



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E  
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN  
METALURGIA Y MATERIALES

“DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN  
POR EL MÉTODO DE RESISTENCIA A LA  
POLARIZACIÓN EN ACEROS API 5L X52 Y X65”

TESIS

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

PRESENTA

C. MARCO ANTONIO PALOMO AVIÑA

DIRECTORES DE TESIS:

DRA. MANUELA DÍAZ CRUZ  
DR. JORGE LUIS GONZÁLEZ VELÁZQUEZ

CIUDAD DE MÉXICO, FEBRERO 2017



T-168-16

Ciudad de México, 22 de noviembre del 2016.

Al C. Pasante:  
**MARCO ANTONIO PALOMO AVIÑA**

Boleta:  
**2012320646**

Carrera:  
**IMM**

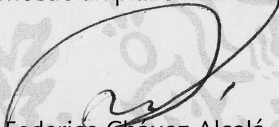
Generación:  
**2011-2015**

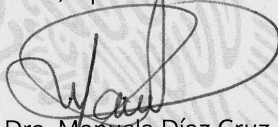
Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica a través de este Departamento autoriza que la C. **Dra. Manuela Díaz Cruz** y el C. **Dr. Jorge Luis González Velázquez**, sean asesores en el tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Individual**,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

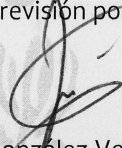
**“Determinación de la velocidad de corrosión por el método de resistencia a la polarización en aceros API 5L X52 y X65”.**

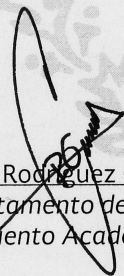
Resumen.  
Introducción.  
I.- Estado del arte y marco teórico.  
II.- Desarrollo experimental.  
III.- Resultados y discusión de resultados.  
Conclusiones.  
Referencias.

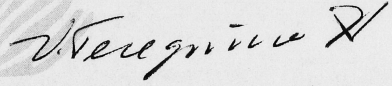
Se concede un plazo máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el Jurado asignado.

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

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

  
Dr. Jorge Luis González Velázquez  
Director de Tesis  
Ced. Prof. 1173240

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

  
Ing. Víctor Manuel Feregrino Hernández  
Subdirector Académico



**T-168-16**

Ciudad de México, a 6 de diciembre de 2016

Al C. Pasante:  
**MARCO ANTONIO PALOMO AVIÑA**  
**PRESENTE**

Boleta:  
**2012320646**

Carrera:  
**IMM**

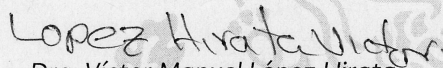
Generación:  
**2011-2015**

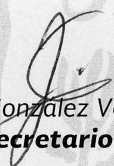
Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:


**“Determinación de la velocidad de corrosión por el método de resistencia a la polarización en aceros API 5L X52 y X65”.**

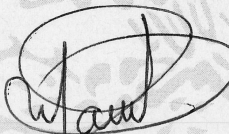
encontramos que el citado Trabajo de **Tesis Individual**, reúne los requisitos para autorizar el Examen Profesional y **PROCEDER A SU IMPRESIÓN** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.


Atentamente  
**JURADO**

  
Dra. Víctor Manuel López Hirata  
**Presidente**

  
Dr. Jorge Luis González Velázquez  
**Secretario**

  
Dr. José Federico Chávez Alcalá  
**1er. Vocal**

  
Dra. Manuela Díaz Cruz  
**2do. Vocal**

  
Dr. Román Cabrera Sierra  
**3er. Vocal**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por permitirme completar esta etapa en mi vida académica, darme los conocimientos y fuerzas para salir adelante. Por cuidar de mí y de todas las personas que me rodean, gracias padre divino.

A mis padres y hermano

Porque al inicio de mi vida académica ustedes también fueron mis profesores y que ahora yo puedo regresar con creces todos los conocimientos que adquirí, sin su apoyo nada de esto sería posible.

A mis directores de tesis y sinodales

No solo como directores y sinodales pues las maravillas que descubrí en el aula bajo su batuta me permitieron continuar en el camino de la metalurgia.

AL IPN y a ESIQIE

Por permitirme pertenecer a tan gloriosa institución y brindarme su apoyo para el aprendizaje y la investigación.

A mis amigos y compañeros de la carrera

A todas las personas que conocí en el camino y que me ayudaron a salir adelante con su lealtad, superación, y compañerismo. Es un placer y un privilegio haber conocido a tan magníficas personas, gracias.



## Dedicatoria

A mis padres Marco Antonio Palomo y Ana Belém Aviña

PARA TODAS LAS PERSONAS QUE CREYERON EN MÍ,  
TAMBIÉN CREAN EN USTEDES.

# ÍNDICE

<b>Lista Figuras.</b>	ii
<b>Lista tablas.</b>	iv
<b>Resumen.</b>	v
<b>Introducción..</b>	1
<b>Capítulo 1 Estado del arte y marco teórico.</b>	2
1.1 Definición de la corrosión.	2
1.1.1 Corrosión acelerada por flujo.	3
1.2 Corrosión por H <sub>2</sub> S.	5
1.3 Resistencia a la polarización.	6
1.3.1 Relación de la Resistencia a la polarización (Rp) y la velocidad de corrosión (Vcorr).	9
1.4 El circuito experimental para tubería (CET).	11
1.5 Tipos de flujo.	11
1.5.1 Cálculo del número de Reynolds.	13
1.6 Aceros API 5L empleados en el transporte por ducto de hidrocarburos.	14
1.7 Simulación matemática del efecto de fluido.	17
<b>Capítulo 2 Desarrollo Experimental.</b>	18
2.1 Experimentación.	18
2.2 Equipo y Materiales.	19
2.3 Diseño de coples y probetas.	21
2.3.1 Diseño, fabricación y nomenclatura de las probetas metálicas.	23
2.4 Ensamble y nomenclatura de los coples porta probeta.	24
2.5 El medio.	25
2.6 Condiciones experimentales.	26
2.7 Resistencia a la polarización.	26
2.8 Simulación numérica.	27
2.9 Caracterización de los productos de corrosión.	27
<b>Capítulo 3 Resultados y discusión de resultados.</b>	29
3.1 Caracterización microestructural de los aceros grado API 5L X52 Y X65.	29
3.2 Composición química de los aceros empleados.	30
3.3 Determinación de la velocidad de corrosión por Resistencia a la Polarización (Rp).	31
3.4 Caracterización de los productos de corrosión mediante el uso de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).	38
3.5 Caracterización de los productos de corrosión mediante el uso de Difracción de Rayos X (DRX).	50
3.6 Análisis del efecto de flujo de fluido en las probetas.	57
<b>Conclusiones.</b>	59
<b>Bibliografía.</b>	60
<b>Apéndice A.</b>	63

---

---

## Lista de Figuras

1.1 Clasificación de la corrosión. . . . .	3
1.2 Representación esquemática del mecanismo del FAC en un acero. . . . .	4
1.3 Representación del análisis de polarización lineal. . . . .	7
1.4 Pendientes de Tafel. . . . .	8
1.5 Comparación de flujo laminar y flujo turbulento. . . . .	13
2.1 Diagrama de la metodología usada. . . . .	18
2.2 Circuito experimental de Tubería. . . . .	20
2.3 Esquema del material y equipo experimental. . . . .	20
2.4 Modelo en Solid Works del cople de teflón; Esquema de las posiciones de las probetas utilizadas. . . . .	21
2.5 Vista isométrica de la probeta. . . . .	22
2.6 Esquema de la zona de trabajo crítica. . . . .	22
2.7 Diámetro de la sección de prueba en una vista frontal; Área expuesta de la probeta presentada en una vista superior. . . . .	23
2.8 Arreglo de los cupones dentro del cople. . . . .	25
2.9 Modelo matemático de las probetas en el CET que serán sujetas a simulación. . . . .	27
2.10 Microscopio Electrónico de Barrido; Difractómetro. . . . .	28
3.1 Metalografías de los aceros API 5L X52 Y X65 atacadas con Nital 3. . . . .	29
3.2 Velocidad de corrosión del acero API 5L X52 para cada una de las posiciones en función del tiempo de exposición. . . . .	32
3.3 Velocidad de corrosión del acero API 5L X65 para cada una de las posiciones en función del tiempo de exposición. . . . .	33
3.4 Relación del potencial de corrosión y la velocidad de corrosión de los aceros en la posición 3. . . . .	34
3.5 Relación del potencial de corrosión y la velocidad de corrosión de los aceros en la posición 6. . . . .	36
3.6 Relación del potencial de corrosión y la velocidad de corrosión de los aceros en la posición 9. . . . .	37
3.7 Micrografía de los aceros API 5L X52 Y X65 en la posición 9 después de tres horas de exposición a 15X. . . . .	38
3.8 Micrografía de los aceros API 5L X52 Y X65 en la posición 9 después de seis horas de exposición a 15X. . . . .	39
3.9 Micrografía de los aceros API 5L X52 Y X65 en la posición 9 después de doce horas de exposición a 15X. . . . .	40

---

---

3.10 Micrografías a 400X de los aceros API 5L X52 Y X65 en la posición 9 a los tres diferentes tiempos de exposición. . . . .	41
3.11 Caracterización puntual de la distribución cuantitativa y cualitativa de los elementos presentes en el acero X52, posición 9, cople P2, a 400X. . . . .	42
3.12 Caracterización puntual de la distribución cuantitativa y cualitativa de los elementos presentes en el acero X65, posición 9, cople P2, a 400X. . . . .	43
3.13 Mapeo de los elementos sobre productos de corrosión del acero API 5L X52 a 400X. . . . .	44
3.14 Mapeo de los elementos sobre productos de corrosión del acero API 5L X65 a 400X. . . . .	45
3.15 Micrografías a 1500X para los aceros API 5L X52 y X65 en la posición 9 a los tres diferentes tiempos de exposición. . . . .	47
3.16 Micrografía de los aceros API 5L X52 a 3000X y X65 a 4000X, en la posición 9 después de 3 horas de exposición. . . . .	48
3.17 Micrografía de los aceros API 5L X52 a 3000X y X65 a 5000X, en la posición 9 después de 6 horas de exposición. . . . .	49
3.18 Micrografía de los aceros API 5L X52 a 3000X y X65 a 4000X, en la posición 9 después de 12 horas de exposición. . . . .	49
3.19 Difractograma del acero API 5L X52 en posición 9 después de 3 horas de exposición. . . . .	50
3.20 Difractograma del acero API 5L X52 en posición 9 después de 6 horas de exposición. . . . .	51
3.21 Difractograma del acero API 5L X52 en posición 9 después de 12 horas de exposición. . . . .	52
3.22 Difractograma del acero API 5L X65 en posición 9 después de 3 horas de exposición. . . . .	53
3.23 Difractograma del acero API 5L X65 en posición 9 después de 6 horas de exposición. . . . .	54
3.24 Difractograma del acero API 5L X65 en posición 9 después de 12 horas de exposición. . . . .	55
3.25 Efecto del flujo de fluido dentro del CET. . . . .	58



---

---

## Lista de Tablas

1.1 Tipos de régimen para un flujo de tubería. . . . .	14
1.2 Requerimientos de tensión uniaxial para PSL 1. . . . .	15
1.3 Requerimientos de tensión uniaxial para PSL 2. . . . .	16
1.4 Requerimientos químicos para PSL 1 en % peso.. . . .	16
1.5 Requerimientos químicos para PSL 2 en % peso.. . . .	17
2.1 Composición química de la salmuera utilizada. . . . .	25
2.2 Condiciones experimentales para cada acero. . . . .	26
3.1 Porcentaje de fases presentes para cada uno de los aceros empleados de la sección superior interna. . . . .	30
3.2 Composición química de los aceros API 5L X52 Y X65. . . . .	31
3.3 Porcentaje peso de la caracterización puntual del acero X52, posición 9, cople P2, a 400X. . . . .	42
3.4 Porcentaje peso de la caracterización puntual del acero X65, posición 9, cople P2, a 400X. . . . .	43
3.5 Compuestos presentes en las probetas en posición 9 de los aceros API 5L X52 Y X65 a diferentes tiempos de exposición. . . . .	56

---

---

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo describir la influencia de la interacción de Salmuera-Keroseno en el fenómeno de Corrosión Asistida por Flujo (FAC), al emplear un medio amargo ( $H_2S$ ). Para llevar a cabo lo anterior se utiliza un sistema denominado "CET" (Circuito Experimental de Tubería), el cual consiste en un sistema de tuberías con probetas diseñadas especialmente que se adapten a la superficie interna del sistema generando una continuidad en ella. Este dispositivo realiza una reproducción a escala de un proceso de transporte de hidrocarburos y es posible presentar fenómenos hidrodinámicos representativos, teniendo cuidado de no sobre pasar las capacidades operativas o de medición y así obtener datos confiables.

En la experimentación se evalúa la velocidad de corrosión y el potencial de corrosión en probetas fabricadas de acero API 5L X52 y X65 en presencia de una salmuera NACE ID-196 (1 bar de  $H_2S$ ) y 10% de keroseno, utilizando la técnica electroquímica de Resistencia a la Polarización ( $R_p$ ). Los productos de corrosión son caracterizados mediante Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Difracción de RayosX (DRX).

De los resultados obtenidos se observa que el acero API 5L X65 presenta un mejor comportamiento en comparación a un X52, ya que se tienen velocidades de corrosión de 5 mmpy para el acero X65 y de 8 mmpy para el acero X52.

Con respecto a la caracterización de los productos de corrosión se tiene la presencia de una mezcla de óxidos y sulfuros, sin embargo en algunos casos se tiene la presencia de un sulfato (mikasaita).

Finalmente, las probetas observadas a través de un estereoscopio muestran similitudes del comportamiento del efecto del fluido en las superficies de las probetas, respecto a la simulación numérica mediante ANSYS Fluent.



---

---

## INTRODUCCIÓN

El estudio de la corrosión en la industria de los hidrocarburos se basa principalmente en el análisis de los efectos del  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  como medio agresivo. Además, se consideran diversas variables de operación o ambientales como son pH, temperatura, medios aireados o desaireados y las velocidades de flujo.<sup>[1]</sup>

También se ha reportado el efecto del flujo como un parámetro que interactúa significativamente en el proceso de corrosión dentro de ductos que transportan hidrocarburos, lo cual origina el FAC por sus siglas en inglés (Flow Accelerated Corrosion). La Corrosión Asistida o Acelerada por Flujo aparece cuando por acción de un fluido con condiciones de régimen de flujo turbulento, disuelve la película o capa protectora de la superficie provocando un adelgazamiento del espesor del material.

Diversos estudios de corrosión se han realizado In situ; sin embargo, la búsqueda de comodidad y eficiencia ha llevado a la investigación a realizar estudios en laboratorio y replicar el comportamiento de las tuberías o ductos y así poder tomar acciones que permitan controlar o reducir la corrosión interna de los mismos.<sup>[2]</sup>

Por lo anterior, es de suma importancia realizar estudios a nivel laboratorio y para lograrlo se ha desarrollado una metodología mediante un modelo físico, el cual consiste de un circuito experimental de tubería "CET", teniendo como objetivo la evaluación de la velocidad de corrosión y el potencial de corrosión mediante la técnica de Resistencia a la Polarización ( $R_p$ ) en aceros API 5L X52 y X65 en una salmuera adicionada con 10 % de keroseno en un medio amargo.



---

# CAPÍTULO 1

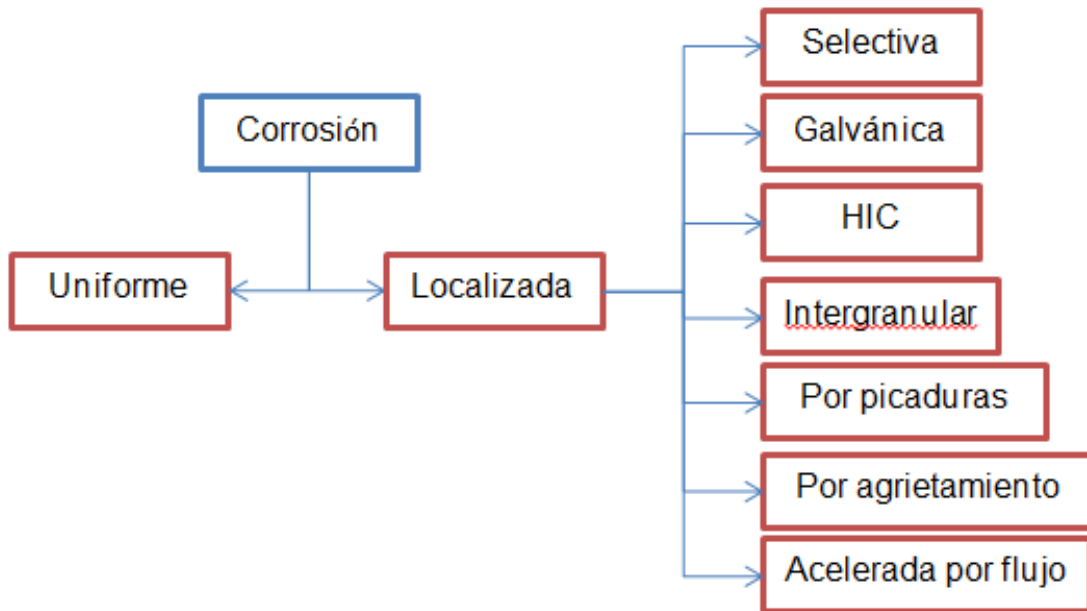
## ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

### 1.1 Definición de la corrosión

Debido a la interacción o exposición que tenga un metal con su medio, ya sea natural o de servicio, y que por lo regular son sustancias agresivas, puede sufrir cambios y transformaciones graduales que lo llevan a un estado más estable, siendo algunos compuestos óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfuros, entre otros, lo cual lleva al metal a la pérdida de material. A este proceso se le conoce como corrosión. Sin embargo, no todos los metales presentan el mismo comportamiento a la reacción electroquímica que sucede al estar expuesto al medio agresivo, por ello, cada metal y material tiene una capacidad de resistir la acción degradante y se le conoce como resistencia a la corrosión o resistividad corrosiva.<sup>[3,4]</sup>

La corrosión se puede presentar de formas diferentes en el material como se muestra en la Figura 1.1; algunos investigadores insisten en aplicar el término de corrosión únicamente a metales, sin embargo, es común considerar metales y no metales para la solución de los problemas que se puedan presentar; entonces, dependiendo de la apariencia del material que se ha corroído se crean diferentes clasificaciones.<sup>[5]</sup>





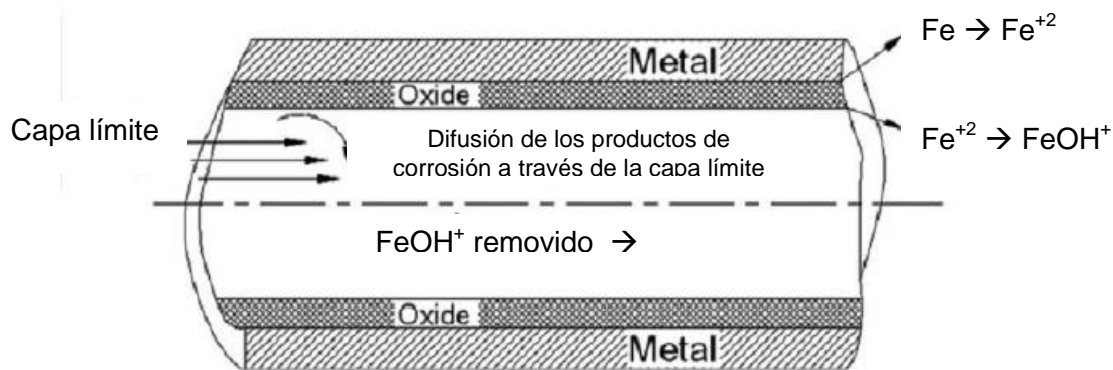
**Figura 1.1. Clasificación de la corrosión.**

### 1.1.1. Corrosión acelerada por flujo (FAC)

La FAC también llamada “Corrosión Acelerada por Flujo”, causa un adelgazamiento de las paredes internas de ductos y tuberías que transportan agua o una mezcla húmeda de material a causa de pérdida de material. Cuando el espesor de los componentes que transportan el fluido es demasiado delgada para soportar los esfuerzos de operación resulta en una falla, por ejemplo, una ruptura.

Para que esta corrosión tenga lugar debe existir un flujo de agua o mezcla húmeda pues estos conducen a la formación de una película protectora en la superficie de los materiales y funciona como un producto contra la corrosión. Sin embargo, el proceso de FAC no se detiene ahí, debido a la acción del flujo la capa de óxido se disuelve y/o desprende y comienza a ser más delgada y menos protectora, incluso con la película de óxido presente en la superficie, la velocidad de corrosión se incrementa a medida que aumenta la velocidad del flujo. Esta es una corrosión de tipo electroquímica que se ve incrementada por la disolución

química y transferencia de masa por lo cual no es un proceso mecánico dominante, como se observa en la Figura 1.2; la FAC no ocurre en líneas que transportan elementos secos. La velocidad de pérdida de material de las paredes debido al FAC depende de diversos parámetros como la composición del material, química del fluido y la hidrodinámica del mismo. Así mismo, las variables dominantes del FAC son temperatura, velocidad del fluido, pH del fluido, contenido de oxígeno, fracción de vacío del fluido, geometría del ducto, entre otros.<sup>[6-8]</sup>



**Figura 1.2. Representación esquemática del mecanismo del FAC en un acero. Fuente: Rybicki, E. F. y colaboradores.**

La corrosión acelerada por flujo es distinta a la corrosión erosión y es primeramente un proceso de corrosión ayudada por disolución química y transferencia de masa; su velocidad es determinada por la transferencia iónica de especies entre el fluido y la superficie del material. La confusión tuvo lugar cuando erosión corrosión se utilizó para el mecanismo que ahora es FAC y en las que los óxidos de descomponen mecánicamente por el choque de partículas, sólidos o burbujas gaseosas. Existen otras diferencias como la morfología de la superficie



en donde el FAC tiene forma de listones o un patrón de “rayas de tigre”, estas características están ausentes en el mecanismo de erosión. De lo anterior se resume que el proceso ocurre en etapas: a) la producción de hierro soluble en la región óxido/agua, b) la transferencia de productos de corrosión al flujo a través la capa límite.<sup>[9-17]</sup>

## 1.2 Corrosión por H<sub>2</sub>S

También llamada corrosión amarga, puede presentarse en diferentes condiciones de pH: neutro, ácido o alcalino. La corrosión del acero y del hierro en soluciones que contienen hidrógeno como el H<sub>2</sub>S ha sido estudiada ampliamente debido a su efecto acelerador de la corrosión en presencia de soluciones neutras y ácidas.<sup>[18]</sup>

Los efectos se le atribuyen a la quimisorción y catálisis del H<sub>2</sub>S. Sin embargo, este ácido suele formar una película de sulfuro durante el proceso de corrosión, la cual es de gran importancia en la industria de los hidrocarburos. El mecanismo bajo el cual se desarrolla se puede explicar en tres etapas.<sup>[19,20]</sup>

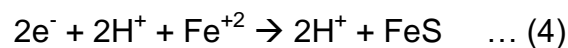
1.- El sulfuro de hidrógeno se disuelve en agua y ocurre una doble disociación (depende del pH), como se muestra en la Ecuación (1) y (2).



2.- La disolución del hierro en la interface metal/electrolito, Ecuación (3).



3.- Los productos de las reacciones, Ecuación (1) y (3), se combinan para formar sulfuro de hierro, Ecuación (4).





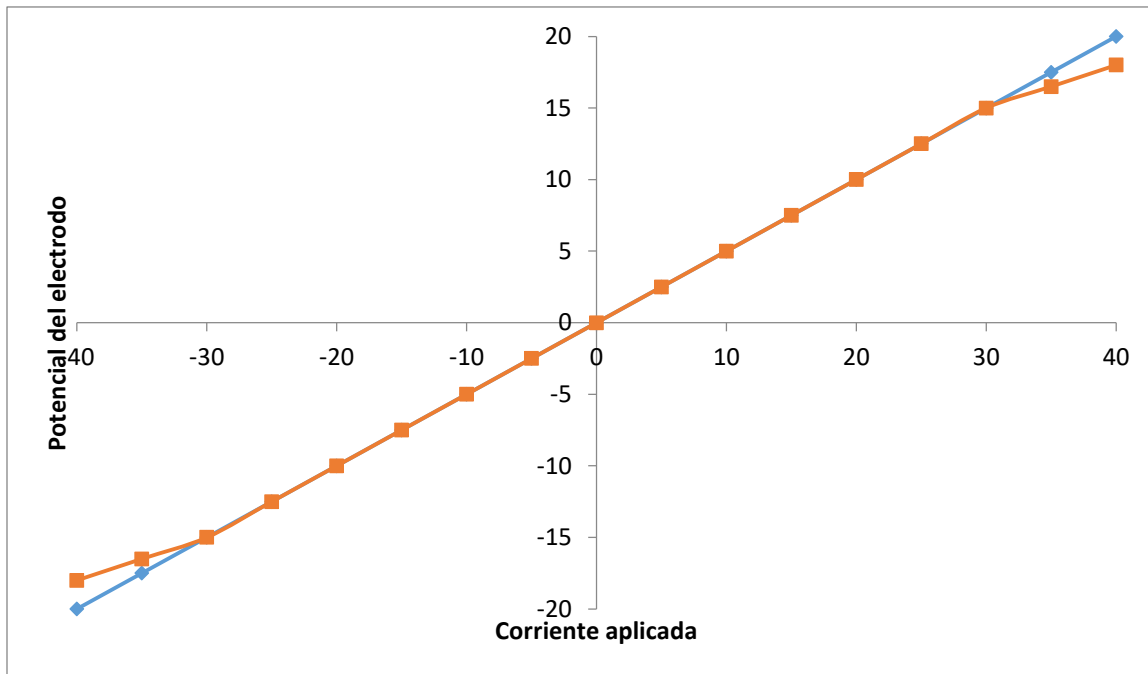
### 1.3 Resistencia a la polarización

Las desventajas de otros tipos de medición (gravimétrica, entre otros) para calcular la velocidad de corrosión se pueden superar en gran parte usando un análisis de polarización lineal. Así, dentro de los 10 mV más activos o nobles del potencial de corrosión, se observa que la aplicación de una corriente es una función lineal del potencial del electrodo. Como se muestra en la Figura 1.3, el potencial de corrosión es usada como un punto de referencia de sobrevoltaje y se grafica contra la corriente anódica o catódica y se muestra en una escala lineal. La gráfica representa los primeros 20 mV de polarización. La pendiente de este gráfico de polarización lineal está relacionada con los parámetros cinéticos de Stern-Geary en la Ecuación (5):

$$\frac{\Delta E}{\Delta i_{app}} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} \quad \dots (5)$$

Donde  $\beta_a$  y  $\beta_c$  son las pendientes de Tafel (Figura 1.4) de las reacciones anódica y catódica respectivamente. El término  $\Delta E/\Delta i_{app}$  está dada en ohms (V/A o mV/mA). Si los valores de beta de las reacciones se conocen, la velocidad de corrosión es calculada por la sustitución en la fórmula.





**Figura 1.3. Representación del análisis de polarización lineal.**

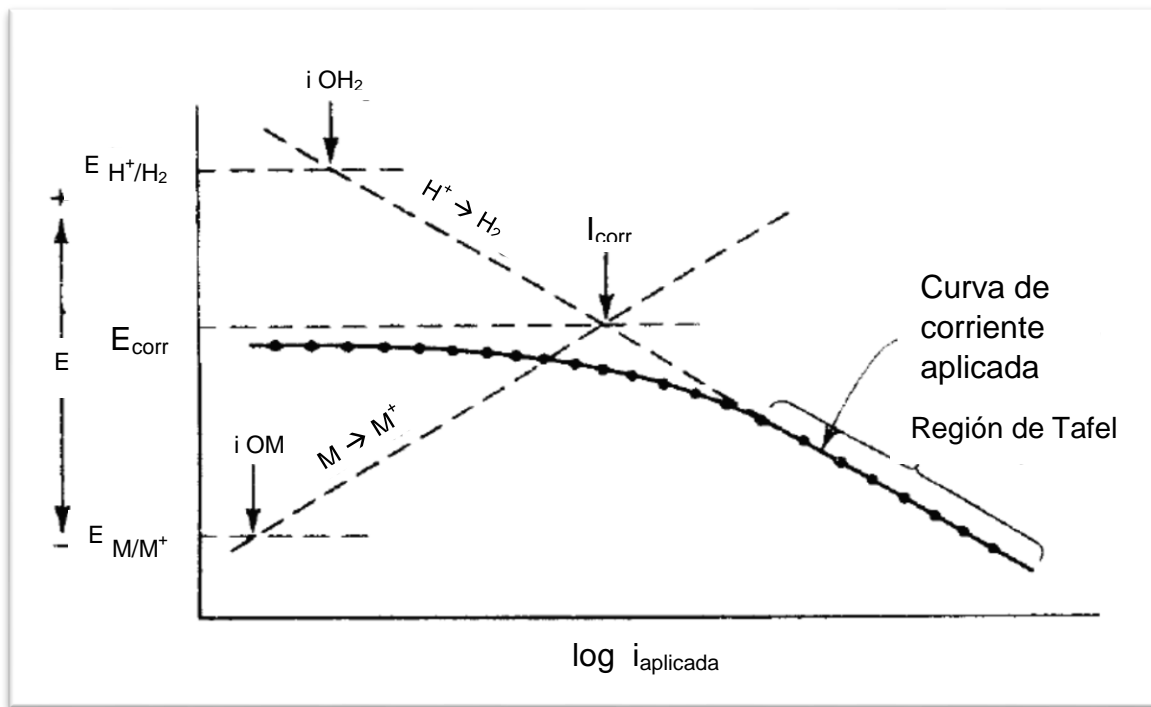
La pendiente de una curva de polarización lineal  $\Delta E/\Delta i_{app}$  está controlada principalmente por  $i_{corr}$  y es poco sensible a cambios en los valores de beta de la ecuación. Por lo tanto, es posible formular una aproximación exacta de la ecuación, asumiendo que los valores catódicos y anódicos de beta de 0.12 V representan un promedio de todos los sistemas de corrosión, la Ecuación (5) se reduce a lo siguiente.

$$\frac{\Delta E}{\Delta i_{app}} = \frac{0.026}{i_{corr}} \quad \dots(6)$$

La Ecuación (6) puede ser usada para calcular la velocidad de corrosión de un sistema sin conocimiento de los parámetros electrodo-cinéticos. Puede ser aplicada a sistemas con reacciones de reducción controlados por activación o difusión y velocidades de corrosión de no más de un factor de 3 de las velocidades actuales. Entonces, si se divide la  $I_{corr}$  por unidad de área se tiene la densidad de corriente de corrosión, o sea, la velocidad de corrosión tal y como se muestra en la Ecuación (7).

$$i_{corr} = I_{corr}/\text{área} \quad \dots(7)$$

Finalmente con la ecuación de Faraday y la  $I_{corr}$  calculada se obtiene la cantidad de material que se pierde por causa de la corrosión.



**Figura 1.4. Pendientes de Tafel.**



Las ventajas de este método electroquímico son que, permiten mediciones rápidas de la velocidad de corrosión dado que prácticamente, el  $R_p$  es el coeficiente del incremento del potencial de electrodo ( $dE$ ) y el incremento correspondiente de la densidad de corriente ( $di$ ). La pendiente está habitualmente en concordancia con el valor verdadero de  $R_p$  y pueden usarse equipos adicionales para controlar la velocidad de corrosión en varias etapas del proceso. Estas técnicas pueden ser usadas para mediciones precisas de bajas velocidades de corrosión (menos de  $0.1\text{mpy}$ ). Las mediciones pueden ser usadas para estructuras que no pueden ser inspeccionadas visualmente y no pueden ser sujetas a pruebas de pérdida de peso por lo que la lleva a ser una técnica no destructiva.<sup>[3,5]</sup>

### **1.3.1 Relación de la Resistencia a la Polarización ( $R_p$ ) y la Velocidad de corrosión ( $V_{corr}$ )**

Los experimentos a nivel laboratorio y la observación *in situ* de ductos o sistemas que transportan hidrocarburos ayudan a predecir la eficiencia de los materiales que lo componen, por lo que se pueden aplicar las medidas necesarias para prevenir o corregir. Así, el parámetro más importante que se evalúa es la velocidad de corrosión ( $V_{corr}$ ).

Cuando se mide la  $V_{corr}$  en un metal utilizando la Resistencia a la Polarización ( $R_p$ ) se obtienen datos de  $I_{corr}$  en Amperios por centímetro cuadrado ( $A/\text{cm}^2$ ), como se muestra en la Ecuación (3), y para relacionarla con la  $V_{corr}$  se utilizan las leyes de Faraday, donde:

- La cantidad de una sustancia disuelta o depositada en una electrólisis es proporcional a la carga eléctrica total transferida.
- La cantidad de sustancias disueltas o depositadas por el paso de la misma carga eléctrica es proporcional a su equivalente en peso.



Para relacionar lo anterior se entiende que el peso atómico entre el número de electrones que puede liberar, es el equivalente en peso. Además, la electrólisis es una producción de cambios químicos en el electrolito mediante el paso de una corriente eléctrica a través de una celda electroquímica.

La constante de Faraday (96500 Coulombs "C"), indica la cantidad de carga eléctrica que causará que un equivalente de un metal se disuelva, una vez que se obtienen resultados de  $I_{corr}$  ( $A/cm^2$ ), por medio de técnicas electroquímicas se relacionan las leyes de Faraday para obtener la  $V_{corr}$  en milésimas de pulgada por año (mpy) o en milímetros por año como se muestra en las Ecuaciones 8, 9 y 10.

$$V_{corr} = (I_{corr})(FC)\left(\frac{1eq}{F}\right)\left(\frac{1}{neq}\right)(PM)\left(\frac{1}{\rho}\right)(FC) \quad \dots (8)$$

Donde:

- A Amperes
- C Coulombs
- F Constante de Faraday
- $\rho$  Densidad del electrodo metálico
- PM Peso molecular del electrodo metálico
- FC Factores de conversión para obtener las unidades de interés

Sustituyendo:

$$mpy = \left(\frac{A}{cm^2}\right)\left(\frac{C}{A \cdot S}\right)\left(\frac{1eq}{96500C}\right)\left(\frac{1mol}{neq}\right)\left(\frac{g}{mol}\right)\left(\frac{cm^3}{g}\right)\left(\frac{31536000s}{1año}\right)\left(\frac{1pulg}{2.54cm}\right)\left(\frac{1000milipulg}{1pulg}\right) \quad \dots (9)$$

$$mmpy = \left(\frac{A}{cm^2}\right)\left(\frac{C}{A \cdot S}\right)\left(\frac{1eq}{96500C}\right)\left(\frac{1mol}{neq}\right)\left(\frac{g}{mol}\right)\left(\frac{cm^3}{g}\right)\left(\frac{31536000s}{1año}\right)\left(\frac{10mm}{1cm}\right) \quad \dots (10)$$





---

## 1.4 El circuito Experimental para Tubería (CET)

Un CET causa turbulencia debido a la distribución de flujo a lo largo de la tubería. El sistema brinda un transporte de masa uniforme sobre la longitud de la superficie que se determina, así, trabajando bajo condiciones de flujo turbulento, para lo cual requiere velocidades relativamente bajas, es de fácil manejo pese a su aparente gran tamaño en comparación con otros sistemas que usan menos cantidad de reactivos. El dispositivo que usa el sistema para la pruebas es de un tamaño pequeño, relativamente económico y de fácil manejo. Opera en un régimen de laminar a turbulento sobre un amplio rango de número de Reynolds, bajo condiciones hidrodinámicas controladas y conocidas. Los experimentos suelen requerir de grandes cantidades de fluido y se pueden hacer simultáneamente pruebas electroquímicas y gravimétricas.

Las principales características del circuito que lo proveen de ventajas experimentales únicas son: generación de un flujo turbulento  $Re > 10000$ , el potencial y las densidades de corriente son uniformes, por lo tanto las velocidades de reacción son uniformes en la superficie del cátodo; el transporte de masa es alto y puede mejorarse al usar superficies rugosas y principalmente, es un sistema a escala que duplica sustancialmente el comportamiento de diversos materiales a lo largo de la sección de prueba.<sup>[22-24]</sup>

## 1.5 Tipos de flujo

Se pueden clasificar de diversas formas, según los diferentes criterios de los autores o las características propias de los fluidos, aquí se describen algunos tipos de flujo.<sup>[25]</sup>



---

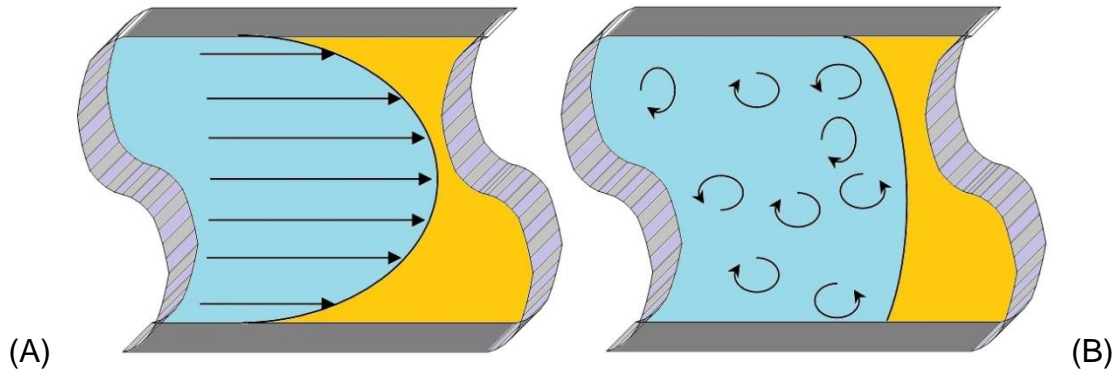
**Laminar:** Este tipo de flujo se caracteriza porque las partículas del fluido tienen un movimiento uniforme que siguen trayectorias regulares, separadas y definidas; este movimiento aparenta que se mueve en forma de láminas o capas paralelas, las cuales se deslizan unas sobre otras de forma ordenada, sin que exista una mezcla macroscópica o intercambio transversal entre ellas. En el flujo laminar la Ley de Newton de la viscosidad es la que rige el flujo laminar pues establece la relación existente entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación angular. Así, la viscosidad puede fungir como amortiguador ante cualquier tendencia turbulenta que pueda presentarse en el flujo laminar. Un flujo laminar se determina cuando el número de Reynolds es menor a 2100.

**Transicional:** Conocido también como flujo crítico, aparece cuando el flujo volumétrico se incrementa partiendo de un tipo laminar, estas láminas comienzan a ondularse y a romperse de forma rápida y difusa; se determina cuando el número de Reynolds tiene valores entre 2100 y 4000.

**Turbulento:** Este flujo aparece casi siempre en la práctica a comparación de los otros tipos. La turbulencia aparece a velocidades mayores que la crítica y cuando existe un movimiento irregular e indeterminado de las partículas del fluido en direcciones transversales a la dirección principal del flujo. Cuando el número de Reynolds es mayor a 4000 se presenta un flujo turbulento.

Para que un flujo se torne turbulento deben presentarse ciertos factores: alta rugosidad superficial de contacto con el flujo, especialmente cerca del borde de ataque y a altas velocidades, pues irrumpe en la zona laminar de flujo y lo vuelve turbulento; alta turbulencia en el flujo de entrada, sobre todo en túneles de viento; gradientes de presión adversos como los que se generan en cuerpos gruesos; calentamiento en la superficie del fluido, asociado y derivado del concepto de entropía (si la superficie de contacto está muy caliente, transmitirá esa energía al fluido y si esa transferencia es lo suficientemente grande se pasará a flujo turbulento).

El siguiente esquema (Figura 1.5), muestra la comparación de un flujo laminar (A) y un flujo turbulento (B), en donde situaciones de baja viscosidad, alta velocidad o grandes caudales el flujo laminar no es estable ocasionando que se transforme el flujo laminar a uno turbulento.



**Figura 1.5. Comparación de flujo laminar (A) y uno turbulento (B).**

### 1.5.1 Cálculo del número de Reynolds

En la industria que maneja líneas de transporte de hidrocarburos normalmente se encuentran fluidos en flujo turbulento, y aunque pueden estudiar el flujo en diversos equipos como el Electrodo Cilindrico Rotatorio (ECR), Electrodo de Disco Rotatorio (EDR), Circuitos Experimentales de Tubería (CET) y cámara de impacto; desde un punto de vista práctico, el CET genera todos los tipos de flujo de manera análoga al utilizado industrialmente.

Considerando el CET, el flujo en régimen laminar se encuentra cuando el número de Reynolds es menor a 2100 según la Ecuación (11):

$$Re = \frac{(\rho * V * d)}{\mu} < 2100 \quad \dots (11)$$



Donde:

- Re Número de Reynolds  
 $\rho$  Densidad del flujo en  $\text{kgm}^{-3}$   
 $\mu$  Viscosidad dinámica en  $\rho$   
d Diámetro de tubería en m  
v Velocidad del flujo en  $\text{Lmin}^{-1}$

Por lo tanto, el número de Reynolds relaciona la fuerza de inercia y la fuerza de la viscosidad, donde expresa que existe una clasificación para los diferentes tipos de flujo, como se muestra en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1. Tipos de régimen para un flujo de tubería**

Régimen de flujo	Número de Reynolds
Laminar	$\text{Re} < 2100$
Laminar-turbulento (transición)	$2100 < \text{Re} < 4000$
Turbulento	$\text{Re} > 4000$

### 1.6 Aceros API 5L empleados en el transporte por ducto de hidrocarburos

De manera general, su característica principal es que son aceros con un contenido bajo de carbono. Este tipo de aceros son utilizados en la industria del gas y del petróleo pues están sujetos a medios corrosivos; amargos ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y dulces ( $\text{CO}_2$ ); los cuales guardan una relación en composición química y propiedades mecánicas, por ejemplo, los que se usan en la construcción de tanques separadores.



Se considera acero a la solución sólida intersticial de carbono contenida en hierro, donde el contenido de carbono no excede el 2.01% en peso. Un acero al carbono se considera como tal cuando sus elementos aleantes: cromo, cobalto, níquel, vanadio, titanio, zirconio, manganeso u otro elemento no se especifica su contenido mínimo requerido, además de que el contenido máximo de magnesio, silicio y cobre no exceden el 1.65%, 0,6% y 0.6%, respectivamente.

En los aceros al carbono existen divisiones; una de ellas son los aceros bajo carbono donde el contenido máximo de carbono es de 0.3%, éste a su vez tiene una subdivisión, los aceros ultra bajo carbono con un contenido máximo de 0.03% y niveles bajo de silicio y manganeso. Los aceros bajo carbono con un contenido de entre 0.04% a 0.15% son utilizados para la fabricación de carrocerías de automóviles. Finalmente, los aceros dulces con un contenido de 0.15% a 0.3% de carbono, se emplean para tuberías, puentes y edificios.<sup>[26,27]</sup>

Esta clasificación de aceros cumple con los requerimientos detallados en el apartado 6 de la especificación API 5L (En la actualidad la fabricación de tuberías para la industria petroquímica se lleva a cabo bajo el estándar de la API o American Petroleum Institute), en donde se mencionan aspectos tales como composición química y propiedades mecánicas. Las Tablas 1.2 y 1.3 muestran especificaciones de los aceros para PSL 1 y PSL 2 (Product Specification Level), respectivamente, donde se establecen los requisitos necesarios de resistencia a la tensión y mínimo esfuerzo de cedencia.<sup>[28]</sup>

**Tabla 1.2. Requerimientos de tensión uniaxial para PSL 1**

Grado	Esfuerzo de cedencia MPa (psi)	Esfuerzo de tensión Mpa (psi)	Elongación (%)
	Mínimo	Mínimo	Mínimo
X52	360 (52200)	460 (66700)	A
X65	450 (65300)	535 (77600)	A



**Tabla 1.3. Requerimientos de tensión uniaxial para PSL 2**

Grado	Esfuerzo de cedencia MPa (psi)	Esfuerzo de tensión Mpa (psi)	Elongación (%)
	Mínimo	Mínimo	Mínimo
X52	360 (52200)	460 (66700)	A
X65	450 (65300)	535 (77600)	A

Para calcular la elongación mínima (A) en 2 pulgadas (50.8 mm) se determina con las Ecuaciones 12 y 13:

$$\text{Unidades del Sistema Inglés } e = 625000 \frac{A^{0.2}}{U^{0.9}} \quad \dots (12)$$

$$\text{Unidades del Sistema Internacional } e = 1994 \frac{A^{0.2}}{U^{0.9}} \quad \dots (13)$$

Donde:

e      Elongación mínima en 2 pulgadas (50.8 mm) en %, redondeado al porcentaje más cercano.

A      Área de la muestra a la que se aplica la fuerza de tensión.

U      Esfuerzo mínimo de tensión final especificado en psi (Mpa)

Además, la composición química de los aceros grado API 5L empleados dentro de la industria petroquímica deber ser de acuerdo con la composición que se encuentra en la Tabla 1.4 para PSL 1 y Tabla 1.5 para PSL 2.

**Tabla 1.4. Requerimientos químicos para PSL 1 en % peso**

Grado	C máx	Mn máx	P máx	S máx
X52	0.26	1.40	0.030	0.030
X65	0.26	1.45	0.030	0.030



**Tabla 1.5. Requerimientos químicos para PSL 2 en % peso.**

Grado	C máx	Mn máx	P máx	S máx	Si máx
X52M	0.22	1.40	0.025	0.015	0.45
X65M	0.12	1.60	0.025	0.015	0.45

### 1.7 Simulación matemática del efecto de fluido

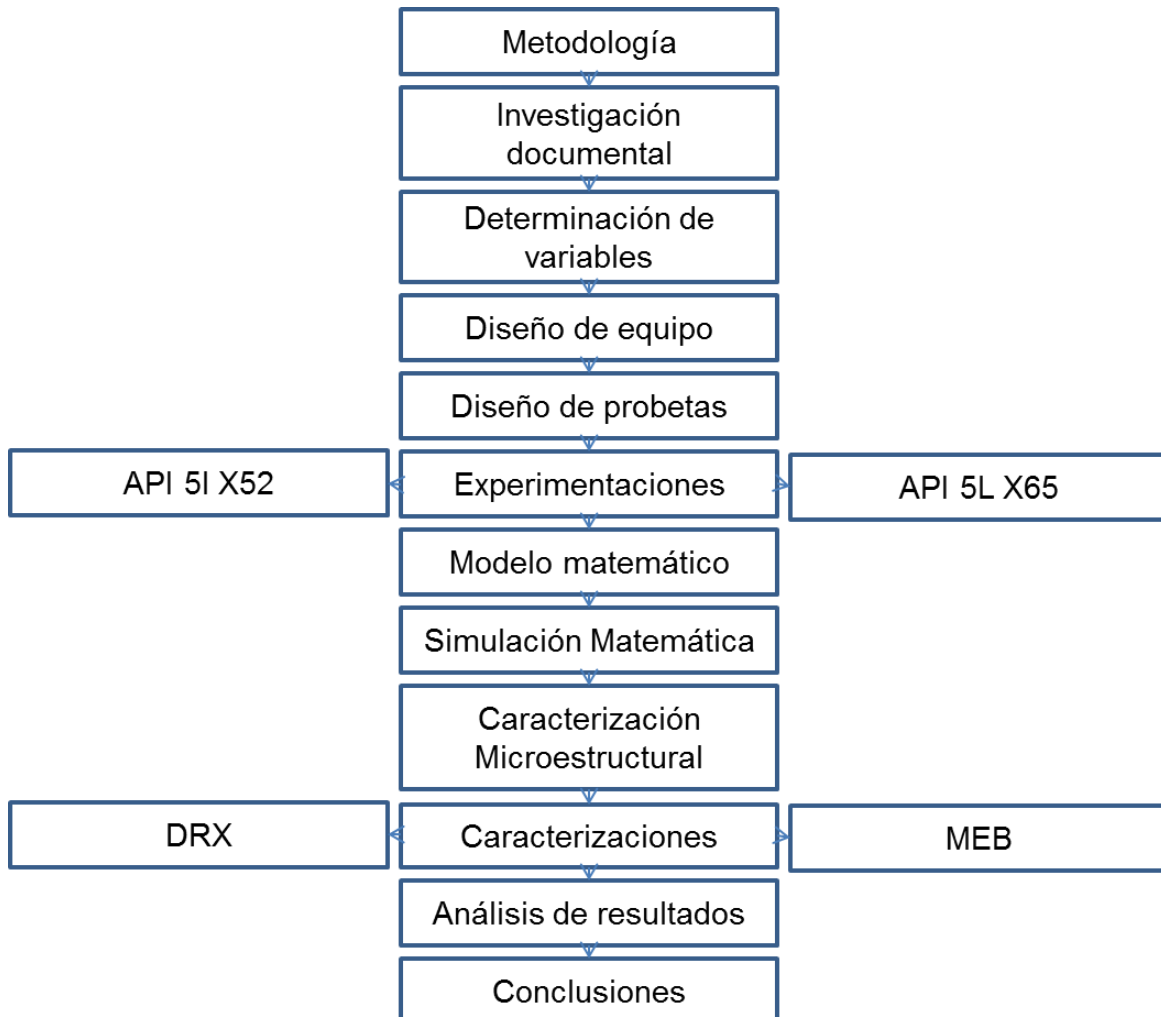
Para resolver un modelo a menudo se utilizan procedimientos matemáticos de tal forma que se pueda encontrar una solución al problema al ser alimentada con información. Así, se convierte en una representación por medio de ecuaciones, las cuales describen el comportamiento de máquinas o de sistemas y que al ser resueltas permiten predecir el funcionamiento de las mismas. Empleando ecuaciones más complejas (que describen mejor un fenómeno) se pueden optimizar los sistemas desde un punto de vista técnico y económico.<sup>[29]</sup>



## CAPÍTULO 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 2.1 Experimentación

En el siguiente capítulo se explica la metodología usada en el desarrollo del trabajo de investigación, la cual se resume en la Figura 2.1. Los experimentos se basaron en pruebas electroquímicas realizadas en las instalaciones de la ESIQIE.



**Figura 2.1. Diagrama de la metodología usada.**



## 2.2 Equipo y Materiales

### *Equipo experimental*

El equipo utilizado en la presente investigación se muestra en las Figuras 2.2 y 2.3, el cual consistió de un Circuito Experimental de Tubería (CET). El CET reproduce a pequeña escala las condiciones de un sistema de tuberías o un sistema de transporte de modo que se presenten los mismos fenómenos hidrodinámicos, pero en un sistema que se puede instalar en laboratorio y colocar instrumentos que en escala real son muy caros o es imposible dicha colocación.

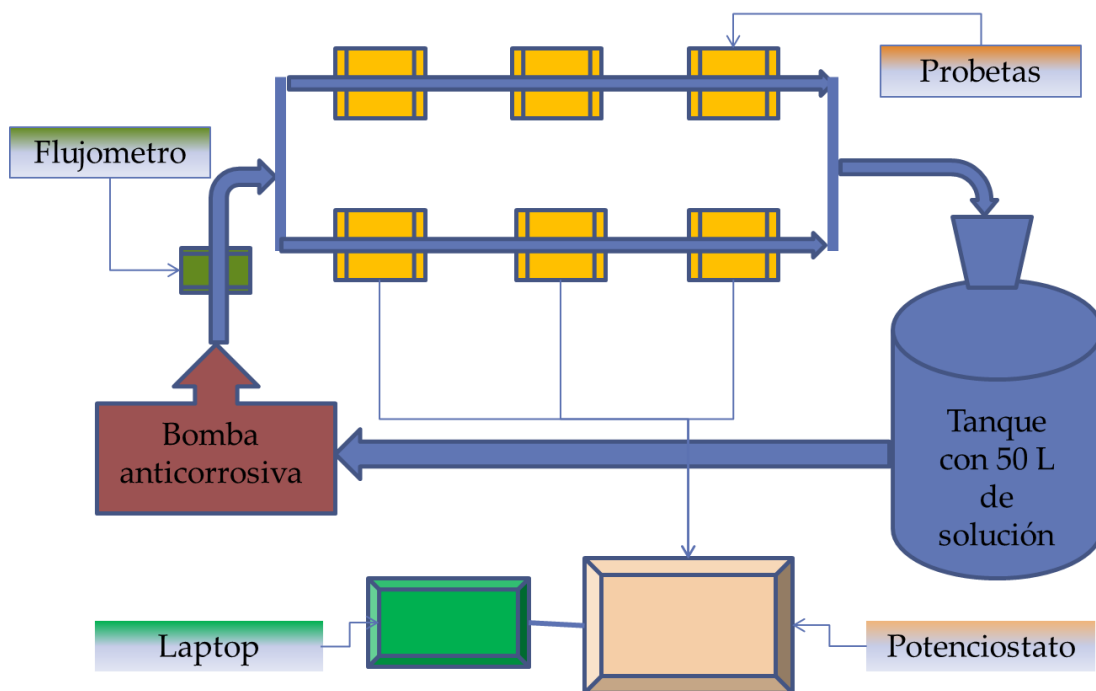
La Figura 2.2 muestra el Circuito Experimental para Tubería (CET) y los materiales y equipo que lo conforman. El CET fue fabricado en PVC cédula 80 de 5mm de espesor; la sección de trabajo tiene una longitud de 80cm fabricada con tubería de acrílico transparente y la zona de prueba crítica corresponde a tres coples de teflón donde cada cople porta 3 probetas.

Se hizo circular un medio que simuló las condiciones corrosivas reales utilizando una salmuera NACE 1D-196 adicionada con 1 bar (1382.7 ppm) de H<sub>2</sub>S y 10% de keroseno. Mediante un rotámetro se controló el caudal del fluido antes descrito. En la Figura 2.3 se muestra el esquema del material y equipo experimental.

- Tanque de almacenamiento.
- Tres coples de teflón para cada acero.
- Bomba centrífuga de 7.5 Hp anticorrosiva, la cual suministrará de fluido al sistema.
- Rotámetro con capacidad de 100 L/min para regular el fluido.
- Potenciostato 2263 para las pruebas electroquímicas.
- Laptop para la toma de datos mediante el programa Power Suite.



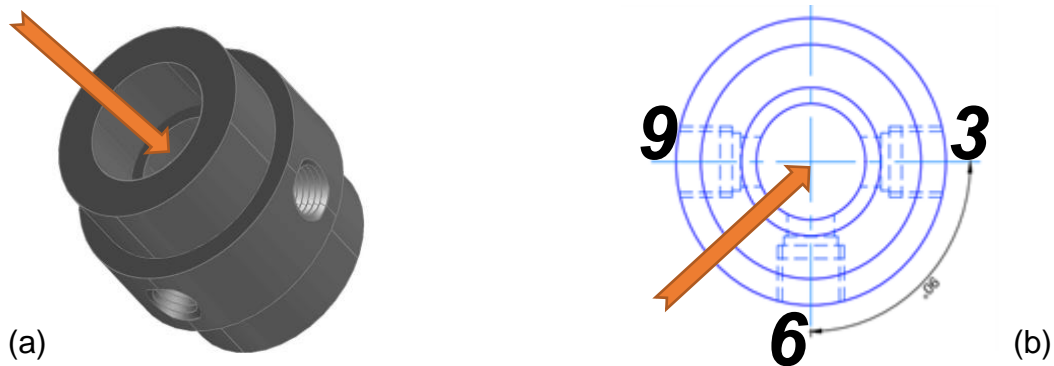
**Figura 2.2. Circuito Experimental de Tubería (CET).**



**Figura 2.3. Esquema del material y equipo experimental.**

### 2.3 Diseño de coples y probetas

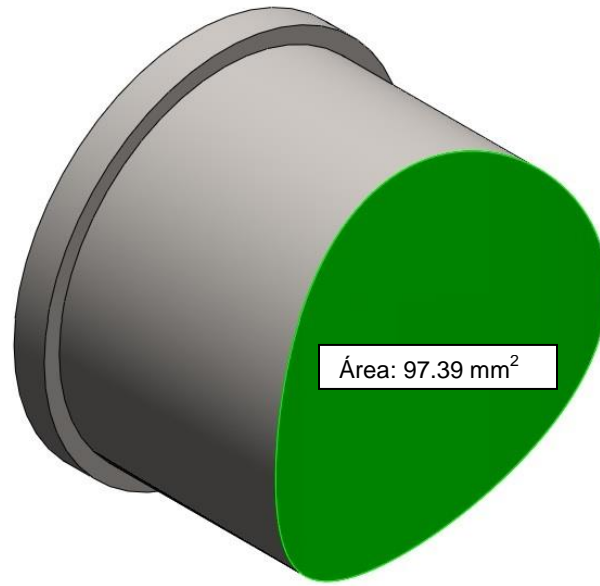
En la Figura 2.4 se muestra el cople que se utilizó para montar las probetas de acero API 5L X52 y X65 que se colocaron a las “3, 6 y 9 horas” según el reloj. Las posiciones se planearon a partir de las investigaciones realizadas en el grupo de trabajo y el modelo fue realizado en Solid Works.



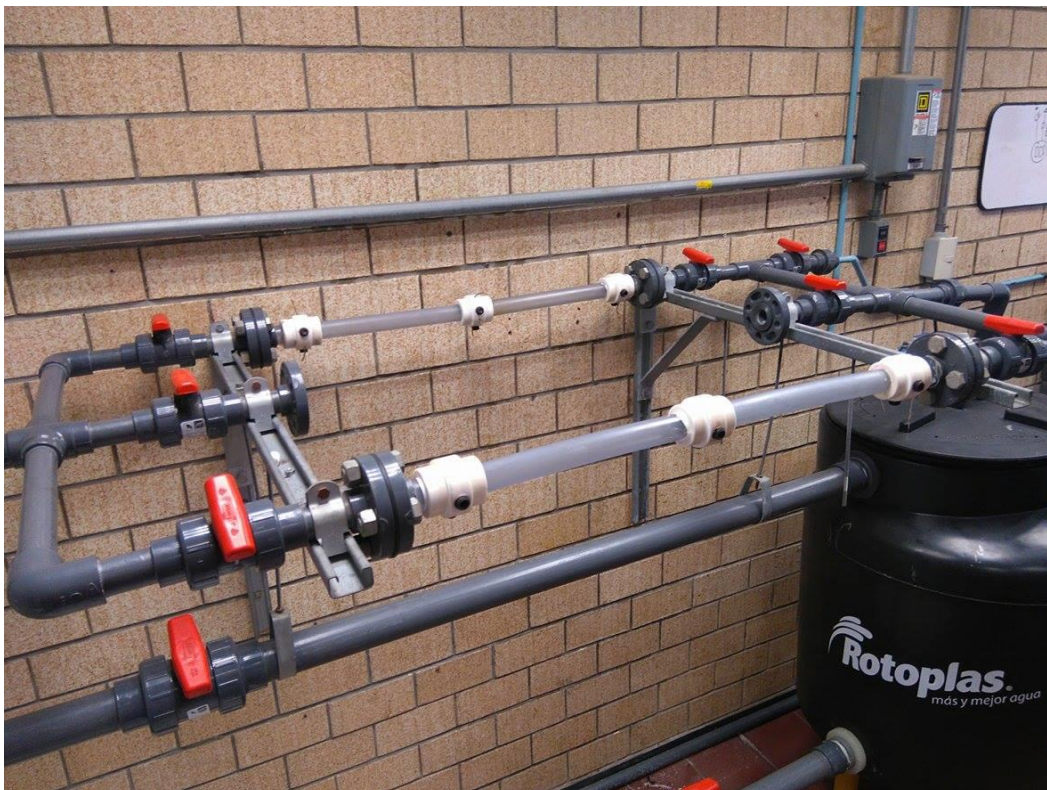
**Figura 2.4. (a) Modelo en Solid Works del cople de teflón; (b) Esquema de las posiciones de las probetas utilizadas.**

De la misma forma que el cople, la probeta y el cálculo del área expuesta fue realizado en Solid Works, tal como aparece en la Figura 2.5. El color verde indica la zona expuesta al flujo y el área calculada es la que se alimenta al programa Power Suite para calcular su velocidad de corrosión.

La zona de trabajo crítica comprende los coples de teflón (color blanco), los puntos críticos (puntos negros en los coples) y el acrílico transparente, como se muestra en la Figura 2.6.



**Figura 2.5. Vista isométrica de la probeta.**



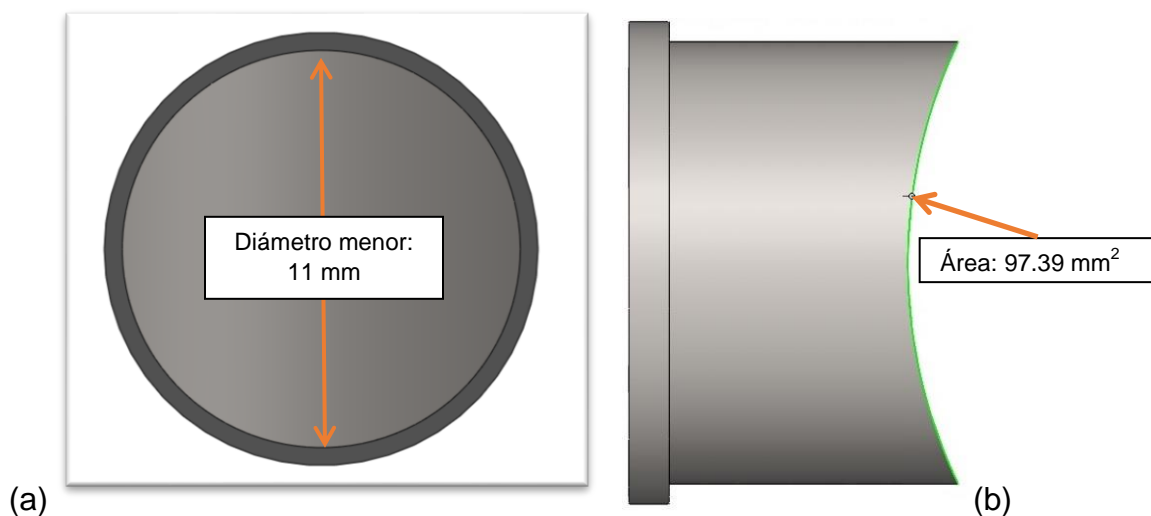
**Figura 2.6. Esquema de la zona de trabajo crítica.**



### 2.3.1 Diseño, fabricación y nomenclatura de las probetas metálicas

Las probetas de acero API 5L X52 y X65 presentan las siguientes dimensiones, tal y como se muestra en la Figura 2.7: 11mm de diámetro menor x 5 mm de alto (sección de prueba); 13mm de diámetro x 2mm de alto (tope).

La nomenclatura de las probetas depende de la posición de la probeta dentro del cople y de la posición del cople a lo largo de la sección de prueba, la cual sirve para diferenciar entre las probetas dentro de cada uno de ellos, teniendo como analogía la carátula de un reloj.



**Figura 2.7. (a) Diámetro de la sección de prueba en una vista frontal; (b) Área expuesta de la probeta presentada en una vista superior.**



---

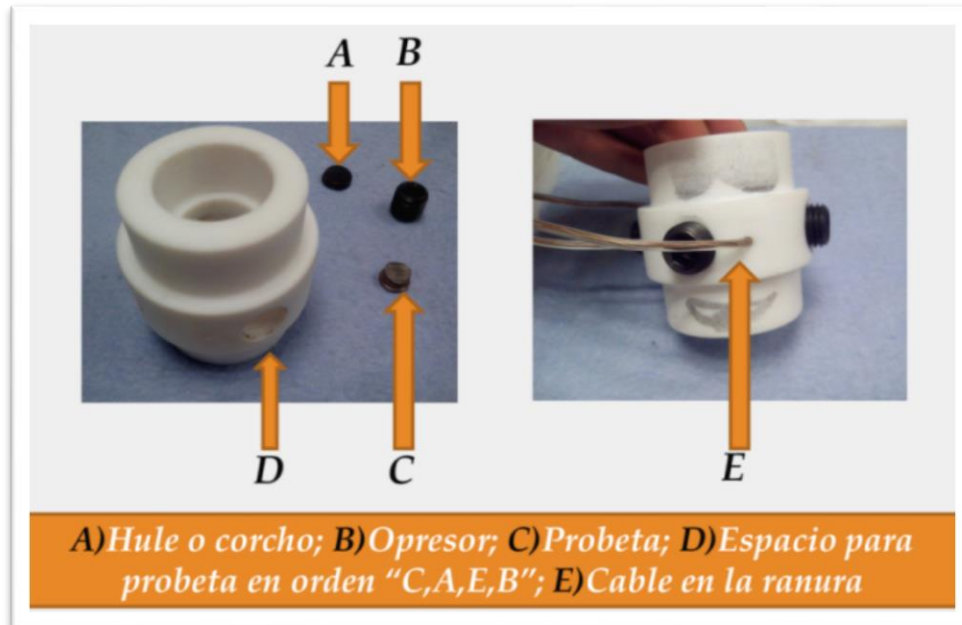
---

## 2.4 Ensamble y nomenclatura de los coples porta probeta

Se utilizaron tres probetas para cada cople, siendo tres coples distribuidos de manera equidistante en los 80cm disponibles de PVC transparente. La superficie prueba de cada probeta fue desbastada hasta lija 600 para obtener una superficie lisa, posteriormente limpiadas con acetona para eliminar cualquier efecto de grasa o suciedad y secadas al aire. Después, las probetas fueron montadas en el cople teniendo atención de hacer coincidir la geometría para generar una superficie uniforme, el arreglo completo se muestra en la Figura 2.8.

Primeramente se coloca la Probeta (C) cuidando que la parte cóncava esté expuesta en el interior del cople y esté orientada de la misma forma que las paredes internas para generar una superficie continua; después se introdujo el cable por la ranura (E) hasta que entró en contacto con la parte trasera de la probeta (esto generará una corriente eléctrica). Posteriormente se introdujo el corcho o hule para aislar el circuito y finalmente el opresor fue insertado de tal forma que haga presionar el cable con la probeta; esto además de promover el contacto metálico entre el cable y probeta, el opresor soportó la presión generada por el flujo de fluido manteniendo la posición de los componentes dentro del cople. A continuación se repitió los pasos anteriores las veces necesarias.

Dado que se tienen tres probetas en cada cople, el arreglo permitió mediante conexiones de cobre, establecer una corriente eléctrica con el Potenciostato. Cada probeta funcionó como Electrodo de Referencia (ER), de trabajo (ET) y auxiliar (EA), una a la vez; después fue posible intercambiar las conexiones. En primera instancia el primer electrodo de trabajo fue en la posición “6”.



**Figura 2.8. Arreglo de los cupones dentro del cople.**

## 2.5 El medio

Las probetas de acero API 5L X52 y X65 estarán en contacto en una salmuera saturada con 1382.7 ppm (1 bar) de H<sub>2</sub>S y 10% de keroseno. Para la experimentación se utiliza el régimen turbulento de acuerdo al número de Reynolds (>10000) para tuberías. La Tabla 2.1 muestra la concentración y la cantidad de reactivos a utilizar en base a la norma NACE 1D-196.

**Tabla 2.1. Composición química de la salmuera utilizada**

Salmuera NACE ID- 196 y su relación para 50 litros de solución		
Compuesto	1 L	50 L
NaCl	106.5789 g	5328.95 g
CaCl <sub>2</sub> * 2H <sub>2</sub> O	4.4773 g	223.87 g
MgCl <sub>2</sub> * "H <sub>2</sub> O	2.061 g	103.05 g
Na <sub>2</sub> S	9.7291 g	486.291 g
Ácido Acético	4.6854 g	234.27 g
H <sub>2</sub> O	Aforar un litro	Aforar 50 litros



## 2.6 Condiciones experimentales

En las Tabla 2.2 se muestran las condiciones experimentales para la evaluación de la velocidad de corrosión.

**Tabla 2.2. Condiciones experimentales para cada acero**

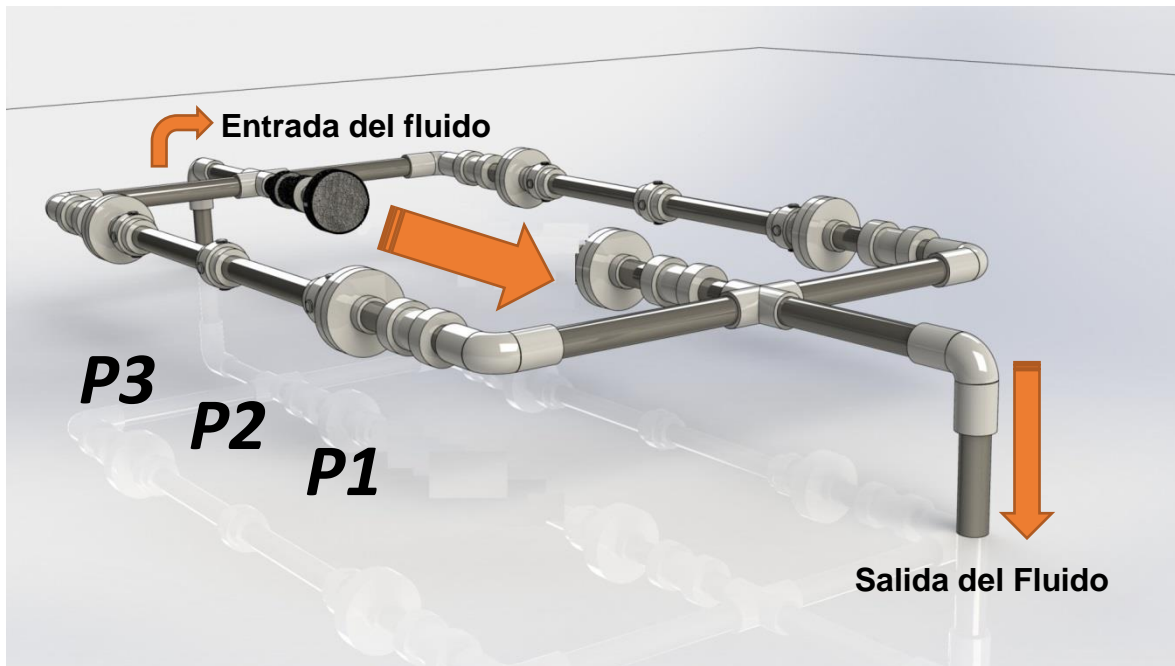
Variables	
Presión del H <sub>2</sub> S	1 Bar
Caudal	30 l/min
Salmuera	NACE ID -196 (50 litros)
Keroseno	10% (5 litros)
Reynolds	10438,2989
Velocidad de flujo	2 m/s
Área expuesta	0.9739 cm <sup>2</sup>

## 2.7 Resistencia a la polarización

Se utiliza un cople con 3 probetas. La técnica se realizó a +/- 20 mV por debajo y por encima del potencial de corrosión, la velocidad de barrido fue de 0.200 mV/s y se monitoreó la velocidad de corrosión a las tres, seis y 12 horas que duró el experimento. Se tomaron de cuatro a cinco lecturas por probeta para verificar el nivel de confianza y de repetición del experimento. Se alimentó en el programa los datos el área expuesta de la probeta, el peso específico y la densidad del acero.

## 2.8 Simulación Matemática

A partir de la geometría mostrada en la Figuras 2.2 y 2.6, se realizó un modelo de acuerdo al diseño del CET en Solid Works 2015 para posteriormente ser utilizada en las simulaciones con ANSYS 15, tal y como se muestra en la Figura 2.9.



**Figura 2.9. Modelo matemático de las probetas en el CET que serán sujetas a simulación.**

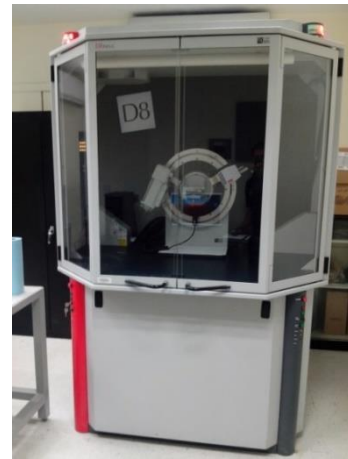
## 2.9 Caracterización de los productos de corrosión

Después de la experimentación se procedió a la caracterización de los productos de corrosión formados en las probetas mediante técnicas de Microscopia electrónica de Barrido y Difracción de Rayos X (DRX). El análisis que se realizó exigió que en ambas técnicas se introdujeran por completo las probetas en los equipos.

La Figura 2.10 muestra el Microscopio Electrónico de Barrido marca JEOL JSM-6300 (a), el cual opera a 20kV, 220  $\mu$ A y una distancia de trabajo de 39mm. Así mismo se muestra el difractómetro marca Focus D8 (b), la cual emplea una radiación de Cu K $\alpha$ , condiciones de trabajo de 35 kV y 25 A, en un intervalo de  $2\theta$  de 20 – 100°, con incrementos de 2° min<sup>-1</sup>. El difractómetro permitió identificar los productos de corrosión en las probetas con sus respectivas estructuras cristalinas.



(a)



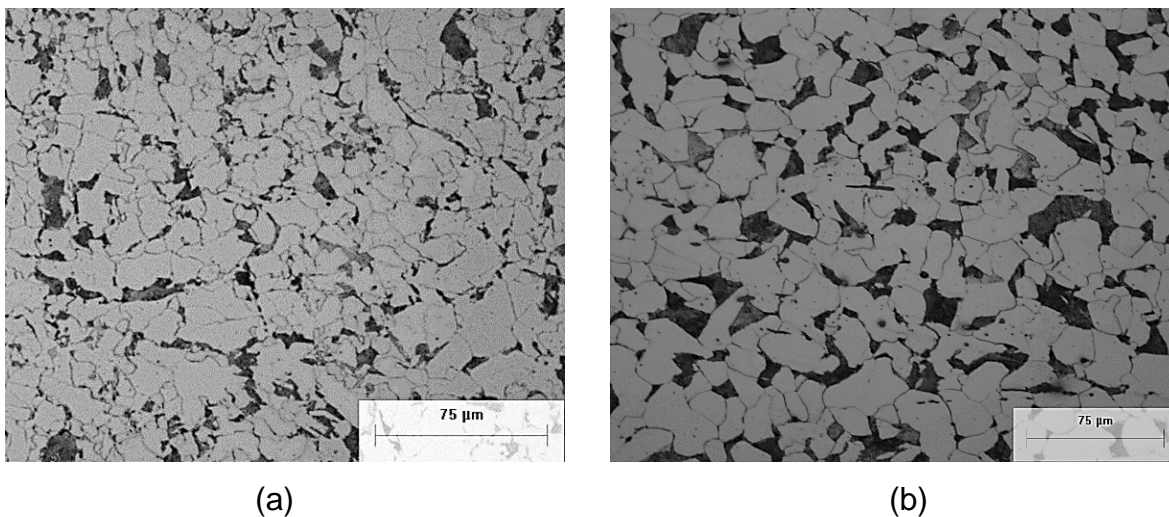
(b)

**Figura 2.10. Microscopio Electrónico de Barrido (a); Difractómetro (b).**

## CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 3.1 Caracterización microestructural de los aceros grado API 5L X52 y X65

Se realizó la caracterización de los aceros grado API 5L X52 (a) y X65 (b) para determinar las fases presentes en cada uno de los aceros, las correspondientes microestructuras se muestran en la Figura 3.1.



**Figura 3.1. Metalografías de los aceros API 5L X52 (a) y X65 (b) atacadas con Nital 3.**

Como se observa en las microestructuras, en ambos aceros se identifica la presencia de dos fases: la perlita (microconstituyente oscuro) y la ferrita (microconstituyente claro); donde la fase perlita está dentro de la matriz ferrita. Por lo tanto se determina que no existen factores ajenos como una elevada concentración de inclusiones, un tratamiento térmico u otro proceso fisicoquímico que afecte la microestructura.



Por otro lado, se llevó a cabo el estudio del porcentaje de fases presentes en la microestructura de los aceros, tal como se muestra en la Tabla 3.1. El estudio se realizó a la sección superior interna del tubo de acero de donde fueron elaboradas las probetas. Se observa que el acero que presenta la mayor cantidad de ferrita es el grado X52 con un 86.64%, por otro lado el acero grado X65 presenta mayor porcentaje de perlita con 21.45%.

Respecto al tamaño de grano para los aceros estudiados los valores obtenidos presentan un tamaño de 7 para el X52 y 8 para el X65, por ende, la microestructura del X65 es más fina que el X52. Cervantes<sup>[30]</sup> sugiere que la “microestructura podría tener algún efecto sobre la corrosión a través del efecto galvánico que se forma entre la ferrita y la perlita, debido a que se incrementa la disolución de la ferrita ya que la cementita que está contenida dentro de la perlita es electroquímicamente más estable que ésta”.

**Tabla 3.1. Porcentaje de fases presentes para cada uno de los aceros empleados de la sección superior interna**

Acero de la sección superior interna	%Ferrita	%Perlita	Tamaño de grano (ASTM)
API 5L X52	86.64	13.35	7
API 5L X65	78.55	21.45	8

### 3.2. Composición química de los aceros empleados

Mediante la técnica de análisis por emisión óptica (chispa) con un espectrómetro de arco y chispa marca BELEC, se obtuvo la composición química de los aceros los cuales se presentan en la Tabla 3.2.



**Tabla 3.2. Composición química de los aceros API 5L X52 Y X65.**

Acero	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Ni	Fe
API 5L X-52	0.170	0.754	0.210	0.008	0.042	0.103	0.387	0.091	98.2
API 5L X-65	0.154	1.357	0.231	0.023	0.014	0.061	0.001	0.022	98.0

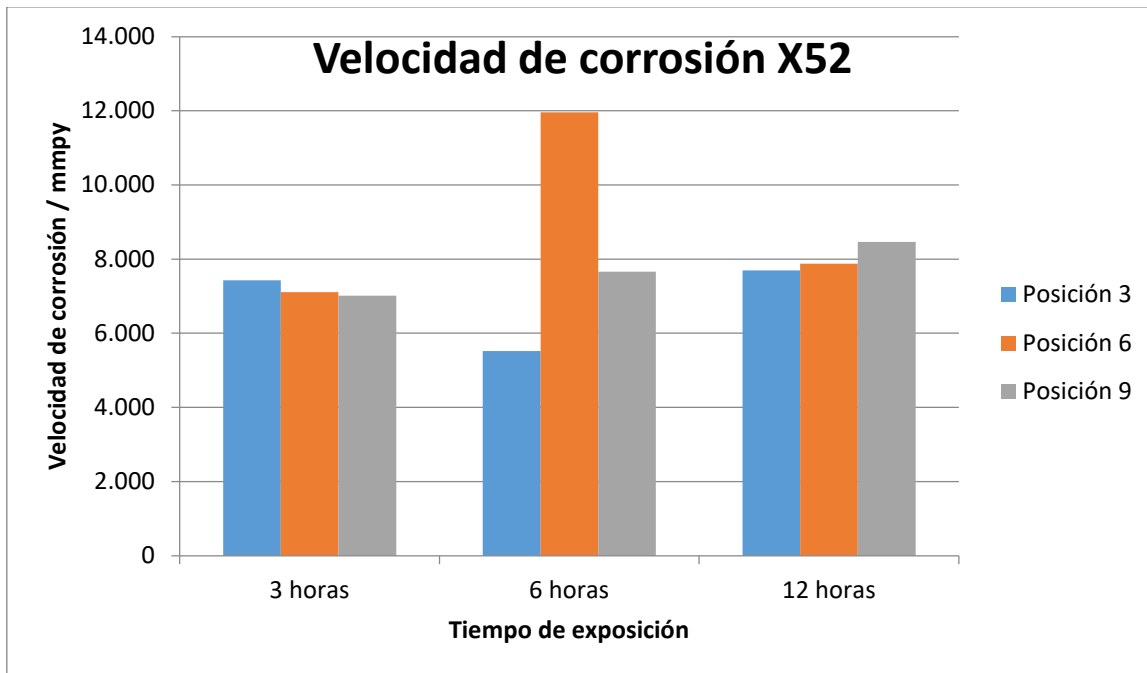
De los datos obtenidos se observa que conservan similitud en el contenido de carbono aunque sea un poco mayor en el X52 y el porcentaje de azufre es relativamente bajo en ambos casos. Existen otros elementos que intervienen en el comportamiento de los aceros en su velocidad de corrosión los cuales son el cromo, cobre y níquel; en conjunto, estos elementos resultan importantes en el comportamiento de los aceros como se explica más adelante.

### **3.3 Determinación de la velocidad de corrosión por Resistencia a la polarización ( $R_p$ )**

Se dividió el experimento en dos pruebas utilizando el mismo medio como agente corrosivo. En la primera prueba se utilizó el acero API 5L X52 y en la segunda el acero API 5L X65.

En la Figura 3.2 se muestra la velocidad de corrosión respecto a las posiciones en el cople para el acero grado X52 en función del tiempo de exposición. Los resultados muestran un aumento en la velocidad de corrosión a medida que transcurre el tiempo en la zona crítica de la posición 6 para un tiempo de exposición de seis horas, siendo la zona que tuvo una inestabilidad mayor comportándose diferente respecto a las otras posiciones. Si bien no existe una relación directa de las posiciones a medida que transcurre el tiempo, la relación de los valores es más cercana entre la posición 3 y 9. El comportamiento de la posición 6 se debe probablemente a la interacción que tiene la superficie del metal

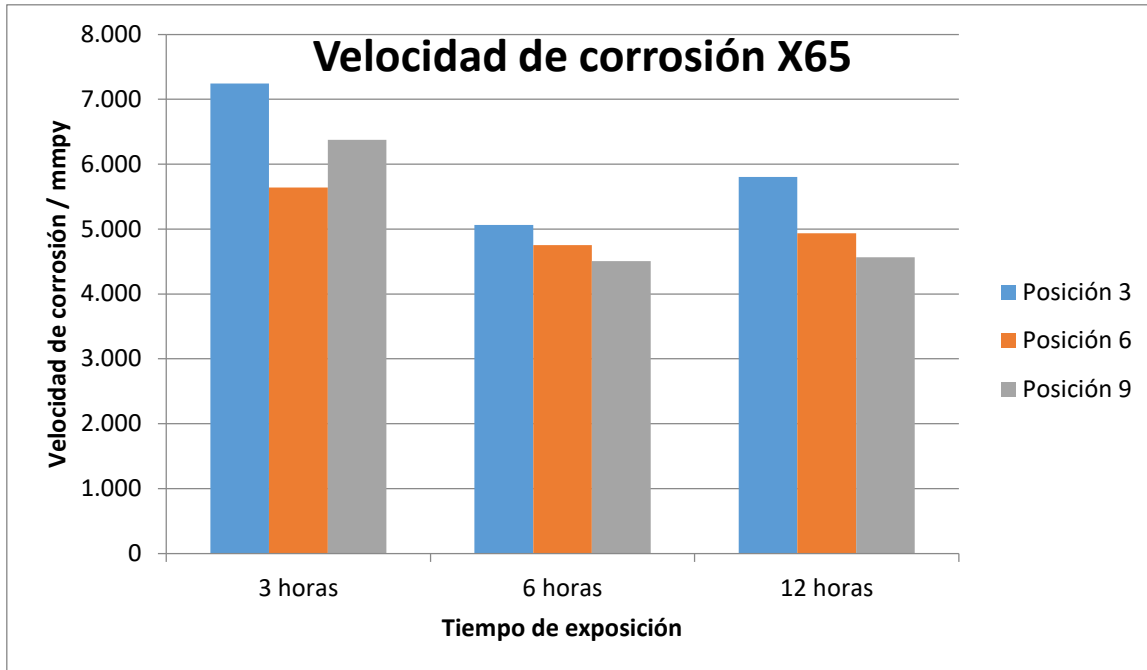
con el agente turbulento al que está expuesto, la cual se analiza más adelante en las caracterizaciones de los productos de corrosión. Al final de la prueba las velocidades de corrosión en cada una de las posiciones tienen cierta similitud al aproximarse a los 8 milímetros por año.



**Figura 3.2. Velocidad de corrosión del acero API 5L X52 para cada una de las posiciones en función del tiempo de exposición.**

En la Figura 3.3 se muestran los resultados de la segunda prueba, inmediatamente se observa que la velocidad de corrosión es menor que el acero grado X52, partiendo del hecho que el X65 tiene menos de 8 mmpy en todos los registros. También se aprecia que el acero tiene una tendencia a disminuir aún más la velocidad de corrosión, probablemente suceda porque el acero se protege desde el inicio de la prueba y mantiene los productos en su superficie. Respecto a la posición 3 la tendencia al final de la prueba es a incrementar su actividad y quizá sea resultado de desprendimientos en su superficie. Las caracterizaciones de la superficie al final de la prueba se analizan más adelante.

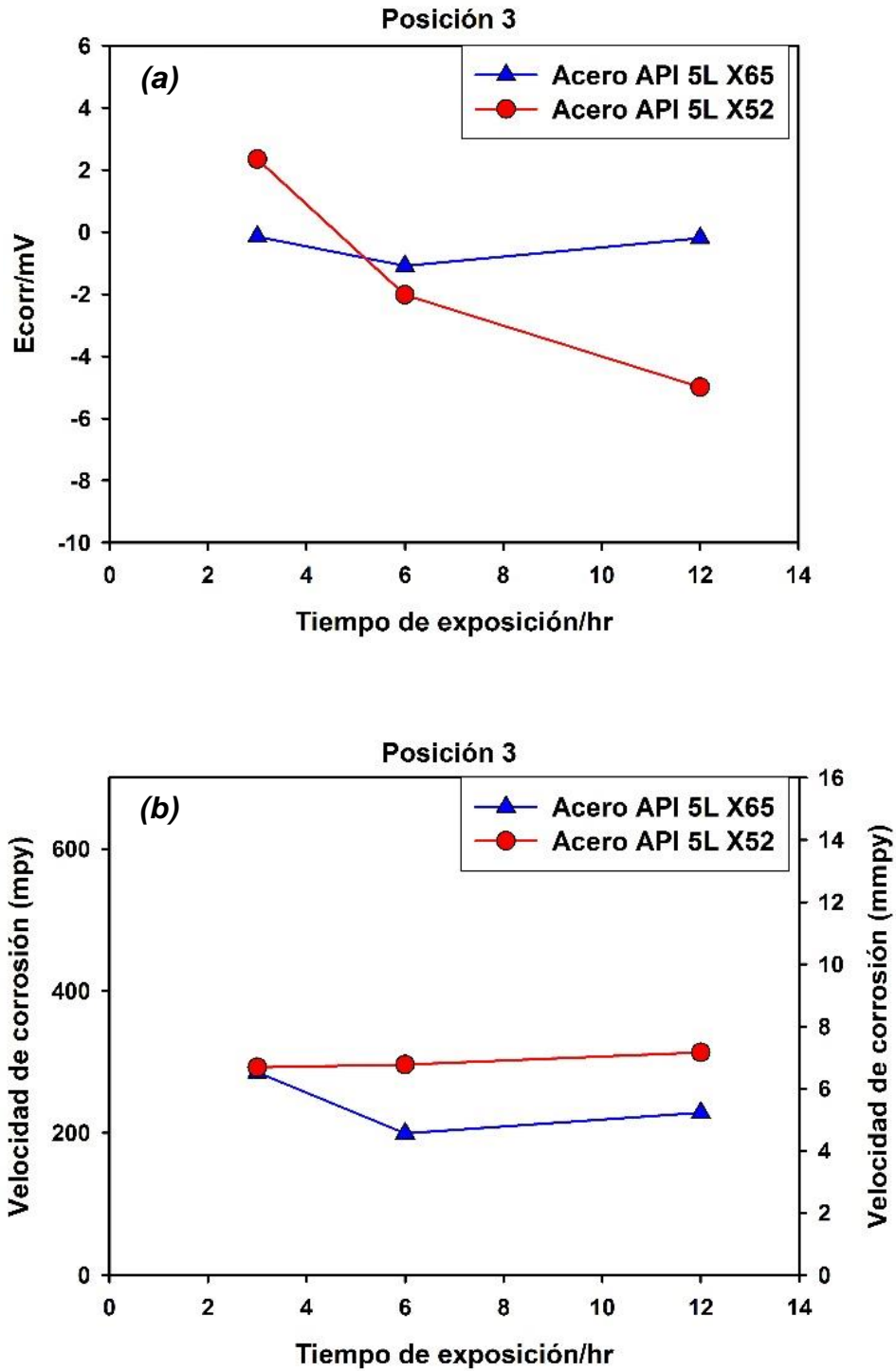




**Figura 3.3. Velocidad de corrosión del acero API 5L X65 para cada una de las posiciones en función del tiempo de exposición.**

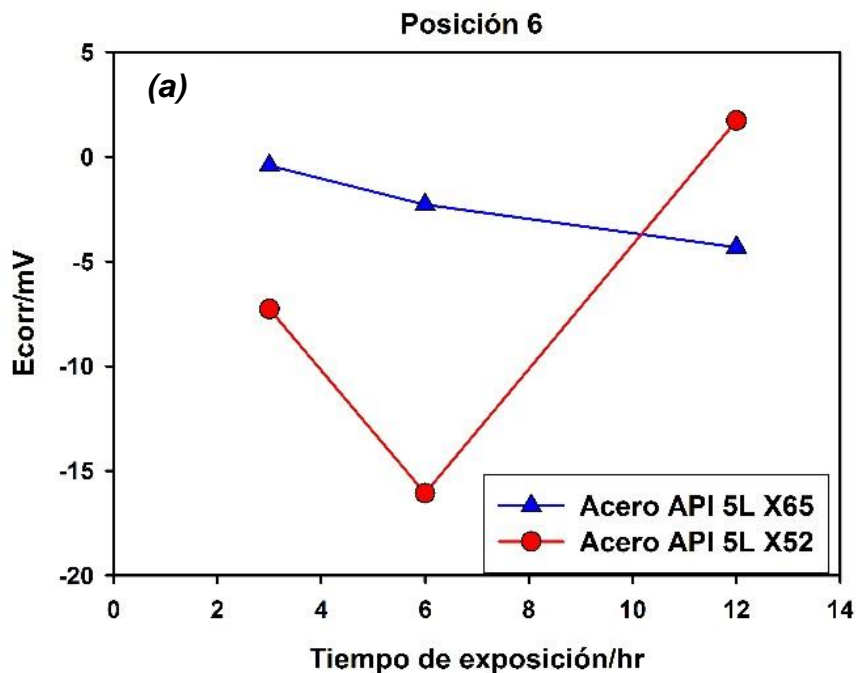
La Figura 3.4 se muestra la velocidad y potencial de corrosión para cada acero y la correspondiente posición en función del tiempo de exposición. En la posición de las tres horas se observa de manera similar la velocidad de corrosión, el acero grado X52 muestra una mayor velocidad de corrosión respecto al X65 y muestra esa tendencia hacia las 12 horas. Sin embargo, su potencial de corrosión comienza a ser más negativo desde el inicio de la prueba y continúa así hasta el final, esto indica que el acero a pesar de protegerse continúa su actividad al formar productos de corrosión. Para el acero X65, una vez que se genera la capa protectora de óxidos y/o sulfuros en la superficie del material a las tres horas de prueba y que se corrobora con el potencial de corrosión, el centro del material queda protegido hasta las doce horas, ya que la velocidad y el potencial aumentan nuevamente lo que probablemente indique que se forma una capa de material adicional a la superficie ya generada.

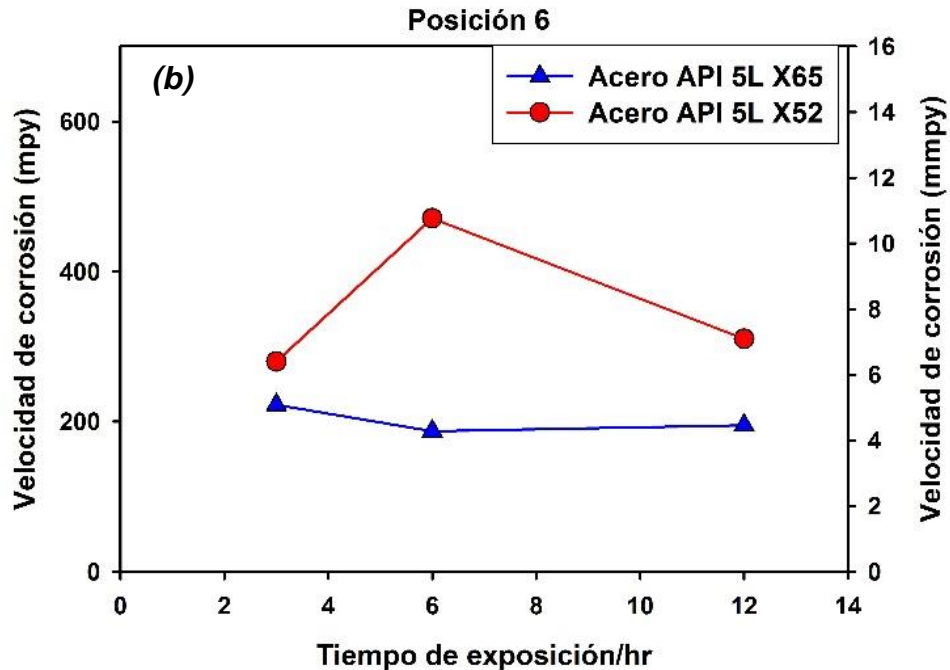




**Figura 3.4. Relación del potencial de corrosión (a) y la velocidad de corrosión de los aceros (b) en la posición 3.**

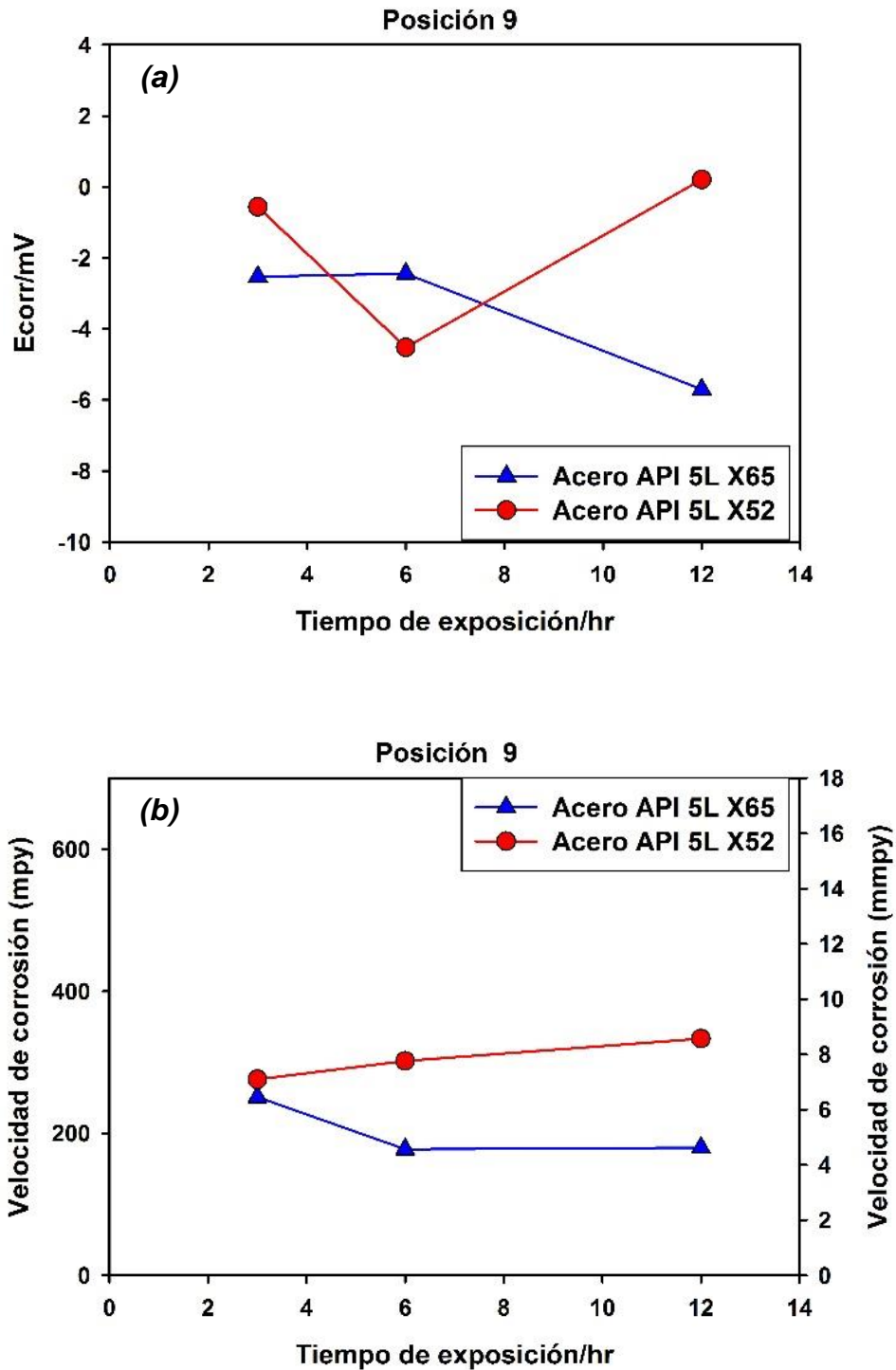
En la Figura 3.5 se muestra la velocidad y potencial de corrosión para cada acero en la posición 6 la correspondiente posición en función del tiempo de exposición. Se observa que la velocidad de corrosión en el acero grado X65 tiene una tendencia constante, al superponerlo con su potencial de corrosión se aprecia que de la misma manera tiene una ligera tendencia a ser más pasivo. De manera contraria la velocidad en el acero grado X52 se ve influenciada por la actividad del acero. Para el tiempo de exposición de tres horas el acero no mostraba señales de protegerse, es hasta las seis horas cuando la actividad del acero comienza y se protege a sí mismo, disminuyendo la velocidad de corrosión.





**Figura 3.5. Relación del potencial de corrosión (a) y la velocidad de corrosión de los aceros (b) en la posición 6.**

En la Figura 3.6 se muestra la velocidad y potencial de corrosión para cada acero y la correspondiente posición en función del tiempo de exposición en la posición 9. De manera general se observa que el acero grado X52 describe un comportamiento de corrosión que va en aumento conforme transcurre el tiempo de exposición a pesar de que el potencial de corrosión muestre que el acero fue menos activo al inicio de la prueba, es hasta las seis horas de exposición en que el acero presenta mayor actividad para posteriormente a las 12 horas ser el menos activo. Por otra parte, el acero X65 al inicio de la prueba es más activo y probablemente genere una capa de productos de corrosión de manera más rápida puesto que a las seis horas de la prueba presenta la menor velocidad de corrosión. Aunque a las 12 horas de prueba el potencial de corrosión indique que el material comienza a ser más activo, su velocidad de corrosión es muy similar a las seis horas de la prueba, posiblemente porque comience un desprendimiento en los productos que le protegen.

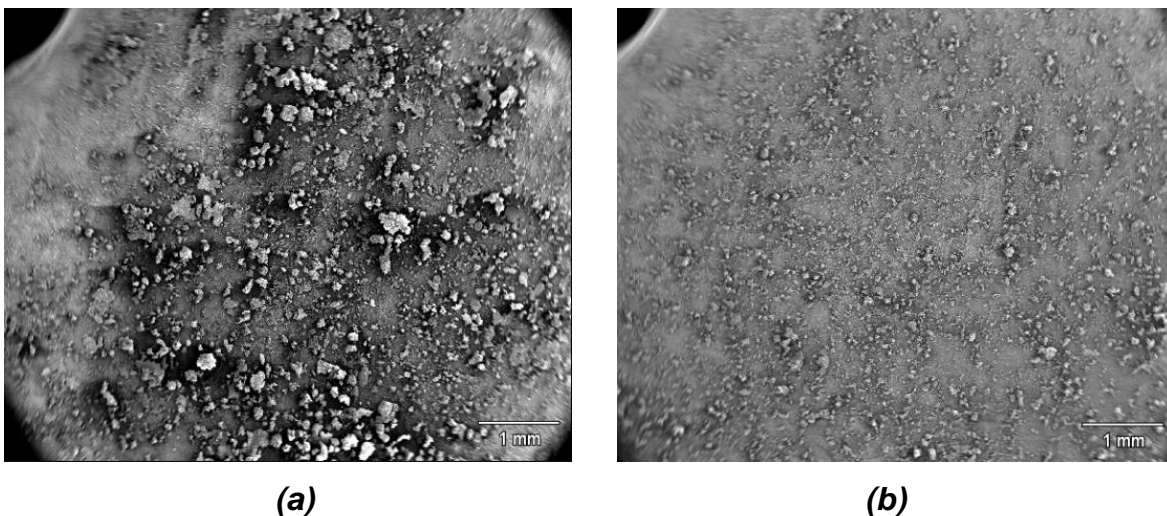


**Figura 3.6. Relación del potencial de corrosión (a) y la velocidad de corrosión de los aceros (b) en la posición 9.**

### 3.4 Caracterización de los productos de corrosión mediante el uso de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

En las Figuras 3.7 – 3.9 se muestran las micrografías a 15X para los diferentes tiempos de exposición para cada acero. De manera general se observa que no hay diferencia en la morfología de las capas de los productos de corrosión para los distintos aceros en las primeras tres y seis horas de exposición pues presentan una forma relativamente esférica, sólo se observa en el acero X52 una mayor presencia de productos de corrosión.

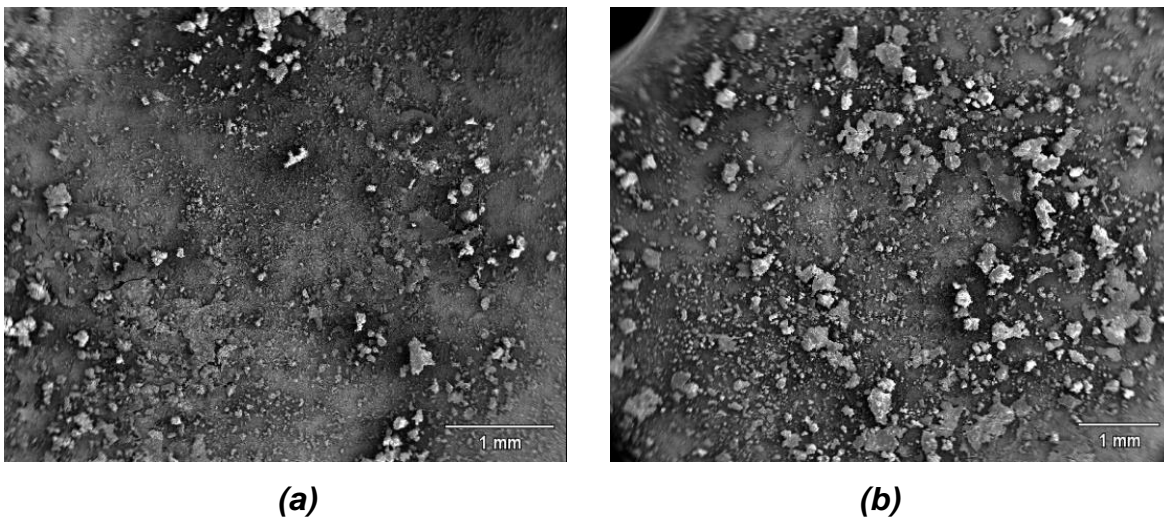
En la Figura 3.7 se muestran los productos de corrosión para los dos tipos de aceros. En el caso del acero X52 la protección que genera el acero consiste en agrupaciones o cúmulos de productos de corrosión de diversos tamaños. Para el acero X65 los productos generan una capa de productos pequeños y redondeados dispersos en la superficie de la probeta. Las micrografías sugieren que el acero X65 tuvo un mejor comportamiento al formar productos pequeños y adherentes los cuales resisten el flujo turbulento y mantiene baja su velocidad de corrosión, tal como se observa en la Figura 3.6.



**Figura 3.7. Micrografía de los aceros API 5L X52 (a) y X65 (b) en la posición 9 después de tres horas de exposición a 15X.**

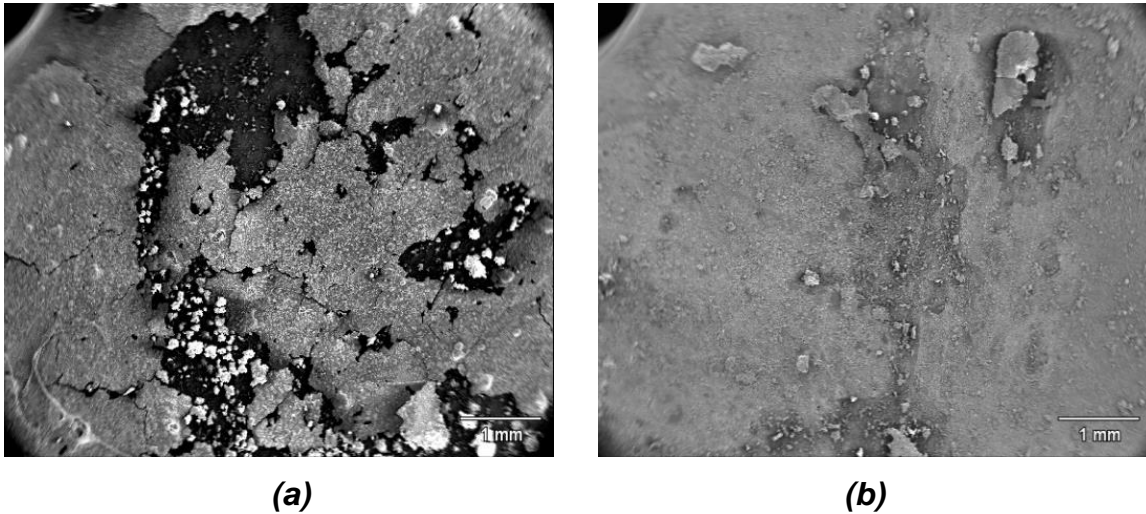


En la Figura 3.8 se observan los productos de corrosión que se generaron después de seis horas de exposición, los cuales se presentan en mayor proporción en el X65 y por ende, se tiene una menor velocidad de corrosión tal como se observa en la Figura 3.6. Por otro lado, el acero X52 presenta una menor cantidad de productos de corrosión, probablemente por el desprendimiento que se lleva a cabo por la acción del flujo.



**Figura 3.8. Micrografía de los aceros API 5L X52 (a) y X65 (b) en la posición 9 después de seis horas de exposición a 15X.**

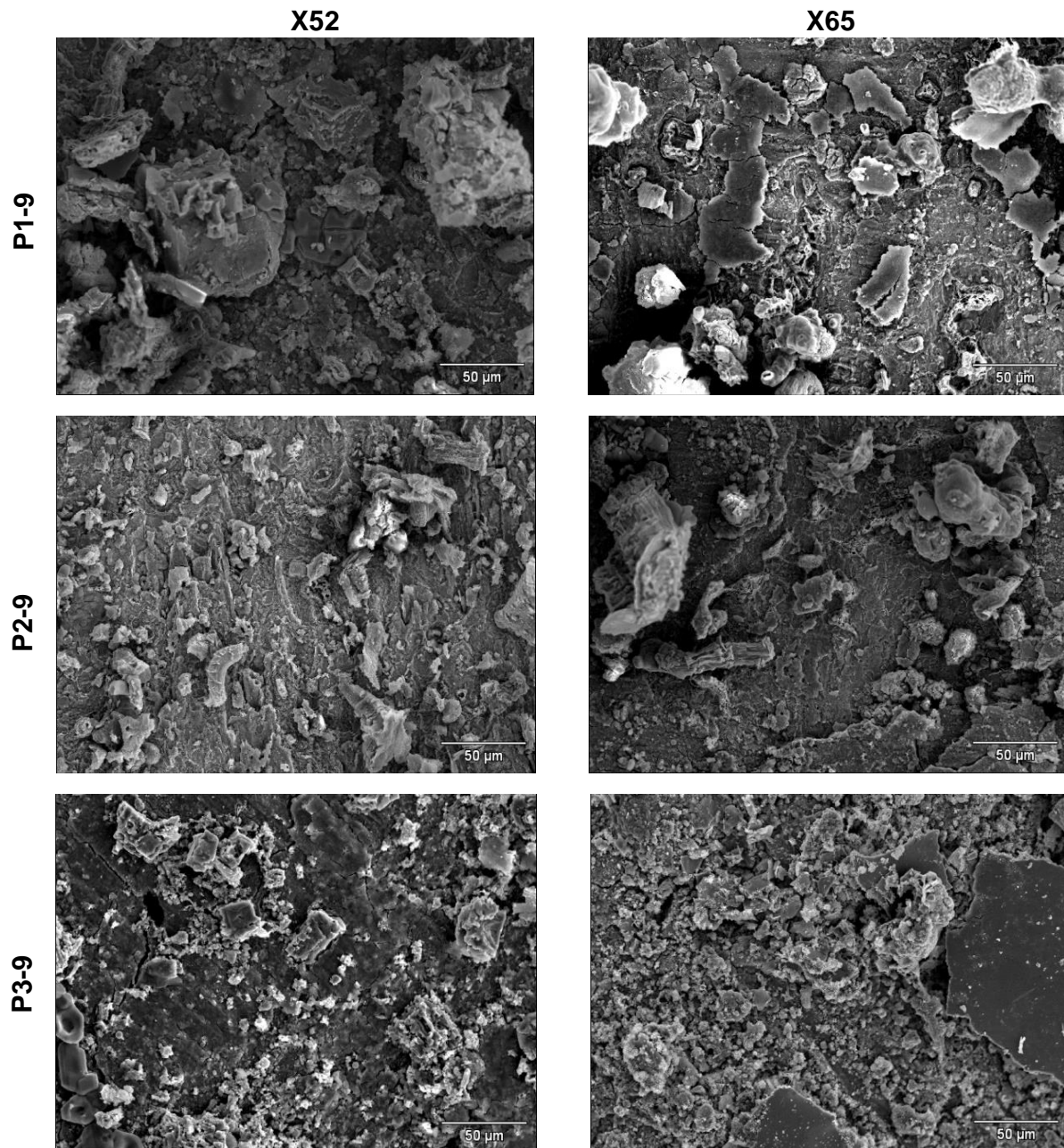
En la Figura 3.9 las micrografías muestran una forma totalmente diferente a las probetas expuestas por tres y seis horas, se observa un claro desprendimiento de los productos de corrosión en ambos aceros. En la micrografía se observa que la acción del flujo no desprende la capa protectora de manera uniforme, lo hace de manera parcial generando grietas. El acero X65 no presenta zonas tan oscuras por lo que los productos presentan una mayor adherencia y no se desprenden desde el material base.



**Figura 3.9. Micrografía de los aceros API 5L X52 (a) y X65 (b) en la posición 9 después de 12 horas de exposición a 15X.**

En la Figura 3.10 se muestran las micrografías a 400X para la posición 9 a diferentes tiempos de exposición, donde se observan de manera más precisa la morfología de los productos de corrosión los cuales resultan ser de tipo irregular. Sin embargo, en el acero X52 se observa un desprendimiento de los productos más grandes probablemente como consecuencia del flujo lo que corrobora el paulatino aumento en la velocidad de corrosión y un comportamiento más activo a las seis horas de exposición, tal como se observa en la Figura 3.6(a).

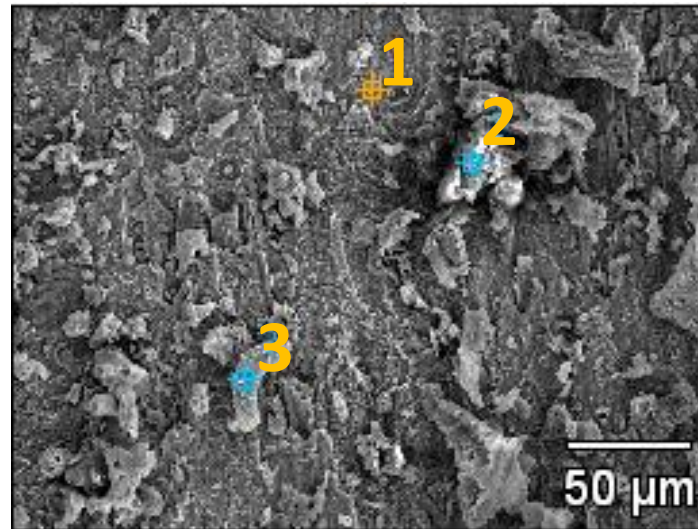




**Figura 3.10. Micrografías a 400X de los aceros API 5L X52 y X65 en la posición 9 a los tres diferentes tiempos de exposición.**



En la Figura 3.11 y Tabla 3.3 se muestran el análisis puntual para el acero X52 a 6 horas de exposición en la posición 9. El punto 1 muestra la presencia de óxidos y sulfuros y de igual manera los puntos 2 y 3 pero en mayor proporción.

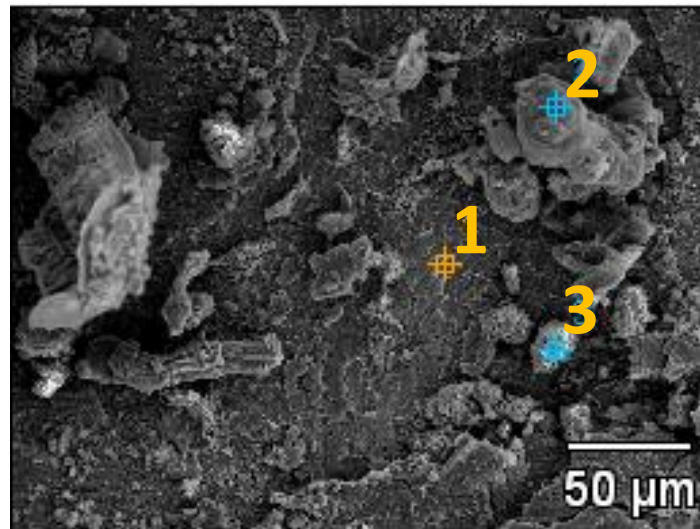


**Figura 3.11. Caracterización puntual de la distribución cuantitativa y cualitativa de los elementos presentes en el acero X52, posición 9, cople P2, a 400X.**

**Tabla 3.3. Por ciento peso de la caracterización puntual del acero X52, posición 9, cople P2, a 400X**

X52	C	O	S	Fe
Punto 1	12.29	15.61	0.91	65.84
Punto 2	12.97	33.88	0.49	49.13
Punto 3	17.11	30.73	1.12	33.16

En la Figura 3.12 y Tabla 3.4 se muestran el análisis puntual para el acero X65 a 6 horas de exposición en la posición 9. El punto 1 muestra la únicamente la presencia de óxidos y en los puntos 2 y 3 se observa la presencia de una mezcla de óxidos y sulfuros.

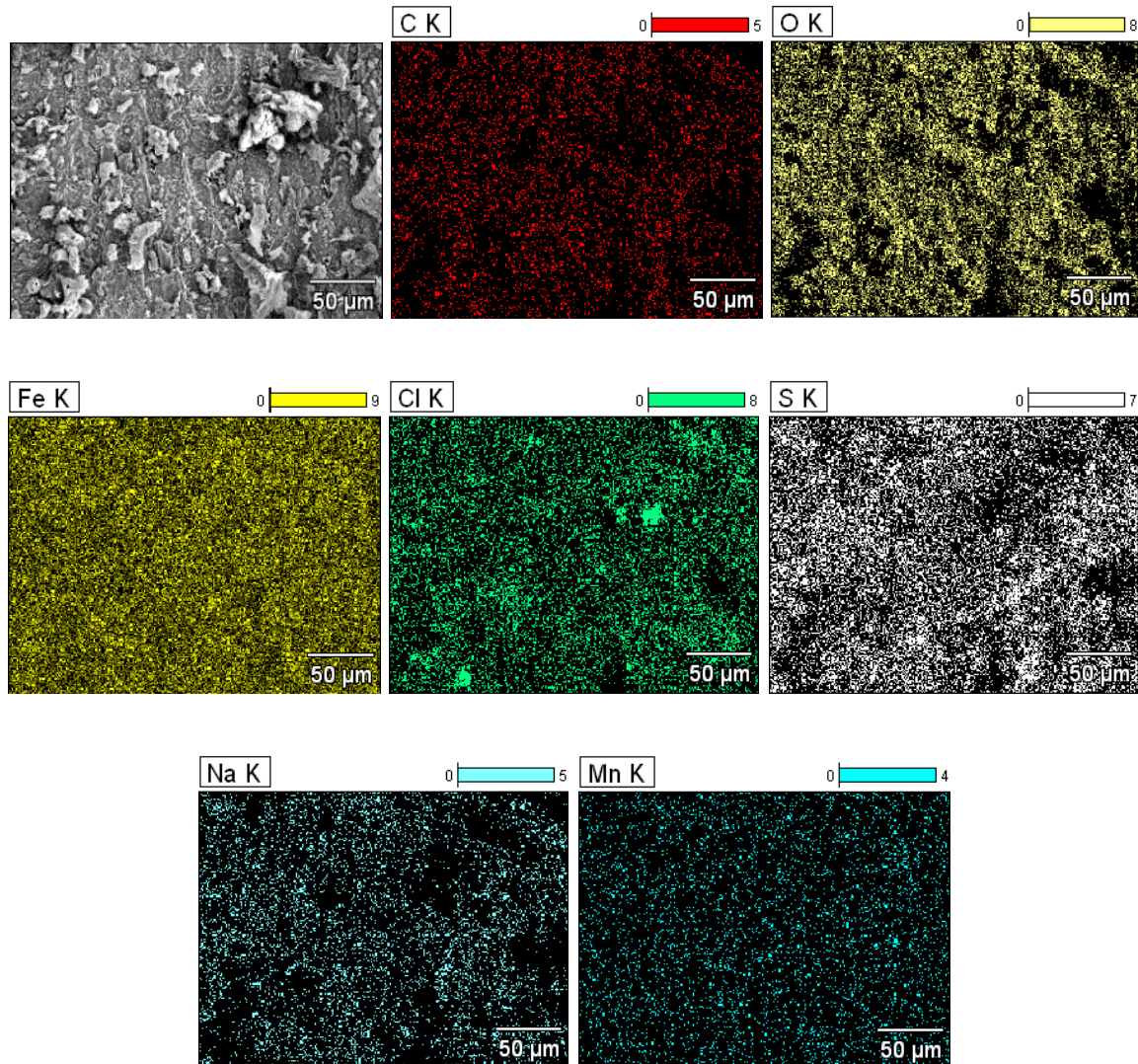


**Figura 3.12. Caracterización puntual de la distribución cuantitativa y cualitativa de los elementos presentes en el acero X65, posición 9, cople P2, a 400X.**

**Tabla 3.4. Por ciento peso de la caracterización puntual del acero X65, posición 9, cople P2, a 400X**

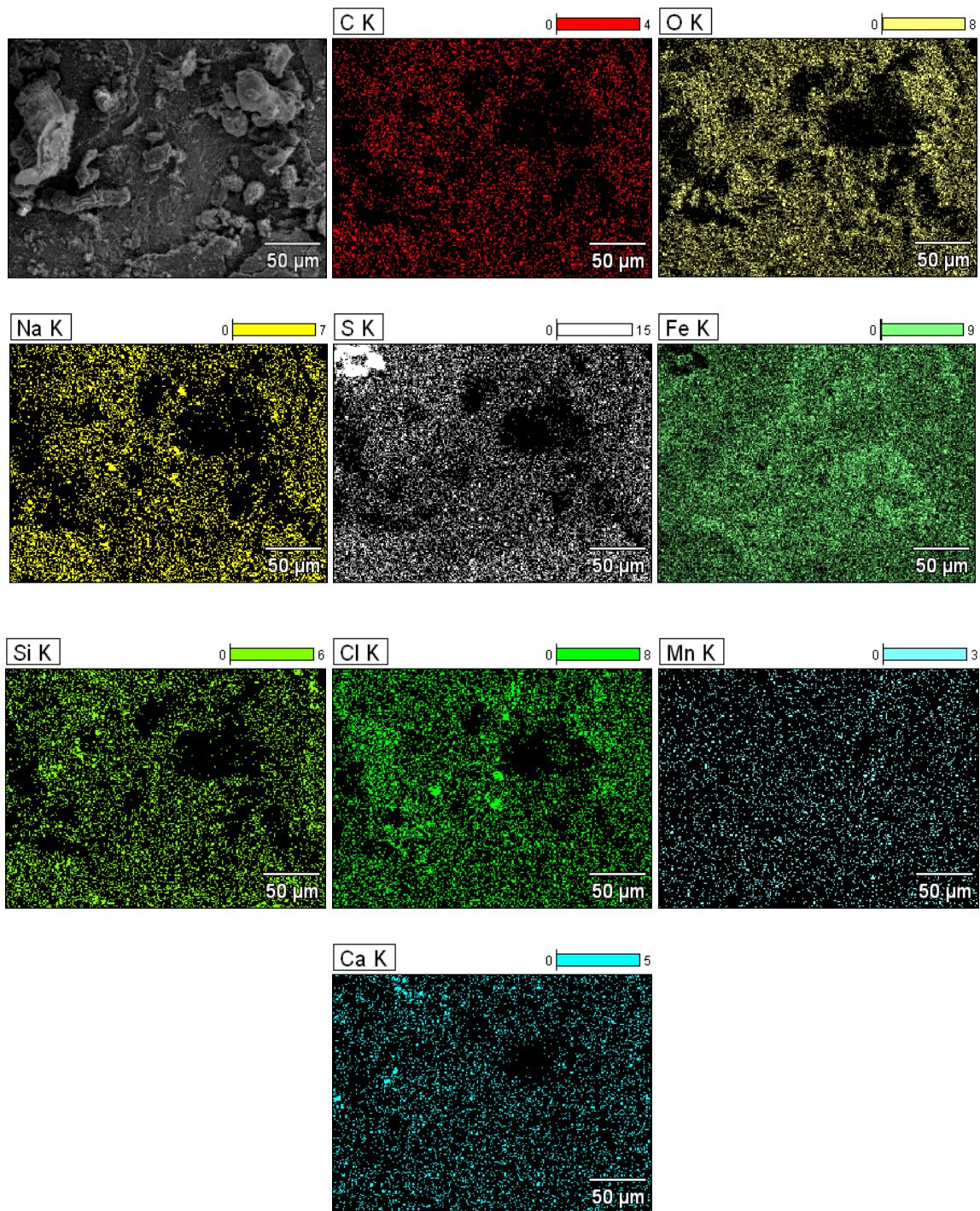
X65	C	O	S	Fe
Punto 1	0.00	5.60		91.31
Punto 2	12.15	22.95	2.48	56.99
Punto 3	10.87	14.37	2.57	67.10

Las Figuras 3.13 y 3.14 se muestran los mapeos de los aceros X52 y X65 respectivamente, a seis horas en la posición 9. Se aprecian elementos propios de la salmuera como Cl, Na y Ca. La presencia de oxígeno y azufre sugiere la formación de óxidos y sulfuros que se formaron en la superficie.



**Figura 3.13. Mapeo de elementos sobre productos de corrosión del acero API 5L X52 a 400X. Acc. Voltage: 15.0 kV.**





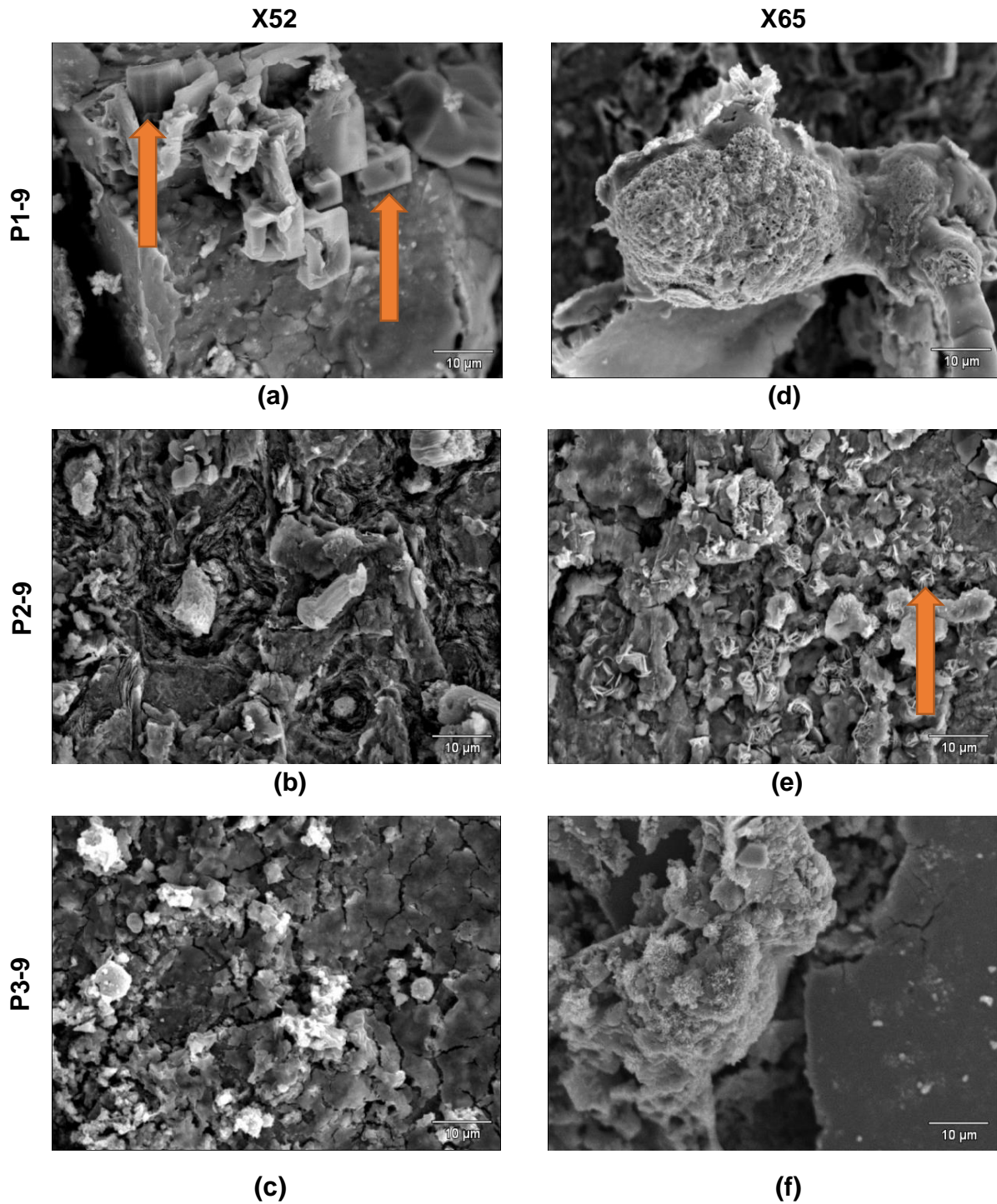
**Figura 3.14. Mapeo de elementos sobre productos de corrosión del acero API 5L X65 a 400X. Acc. Voltage: 15.0 kV.**



La Figura 3.15 muestra las micrografías tomadas a 1500X a mayor detalle la morfología de los productos de corrosión para ambos aceros. Se observa que en el acero X52 a tres horas de exposición (a) claramente aparece una forma definida de prismas regulares con base cuadrada y hexagonal, tal como lo Pengpeng.<sup>[30]</sup> Sin embargo, para el acero X65 (d) no se aprecia con exactitud especies cristalinas sino más bien un cúmulo con bordes redondeados.

La Figura 3.15 (b) y (e) a 6 horas de exposición presentan desprendimientos en la superficie, especialmente en el acero grado X52, por acción del flujo, lo cual se refleja en un incremento de la velocidad de corrosión y un cambio en el potencial de corrosión al ser más activo al quedar material base expuesto a la corrosión (Figura 3.6). Por otro lado, en el acero X65 se observa indicios de diversas “agujas” las cuales sugieren la tendencia de formación de los llamados “cactus”.

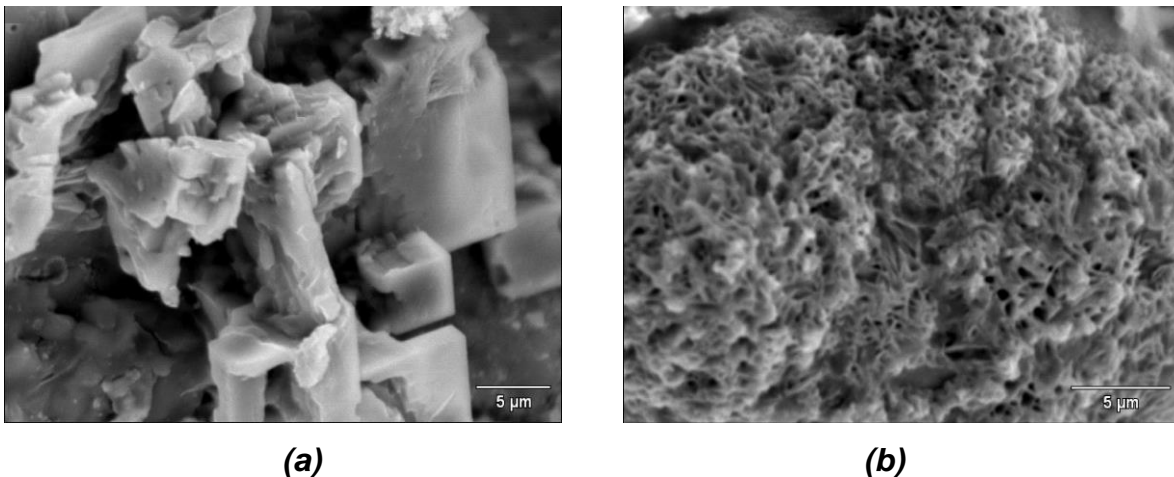
En la Figura 3.15 (c) y (f) se observan los productos de corrosión formados a las 12 horas de experimentación, para ambos aceros se tienen productos de forma irregular. Sin embargo para X65 se tiene una aglomeración de los productos de corrosión y por ende una disminución de la velocidad de corrosión (Figura 3.6).



**Figura 3.15. Micrografías a 1500X para los aceros API 5L X52 y X65 en la posición 9 a los tres diferentes tiempos de exposición.**

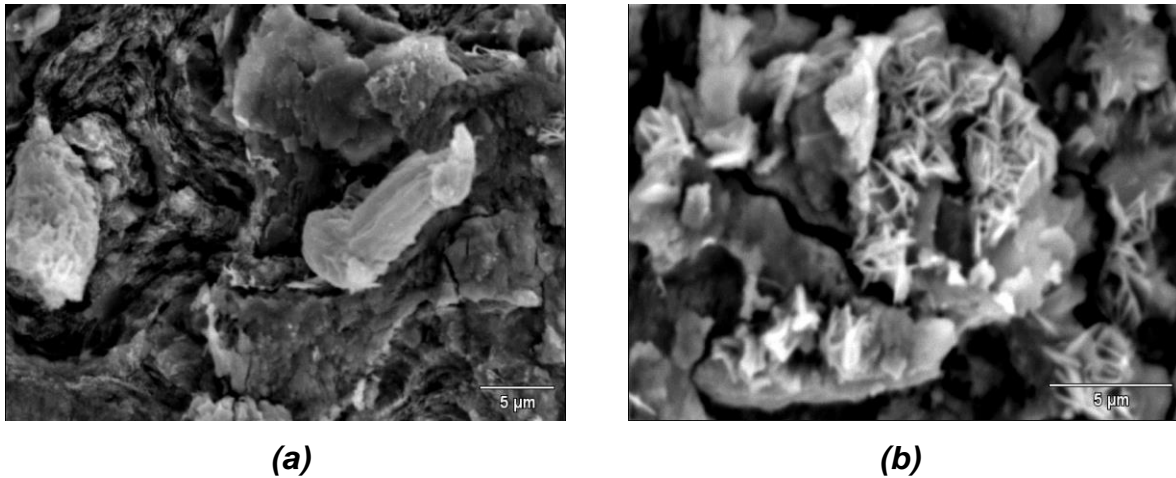


La Figura 3.16 a 3 horas de exposición del medio, se observan productos de corrosión de forma irregular a 3000X para el acero X52. Para el caso del acero X65 a 4000X se observan productos de corrosión tipo cactus con cierto grado de porosidad, lo cual sería más susceptible a desprendimientos por la acción del flujo lo cual provoca un incremento de la velocidad de corrosión.



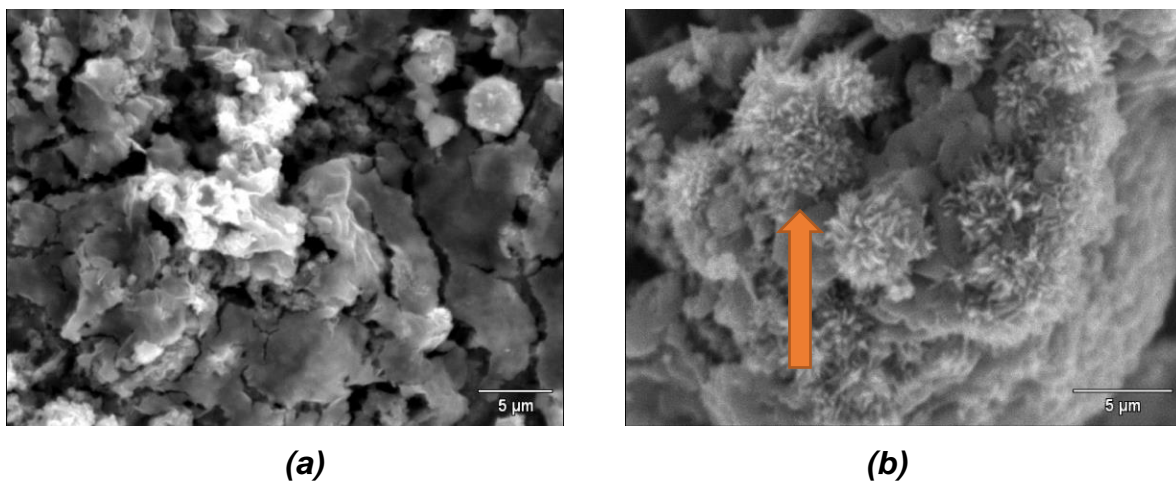
***Figura 3.16. Micrografía de los aceros API 5L X52 a 3000X (a) y X65 a 4000X (b), en la posición 9 después de 3 horas de exposición.***

En la Figura 3.17 se aprecia de manera más precisa que a las seis horas de exposición, la tendencia de las morfologías encontradas para ambos aceros es del tipo cactus. Sin embargo se observa un mayor desprendimiento para el acero X52 lo cual se ve reflejado en el incremento de la velocidad de corrosión, tal como se observa en la Figura 3.6.



**Figura 3.17. Micrografía de los aceros API 5L X52 a 3000 aumentos (a) y X65 a 5000 aumentos (b), en la posición 9 después de 6 horas de exposición.**

En la Figura 3.18 se aprecia que a las 12 horas de experimentación el acero X52 presenta mayor desprendimiento de los productos de corrosión en comparación con el X65 y por ende un mayor incremento de la velocidad de corrosión. Los productos de corrosión para el X65 tienden a ser del tipo cactus con tendencia a ser redondeados, lo cual favorece el paso del flujo, Figura 3.6.



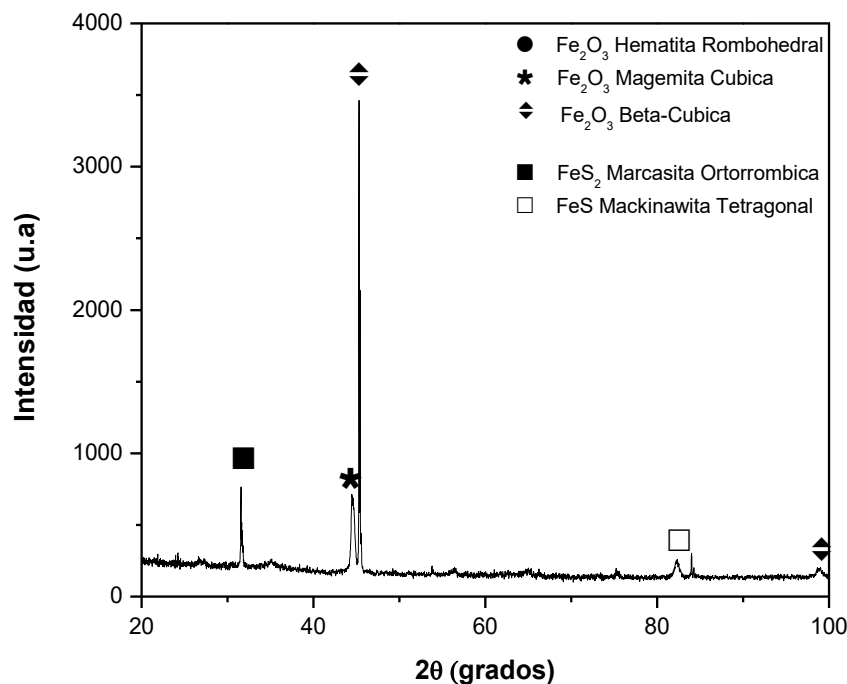
**Figura 3.18. Micrografía de los aceros API 5L X52 a 3000 aumentos (a) y X65 a 4000 aumentos (b), en la posición 9 después de 12 horas de exposición.**



### 3.5 Caracterización de los productos de corrosión mediante el uso de Difracción de Rayos X (DRX)

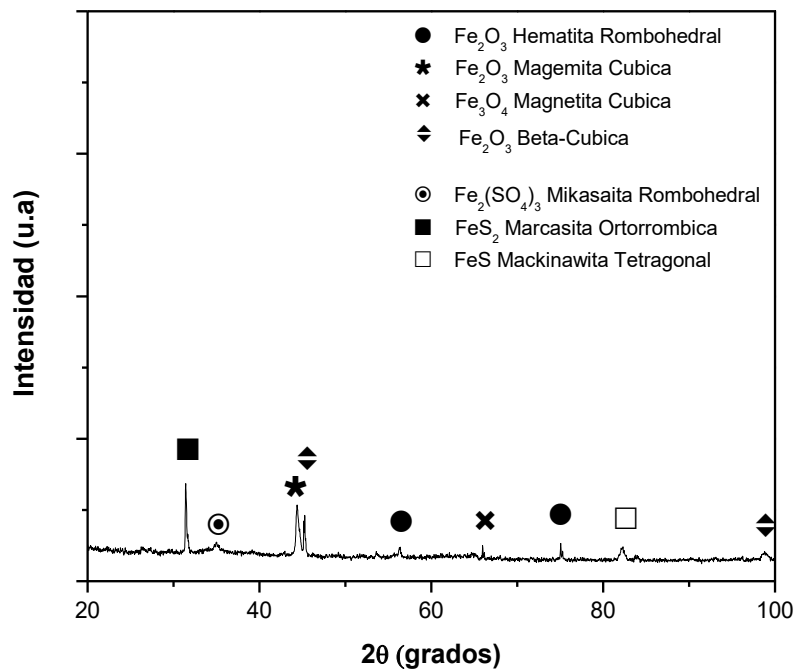
En las Figuras 3.19 – 3.21 se muestran los difractogramas correspondientes al acero API 5L X52 en la posición 9 para los tres diferentes tiempos de exposición.

En la Figura 3.19 se observan los productos de corrosión a tres horas de exposición en donde se identifica mayor predominancia de óxidos respecto a los sulfuros, especialmente la formación del óxido Beta-Cúbica ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). De acuerdo a Hernández-Espejel<sup>[31]</sup> los óxidos son menos protectores que los sulfuros al no presentar buena adherencia para resistir el FAC, por cual se tiene un incremento ligeramente mayor de la velocidad de corrosión respecto al acero X65, tal y como se observa en la Figura 3.6.



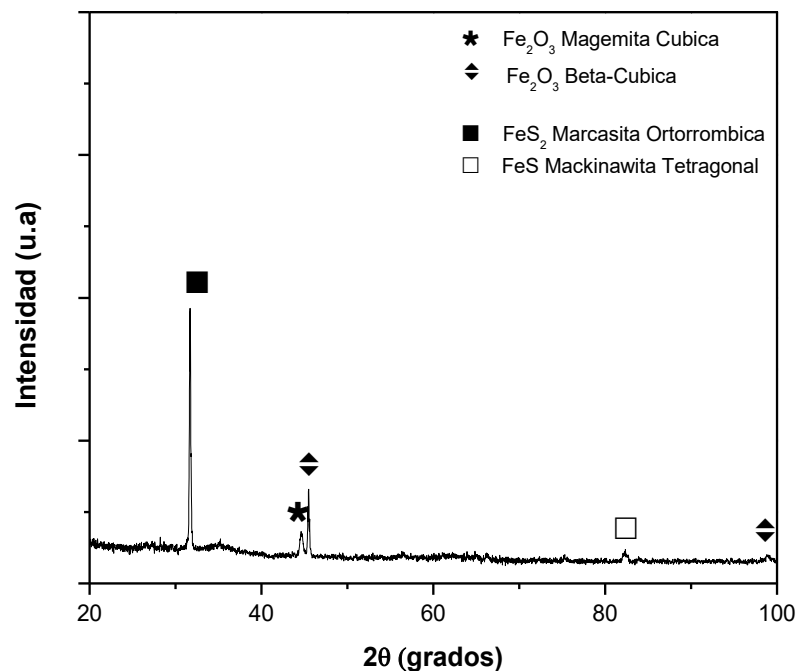
**Figura 3.19. Difractograma del acero API 5L X52 en posición 9 después de 3 horas de experimentación.**

La Figura 3.20 muestra los productos de corrosión a 6 horas de exposición mostrando una mayor una gama de productos tales como óxidos, sulfuros y la presencia de un sulfato. Para este tiempo, se observa que la acción del flujo remueve gran parte del óxido tipo Beta-Cúbica lo cual a su vez permite la aparición de nuevas especies; esto explica que el potencial de corrosión del material comienza a formar una capa más estable por la acción de los sulfuros. Sin embargo, hay un desprendimiento de óxidos y por ende un incremento de la velocidad de corrosión como lo muestra la Figura 3.6. Hernández-Espejel, op. cit.



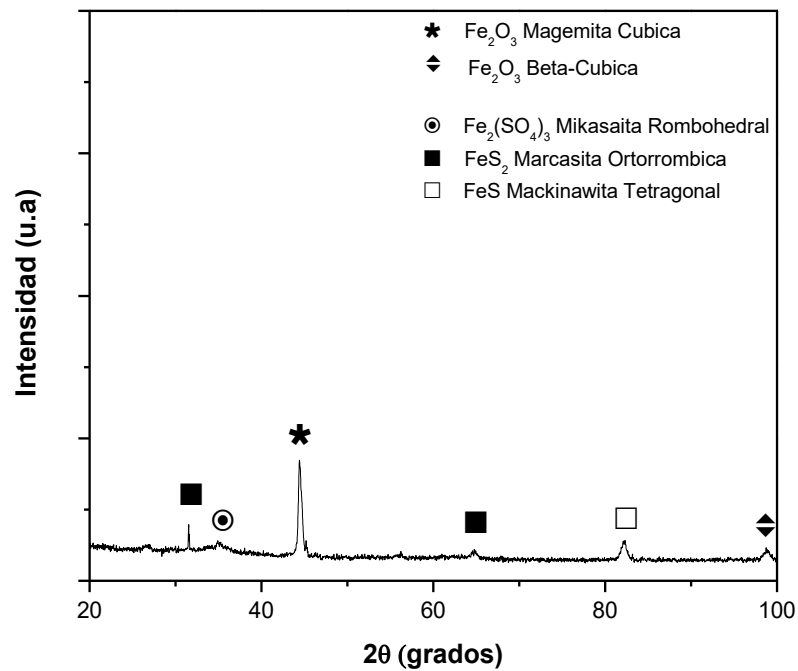
**Figura 3.20. Difractograma del acero API 5L X52 en posición 9 después de 6 horas de experimentación.**

En la Figura 3.21 se muestra el difractograma de la probeta expuesta a doce horas identificándose dos especies de óxidos y dos especies de sulfuros. En esta etapa de la prueba se destaca la predominancia de sulfuros respecto a los óxidos, lo cual favorece la estabilidad de la capa protectora, siendo la marcasita ortorrómbica ( $\text{FeS}_2$ ) la que se presenta con mayor intensidad y aunado con la mackinawita ( $\text{FeS}$ ) proporcionan una mayor protección al acero. Estos productos estabilizan a velocidad de corrosión tal como se muestra en la Figura 3.6.



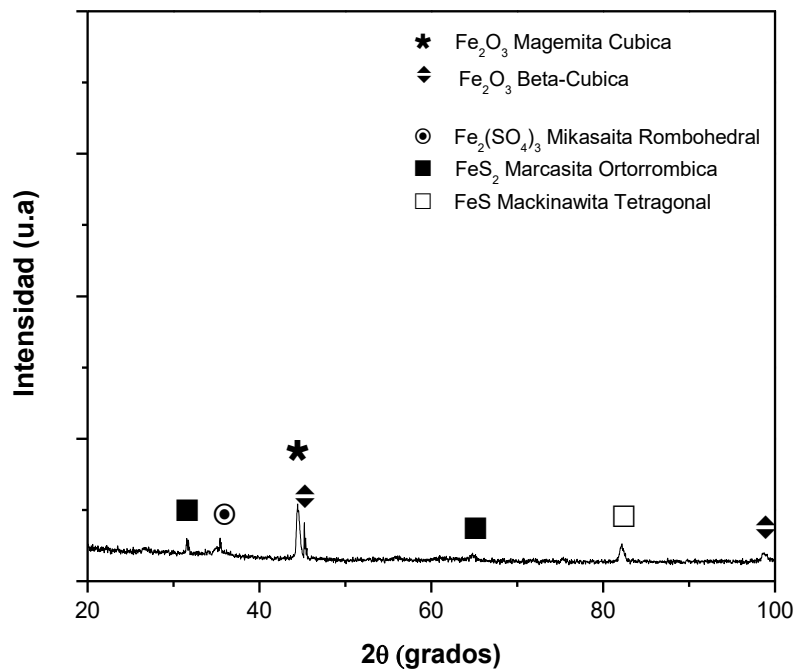
**Figura 3.21. Difractograma del acero API 5L X52 en posición 9 después de 12 horas de experimentación.**

La Figura 3.22 muestra el difractograma de las primeras 3 horas de prueba para el acero X65 donde se comprueba que este acero desarrolló a lo largo de la prueba una mayor variedad de productos de corrosión tales como sulfuros y un sulfato, los cuales en comparación con los óxidos, tienen un comportamiento de mayor adherencia y por ende una disminución de la velocidad de corrosión en comparación con el acero X52, tal como se muestra en la Figura 3.6.



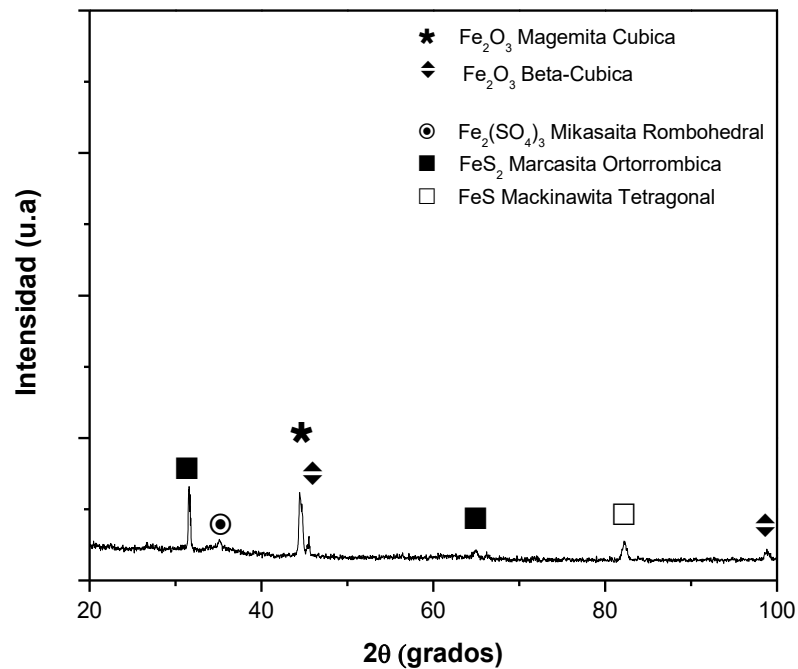
**Figura 3.22. Difractograma del acero API 5L X65 en posición 9 después de 3 horas de experimentación.**

En la Figura 3.23 se presenta el difractograma de la probeta para la posición 9 después de seis horas de experimentación. Se observa la presencia de la misma gama de productos de corrosión. El EDS de la Figura 3.12 muestra que las zonas donde aparece el oxígeno también aparece azufre, logrando con ello una mayor estabilidad o adherencia de los productos de corrosión generados. De esta manera, el acero X65 tiene una mayor estabilidad y por ende una disminución de la velocidad de corrosión, este comportamiento ha sido descrito por Muhammad. [33]



**Figura 3.23. Difractograma del acero API 5L X65 en posición 9 después de 6 horas de experimentación.**

Por último, en el difractograma de la Figura 3.24 se observa la misma gama de productos de corrosión respecto a las probetas sujetas a menor tiempo de exposición. Sin embargo, la marcasita ortorrómbica ( $\text{FeS}_2$ ) aparece con más intensidad. Esto puede explicar la estabilidad de la velocidad de corrosión tal como se observa en la Figura 3.6.



**Figura 3.24. Difractograma del acero API 5L X52 en posición 9 después de 12 horas de experimentación.**



La Tabla 3.5 muestra una comparación general de los productos de corrosión formados en los aceros API 5L X52 y X65 a las 3, 6 y 12 horas de exposición al medio amargo.

**Tabla 3.5. Compuestos presentes en las probetas en posición 9 de los aceros API 5L X52 y X65 a diferentes tiempos de exposición.**

Probetas en posición 9						
Compuesto / Acero	Tiempo de exposición/hr					
	3		6		12	
	X52	X65	X52	X65	X52	X65
Hematita Rombohedral ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	X		X			
Magemita Cúbica ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	X	X	X	X	X	X
Beta-Cúbica ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	X	X	X	X	X	X
Magnetita Cúbica ( $\text{Fe}_2\text{O}_4$ )			X			
Marcasita Ortorrombica ( $\text{FeS}_2$ )	X	X	X	X	X	X
Mackinawita tetragonal ( $\text{FeS}$ )	X	X	X	X	X	X
Mikasaita Rombohedral ( $\text{Fe}_2(\text{So}_4)_3$ )		X	X	X		X



---

### 3.6 Análisis del efecto de flujo de fluido en las probetas

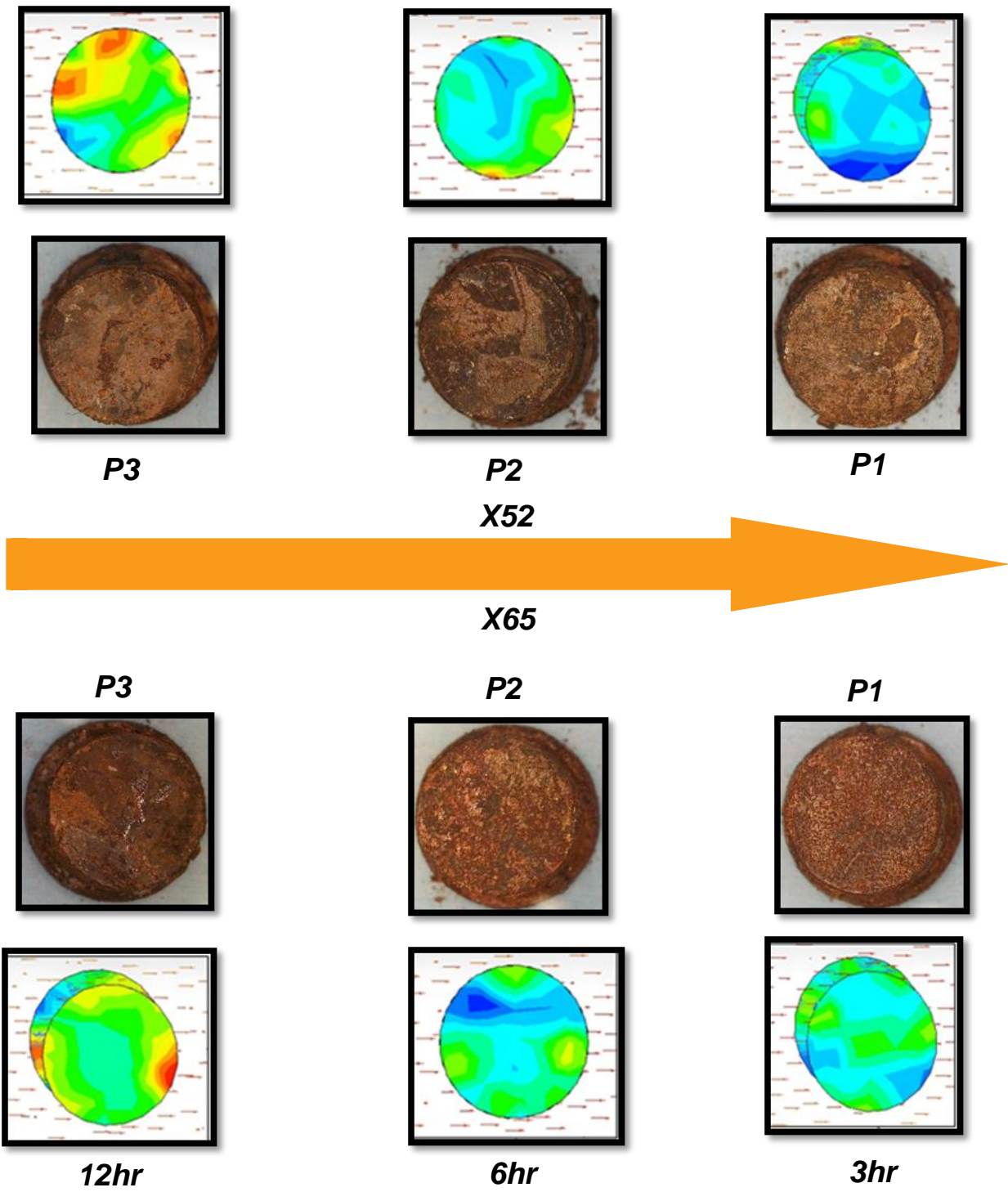
En la Figura 3.25 se realizó un análisis del comportamiento del flujo sobre la superficie de las probetas para estudiar el efecto que tiene el flujo turbulento sobre la formación y desarrollo de los productos de corrosión, lo cual afecta el potencial y la velocidad de corrosión.

El análisis consiste en una comparación de las superficies de las probetas, siendo las probetas llevadas a un estereoscopio para observar su apariencia física y posteriormente compararlas con los resultados obtenidos mediante una simulación numérica en ANSYS Fluent<sup>[34]</sup> a las mismas condiciones experimentales.

De manera general se observa que las probetas físicas presentan zonas claras y zonas oscuras, lo cual expresa que han sufrido los efectos de la corrosión; siendo las zonas oscuras las áreas de la probeta que estuvieron sujetas a mayores esfuerzos provocados por la turbulencia de flujo. Este mismo comportamiento se observa con los resultados obtenidos mediante la simulación numérica ya que las zonas oscuras de la probeta física tienen similitud a las zonas rojas de la simulación, lo que en resumen significa un mayor desprendimiento de los productos de corrosión y en por ende un incremento de la velocidad de corrosión.

De igual manera, se observa que las probetas de los aceros presentan coloraciones más oscuras conforme el tiempo de exposición transcurre lo cual indica la presencia de sulfuros.





*Figura 3.25. Efecto del flujo de fluido dentro del CET.*



## CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó la velocidad de corrosión y se caracterizaron los productos de corrosión de los aceros API 5L X52 y X65 mediante la técnica de resistencia a la polarización ( $R_p$ ) y se obtuvieron las siguientes conclusiones.

1. Se observó que el acero API 5L X65 presenta menores velocidades de corrosión debido a la formación de productos de corrosión más estables en la superficie metálica en comparación que el acero API 5L X52.
2. Las menores velocidades de corrosión en el acero API 5L X65 se atribuye a una mayor gama de sulfuros en comparación de los óxidos tales como la Marcasita Ortorrombica ( $\text{FeS}_2$ ), Mackinawita tetragonal ( $\text{FeS}$ ) y la Mikasaita Rombohedral ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ).
3. De acuerdo a los resultados de la simulación numérica, se determinó que el flujo genera un mayor esfuerzo de corte, lo cual favorece el desprendimiento de los productos de corrosión en condiciones de alto flujo.
4. Con la técnica de resistencia a la polarización se obtienen resultados confiables de velocidades de corrosión debido a los parámetros que se involucran en esta técnica.



---

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Biomorgi José, Hernández Samuel, Marín Jairo, Rodríguez Erik, Lara Milton, Vilorio Alfredo; Evaluación de los mecanismos de corrosión presentes en las líneas de producción de crudo y gas ubicadas en el noreste de Venezuela; Rev. LatinAm. Metal. Mat.
- [2] Y. Chen, W.P. Jepson; EIS measurement for corrosion monitoring under multiphase flow conditions; Electrochimica Acta; 1999.
- [3] Raichev Raicho, Veleva Lucien, Valdez Benjamín; Corrosión de metales y degradación de materiales, principios y prácticas de laboratorio, selección anual para el libro universitario 2007-2008; CINVSTAV-MÉRIDA, UABC-NEXICALI.
- [4] L.Y. Xu, Y.F. Cheng; Effect of fluid hydrodynamics on flow-assisted corrosion of aluminum alloy in ethylene glycol-water solution studied by a microelectrode technique; Corrosion Science; 2009.
- [5] Fontana Mars G.; Corrosion engineering, third edition; 1987
- [6] Vivekanand Kain; flow accelerated corrosion: forms, mechanism and case studies; 1<sup>st</sup> International Conference on Structural Integrity; 2014.
- [7] Wawl H. Ahmed; Evaluation of the proximity effect on flow-accelerated corrosion; Annals of Nuclear Energy; 2010.
- [8] G.A. Zhang, Y.F. Cheng; Electrochemical characterization and computational fluid dynamics simulation of flow-accelerated corrosion of X65 steel in a CO<sub>2</sub>-saturated oilfield formation water; Corrosion Science; 2010.
- [9] Flow accelerated corrosion (FAC) of carbon steel and low alloy steel piping in commercial nuclear power plants; CODAP topical report; 2014.
- [10] Muhammadu Masin Muhammadu, Jamaluddin Sheriff, Esah Hamzah; A review of literature for flow accelerated corrosion of mitred bends; IJETAE; Vol. 3; Issue 8; 2013.
- [11] M. El-Gammal, H. Mazhar, J. S. Cotton, C. Shefsku, J. Pietralik; the hydrodynamic effects of single-phase flow on flow accelerated corrosion in a 90-degree elbow; Nuclear Engineering and Design; 2009.
- [12] Wael H. Ahmed; evaluation of the proximity on flow-accelerated corrosion; Annals of Nuclear Energy; 2010.
- [13] S. Zhou, M.M. Stack, R.C. Newman; Electrochemical studies of anodic dissolution of mild steel in a carbonate-bicarbonate buffer under erosion-corrosion conditions; Pergamon; 1996.



- 
- [14] G.A Zhang, Y.F. Cheng; Electrochemical corrosion of X65 pipe steel in oil/water emulsion; Corrosion Science; 2009.
- [15] B.R. Tian, Y.F. Cheng; Electrochemical corrosion behavior of X65 steel in the simulated oil sand and slurry, I: Effects of hydrodynamic condition; ScienceDirect; 2008.
- [16] Xinming Hu, Anne Neville; CO<sub>2</sub> erosion-corrosion of pipeline steel (API X65) in oil and gas conditions-A systematic approach; Wear; 2009.
- [17] K. Fujiwara, M. Domae, K. Yoneda, F. Inada, T. Ohira, K. Hisamune; Correlation of flow accelerated corrosion rate with iron solubility; Nuclear Engineering and Design; 2011.
- [18] B. C. Galicia Amaro; Efecto del flujo del ácido sulfhídrico en el comportamiento electroquímico del proceso de corrosión de un acero 1018 en salmueras saturadas con CO<sub>2</sub>; Tesis de Maestría; UNAM; 2013.
- [19] Georgi Genchev, Karsten Cox; Metallic, oxygen-containing reaction products after polarization iron in H<sub>2</sub>S saturated saline solutions; Corrosion Science; 2015.
- [20] D. Ricard, G. Luther; Chemistry of iron sulfides; chemical reviews; vol. 107, pp. 514-562, 2007.
- [21] Sergio R.P. Perillo, Belle R. Upadhyaya, J. Wesley Hines; Faulty measurement substitution and control reconfiguration by using a multivariate flow control loop; ISA Transactions; 2014.
- [22] J. Villareal, D. Laverde, C. Fuentes; Carbon-Steel corrosión in multiphase Slug flow and CO<sub>2</sub>; ScienceDirect; 2005.
- [23] L. Zeng, G. A. Zhang, X.P. Guo, C.W. Chai; Inhibition effect of thioureidoimidazoline inhibitor for flow accelerated corrosion of an elbow; Corrosion Science; 2015.
- [24] Robert L. Mott "Mecánica de Fluidos Aplicada", 4ta edición, Ed. Pearson, Cap. 8 "Número de Reynolds, Flujo Laminar y Turbulento", 1996.
- [25] ASM International, Metals Handbook, Volume 1; properties and selection: irons steels and high performance alloy, carbon steels; p. 356.
- [26] Donald R. Askeland; Designaciones y clasificaciones de aceros; Ciencia e ingeniería de Materiales; 6ª edición; CENGAGE Learning; p. 494.
- [27] API Specification 5L, Specification for Line Pipe; 43th Edition; 2004.
- [28] Wael H. Ahmed, Mufatiu M. Bello, Meamer El Nakla, Abdelsalam Al Sarkhi; Flow and mass transfer downstream of an orifice under flow accelerated corrosion conditions; Nuclear Engineering and Design; 2012.
- [29] Arturo Cervantes, A.C.; Corrosión acelerada por flujo en aceros para ductos y equipos que transportan hidrocarburos; Tesis de doctorado; México, D.F., Instituto



---

Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas; 2014; 245 pp.

[30] Pengpeng Bai, Shuqi Zheng; Investigation of the iron-sulphide phase transformation in Nanoscale. *Chrystal Growth & Design*; 2014; 4295-4302.

[31] A. Hernández-Espejel, M.A. Domínguez-Crespo, R. Cabrera-Sierra, C. Rodríguez-Meneses, E.M. Arce-Estrada; Investigations of corrosion films formed on API-X52 pipeline Steel in acid sour media; *Corrosion Science*; 2010.

[32] Muhammad Nauman Zafar, Rihan Rihan, Luai Al.Hadhrami; Evaluation of the corrosion resistance of SA-543 and X65 steels in emulsions containing H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> using a novel emulsion flow loop; *Corrosion Science*; 2015.

[33] Miguel Garay; Velocidad de corrosión y caracterización de productos de corrosión de aceros API 5L X52 y X65 en un medio amargo y flujo turbulento; Tesis de licenciatura; México, D.F., Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas; 2016; 85 pp.

## APÉNDICE A

Resultados obtenidos del programa Power Suite para cada experimentación.

**Tabla 1. Resultados electroquímicos de la experimentación del acero API 5L X65**

X65					
Tiempo de exposición 3 horas					
Posición	Ecorr (mV)	Icorr (mA)	Rp	Vmmpy	Vmpy
6	-0.4185	705.85	30.8245	5.641	222.10
9	-2.5270	797.95	27.2455	6.337	251.05
3	-0.1420	906.30	23.9885	7.243	285.15
Tiempo de exposición 6 horas					
Posición	Ecorr (mV)	Icorr (mA)	Rp	Vmmpy	Vmpy
6	-2.2760	594.45	36.5830	4.750	187
9	-2.4405	564.05	38.5430	4.507	177.50
3	-1.0850	634.70	34.3080	5.064	199.35
Tiempo de exposición 12 horas					
Posición	Ecorr (mV)	Icorr (mA)	Rp	Vmmpy	Vmpy
6	-4.3160	619.85	35.0800	4.9535	195
9	-5.7030	571.20	38.0600	4.5650	179.70
3	-0.1880	726.40	29.9270	5.8050	228.55

**Tabla 2. Resultados electroquímicos de la experimentación del acero API 5L X52**

X52					
Tiempo de exposición 3 horas					
Posición	Ecorr (mV)	Icorr (mA)	Rp	Vmmpy	Vmpy
6	-7.2685	889.25	24.4480	7.1065	279.80
9	-0.5620	877.05	24.7880	7.0090	275.95
3	2.3530	929.10	23.3995	7.4250	292.35
Tiempo de exposición 6 horas					
Posición	Ecorr (mV)	Icorr (mA)	Rp	Vmmpy	Vmpy
6	-16.0725	1497	14.5265	11.960	470.90
9	-4.5210	958.95	22.6755	7.6635	301.70
3	-2.0170	992.55	21.9070	7.5175	296
Tiempo de exposición 12 horas					
Posición	Ecorr (mV)	Icorr (mA)	Rp	Vmmpy	Vmpy
6	1.7385	1039.50	20.9165	7.8745	310
9	0.2085	1118.50	19.4505	8.4665	333.33
3	-4.9955	996.50	21.8265	7.9625	313.50