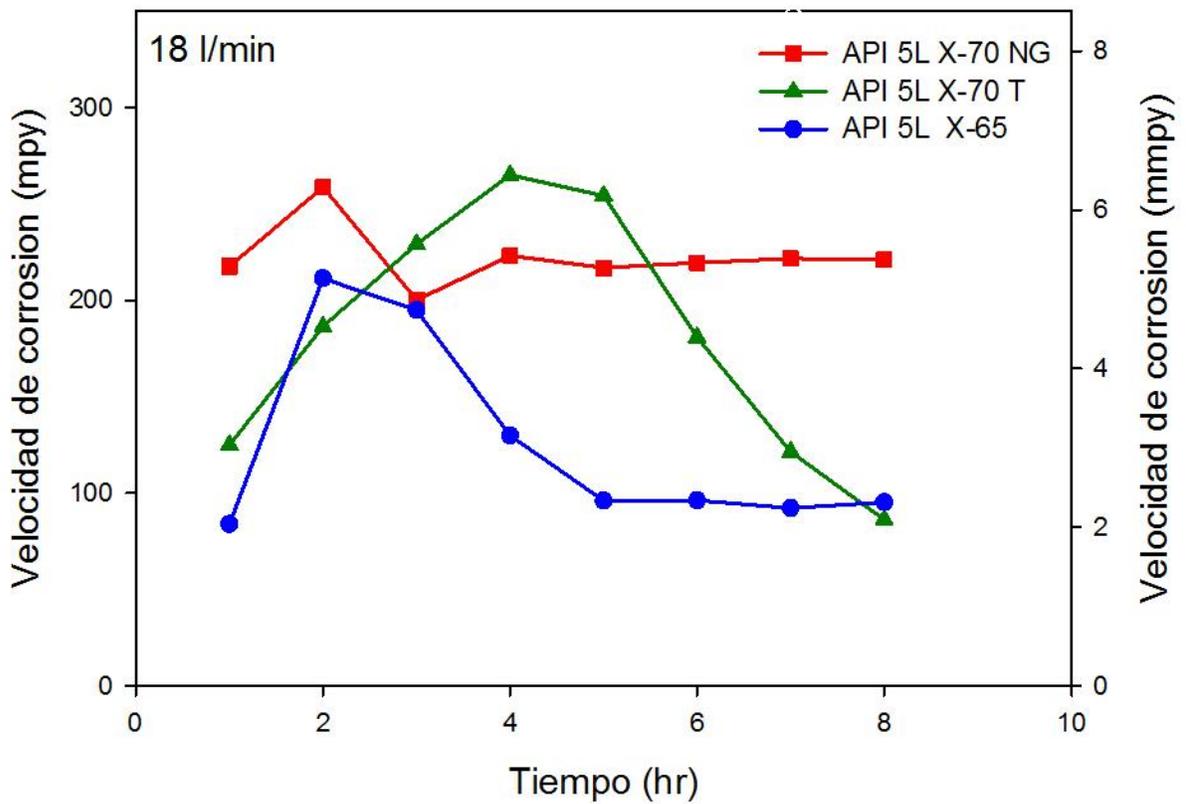


Figura 37. Velocidad de corrosión para una velocidad de flujo de 18 l/min con un ángulo de impacto de 90° a un tiempo de 8 horas en tres aceros grado API.

Conclusiones

- El mejor comportamiento con respecto a la velocidad de corrosión lo presenta el ángulo de 60° a 8 l/min, debido a la formación de una mezcla de óxidos y sulfuros, pero especialmente los sulfuros de mackinawita y troilita colaboran de manera importante ya que son productos considerados como buenos protectores.
- El mejor comportamiento con respecto a la velocidad de corrosión es el ángulo de 90° a 18 l/min, debido a la formación de una mezcla de óxidos y sulfuros, pero con una mayor presencia de estos últimos, particularmente la marcasita la cual resulta ser también un buen protector.
- La formación de triolita y marcasita son especies cristalinas que actúan de manera conjunta con la mackinawita para una buena labor de protección en la colaboración de los óxidos que llegan a formarse.
- Al analizar los tres aceros a las condiciones de 8 l/min para el ángulo de 60° el acero que presenta el mejor comportamiento es el API 5L X-70 tradicional. Este comportamiento se atribuye a la formación de una mayor gama de especies cristalinas de los productos de corrosión siendo mayor proporción la presencia de sulfuros.
- Para el caso de 18 l/min y un ángulo de 90° el mejor comportamiento muy estrecho. Este comportamiento es debido a que los dos forman una mayor proporción de sulfuro.
- De manera general se observa que el acero API 5L X65 presenta un mejor comportamiento con respecto a los aceros API 5L X70T y X70 NG debido a que presenta menos velocidades de corrosión.

Referencias

- [1] The Oil & Gas Year. “ The Who’s Who of the Global Energy Industry” (México 2012) 171.
- [2] C. Ren, D. Liu, Z. Bai, T. Li “Corrosion behavior of oil tube Steel in simulant solution with hydrogen sulfide and carbon dioxide”. *Materials Chemistry and Physics* 93 (2005) 305-309.
- [3] J. Amri, E. Gulbrandsen, R. P. Nogueira “The effect of acetic acid on the pit propagation in CO₂ corrosion of carbon steel”. *Electrochemistry Communications* 10 (2008) 200-2003.
- [4] M. Koteeswaran, “CO₂ and H₂S corrosion in pipelines”, M.S. Thesis, University of Stavanger, 2010.
- [5] Muhammed Nauman Zafar, Rihan Rihan. “Evaluation of the corrosion resistance of SA-543 and X65 Steels in emulsions containing H₂S and CO₂ using a novel emulsion flow loop”. *Corrosion Science* (2015) 275-287.
- [6] G.A. Zhang, Y.F. Cheng. “Electrochemical characterization and computational fluid dynamics simulation of flow-accelerated corrosion of X65 steel in a CO₂-saturated oilfield formation water”. *Corrosion Science*. (2010) 2716-2724.
- [7] M.C. Gonzalez Videgaray “ Modelos y simulacion”.Primera edicion, Universidad Nacional Autonoma de Mexico CU, Mexico, D.F. (1996) 7-8.
- [8] M. Fontana “Corrosion Engineering” Mc. Graw Hill 1986.
- [9] R.W. Revie. Uhlig’s “Corrosion Handbook”. Editorial John Wiley & Sons Inc., 2a. Ed., 2000.
- [10] E.E. Buchanan, R.A. Stansbury, “Fundamentals of electrochemical corrosion”, ASM International. The materials information society. Ohio: Department of Materials Science and Engineering, 2000.
- [11] A. C. Peraza, Y. R. Villalta “ Evaluacion de corrosion por CO₂ y erosion en lineas de flujos de pozos ubicados en campo quirique en el oriente de Venezuela” Tesis de licenciatura, Escuela de Ingenieria y Ciencias aplicadas- Universidad de Oriente Nucleo de Anzoátegui (2009).

-
- [12] F. Almeraya, "Técnicas electroquímicas. Memorias II Congreso Internacional de Materiales y VI Congreso Nacional de Corrosión y Protección", CITEMA-UIS, Bucaramanga, Agosto, 2003.
- [13] José Biomorgi, Samuel Hernández, Jairo Marín. "Evaluación de los mecanismos de corrosión presentes en las líneas de producción de crudo y gas ubicadas en el noroeste de Venezuela". *Rev. LatinAm. Metal. Mat.* (2012) 96-106.
- [14] J. Ning, Y. Zheng, D. Young, B. Brown, S. Nestic, "A Thermodynamic Study of Hydrogen Sulfide Corrosion of Mild Steel", NACE international, 2013. Houston, Texas.
- [15] L.L. Shreir, R.A. Jarman, G. T. Burstein. "Corrosion Control". Editorial Butterworth Heinemann. Vol. 2, 3a Ed., 1994.
- [16] J. O. Robinson, T. Drews. "Resolving Flow-Accelerated Corrosion problems in the industrial steam plant". *Corrosion* 99, Paper No. 346. 1999.
- [17] Marvin D. Silvert "Flow-Accelerated Corrosion in Water Systems". Marvin Silbert and associates. *The Analyst*. 2002. pp 25-29.
- [18] J.S. Smith and J.D.A. Miller "Nature of Sulphides and their corrosive effect on ferrous metals: a Review. *Corrosion Journal*. Vol 10, No. 3. 1975.
- [19] Pengpeng Bai, Shuqi Zheng, "Investigation of the iron-sulfide phase transformation in Nanoscale. *Crystal Growth & Design*", (2014), 4295-4302.
- [20] J. Sonka, M. Jerome, M. Sonansk, P. Vanova, "Role of Microstructure and Testing conditions in sulphide stress cracking of X52 and X60 steels", *Material science and engineering A* 480 (2008), p. 237-243.
- [21] B. C. Galicia Amaro. "Efecto del flujo del ácido Sulhídrico en el comportamiento electroquímico del proceso de corrosión de un acero 1018 en salmueras saturadas con CO₂", Tesis de Maestría UNAM 2013.
- [22] D. Ricard, G. Luther, "Chemistry of Iron sulfides", *Chemical Reviews*; Vol. 107, pp. 514-562, 2007.
- [23] Robert L. Mott "Mecanica de Fluidos Aplicada" 4ta Edición, Ed. Pearson. Cap. 8 "Número de Reynolds. Flujo Laminar y Turbulento", 1996.

[24] ASM International, Metals Handbook, Volume 1, "Properties and selection: Irons Steels and High Performance Alloy", Carbon Steels, Pag. 356.

[25] Donald R. Askeland, "Designaciones y clasificaciones de aceros", Ciencia e ingeniería de materiales (Sexta edición), CENGAGE Learning, Pag. 494.

[26] API Specification 5L, Specification for Line Pipe, Forty Third Edition, March 2004.

[27] T. Ohki, M. Tanimura, "Effect of inclusion on sulphide stress cracking", ASTM STP 610, American Society for Testing and Materials, 1970.

[28] NACE 1D 196 Laboratory Test Methods for evaluation oilfield corrosion inhibitors. Houston TX: NACE, 1996 1996.

[29] S. Uchida, S. Naitoh, M. Okada, H. Uehara, K. Seiichi, "Evaluation of flow accelerated corrosion by couple analysis of corrosion and flow dynamics. Relationship of oxide film thickness, hematite/magnetite ratio, ECP and wall thinning rate". Nuclear Engineering and Design. 241. 2011. pp. 4585-4593.

[30] M. Naitoh, S. Koshizuka, S. Uchida, H. Okada, Y. Uehara, D. Lister. "Evaluation of Flow Accelerated Corrosion of PWR Secondary Piping by Coupling Analysis of Corrosion and Flow Dynamics". NACE International Corrosion Conference and Expo paper. 09468. 2009.

[31] A. Cervantes, Corrosión acelerada por flujo en aceros para ductos y equipos que transportan hidrocarburos. Tesis doctoral ESQIE-IPN, 2015.

[32] S. Seal, K. Sapre, A. Kale, V. Desai, M. Gopal, P. Jepson, "Effect of multiphase flow on corrosion of C-steel in presence of inhibitor: a surface morphological and chemical study", Corrosion Science, Vol 42, 2000, pp 1623-1634.

[33] J. Ning, Y. Zheng, D. Young, B. Brown, S. Nestic, A Thermodynamic Study of Hydrogen Sulfide Corrosion of Mild Steel, NACE international, 2013. Houston, Texas.

[34] J. E. Padilla Pineda. Evaluación de la corrosión interna generada por el Sistema H₂O-CO₂-H₂O en gasoductos. Tesis de maestría, Colombia, 2012.

[35] A. Galván, “Estudio de la corrosión asistida por flujo en zonas de cambio de dirección en tuberías de acero”. Tesis de maestría ESIQIE-IPN (2015).

[36] F. García, “Determinación de la velocidad de corrosión para un acero API 5L X70 nueva generación en una cámara de impacto”. Tesis de licenciatura ESIQIE-IPN (2017).

Apéndice A

Número de Reynolds.

Para la determinación del número de Reynolds en secciones circulares se ocupa la Ec. 1.1

$$N_{Re} = \frac{v \times D \times \rho}{\mu} \quad (1.1)$$

Donde:

- v : Velocidad del fluido (m/s)
- D : Diámetro del círculo (m)
- ρ : Densidad del fluido (kg/m³)
- μ : Viscosidad del fluido (ms/kg)

Calculo para el número de Reynolds

8 l/min

v : 1.05 m/s

D : 0.0088 m

ρ : 1062.9 kg/m³

μ : 2.5×10^{-3} kg/ms

$$N_{Re} = \frac{1.05 \times 0.005 \times 1062.9}{2.5 \times 10^{-3}}$$

$$N_{Re} = 2232.09$$

18 l/min

v : 2.36 m/s

D : 0.0088 m

ρ : 1062.9 kg/m³

μ : 2.5×10^{-3} kg/ms

$$N_{Re} = \frac{2.36 \times 0.005 \times 1062.9}{2.5 \times 10^{-3}}$$

$$N_{Re} = 5016.888$$

Apéndice B

Composición química

- Acero API 5L X70 T (tradicional)

Acero	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Ni	Fe
API 5L X70 T	0.240	1.081	0.284	0.019	0.021	0.156	0.185	0.088	97.8

- Acero API 5L X70 NG (nueva generación)

Acero	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Ni	Fe
API 5L X70 NG	0.048	0.927	0.222	0.004	0.015	0.017	0.279	0.005	98.4

Apéndice C

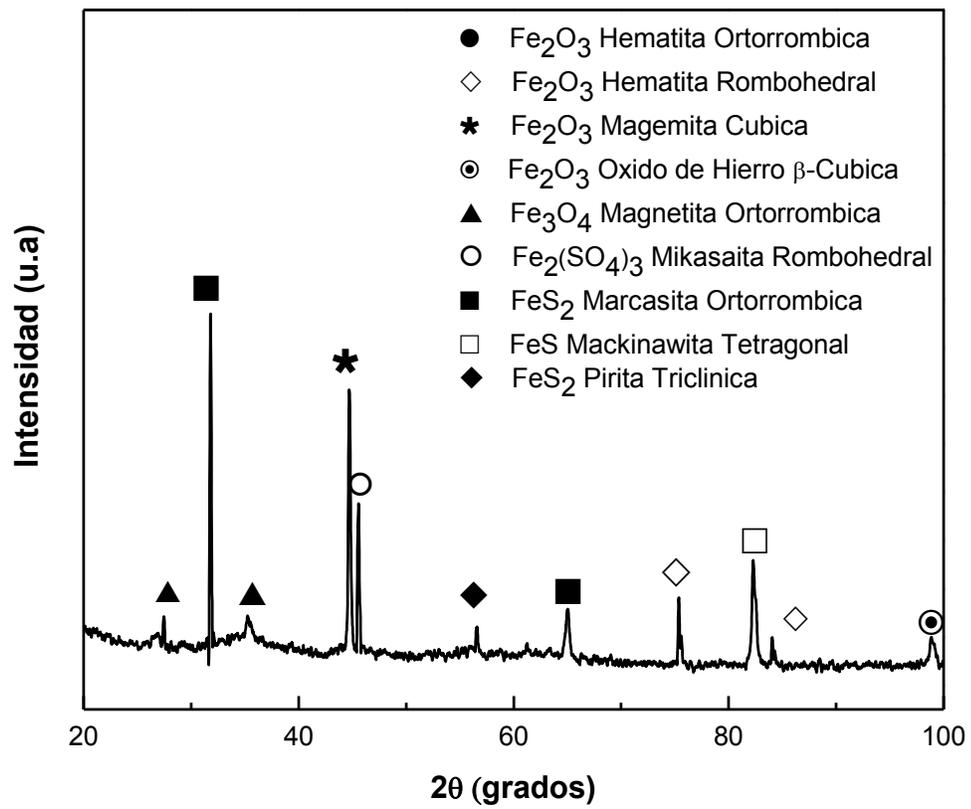
- Análisis comparativo de los productos de corrosión formados en la superficie del acero API 5L X70 T

Acero API 5L X70 T						
Producto de corrosión	8 l/min			18 l/min		
	30°	60°	90°	30°	60°	90°
Magemita Cubica (Fe_2O_3)	X	X	X	X	X	X
Magnetita Ortorrombica (Fe_3O_4)	X	X	X			
Óxido de Hierro β -Cubica (Fe_2O_3)		X	X	X	X	X
Marcasita Ortorrombica (FeS_2)	X	X	X	X	X	X
Mackinawita Tetragonal (FeS)	X	X	X	X	X	X
Mikasaita Rombohedral ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)	X	X	X			
Hematita Ortorrombica (Fe_2O_3)		X	X			
Hematita Rombohedral (Fe_2O_3)		X	X			
Pirita Triclinica (FeS)		X	X			

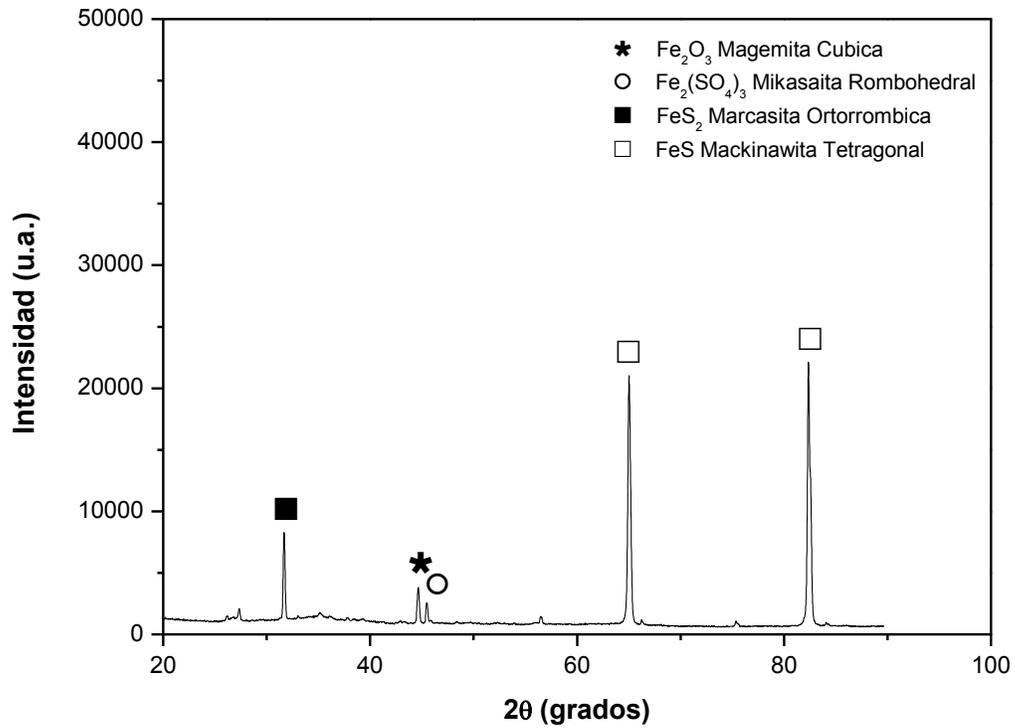
- Análisis comparativo de los productos de corrosión formados en la superficie del acero API 5L X70 NG

Acero API 5L X70 NG						
Producto de corrosión	8 l/min			18 l/min		
	30°	60°	90°	30°	60°	90°
Magemita Cubica (Fe_2O_3)	X	X	X	X	X	X
Magnetita Cubica (Fe_3O_4)	X					
Magnetita Ortorrombica (Fe_3O_4)	X					
Marcasita Ortorrombica (FeS_2)	X	X	X	X	X	
Mackinawita Tetragonal (FeS)	X	X	X	X	X	X
Mikasaita Rombohedral ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)		X				

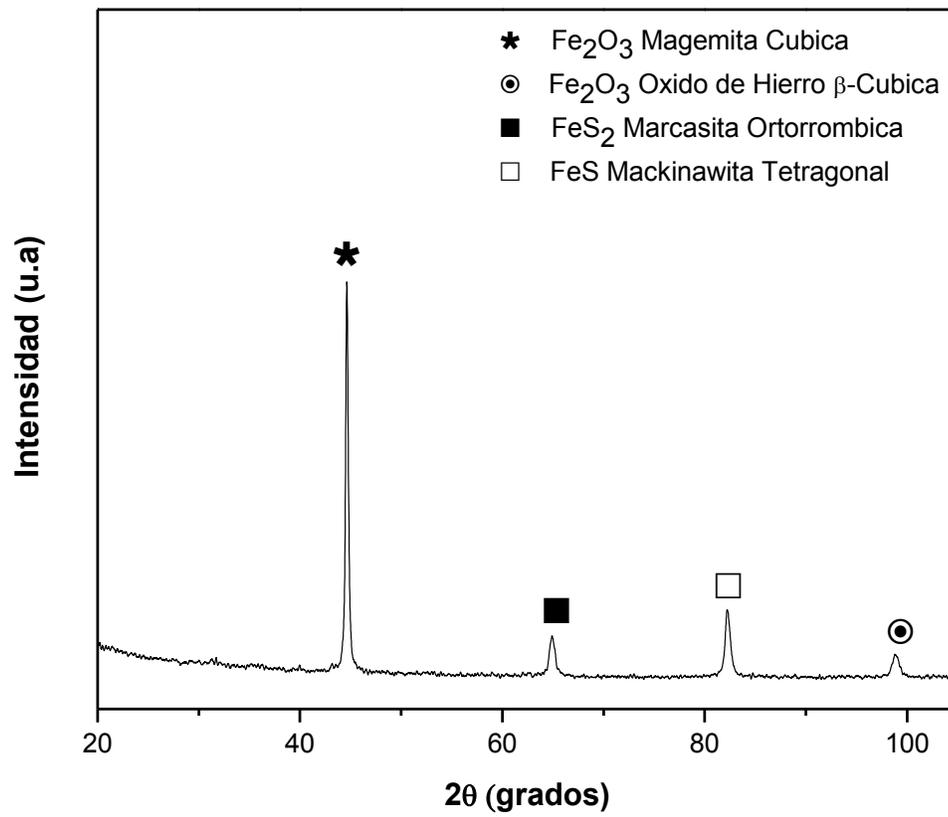
-
- Difractogramas del acero API 5L X70 T a 8 l/min para un ángulo de impacto de 60°



- Difractogramas del acero API 5L X70 NG a 8 l/min para un ángulo de impacto de 60°



-
- Difractogramas del acero API 5L X70 T a 18 l/min para un ángulo de impacto de 90°



- Difractogramas del acero API 5L X70 NG a 18 l/min para un ángulo de impacto de 90°

