



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA QUÍMICA
E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“CORROSIÓN ACELERADA POR FLUJO EN ACEROS
PARA DUCTOS Y EQUIPOS QUE TRANSPORTAN
HIDROCARBUROS.”**

T E S I S

**PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS EN METALURGIA Y MATERIALES**

P R E S E N T A

M en C. ARTURO CERVANTES TOBÓN

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JESÚS G. GODINEZ SALCEDO



MÉXICO, D.F.

2014



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 08 del mes Septiembre del año 2014, el (la) que suscribe M en C. Arturo Cervantes Tobón alumno (a) del Programa de Doctorado en Ciencias en Metalurgia y Materiales con número de registro A070345, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación-E.S.I.Q.I.E, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de Dr. Jesús Gilberto Godínez Salcedo y ceden los derechos del trabajo intitulado “Corrosión acelerada por flujo en aceros para ductos y equipos que transportan hidrocarburos”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

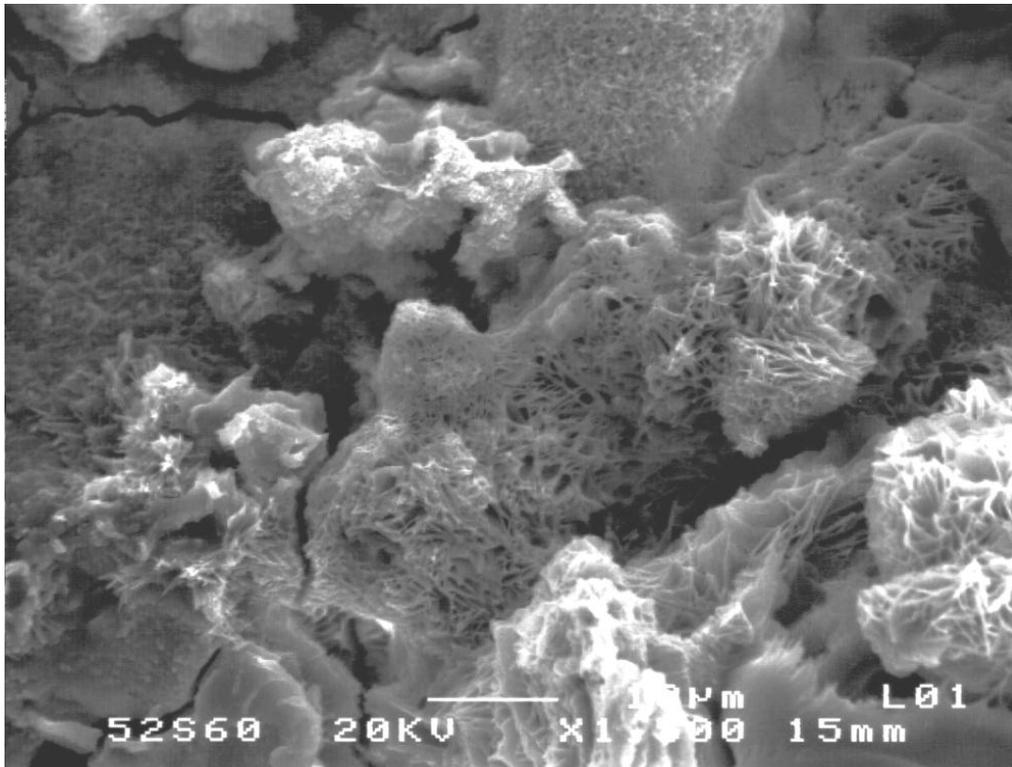
Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección maenc_2000@yahoo.com.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

M en C. Arturo Cervantes Tobón

Nombre y firma



“CORROSIÓN ACELERADA POR FLUJO EN ACEROS PARA DUCTOS Y EQUIPOS QUE TRANSPORTAN HIDROCARBUROS”



Productos de corrosión formados en presencia de H_2S

M en C. ARTURO CERVANTES TOBON

DIRECTOR DE TESIS: DR. JESÚS GILBERTO GODÍNEZ SALCEDO

MEXICO, D.F. 2014

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento al **Instituto Politécnico Nacional**, a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.Q.I.E., al **CONACYT** y al grupo de análisis e integridad de ductos (**GAID**) por el apoyo económico otorgado para los estudios de doctorado.

A la comisión revisora:

Por sus observaciones, correcciones y atinados consejos para el mejoramiento del presente trabajo.

Dr. Jesús Gilberto Godínez Salcedo
Dr. Jorge Luis González Velázquez
Dr. David Hernández Silva
Dr. Federico Chávez Alcalá
Dr. Elías Rangel Salinas
Dr. Alejandro Cruz Ramírez

A la **Dra. Manuela Díaz Cruz** por sus sugerencias para la realización de algunos aspectos de la tesis y además por su gran amistad hacia mí.

A la **Dra. Lucía Téllez Jurado** por su apoyo económico en la realización de las pruebas de caracterización por difracción de rayos X en el centro de nanociencias del IPN.

Al **Dr. Miguel Pérez Labra** por el apoyo brindado en la sección de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

A mis amigos y compañeros con quien conviví a lo largo de mi estancia en el doctorado haciendo un ambiente de trabajo agradable y varias experiencias compartidas: Cony, Saraí, Lucio, Julio C., Josué, Aarón, Manuel, Benjamín y a todos aquellos que me conocen y sin querer omito en este momento.

A todos mis profesores por sus enseñanzas y al personal del DIM.

DEDICATORIAS

A toda mi familia en especial a mi madre Juana Tobón R., por ser parte esencial en mi vida, por su cariño, su ejemplo y el apoyo brindado para alcanzar esta meta importante.

A mis hermanos: Juan De Dios, Hilda y Elia Cervantes Tobón, porque a pesar de todo siempre estamos unidos.

A mi otra hermana Enedina Cervantes.

A mis sobrinos: Jaqueline, Oscar Adrián y Karlita Ayala Cervantes, esperando seguir siendo para ellos un buen ejemplo a seguir.

A Lourdes Mondragón M (Lulú) por estar siempre en las buenas y las malas conmigo.

Y finalmente a dos personas muy especiales que se adelantaron: a ti papá, desde donde te encuentres sé que estarás aún más orgulloso de mí y a mi cuñado Armando a quien considero aun como a un hermano más que vivirá por siempre en nuestros corazones.



RESUMEN

La corrosión se puede definir como el deterioro de un material generalmente un metal al reaccionar con el medio que lo rodea⁽¹⁾. Existen distintos mecanismos por los cuales puede llevarse a cabo dicho deterioro, entre los cuales se destaca el electroquímico y dentro de éste, se encuentra la corrosión acelerada por flujo conocida por sus siglas en inglés como FAC (flow accelerated corrosión), la cual causa un deterioro en el metal reflejado como una disminución en su espesor por la acción del flujo⁽²⁾.

Debido a la enorme problemática de corrosión inherente al sector petroquímico originada en las líneas de conducción durante el proceso de transporte de crudo, en esta investigación se hace un estudio de la velocidad de corrosión en una tubería de acero al carbono en función de la velocidad con la que circula una salmuera NACE ID-196 adicionada con keroseno y otra adicionada con H₂S (1382.7 ppm). El estudio se lleva a cabo mediante el uso de un electrodo cilíndrico rotatorio para simular a nivel laboratorio las condiciones hidrodinámicas internas desarrolladas sobre el ducto debido al flujo de fluidos para de esta manera conocer la velocidad de corrosión y el tipo de daño que pueda presentarse como una función de la velocidad a la cual el medio es transportado.

Se estudiaron los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70, los cuales simulan las condiciones de campo donde existe la presencia de flujo en un rango de rotación del electrodo de trabajo desde 0 - 6500 rpm (3.744 m/s) a temperaturas de 30 y 60°C. Para determinar la velocidad de corrosión se utiliza la técnica de la resistencia a la polarización. Mediante esta técnica se observa que el acero API 5L X-70 tiene el mejor comportamiento a cualquier condición experimental debido a que presenta las velocidades de corrosión más bajas.

Como aportación se lleva a cabo un seguimiento de la evolución de la formación de las capas protectoras (productos de corrosión), analizando la composición de las mismas mediante microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X, resultando ser más protectoras aquellas que están compuestas de una mezcla de óxidos con sulfuros y un sulfato.



ABSTRACT

Corrosion can be defined as the deterioration of a material usually a metal to react with the environment that surrounds it⁽¹⁾. There are several mechanisms by which this can be carried out deterioration, including electrochemical and within this stands out, flow accelerated corrosion known by its initials in English as FAC (flow accelerated corrosion), which cause a deterioration in the metal reflected as a decrease in thickness by the action of the flow⁽²⁾.

Due to the enormous problems inherent corrosion originated in petrochemical pipelines during transportation of crude oil, in this research a study of the corrosion rate in a pipe made of carbon steel as a function of speed which circulates a brine NACE ID-196 added with kerosene and other added with H₂S (1382.7 ppm). The study was takes place using a rotating cylinder electrode at laboratory to simulate hydrodynamic conditions internal on the pipeline developed due to fluid flow for this way know the corrosion rate and damage type that can occur as a function of the rate at which the medium is transported.

Steels API 5L X-52, X-65 and X-70 were studied, which simulate field conditions where there is the presence of flow in a range of rotation of the working electrode from 0-6500 rpm (3.744 m / s) at temperatures of 30 and 60 ° C. To determine the corrosion rate of technique of polarization resistance is used. By this technique shows that the steel API 5L X-70 has the Better behavior at any experimental condition because it has the lowest corrosion rates.

As a contribution was performed monitoring the evolution of the formation of the protective layers (corrosion products), analyzing the composition of the same by scanning electron microscopy and X-ray diffraction and found to be more protective those are composed of a mixture of oxides with sulfides and one sulphate.



INDICE

CONTENIDO	PAGINA
Lista de figuras	i
Lista de tablas	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCION	1
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	
2.1 Reacciones básicas en corrosión	4
2.2 Técnicas electroquímicas	5
2.3 Curvas de polarización (CP)	10
2.3.1 Resistencia a la polarización (Rp)	13
2.4 Cálculo de la velocidad de corrosión (v_{corr})	14
2.5 Flujo de fluidos y su efecto en la corrosión	16
2.5.1 Flujo y viscosidad	16
2.5.2 Grupos adimensionales (Re, Sc y Sh)	18
2.5.3 Electrodo de cilindro rotatorio (ECR)	22
2.5.4 Transporte de masa en el electrodo de cilindro rotatorio (ECR)	24
2.6 Efectos del flujo de fluidos sobre la velocidad de corrosión	25
2.7 Principales parámetros hidrodinámicos que afectan la velocidad de corrosión	28



2.8 Principales geometrías utilizadas a nivel laboratorio para simular el flujo de fluidos tanto en régimen laminar como turbulento	34
2.9 Cálculo del parámetro hidrodinámico esfuerzo de corte de superficie (τ_w)	36
2.10 Cálculo del coeficiente de transferencia de masa (K)	39
2.11 Cálculo del número de Reynolds (Re)	41
2.12 Modelo predictivo de velocidad de corrosión al emplear la geometría CR o ECR propuesto por Efird	42

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Materiales y equipos	46
3.2 Materiales	46
3.3 Equipos	46
3.4 Descripción de la metodología que se empleó en las diferentes etapas del desarrollo experimental	47
3.5 Preparación del medio químico	47
3.6 Determinación experimental de la densidad y viscosidad para el medio químico empleado	48
3.7 Preparación de probetas cilíndricas	49
3.8 Metalografía y análisis de composición química de cada tipo de acero	49
3.9 Ensamble de la celda electroquímica (electrodo cilíndrico rotatorio)	50
3.10 Pruebas de polarización potenciodinámica y cálculo de la velocidad de corrosión por la técnica de resistencia a la polarización	57



3.11 Evolución de la formación de productos de corrosión	58
3.11.1 Caracterización de productos de corrosión por microscopía electrónica de barrido	58
3.11.2 Caracterización de los productos de corrosión por difracción de rayos X	59

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Medición de pH de manera directa para los distintos medios empleados	60
4.2 Densidad y viscosidad dinámica evaluadas para los distintos medios utilizados en la presente investigación	61
4.3 Composición química de los aceros estudiados	62
4.4 Metalografía de los aceros estudiados (microestructura)	63
4.4.1 Cuantificación de fases y tamaño de grano de los aceros estudiados	67
4.5 Potencial y velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación	69
4.6 Cálculo del número de Reynolds y el esfuerzo de corte de superficie	78
4.7 cálculo de la velocidad de corrosión en función de la rotación por el modelo de Efirid	81
4.8 Modelo predictivo de velocidad de corrosión propuesto (ajuste de datos experimentales).....	84
4.8.1 Efecto conjunto de todas las variables involucradas En el comportamiento de la velocidad de corrosión	96
4.9 Observación macroscópica de los productos de corrosión	99



4.10 Microscopía electrónica de barrido (MEB) de los productos de corrosión	102
4.11 Clasificación de los productos de corrosión	107
4.12 Efecto del flujo sobre los productos de corrosión y como influye sobre la velocidad de corrosión	113
4.13 Microanálisis por EDS de los productos de corrosión	117
4.14 Mapeo para ver la distribución de los elementos identificados en los productos de corrosión formados	142
4.15 Identificación de compuestos presentes en los productos de corrosión mediante la técnica de difracción de rayos X	151
4.16 Microscopía electrónica de barrido (MEB) de la superficie de los aceros empleados después de remover los productos de corrosión	164
4.17 Microanálisis por EDS en la superficie de cada uno de los aceros seleccionados, después de llevar a cabo la limpieza y remoción de productos de corrosión	174
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	187
CAPÍTULO 6. REFERENCIAS.....	189
APÉNDICE 1.	193
APÉNDICE 2.	205
APÉNDICE 3.	209



APÉNDICE 4.	221
APÉNDICE 5.	233
ANEXO A.	245



LISTA DE FIGURAS

FIGURA	LEYENDA	PÁGINA
1	Diagrama esquemático de Evans para hierro en un electrolito.	7
2	Diagrama esquemático de Evans-Tafel para el hierro en un electrolito (CPA y CPC controladas por activación).	11
3	Diagrama esquemático de Evans-Tafel para el hierro en un electrolito (CPA controlada por activación y CPC controlada por difusión).	12
4	Diagrama esquemático de la linealidad entre i y E en la proximidad de E_{corr} .	14
5	Concepto esquemático de fluido.	16
6	Ejemplo esquemático de flujo laminar (a) y turbulento (b).	19
7	Capas límite hidrodinámicas.	20
8	Representación esquemática del electrodo de cilindro rotatorio (ECR).	23
9	Procedimiento para determinar la velocidad de corrosión en campo a partir de datos usados en laboratorio mediante consideraciones de mecanismos de flujo de fluido.	29
10	Balance de fuerzas de presión y esfuerzo de corte superficial en un segmento de tubería asumiendo sólo pérdidas por fricción (no se consideran cambios de elevación y de temperatura).	36
11	Procedimiento experimental representado de manera esquemática.	45
12	Unidad electrodo cilíndrica rotatoria (motor) marca Radiometer analytical modelo EDI 10000.	51
13	Unidad de control de velocidad marca Radiometer analytical modelo TACHYPROCESSEUR.	51
14	Descripción de los componentes de la Unidad Cilíndrica Rotatoria (motor) marca Radiometer analytical modelo EDI 10000.	53
15	Ensamble de la celda electroquímica utilizada.	54
16	Vista de la muestra cilíndrica dentro de la celda electroquímica.	54



17	Baño para el control de la temperatura PolyScience-Digital Temperature Controller marca PolyScience modelo 8001.	55
18	Potenciostato empleado en las pruebas de Polarización Potenciodinámica: Potenciostat / Galvanostat Model 263A.	56
19	Micrografías del acero API 5L X-52, (a) sección longitudinal y (b) sección transversal, atacadas con Nital 3.	64
20	Micrografías del acero API 5L X-65, (a) sección longitudinal y (b) sección transversal, atacadas con Nital 3.	65
21	Micrografías del acero API 5L X-70, (a) sección longitudinal y (b) sección transversal, atacadas con Nital 3.	66
22	Potencial de corrosión comparativo para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno a 30°C.	70
23	Potencial de corrosión comparativo para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno a 60°C.	71
24	Potencial de corrosión comparativo para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	72
25	Potencial de corrosión comparativo para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	73
26	Velocidad de corrosión comparativa para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno a 30°C.	75
27	Velocidad de corrosión comparativa para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno a 60°C.	76
28	Velocidad de corrosión comparativa para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	77
29	Velocidad de corrosión comparativa para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	78
30	Esfuerzo de corte de superficie vs velocidad de rotación del ECR para el medio que contiene salmuera + 10% Keroseno a 30 y 60°C.	80



31	Esfuerzo de corte de superficie vs velocidad de rotación del ECR para el medio que contiene salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30 y 60°C.	80
32	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo de Efird para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	82
33	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo de Efird para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	82
34	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo de Efird para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	83
35	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo de Efird para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	84
36	Velocidad de corrosión obtenida por Rp vs esfuerzo cortante de superficie, para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	85
37	Velocidad de corrosión obtenida por Rp vs esfuerzo cortante de superficie, para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	85
38	Velocidad de corrosión obtenida por Rp vs esfuerzo cortante de superficie, para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	86
39	Velocidad de corrosión obtenida por Rp vs esfuerzo cortante de superficie, para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	86
40	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	90
41	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	90



42	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	91
43	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	91
44	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	92
45	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	92
46	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	93
47	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	93
48	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	94
49	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	94
50	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	95
51	Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	95



52	log velocidad de corrosión obtenida por Rp vs esfuerzo de corte de superficie para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	97
53	log velocidad de corrosión obtenida por Rp vs esfuerzo de corte de superficie para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	98
54	log velocidad de corrosión obtenida por Rp vs esfuerzo de corte de superficie para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1 bar) a 30°C.	98
55	log velocidad de corrosión obtenida por Rp vs esfuerzo de corte de superficie para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1 bar) a 60°C.	99
56	Productos de corrosión formados de los aceros al final de cada prueba (salmuera + 10% Keroseno): (a) API 5L X-52 (30°C), (b) API 5L X-52 (60°C) y (c) API 5L X-70 (30°C), (d) API 5L X-70 (60°C).	100
57	Productos de corrosión formados de los aceros al final de cada prueba (salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p= 1 bar): (a) API 5L X-52 (30°C), (b) API 5L X-52 (60°C) y (c) API 5L X-70 (30°C), (d) API 5L X-70 (60°C).	101
58	Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 30°C tomados a bajos aumentos (100X).	103
59	Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L-X52, (b) API 5L-X65 y (c) API 5L-X70 en salmuera + 10% keroseno a 30°C tomados a mayores aumentos (a y b 1000X y c 500X).	104
60	Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 60°C tomados a bajos aumentos (100X).	105
61	Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 60°C tomados a mayores aumentos (1000X).	106



62	Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C tomados a bajos aumentos (100X).	107
63	Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C tomados a mayores aumentos (a y b 500X, c 1000X).	108
64	Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C tomados a bajos aumentos (100X).	109
65	Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C tomados a mayores aumentos (1000X).	110
66	Microfotografía del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C), a una magnificación de 4300X.	111
67	Microfotografía del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 60°C) a una magnificación de 1000X.	112
68	Microfotografía del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C), a una magnificación de 1000X.	113
69	Microfotografía del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C) donde se muestra el agrietamiento (A) y el desprendimiento (D) de los productos de corrosión (500X).	114
70	Microfotografía del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 60°C) donde se muestra el agrietamiento (A) y el desprendimiento (D) de los productos de corrosión (1000X).	115
71	Microfotografía del acero API 5L-X65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C) donde se muestra el agrietamiento (A) y el desprendimiento (D) de los productos de corrosión (300X).	115
72	Microfotografía del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C) donde se muestra el agrietamiento (A) y el desprendimiento (D) de los productos de corrosión (1000X).	116



73	Microfotografía del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C) donde se muestra el agrietamiento (A) y el desprendimiento (D) de los productos de corrosión (1000X).	116
74	Microfotografía del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C) donde se muestra el agrietamiento (A) y el desprendimiento (D) de los productos de corrosión (1000X y el recuadro a 5000X).	117
75	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).	118
76	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).	120
77	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).	122
78	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C).	124
79	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C).	126
80	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C).	128
81	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno 60°C).	130
82	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno 60°C).	132
83	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno 60°C).	134
84	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 60°C).	136
85	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 60°C).	138
86	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 60°C).	140



87	Mapeo de C, O, Na, Mg, S, Si, P, Cl, Cr, Mn y Fe del acero API 5L X-65 en Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C.	143
88	Mapeo de C, O, Na, Mg, S, Si, P, Cl, Cr, Mn y Fe del acero API 5L X-70 en Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C.	145
89	Mapeo de C, O, Na, Mg, S, Si, P, Cl, Cr, Mn y Fe del acero API 5L X-65 en Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 60°C.	147
90	Mapeo de C, O, Na, Mg, S, Si, P, Cl, Cr, Mn y Fe del acero API 5L X-70 en Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 60°C.	149
91	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).	152
92	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).	153
93	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).	154
94	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C).	155
95	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C).	156
96	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C).	157
97	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1387.2 ppm H ₂ S a 30°C).	158
98	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1387.2 ppm H ₂ S a 30°C).	159
99	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1387.2 ppm H ₂ S a 30°C).	160
100	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1387.2 ppm H ₂ S a 60°C).	161



101	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1387.2 ppm H ₂ S a 60°C).	162
102	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1387.2 ppm H ₂ S a 60°C).	163
103	Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 30°C tomados a bajos aumentos (100X).	165
104	Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5LX-70 en salmuera + 10% keroseno a 30°C tomados a mayores aumentos (1000X).	166
105	Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 60°C tomados a bajos aumentos (100X).	167
106	Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 60°C tomados a mayores aumentos (1000X).	168
107	Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C tomados a bajos aumentos (100X).	170
108	Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C tomados a mayores aumentos (1000X).	171
109	Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C tomados a bajos aumentos (100X).	172



110	Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C tomados a mayores aumentos (1000X).	173
111	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C), después de limpiar la superficie (1000X).	175
112	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C), después de limpiar la superficie (1000X).	177
113	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C), después de limpiar la superficie (1000X).	179
114	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C), después de limpiar la superficie (1000X).	181
115	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C), después de limpiar la superficie (1000X).	183
116	Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C), después de limpiar la superficie (1000X).	185



LISTA DE TABLAS

TABLA	LEYENDA	PÁGINA
1	Clasificación de las técnicas electroquímicas.	9
2	Características de técnicas electroquímicas y gravimétricas.	9
3	Composición de la salmuera sintética.	48
4	Valores de pH medidos para los distintos medios empleados.	60
5	Valores de densidad y viscosidad dinámica obtenidos para los distintos medios empleados.	61
6	Composición química de los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70.	62
7	Fases presentes para cada uno de los aceros empleados en la sección longitudinal.	67
8	Fases presentes para cada uno de los aceros empleados en la sección transversal.	67
9	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-52 a 30°C, empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.	193
10	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-52 a 60°C, empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.	194
11	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-52 a 30°C adicionado con H ₂ S (p = 1 bar), empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.	195
12	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-52 a 60°C adicionado con H ₂ S (p = 1 bar), empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.	196



13	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-65 a 30°C, empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.	197
14	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-65 a 60°C, empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.	198
15	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-65 a 30°C adicionado con H ₂ S (p = 1 bar), empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.	199
16	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-65 a 60°C adicionado con H ₂ S (p = 1 bar), empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.	200
17	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-70 a 30°C, empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.	201
18	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-70 a 60°C, empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.	202
19	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-70 a 30°C adicionado con H ₂ S (p = 1 bar), empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.	203
20	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-70 a 60°C adicionado con H ₂ S (p = 1 bar), empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.	204
21	Resultados obtenidos del número de Reynolds y el esfuerzo de corte de superficie con respecto a la velocidad de rotación de ECR para el medio que contiene salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	205



22	Resultados obtenidos del número de Reynolds y el esfuerzo de corte de superficie con respecto a la velocidad de rotación de ECR para el medio que contiene salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	206
23	Resultados obtenidos del número de Reynolds y el esfuerzo de corte de superficie con respecto a la velocidad de rotación de ECR para el medio que contiene salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	207
24	Resultados obtenidos del número de Reynolds y el esfuerzo de corte de superficie con respecto a la velocidad de rotación de ECR para el medio que contiene salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	208
25	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	209
26	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	210
27	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	211
28	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	212
29	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	213



30	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	214
31	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	215
32	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	216
33	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	217
34	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	218
35	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	219



36	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efir y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	220
37	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	221
38	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	222
39	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	223
40	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	224
41	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	225
42	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	226
43	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	227
44	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	228



45	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	229
46	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	230
47	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	231
48	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	232
49	Modelo de la velocidad de corrosión propuesto para el acero API 5L X-52 en los diferentes medios empleados.	87
52	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	233
53	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	234
54	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.	235
55	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	236



56	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	237
57	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.	238
58	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	239
59	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	240
60	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 30°C.	241
61	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	242
62	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	243
63	Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L-X70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (p=1bar) a 60°C.	264



64	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).	119
65	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).	121
66	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).	123
67	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C).	125
68	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C).	127
69	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C).	129
70	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C).	131
71	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C).	133
72	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C).	135
73	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 60°C).	137
74	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 60°C).	139
75	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 60°C).	141
76	Cuantificación de elementos en el mapeo del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C).	144
77	Cuantificación de elementos en el mapeo del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C).	146
78	Cuantificación de elementos en el mapeo del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 60°C).	148
79	Cuantificación de elementos en el mapeo del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 60°C).	150



80	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C), después de limpiar la superficie.	176
81	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C), después de limpiar la superficie.	178
82	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C), después de limpiar la superficie.	180
83	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C), después de limpiar la superficie.	182
84	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C), después de limpiar la superficie.	184
85	Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S a 30°C), después de limpiar la superficie.	186



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

A lo largo del territorio nacional, Petróleos Mexicanos (PEMEX) mantiene en operación un sistema de líneas de transporte de hidrocarburos (ductos) terrestres de alrededor de 54 mil kilómetros por donde transporta petróleo crudo, gas natural, gas amargo, gas dulce, gasolinas, diesel y otros productos refinados. Cuenta, además, con dos mil kilómetros localizados en zonas submarinas. Cerca de la mitad de los ductos tiene más de 30 años en operación, y a pesar del constante mantenimiento, ocurren problemas provocados por la corrosión y fallas del material.

A pesar de que algunos hidrocarburos líquidos y gaseosos son sometidos a variados procesos de eliminación de impurezas, aún conservan contaminantes que pueden afectar la integridad física de los ductos, debido principalmente a agentes agresivos como el bióxido de carbono (CO_2) y el H_2S . El CO_2 por ejemplo al estar en contacto con el agua, se disuelve rápidamente formando ácido carbónico (H_2CO_3), propiciando que la corrosión interna en ductos sea más acelerada.

En los ductos es fundamental el mantener su operabilidad y eficiencia. Esto se logra a partir de pruebas de laboratorio y del monitoreo de los ductos, aplicando las medidas preventivas y/o correctivas que se requieran, por esto uno de los parámetros más importantes para su evaluación, lo representa la velocidad de corrosión (V_{corr}) y para determinarla existen diferentes técnicas, como lo son las gravimétricas y las electroquímicas. Disponiendo de la información e interpretación de resultados tanto en laboratorio como in situ se toman las medidas correctivas y de optimización que mantenga segura la operabilidad del ducto.



El reto de los especialistas en corrosión es trabajar de forma acelerada en el laboratorio en condiciones lo más cercanas a las de campo para proponer soluciones en cuanto a materiales más resistentes a la corrosión, en sistemas que protejan a los ya existentes, tanto interna como exteriormente, y una forma de lograrlo es con la aplicación e interpretación de técnicas electroquímicas.

Anteriormente en el laboratorio se evaluaban algunos parámetros en condiciones estáticas por técnicas electroquímicas y solo se limitaba a condiciones dinámicas con algunas técnicas gravimétricas⁽³⁾. Pero conforme pasa el tiempo las investigaciones electroquímicas estáticas pasan a dinámicas en donde la corrosión es más agresiva y se apega más a las condiciones que ocurren en campo. La corrosión en los sistemas de producción de hidrocarburos, normalmente ocasiona problemas en las líneas de transporte y en las operaciones del proceso, si el desgaste del metal de la tubería es elevado puede ocurrir una fuga de hidrocarburo, dando como resultado pérdidas económicas por reparación o emplazamiento parcial o total del equipo dañado, ocasionando daños imprevistos, como el derrame de hidrocarburo causando daños irreversibles al medio ambiente y la posibilidad de accidentes que involucren pérdidas humanas.

De aquí la importancia en contribuir con pruebas de laboratorio, en conocer el efecto de la velocidad del fluido sobre la velocidad de corrosión en aceros al carbón utilizados en la fabricación de ductos inmersos en medios corrosivos.

Es importante mencionar que una simulación adecuada del flujo de fluidos y haciendo uso de la geometría cilíndrica rotatoria puede contribuir en la presente investigación y posteriores en la reproducción en el laboratorio de las condiciones de campo de interés práctico para poder modelar y predecir de manera más completa el comportamiento corrosivo de los aceros al carbono utilizados en ductos. Así mismo se ha escrito muy poco acerca de la corrosión acelerada por flujo (flow accelerated corrosion)⁽⁴⁻⁹⁾.



Para poder llevar a cabo todo lo anterior es necesario recurrir a los primeros estudios de la geometría cilíndrica rotatoria realizados por Efirid⁽¹⁰⁾.

Por lo anterior el objetivo principal del presente trabajo es el de evaluar la velocidad de corrosión de los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70, en función del flujo de fluidos mediante el uso de un electrodo cilíndrico rotatorio (ECR). De manera complementaria se estudiarán los principales parámetros hidrodinámicos que afectan a la velocidad de corrosión tales como:

- Número de Reynolds (Re)
- Esfuerzos de corte τ_{ω}

Con los parámetros anteriores se obtiene la velocidad de velocidad de corrosión en el sistema mediante la técnica de resistencia a la polarización, para poder comparar que acero presenta el mejor comportamiento con respecto a esta.

Desarrollar un modelo predictivo de la velocidad de corrosión al emplear la geometría cilíndrica, mediante una regresión de potencia de los coeficientes a y b de la ecuación de Efirid.

Debido a que existen muy pocos estudios sobre el efecto de los productos de corrosión sobre el proceso mismo de corrosión en un medio amargo se lleva a cabo una caracterización de los productos de corrosión que se forman en la superficie mediante microscopia electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX) para observar el efecto que tienen sobre la velocidad de corrosión siendo esto además un aporte adicional del presente estudio al área de la corrosión.



CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 REACCIONES BÁSICAS EN CORROSIÓN

La corrosión acuosa es de naturaleza electroquímica y se define como el deterioro de un material, generalmente un metal, al reaccionar con el medio que lo rodea⁽¹⁾. En electroquímica es muy común manejar reacciones oxidoreducción^(11,12), por ejemplo:



El proceso de despojamiento de electrones se conoce como oxidación y el incremento de carga negativa se le conoce como reducción.

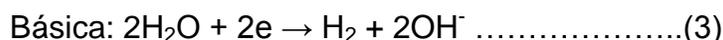
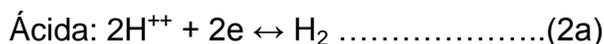


Si en una celda de corrosión el hierro fuera el ánodo, las reacciones que podrían tener lugar serian las siguientes:



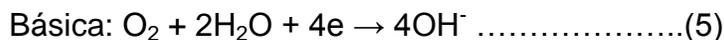
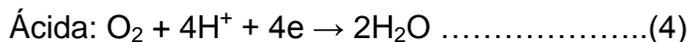
Las reducciones (reacciones catódicas) pueden variar dependiendo de las condiciones de trabajo y podrían ser los siguientes casos:

Desaerada





Aereada



En (1) la velocidad con la que se disuelve el hierro es igual a la velocidad con la cual el hierro pasa a la solución acuosa, a este fenómeno se le conoce como densidad de corriente de intercambio (i_0), donde es igual a la densidad de corriente en sentido anódico (i_a) menos la densidad de corriente en sentido catódico (i_c), es decir:

$$i_0 = i_a - i_c \dots\dots\dots(6)$$

2.2 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS

Para poder abordar este tema es necesario comentar sobre el potencial de equilibrio y la teoría del potencial mixto^(11,12,13). Cuando un conductor electrónico (metal) está en contacto con un conductor iónico (electrolito) se forma lo que se conoce como “Electrodo” y en la interfase es donde suceden las reacciones de oxidación y reducción, cada elemento o compuesto químico tiene un potencial de equilibrio único y fue representado por Nernst en la ecuación (7), al listado de varios elementos con su potencial de equilibrio se le conoce como Serie de Fuerza Electromotriz, en donde termodinámicamente unos metales son propensos a oxidarse antes que otros.

$$E = E^0 - 2.3RT/nF * \log (a_p/a_r) \dots\dots\dots(7)$$

$$E^0 = \Delta G/nF \dots\dots\dots(8)$$

$$\Delta G = \sum C_{ij}D_{ij} - \sum A_{ij}B_{ij} \dots\dots\dots(9)$$



Donde:

$E, E^0, \Delta G$ = Potencial, potencial estándar y energía libre

R, T = Constante universal de los gases y Temperatura

N, F = Número de electrones involucrados en la reacción y Constante de Faraday

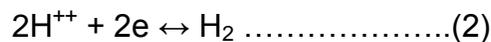
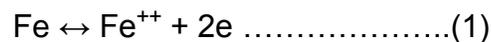
a_p = Actividad de los productos en la reacción

a_r = Actividad de los reactivos en la reacción

A_{ii}, B_{ii} = Potenciales químicos de reactivos

C_{ii}, D_{ii} = Potenciales químicos de productos

Si se consideran las reacciones 1 y 2 de oxido-reducción cada una tiene un potencial de equilibrio particular como se muestra en la figura 1.



Como existe una diferencia de potencial, habrá un flujo neto de electrones de las zonas anódicas a las catódicas generando por lo tanto la corrosión, misma que no les permitirá estar en equilibrio sobre la misma superficie del metal, entonces el hierro se disuelve y el hidrógeno gaseoso se desprende de zonas metálicas que funcionan como cátodos, ambos potenciales se desvían de su equilibrio inicial (se polarizan) y alcanzan un potencial común conocido como potencial mixto, de reposo o de corrosión (E_{corr}) de electrodo en donde la velocidad con que se corroe el hierro es igual a la velocidad con que se desprende el hidrógeno.

Esto se puede expresar claramente en la Figura 1, conocido comúnmente como diagrama de Evans, en donde se muestran las reacciones de óxido-reducción del hierro e hidrógeno y la intersección de la reacción catódica del hidrógeno con la reacción anódica del hierro formando la densidad de corriente (i_{corr}) y el potencial de corrosión (E_{corr}).

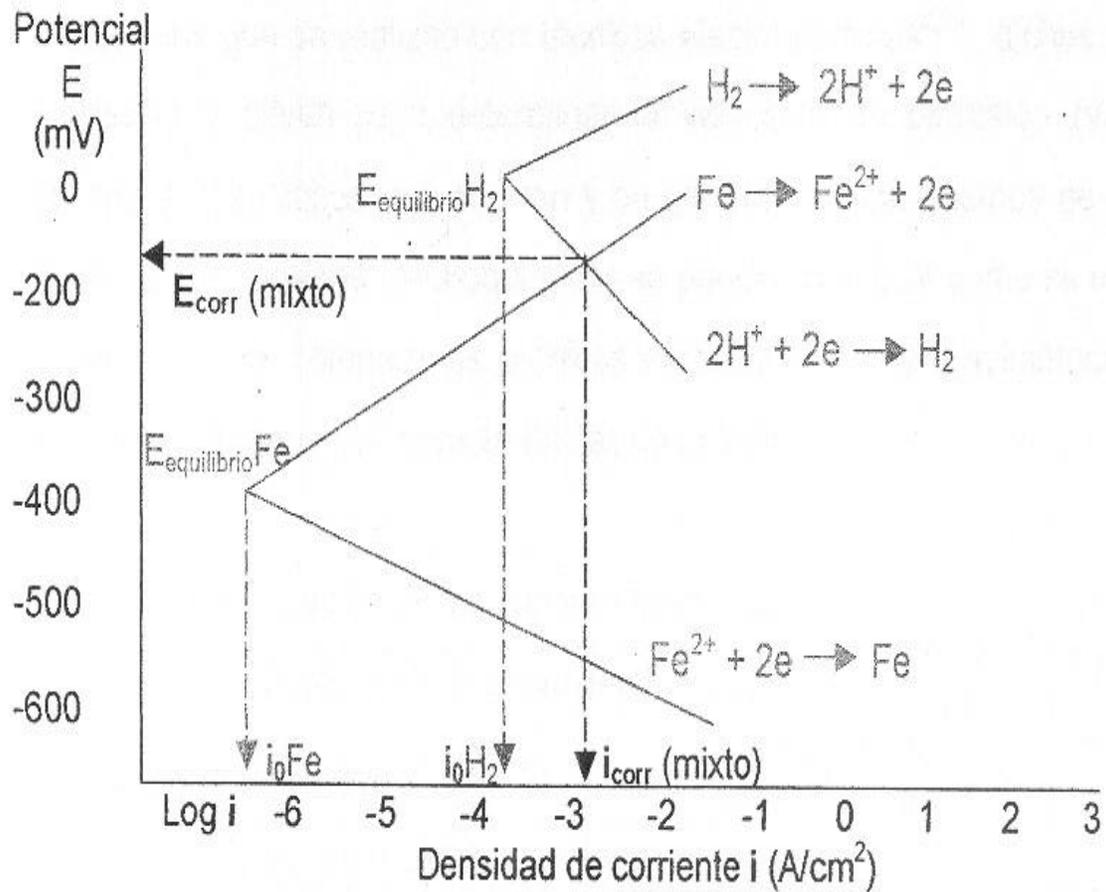


Figura 1.- Diagrama esquemático de Evans para hierro en un electrolito.



Lo anterior se le conoce como la teoría del potencial mixto, que fue propuesta por Wagner y Traud^(11,12,13) donde se indican la relación entre el potencial y la corriente para un proceso controlado por transferencia de carga como se muestra en la ecuación (7), si al E_{corr} se perturba aplicándole una corriente, las velocidades de oxidación y de reducción ya no serán iguales (ya no existe equilibrio), por lo tanto se generará un nuevo potencial, esta desviación de potencial se le conoce como “polarización” y al potencial que se la aplicó se le conoce como “sobrepotencial (η)” el cual puede favorecer cualquiera de las dos reacciones 1a y 2a.



$$j_0 = i_0 [\exp (\alpha_a n F \eta / RT) - \exp (\alpha_c n F \eta / RT)](7)$$

Donde:

j_0 = Densidad de corriente neta

i_0 = Densidad de corriente de intercambio

α_a = Coeficiente de transferencia para la reacción anódica

α_c = Coeficiente de transferencia para la reacción catódica

n = Número de electrones involucrados en la reacción

F, η = Constante de Faraday y sobre potencial

R, T = Constante universal de los gases y temperatura

Todo lo anterior comentado es necesario para visualizar de donde parten las mediciones que se realizan con técnicas electroquímicas, dichas técnicas son indirectas y sirven para determinar la velocidad de corrosión (V_{corr}), tipo de corrosión, reacciones que ocurren y en general los mecanismos de reacción del sistema.



Las técnicas electroquímicas se pueden clasificar como se muestra a continuación en la Tabla 1:

Tabla 1.- Clasificación de las técnicas electroquímicas.

Técnicas con perturbación externa	
Técnicas de corriente directa	Técnicas de corriente alterna
Extrapolación de Tafel	Espectroscopia de impedancia electroquímica
Resistencia a la polarización lineal (R_p)	
Curvas de polarización	
Técnicas sin perturbación externa	
Ruido electroquímico	

Si se comparan las técnicas electroquímicas con las gravimétricas se pueden observar las siguientes características en la Tabla 2.

Tabla 2.- Características de técnicas electroquímicas y gravimétricas.

Técnicas electroquímicas	Técnicas gravimétricas
Se obtiene la V_{corr} instantánea	Se obtiene la V_{corr} en tiempos largos de exposición
Se obtiene mucha información de la corrosión del metal en tiempos cortos	Se obtiene moderada información de la corrosión del metal en tiempos largos
Puede ser no destructiva la prueba	Es una prueba destructiva
Se requiere cierto conocimiento especializado para su interpretación	Se requiere de aritmética básica para su interpretación



2.3 CURVAS DE POLARIZACIÓN (CP)

Las curvas de polarización pueden ser de distintas formas dependiendo del mecanismo de corrosión y estos pueden ser controlados por activación, difusión o mixto, para el caso de la Figura 2 se muestran potenciales altos, una vez que se aleja unos 120 mV del potencial de reposo y que se encuentre linealidad durante una década logarítmica se pueden trazar a las curvas de polarización unas pendientes y en la intersección de ellas con el potencial de reposo se obtiene una nueva i_{corr} este método es conocido como extrapolación de Tafel^(12,13).

Tafel partió de que a potenciales altos uno de los miembros (anódico o catódico) de la ecuación (7) de Wagner y Traed se hace despreciable y el sobrepotencial está dado por las velocidades anódicas y catódicas (a), más una pendiente (b) conocida como pendiente de Tafel por el logaritmo de i_{corr} , es decir:

$$\eta = a + b \log i_{corr} \dots\dots\dots(8)$$

La ecuación (8) es similar a la ecuación de una recta $y = mx + b$, la pendiente anódica (b_a) y catódica (b_c) quedan representadas de la siguiente forma:

$$b_a = 2.303RT/\alpha_a nF \dots\dots\dots(9)$$

$$b_c = 2.303RT/\alpha_c nF \dots\dots\dots(10)$$

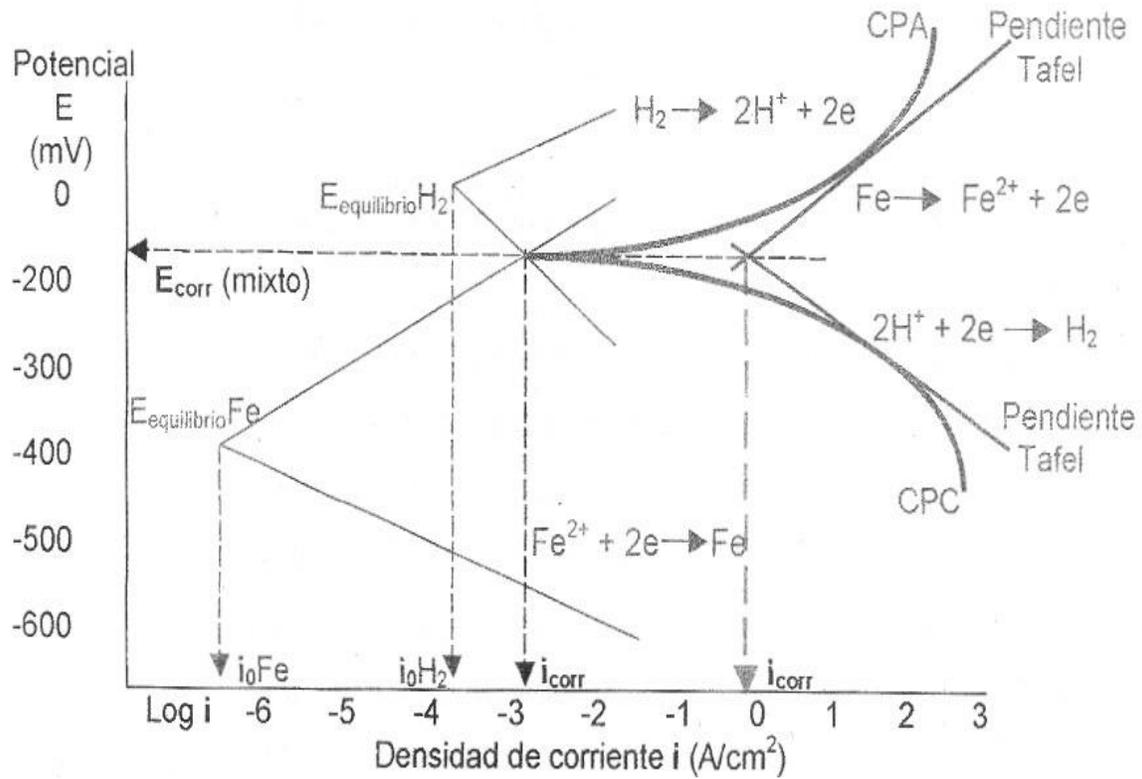


Figura 2.- Diagrama esquemático de Evans-Tafel para el hierro en un electrolito (CPA y CPC controladas por activación).

Cuando la curva de polarización no es controlada por activación no se aplica Tafel, para el caso de la Figura 3 se muestran potenciales altos, donde la curva de polarización anódica (CPA) está controlada por activación y en la curva de polarización catódica (CPC) existe un control por difusión⁽¹²⁾ generando una densidad de corriente límite de difusión (i_{lim}) en donde aunque se le aumente el potencial la corriente permanece “casi constante” para estos casos la $i_{lim} = i_{corr}$.

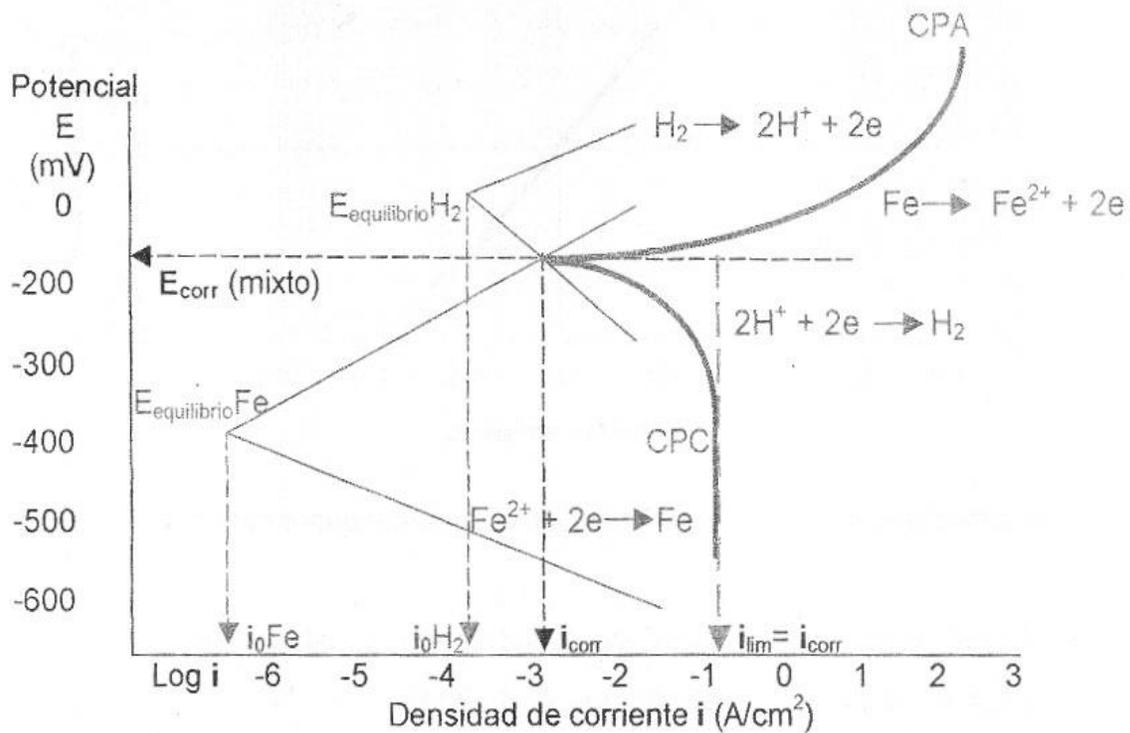


Figura 3.- Diagrama esquemático de Evans-Tafel para el hierro en un electrolito (CPA controlada por activación y CPC controlada por difusión).



2.3.1 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RP)

La técnica de resistencia a la polarización lineal o resistencia a la polarización, generalmente referida como Rp sirve para medir la corrosión de tipo uniforme^(12,13,14), cuando se perturba el E_{corr} con potenciales muy pequeños entre ± 5 y ± 20 mV, la i_{corr} es lineal con el potencial y la pendiente de la curva lineal es la Rp la cual puede ser determinada por la ecuación (11) de Stern y Geary^(12,13,14), donde B es la constante de proporcionalidad y presenta una relación entre las pendientes de Tafel, la B puede obtenerse de forma experimental si se realizan curvas de polarización anódicas y catódicas, la otra forma de obtener B si nuestro sistema es controlado por activación es tomar el valor de 26 mV derivado de valores de b_a y b_c de 120 mV/década.

$$i_{corr} = B/RP \dots\dots\dots(11)$$

$$B = (b_a b_c) / 2.303(b_a + b_c) \dots\dots\dots(12)$$

En la Figura 4 se observa un esquema de la linealidad existente entre la corriente (i) y el voltaje (E) en la proximidad de E_{corr} , este es un comportamiento típico de un metal con $E_{corr} = -700$ mV, el cual se le aplicó un $\eta = \pm 20$ mV con $b_a = 118$ mV y $b_c = -118$ mV.

Cuando en un proceso de corrosión es controlado por difusión la curva de polarización catódica alcanza una i_{lim} , por la cual la b_c tenderá a ser infinita por lo tanto la i_{corr} puede ser determinada por la ecuación (13).

$$i_{corr} = b_a/(2.303RP) \dots\dots\dots(13)$$

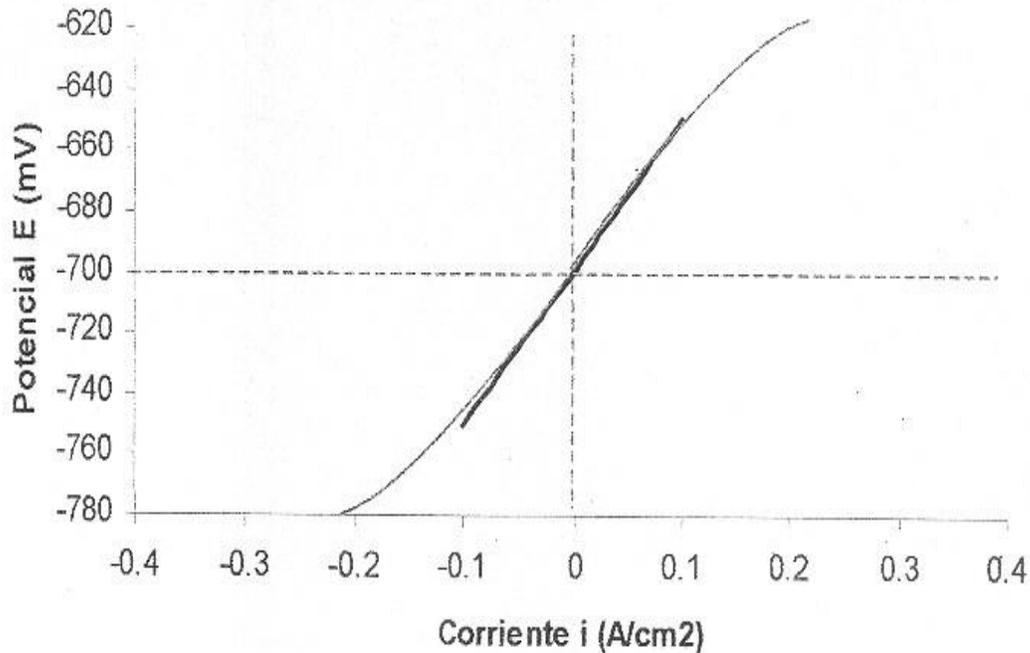


Figura 4.- Diagrama esquemático de la linealidad entre i y E en la proximidad de E_{corr} .

2.4 CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN (V_{corr})

En los ductos es fundamental el mantener su operabilidad y eficiencia. Esto se logra a partir de pruebas de laboratorio y del monitoreo de los ductos, aplicando las medidas preventivas y/o correctivas que se requieran, por esto uno de los parámetros más importantes para su evaluación es medir su velocidad de corrosión (V_{corr}).



Cuando se mide la V_{corr} en un metal por medio de técnicas electroquímicas se obtienen resultados de i_{corr} en amperios por centímetro cuadrado (A/cm^2), para relacionar la i_{corr} con la V_{corr} se utiliza las leyes de Faraday las cuales indican:

1.- La cantidad de una sustancia disuelta o depositada en una electrólisis es proporcional a la carga eléctrica total transferida.

2.- La cantidad de sustancias disueltas o depositadas por el paso de la misma carga eléctrica es proporcional a su equivalente en peso.

Entendiendo que:

Electrólisis: Producción de cambios químicos en el electrolito mediante el paso de una corriente eléctrica a través de una celda electroquímica.

Equivalente en peso: Peso atómico entre número de electrones que puede liberar.

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) como se muestra a continuación:

$$V_{corr} = (i_{corr})(FC)(1eq/F)(1/eq)(PM)(1/\rho)(FC)(FC)(FC)$$

mpy =

$$(A/cm^2)(C/A*s)(1eq/96500C)(1mol/eq)(g/mol)(cm^3/g)(31536000s/1año)(1pulg/2.24cm)(1000milipulg/1pulg)$$

Donde:

A, C, F = Amper, Coulombs y constante de Faraday

neq = Número de equivalentes electroquímicos

PM, ρ = Peso molecular del electrodo metálico y densidad del electrodo metálico

FC = Factores de conversión para obtener las unidades que nos interesan

2.5 FLUJO DE FLUIDOS Y SU EFECTO EN LA CORROSIÓN

2.5.1 FLUJO Y VISCOSIDAD

A la materia (sólida, líquida o gaseosa) que se deforma continuamente cuando es sometida a un esfuerzo de corte se le conoce como fluido, la facilidad que tiene este fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza externa se le conoce como viscosidad^(11,15,16), lo anterior queda claramente expresado en la Figura 5 donde se encuentra la materia inmóvil (no es fluido) y es movido (si es fluido) aplicándole un esfuerzo de corte (ζ), es decir la fuerza (F) que actúa sobre un área (Ax).

$$\zeta = F/Ax \dots\dots\dots(14)$$

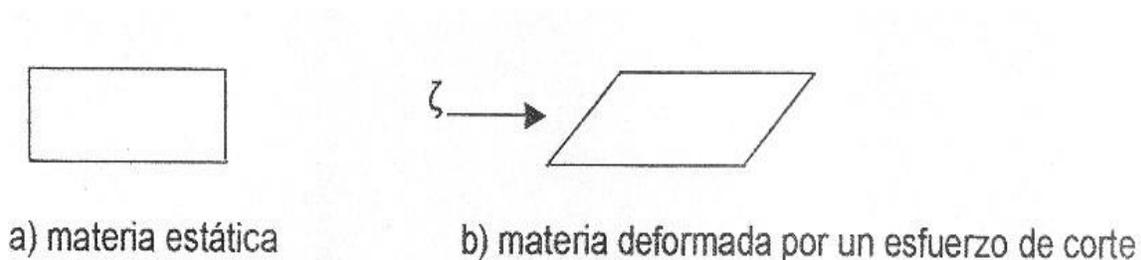


Figura 5.- Concepto esquemático de fluido.



Existen 2 tipos de viscosidad:

1) La viscosidad absoluta o dinámica^(11,15,16) (μ) y se expresa en pascal segundo (Pa s), en newton segundo por metro cuadrado ($N s/m^2$), en kilogramo por metro segundo (Kg/ms) o en la forma más común en gramos por centímetro segundo (g/cm s) mejor conocido como centi poise (Cp).

2) La viscosidad cinemática^(11,15,16) (V): Es el cociente entre la viscosidad dinámica (μ) y la densidad (ρ) y se expresa en metro cuadrado por segundo (m^2/s), en centímetro cuadrado por segundo (cm^2/s) mejor conocido como stoke (St).

$$V = \mu / \rho \dots\dots\dots(15)$$

La medida de la viscosidad se puede hacer de acuerdo a lo recomendado en la norma⁽¹⁷⁾ ASTM D2196-99.

Si consideramos en la figura 5 que a) y b) son planos de un fluido separados por una distancia, a) está estático y b) moviéndose con una velocidad característica (U_x), el esfuerzo de corte (ζ) para condiciones de movimiento rectilíneo entre dos capas de fluido adyacentes queda plasmado en la ecuación 16 , conocida como: ley de Newton de la viscosidad⁽¹¹⁾, en donde μ es una constante de proporcionalidad definida anteriormente como viscosidad dinámica en donde esta propiedad solo depende del estado del fluido (presión, temperatura y composición), dU_x/dy es el gradiente de velocidad considerando el movimiento en una dirección.

$$\zeta = \mu (dU_x/dy) \dots\dots\dots(16)$$



2.5.2 GRUPOS ADIMENSIONALES (Re, Sc, y Sh)

Este grupo está conformado por diversos números adimensionales: Reynolds (Re), Schmidt (Sc) y Sherwood (Sh), los cuales tienen características representativas del fluido, el análisis de estos números adimensionales nos sirve para describir procesos de transferencia de masa en condiciones de flujo turbulento.

El número de Re nos da las características de las condiciones de flujo de un electrolito en una geometría de un reactor dado y se representa por la ecuación 17, donde (Vx) es la velocidad característica, (L) es la longitud característica y (ν) es la viscosidad cinemática.

$$Re = (Vx L)/\nu \dots\dots\dots(17)$$

El $Re^{(11)}$ nos sirve para determinar el tipo de flujo por ejemplo para $Re < 2000$ se considera flujo laminar, para $Re > 3000$ el flujo es turbulento y para Re entre 2000 y 3000 el flujo sufre una transición gradual de laminar a turbulento se le conoce como capa intermedia y el Re se redefine como número de Reynolds crítico Re_{crit} .

Las condiciones de flujo pueden ser estudiadas vía técnica de inyección de un trazador que destaca los patrones de flujo localizado, la Figura 6 muestra el resultado de tal experimento en forma esquemática, donde en un tubo transparente fluye un líquido y se le inyecta un colorante en $Re < 2000$ la amortiguación viscosa suprime la perturbación del fluido laminar (a) y para $Re > 3000$ altas velocidades tangenciales en la superficie de la pared inducen al final la rotación del fluido y se forman pequeños remolinos y se observa la turbulencia (b).

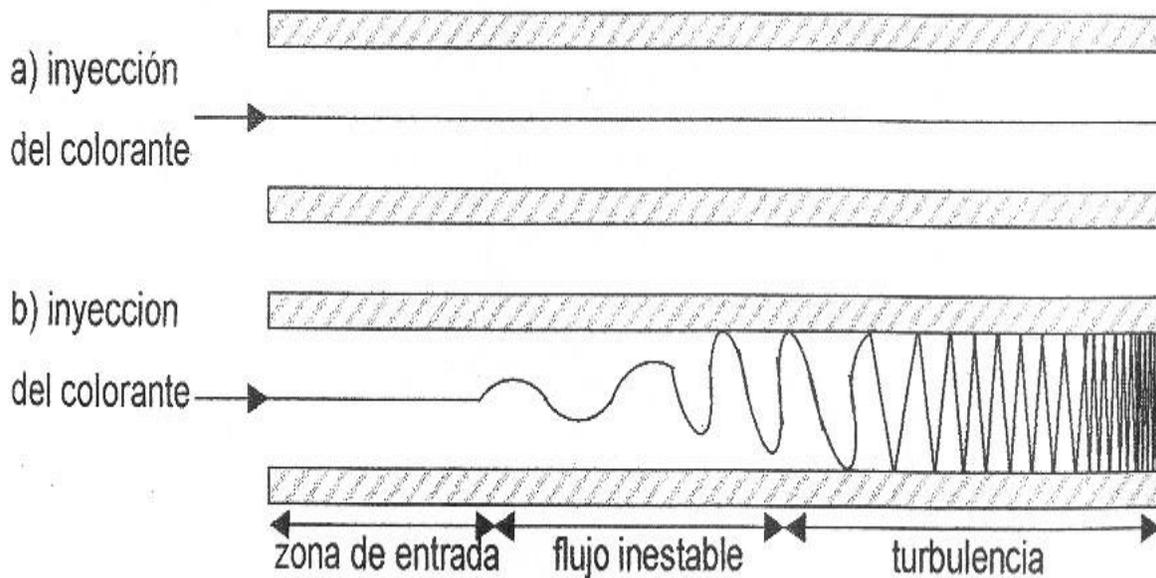


Figura 6.- Ejemplo esquemático de flujo laminar (a) y turbulento (b).

Si se considera el desarrollo del flujo de un electrolito sobre una placa, dos fuerzas actúan sobre el fluido: 1.- La fuerza que causa el flujo y 2.- Una fuerza opositora debida a las fuerzas viscosas en la interfase placa-electrolito. Si la disolución se divide en capas elementales, entonces los elementos cercanos a la placa estacionaria son retardados y más allá de la placa, las capas retardadas ejercen una influencia creciente sobre sus vecinas generando una capa laminar, si se aumenta la velocidad se entra a una capa intermedia (Re_{crit}), posteriormente se hace una capa de turbulencia pero con una fina subcapa laminar cercana a la placa como se muestra en la Figura 7.

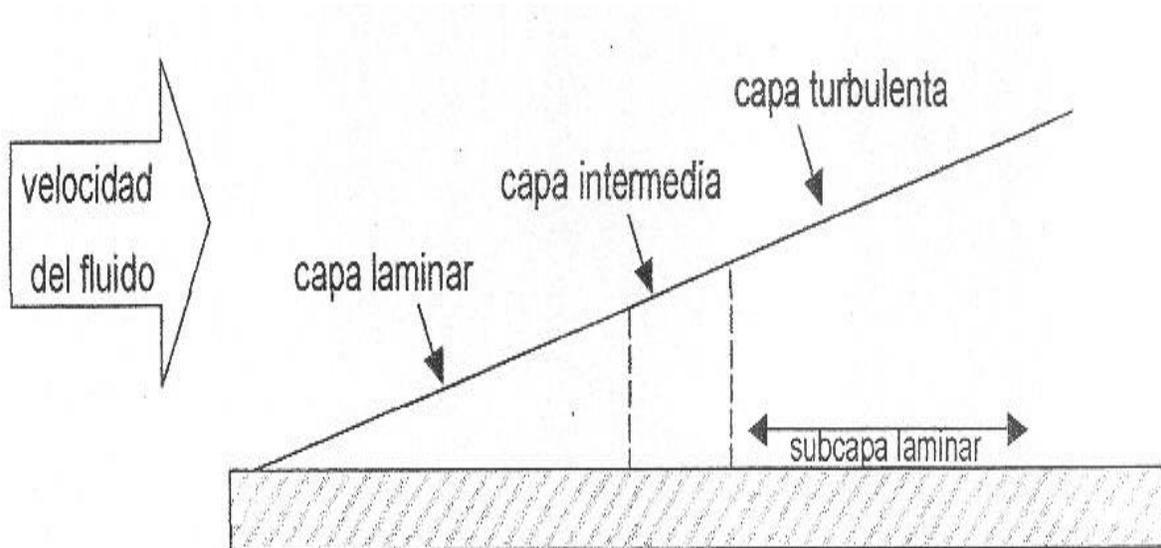


Figura 7.- Capas límite hidrodinámicas.

El número Sc está asociado con las propiedades de transporte de masa del fluido.

$$Sc_i = V / D_i \dots\dots\dots(18)$$

El número Sh está asociado con el coeficiente de transporte de masa (k_i) en este caso para una especie i en el fluido.

$$Sh_i = k_i L / D_i \dots\dots\dots(19)$$



Si en el proceso de transferencia de masa es influenciado por la difusión de la especie i , i_{lim} y k_i , pueden correlacionarse con la siguiente ecuación:

$$k_i = i_{lim} / nFCi^{ss} \dots\dots\dots(20)$$

Donde:

ν , L = Viscosidad cinemática y longitud característica

D_i = Coeficiente de difusión de la especie i en el fluido

C_i^{ss} = Concentración de la especie i en el seno de la solución

n , F = Electrones involucrados en el proceso y constante de Faraday

Sustituyendo (19) en (20) se obtiene el número $Sh^{(11,18-22)}$ en términos de i_{lim} :

$$Sh_i = i_{lim} L / nF D_i C_i^{ss} \dots\dots\dots(21)$$

La correlación de los números adimensionales en sistemas controlados por transferencia de masa en condiciones de flujo turbulento puede expresarse en la ecuación (22), donde x , y , y la constante se obtienen experimentalmente.

$$Sh = (Constante)(Re^x)(Sc^y) \dots\dots\dots(22)$$



2.5.3 ELECTRODO DE CILINDRO ROTATORIO (ECR)

En la industria petrolera las líneas de transporte de hidrocarburo normalmente se encuentra el fluido en flujo turbulento, anteriormente las pruebas por medio de técnicas electroquímicas se realizaban en condiciones estáticas con el paso del tiempo muchos laboratorios de corrosión de instituciones públicas y compañías privadas han adquirido diversos equipos para estudiar el efecto del flujo en la corrosión, como el electrodo de cilindro rotatorio (ECR), electrodo de disco rotatorio (EDR), circuitos cerrados de tuberías (loops) e impinging jet.

El estudio del flujo en la corrosión es muy compleja ya que existen muchas variables (presión, temperatura, existencia de diversos agentes corrosivos como el CO_2 , H_2S , Cl^- , películas formadas en el metal, etc.), de forma general se conoce que el proceso de corrosión es influenciado por el movimiento del metal y medio corrosivo, este movimiento incrementa la transferencia de calor y de masa produciendo un aumento en la velocidad de corrosión (V_{corr}).

El electrodo de cilindro rotatorio ha tenido gran éxito en el estudio de la corrosión bajo condiciones de flujo turbulento debido principalmente a que tiene las propiedades de transferencia de masa bien definidas y se obtiene un control del flujo, a velocidades bajas de rotación Gabe^(19,20) indicó que el fluido se mueve en círculos concéntricos alrededor del cilindro, generando que el flujo sea laminar mientras que en altas velocidades de rotación el flujo se hace inestable y empiezan a formarse patrones de flujo celular (vértices de Taylor) generando que el flujo sea turbulento.

En el electrodo de cilindro rotatorio el flujo es turbulento^(18,19,22,23) con un Re aproximado de 200, este valor es equivalente a una velocidad periférica de 0.002 m/s equivalente a 40 revoluciones por minuto (rpm) aproximadamente, para un cilindro de 0.01m de diámetro inmerso en agua pura con $v = 1 \times 10^{-6}$.

Un electrodo de cilindro rotatorio físicamente puede estar conformado por lo siguiente (Figura 8):

- 1.- Sistema de rotación
- 2.- Terminales del electrodo de trabajo
- 3.- Goma ajustable para trabajar en un matraz de 5 bocas
- 4.- Eje de rotación metálico
- 5.- Material aislante (teflón)
- 6.- Cilindro del metal a estudiar
- 7.- Punta aislante (teflón)
- 8.- Cable conectado a una caja de encendido-apagado con control de velocidades del ECR.

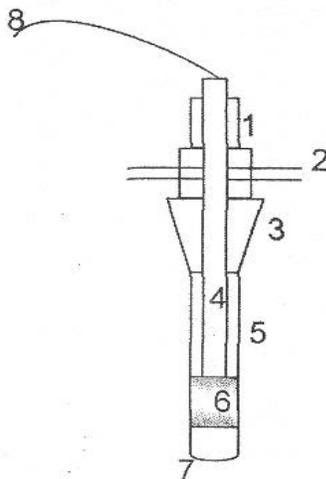


Figura 8.- Representación esquemática del electrodo de cilindro rotatorio (ECR).



2.5.4 TRANSPORTE DE MASA EN EL ELECTRODO DE CILINDRO ROTATORIO (ECR)

El ECR fue examinado exhaustivamente por primera vez en 1954 por Eisenberg y col.⁽²¹⁾, determinaron la relación que existe entre la $i_{lim,i}$ y la velocidad de rotación del ECR (U_{ECR}), lo cual es representado en la siguiente ecuación:

$$i_{lim,i} = 0.0791 nFC_i^{ss} d_{ECR}^{-0.3} V^{-0.344} D_i U_{ECR}^{0.7} \dots\dots\dots(23)$$

Donde:

n, F = Electrones involucrados en el proceso y constante de Faraday

C_i^{ss} = Concentración de la especie i en el seno de la solución

d_{ECR}, V = Diámetro del ECR y viscosidad cinemática

D_i = Coeficiente de difusión de la especie i en el fluido

En la ecuación (23) existe una linealidad entre la i_{lim} y la U_{ECR} elevada a la potencia 0.7, a una temperatura constante, por lo tanto se puede expresar como:

$$i_{lim} = AU_{ECR}^{0.7} \dots\dots\dots(24)$$

Donde:

$$A = 0.0791 nFC_i^{ss} d_{ECR}^{-0.3} V^{-0.344} D_i \dots\dots\dots(25)$$

Si se considera que la longitud característica (L) utilizada en los cálculos de números adimensionales Re y Sh , es igual al diámetro del electrodo (d_{ECR}), entonces la ecuación (23) se puede expresar en números adimensionales como:

$$Sh_{i,ECR} = 0.079 Re_{ECR}^{0.7} Sc_i^{0.356} \dots\dots\dots(26)$$



2.6 EFECTOS DEL FLUJO DE FLUIDOS SOBRE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

La necesidad de minimizar costos dentro de procesos productivos demanda el manejo de fluidos a altas velocidades, esto trae como consecuencia cierto grado de deterioro sobre el equipo involucrado. El tipo de daño originado es función principalmente del medio agresivo que se maneja (fluido) así como de la velocidad a la cual se encuentra circulando dicho fluido. Un ejemplo claro de esto lo encontramos en tecnologías marinas, procesos energéticos, producción de crudo y gas, entre otros. Así daños por corrosión presentes en bombas, impulsores, válvulas, tubos de intercambio de calor y otros equipos hidráulicos son ejemplos típicos de la clase de materiales que son destruidos por corrosión debido al efecto de la velocidad del fluido.

Existen un número de mecanismos de acción conjunta de flujo y corrosión que dan como resultado 2 tipos diferentes de corrosión inducida por flujo:

- 1.- Corrosión controlada por transporte de masa
- 2.- Corrosión controlada por transporte de carga

Transporte de masa es relacionado con fluidos líquidos, en donde similarmente a la transferencia de calor, el transporte de masa es afectado por las condiciones de flujo. Básicamente la transferencia de masa puede describirse como iones y/o moléculas que pueden hacer contacto con la superficie metálica donde no existen productos de corrosión; el contacto de los iones y/o moléculas con la superficie del metal se realiza por difusión molecular como resultado de un gradiente de concentración. Si además, el o los materiales reaccionantes son transportados también por convección (debido al flujo laminar o turbulento), la cantidad de materia que llega a la superficie se ve incrementada, aumentándose al mismo tiempo la velocidad de la reacción.



Este tipo de transporte se conoce como difusión convectiva y tal como su nombre sugiere; este consiste en convección en el volumen de la solución y difusión en la vecindad inmediata de la superficie.

Debe realizarse una clara distinción entre corrosión acelerada por flujo y corrosión-erosión debido a que estos términos con frecuencia en la literatura son manejados de forma similar siendo esto incorrecto. Corrosión acelerada por flujo es definida como el incremento en la corrosión debido al incremento en la intensidad de turbulencia y la transferencia de masa, como resultado del flujo de un fluido sobre una superficie, corrosión-erosión es definida como el incremento en la corrosión como el resultado del impacto de una segunda fase de partículas contenidas en un fluido, por ejemplo partículas sólidas de un líquido o pequeñas gotas de líquido en un gas, sobre una superficie sólida como el resultado del flujo de fluidos sobre esta.

Un incremento en la velocidad de flujo generalmente aumenta la velocidad de corrosión, aunque existen también efectos benéficos pues al intensificar el flujo puede eliminarse acumulación local de agentes agresivos sobre la superficie de un metal evitando así la corrosión por picaduras o corrosión por fisuras, en otros casos al incrementar la velocidad del flujo puede aumentarse la pasivación e inhibición debido a un mejoramiento en el transporte del pasivador e inhibidor hacia la fase límite⁽²⁴⁾.

El patrón de flujo a lo largo de una geometría dada, es gobernado por leyes de hidrodinámica. Para fluidos Newtonianos como lo son la mayoría de los líquidos, el campo de velocidad está dado por la ecuación de Navier-Stokes representando la conservación de momentum así como por la ecuación de continuidad basada en la ley de la conservación de masa^(25,26).



Usando como ejemplo un fluido circulando por una tubería, pueden ser distinguidos 2 tipos de flujo: laminar y turbulento. El flujo laminar se caracteriza por líneas de flujo paralelas mientras que el flujo turbulento es descrito como un flujo inestable que contiene tres dimensiones y fluctuación rotacional, estas fluctuaciones son al azar en el espacio y tiempo, un flujo turbulento se considera como un centro o capa de turbulencia completa en donde la velocidad media es básicamente constante^(8,27-29).

Desde un punto de vista práctico, es raro encontrar flujo laminar por lo que es el flujo turbulento el que debe ser considerado con respecto a los efectos de corrosión. El flujo turbulento a su vez es dividido en flujo turbulento sin disturbio, con vectores de velocidad paralelos y flujo turbulento con disturbio cuyos vectores de velocidad no son paralelos. Esto último puede ser originado por variaciones en el límite de fase (por ejemplo desniveles en la pared o elevaciones en una tubería), así como por variaciones de presión (debida a vibraciones en bombas)^(8,24).

Una descripción completa de los efectos del flujo de fluidos sobre la corrosión para cualquier sistema requiere una rigurosa consideración de los conceptos de transferencia de calor (térmico), transferencia de masa (químico) y transferencia de cantidad de movimiento (momentum) (física). Los efectos de la transferencia de calor, transferencia de momentum y transferencia de masa sobre la velocidad de corrosión no son independientes. Cambios en el esfuerzo de corte superficial (transferencia de cantidad de movimiento) afectarán el coeficiente de difusión (transferencia de masa) así como también producirán cambios en el gradiente de temperatura (transferencia de calor).



La transferencia de la cantidad de movimiento (momentum) es la fuerza del fluido actuando directamente en la superficie del material sólido, esta fuerza se intensifica bajo condiciones de turbulencia y se mide mediante el esfuerzo de corte superficial (τ_w), la transferencia de masa es la velocidad a la cual los reactantes químicos o productos de la reacción son transportados hacia y desde la superficie del metal y es determinada mediante la medición del coeficiente de transferencia de masa (k) para cada especie química relevante (k_i). Por otro lado, la transferencia de calor en producción y transporte de crudo generalmente no es un factor que afecte el proceso de corrosión como lo es la transferencia de momentum y la transferencia de masa^(30,31).

La mayoría de los cambios en las características de los fluidos, turbulencia, transferencia de masa e interacción con la superficie se presentan en la capa límite^(25,32-35). Esto implica que un método de prueba permita el cálculo de parámetros independientemente a la geometría del sistema y que puedan ser utilizados en la investigación de los efectos del flujo del fluido sobre la corrosión de cualquier sistema que se pueda caracterizar hidrodinámicamente.

2.7 PRINCIPALES PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

El uso eficaz de datos obtenidos en pruebas de laboratorio para predecir la aceleración de la corrosión debido al flujo de fluidos ha sido uno de los objetivos centrales al investigar la velocidad de corrosión en ductos por décadas. La primera publicación en donde se relaciona el parámetro hidrodinámico conocido como esfuerzo de corte superficial (τ_w) con el proceso de corrosión fue en el año de 1977 para aleaciones de cobre en contacto con agua de mar en movimiento⁽¹⁰⁾.

Actualmente los científicos en corrosión consideran que la corrosión acelerada por flujo se debe expresar en términos de parámetros comunes a todos los sistemas hidrodinámicos independientes de la geometría de estos sistemas, para poder realizar la aplicación de los datos de las pruebas de laboratorio a las operaciones en el campo^(36,37). Estos parámetros son calculados a partir de ecuaciones hidrodinámicas empíricas desarrolladas para caracterizar el flujo del fluido. Como resultado de estas consideraciones, la determinación experimental de los efectos del fluido sobre la corrosión involucra el cálculo de parámetros como el esfuerzo de corte superficial (τ_w) y el coeficiente de transferencia de masa (k).

En la Figura 9 se describe el proceso básico para relacionar los datos de corrosión debidos al flujo obtenidos en el laboratorio para su aplicación en el campo.

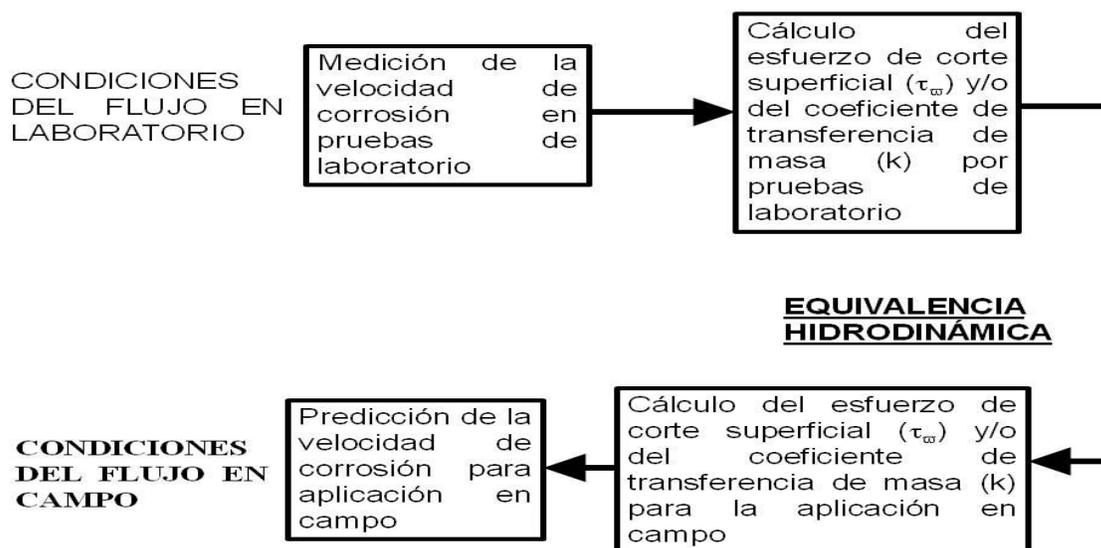


Figura 9.- Procedimiento para determinar la velocidad de corrosión en campo a partir de datos usados en laboratorio mediante consideraciones de mecanismos de flujo de fluido.



Las pruebas de corrosión en laboratorio son realizadas de tal forma que permitan el cálculo de τ_w y k . Las velocidades de corrosión en el laboratorio son transferidas al campo para determinar la velocidad de corrosión en este. La corrosión es un fenómeno de superficie que se presenta en la interfase de un fluido corrosivo y la superficie de un material sólido. Consecuentemente, la influencia del flujo de fluidos sobre los procesos de corrosión resulta de una compleja interrelación entre la cantidad de movimiento hidrodinámico y la transferencia de masa cerca de la superficie.

Así; existen varios tipos de interacción de un fluido líquido fluyendo por una pared sólida, junto con reacciones químicas y electroquímicas que involucran componentes disueltos en el líquido, los efectos mecánicos deben ser considerados. Mientras que en un fluido en fase simple la presión, esfuerzo cortante y variaciones del líquido dominan, en un fluido de dos fases el impacto de partículas es el evento central en la destrucción de materiales.

Como ya se ha mencionado, la transferencia de masa es la velocidad a la cual los reactantes químicos o productos de la reacción son transportados hacia y desde la superficie del metal y es determinada por la medición del coeficiente de transferencia de masa (k) para cada especie química relevante (k_i), la corrosión puede ser afectada por el flujo de diferentes formas dependiendo del mecanismo que gobierne el proceso de corrosión, pudiéndose distinguir dos casos. El efecto del flujo sobre la corrosión cuando en la superficie no se encuentran películas protectoras y el efecto del flujo sobre la corrosión en presencia de películas superficiales (precipitados, inhibidores, etc).



En ausencia de películas protectoras, el efecto principal que ejerce el flujo sobre la velocidad de corrosión es a través de la transferencia de masa de las especies involucradas en la reacción de corrosión a la superficie del metal, para la transferencia de masa en un flujo en condiciones de turbulencia, debido a números de Schmidt (Sc) muy grandes, todos los cambios de concentración ocurren en una capa muy estrecha adyacente a la superficie del metal, en el fondo de la capa viscosa, en la llamada en transferencia de masa subcapa o capa límite. El espesor de esta capa es función de la velocidad de flujo (Re).

La transferencia de masa usualmente es asociada con corrientes límites, es decir con situaciones en las que los procesos electroquímicos en la superficie del metal son tan rápidos que dificultan el transporte de los reactantes desde y hacia el volumen de la solución. Sin embargo, si el proceso de corrosión se encuentra bajo transferencia de carga (activación) cambios asociados con el flujo y transferencia de masa no tendrán efecto sobre la velocidad de corrosión.

Cuando en la superficie existen películas, estas pueden reducir la velocidad de corrosión debido a que impiden el transporte de las especies involucradas en las reacciones electroquímicas hacia la superficie del metal. En el caso de películas de inhibidor, parte de la superficie del metal es “obstaculizada” por el inhibidor.

La película formada en la superficie puede ser removida local o globalmente por disolución química (en el caso de precipitados) o por fuerzas mecánicas, ambos casos, producen un significativo incremento en la velocidad de corrosión. Ambos mecanismos en que son removidas las películas se encuentran relacionados con el flujo y los procesos de transferencia.



La disolución química de los depósitos en la superficie es relacionada con la transferencia de masa y el electrolito (medio químico). Si la película es removida mecánicamente, esta se relaciona con la transferencia de momentum y frecuentemente se encuentra en fluidos simples (monofásicos) y fluidos multifásicos; considerando estos últimos, las películas pueden ser removidas debido al impacto de partículas sólidas presentes en el líquido, por el impacto de pequeñas gotas presentes en fluidos gaseosos (erosión) o por fluctuaciones de presión y esfuerzos de corte que producen golpeteo, al considerar un flujo simple (monofásico), el desprendimiento de la película debido a fuerzas mecánicas frecuentemente es ocasionado por irregularidades en la geometría (por ejemplo soldaduras, ranuras o súbitos cambios de diámetro).

Aún no es muy claro cuáles son las fuerzas responsables del desprendimiento mecánico. En la literatura el promedio del esfuerzo de corte superficial⁽¹⁰⁾ y “fluctuaciones en la turbulencia”⁽⁶⁾ son relacionados con la película removida, sea como sea esto no es claro y requiere de más estudio.

Así, para poder transferir los datos desde el laboratorio al campo solo es necesario un modelo que describa el proceso considerando diferentes parámetros como son: Número de Reynolds⁽³⁵⁾, esfuerzo superficial de corte^(8,9), turbulencia⁽⁶⁾, etc. Para capturar el efecto del flujo sobre la corrosión.

El término “esfuerzo de corte de superficie” por lo regular es mal interpretado. Algunos investigadores perciben este término como el efecto de una fuerza para remover la película producto de corrosión desde la superficie del metal. Esta percepción es incorrecta. Más que esto, este parámetro es una medición directa de la pérdida de energía viscosa dentro de la capa límite en un flujo turbulento y se relaciona con la intensidad de turbulencia en el fluido actuando sobre la pared.



Esta no es una fuerza sobre la pared desde el flujo del fluido pero, más que esto, es una fuerza dentro de la corriente de fluido en la pared.

El esfuerzo de corte superficial es la pérdida de presión a condiciones isotérmicas en flujo turbulento dentro de un incremento longitudinal debida a la extensión en la fricción del fluido ocasionada por el contacto con la superficie estática. La definición matemática del esfuerzo de corte total en un fluido moviéndose en la pared fija esta expresada como^(26,32):

$$\tau = \nu \frac{\partial U}{\partial Y} - U_x U_y \dots\dots\dots(27)$$

Donde:

U = Velocidad del fluido

ν = Viscosidad cinemática del fluido

En la pared $U_x = U_y = 0$, dejando solo el esfuerzo viscoso del fluido, τ_w es definido como el esfuerzo cortante viscoso a $y = 0$ y se expresa como:

$$\tau_w = \nu \left[\frac{\partial U}{\partial Y} \right]_{y=0} \dots\dots\dots(28)$$



2.8 PRINCIPALES GEOMETRÍAS UTILIZADAS A NIVEL LABORATORIO PARA SIMULAR EL FLUJO DE FLUIDOS TANTO EN RÉGIMEN LAMINAR COMO TURBULENTO

La velocidad a la que un fluido circula dentro de una tubería está íntimamente relacionada con el desgaste ocasionado en ella, aunado a esto, el desgaste se intensifica al trabajar bajo condiciones de turbulencia.

Existen dos diferentes geometrías las cuales son ampliamente utilizadas para simular las condiciones de campo (tanto para flujo estacionario así como de alta turbulencia) y con las cuales es posible estudiar el comportamiento en el laboratorio, estas geometrías de flujo son:

- A) Tubería de flujo (TF)
- B) Cilíndrica rotatoria (CR) o electrodo cilíndrico rotatorio (ECR)

La geometría TF tiende a ser un sistema aparatoso donde se requieren volúmenes excesivamente grandes del medio corrosivo que se está evaluando, es lenta en cuanto al tiempo requerido para realizar cada prueba, requiere de la instalación de tramos grandes de tubería así como de la instalación de bombas y aditamentos que simulen las condiciones que se tienen en campo, debido a esto, resulta ser una geometría poco empleada a nivel laboratorio para poder realizar estudios de corrosión pues la instalación de este tipo de sistemas es demasiado costosa, aunque su principal ventaja estriba en los resultados obtenidos, ya que de todas las geometrías existentes para caracterizar el flujo de fluidos, esta es la más precisa.



La geometría CR o electrodo cilíndrico rotatorio (ECR) es compacta, requiere de la utilización de volúmenes pequeños del fluido de prueba (medio corrosivo), así como de muestras realmente pequeñas del material que será evaluado (material del que está construida la tubería), el tiempo para la realización de cada prueba está en función de la técnica electroquímica seleccionada pero generalmente se requieren periodos de prueba no muy largos, la instalación de este tipo de sistema es muy fácil, es relativamente menos costoso y puede ser controlado muy fácilmente. Otras ventajas de este tipo de geometría (CR o ECR) son las de proporcionar estabilidad y reproducibilidad en flujo laminar y turbulento (reproduce una velocidad de rotación en un rango de 0 a 10 000 rpm).

Aunque presenta las desventajas de no poder ser empleado para casos que impliquen presiones muy altas o temperaturas extremadamente altas, la desventaja principal se presenta en los resultados arrojados ya que es menos precisa en comparación con la geometría TF aunque investigaciones recientemente desarrolladas han calculado factores de corrección los cuales son función del medio estudiado, pudiendo obtener mediante la introducción de este factor resultados similares a los obtenidos mediante la geometría TF.

La geometría CR o electrodo cilíndrico rotatorio (ECR) es uno de los métodos utilizados con mayor frecuencia para estudiar los efectos que produce el flujo de fluidos en la corrosión de un material, de cualquier manera la simulación de las condiciones de campo en el laboratorio es extremadamente complicada y esta depende principalmente del conocimiento detallado de los procesos que estén presentándose, los procesos que ocurren en el sistema son tan complicados que un simple balance de los parámetros probablemente no exista, de esta forma para poder transferir los datos desde el campo al laboratorio solo es posible mediante un modelo que describa el proceso considerando diferentes parámetros como son número de Reynolds, esfuerzo cortante, turbulencia, etc. Para poder representar en forma precisa al sistema en estudio.

2.9 CÁLCULO DEL PARÁMETRO HIDRODINÁMICO ESFUERZO DE CORTE DE SUPERFICIE (τ_w)

El efecto del esfuerzo de corte de superficie sobre la pérdida de presión en un segmento de tubería (dL) y diámetro (d) puede ser evaluado estableciendo un balance de fuerzas, entre fuerzas de presión (P_1 y dP) y τ_w ⁽⁴⁾. Debe recalcar que en este balance solo se consideraron pérdidas de presión debidas al esfuerzo de corte superficial, eliminando las que se producirán por un cambio en la temperatura o en la altura. Este balance de fuerzas, se muestra esquematizado en la Figura 10.

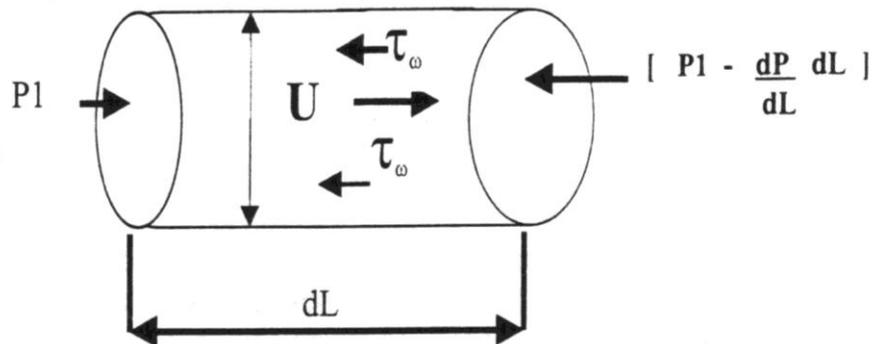


Figura 10.- Balance de fuerzas de presión y esfuerzo de corte superficial en un segmento de tubería asumiendo sólo pérdidas por fricción (no se consideran cambios de elevación y de temperatura).

Este balance es expresado como:

$$P_1 - \left[P_1 - \frac{dP}{dL} dL \right] \frac{\pi d^2}{4} = \tau_w \pi * d(dL) \dots\dots\dots(29)$$



Esta expresión puede ser reducida a la siguiente ecuación (30), la cual define una medición directa de la interacción del fluido fluyendo en la pared de la tubería denotada como τ_w , expresada en términos que pueden ser medidos experimentalmente, por ejemplo, en términos de la diferencia de presión (ΔP) que se origina en una distancia específica (ΔL) con un diámetro específico (d).

$$\tau_w = \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right) \left(\frac{d}{4} \right) \dots \dots \dots (30)$$

La relación de τ_w con respecto a la pérdida de energía cinética y presión por unidad de volumen de fluido define un factor de fricción (f) adimensional que es una medida de la pérdida de presión como resultado de la turbulencia en la pared, para paredes rugosas y fluidos viscosos⁽³²⁾ esta relación es expresada como:

$$f \equiv \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U_o^2} \equiv \frac{2\tau_w}{\rho U_o^2} \dots \dots \dots (31)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido

Resolviendo esta ecuación para τ_w se tiene la siguiente relación:

$$\tau_w = \frac{f U_o^2 \rho}{2} \dots \dots \dots (32)$$



El valor del esfuerzo cortante de superficie (τ_w) para flujo de fluido paralelo en un tubo en condiciones isotérmicas puede ser calculado empíricamente por medio de la ecuación anterior haciendo uso de las propiedades del líquido o experimentalmente por medio de la medición de las caídas de presión en una sección de tubería de dimensiones conocidas y conociendo también las propiedades del fluido mediante la ecuación 4. Esta analogía se puede definir matemáticamente para cualquier superficie en contacto con un fluido en movimiento.

En las pruebas de simulación de laboratorio en donde se utiliza un electrodo cilíndrico rotatorio (ECR), un cilindro metálico es sumergido en un medio corrosivo que resulta de gran interés para la investigación y es puesto en rotación controlando la velocidad. La transición desde un flujo laminar a uno turbulento ocurre a velocidades muy bajas de rotación y matemáticamente se definen condiciones hidrodinámicas, las cuales se producen en la superficie del electrodo.

La mayoría de los trabajos experimentales en donde se utiliza el electrodo de disco rotatorio (EDR) para determinar de la velocidad de corrosión se han concentrado en observaciones de transferencia de masa. Gabe, revisó las características hidrodinámicas del ECR en pruebas electroquímicas^(19,37). A velocidades de rotación muy bajas, el flujo alrededor del ECR es laminar y ocurre en círculos concéntricos alrededor del cilindro.

A elevadas velocidades de rotación, el flujo comienza a presentar un patrón de inestabilidad pero el volumen del fluido permanece esencialmente laminar y a medida que se incrementa la velocidad de rotación, el flujo se transforma totalmente turbulento. La transición a un flujo totalmente turbulento se presenta para números de Reynolds (Re) de aproximadamente igual a 200.



La ecuación que permite calcular τ_ω para la rotación del cilindro en flujo turbulento fue determinada por Silverman y se representa como⁽³⁷⁾:

$$\tau_\omega = 0.0791 \text{Re}^{-0.3} \rho r^2 \omega^2 \dots\dots\dots(33)$$

Donde:

τ_ω es el esfuerzo cortante de superficie en $\text{gm cm}^{-1} \text{s}^{-2}$

Re es el número de Reynolds

ρ es la densidad en g cm^{-3}

ω es la velocidad de rotación en radianes s^{-1}

R es el radio del cilindro en cm

Esta ecuación se basa en los trabajos realizados por Theodorsen y Regier⁽⁵⁾ los cuales determinaron empíricamente los coeficientes de arrastre sobre los cilindros rotatorios para varios gases y líquidos.

2.10 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA (K)

La corriente límite de transferencia de masa medida en forma experimental, puede ser convertida a coeficiente de transferencia de masa empleando la siguiente ecuación:

$$k_m = \frac{i_{\text{lim}}^d \text{ especie que se reduce}}{F \times 10^{-pH}} \dots\dots\dots(34)$$



Donde:

K_m = Coeficiente de transferencia de masa en $m\ s^{-1}$

i_{lim}^d = Densidad de corriente límite de difusión en $A\ m^{-2}$

F = Constante de Faraday (96,490 coulomb/equiv)

El cálculo del coeficiente de transferencia de masa para la geometría de tubería de flujo (TF) se encuentra bien definida en la literatura, este parámetro puede ser calculado haciendo uso de la correlación de Bereger y Hau⁽³⁸⁾.

$$Sh_T = \frac{K_m d_T}{D} = 0.0165 Re_T^{0.86} Sc \dots\dots\dots(35)$$

Donde:

Sh_T = Número de Sherwood

D = Coeficiente de difusión en $m^2\ s^{-1}$

Sc= Número de Schmidt

El cálculo del coeficiente de transferencia de masa en forma teórica para la geometría CR o ECR se realiza empleando la correlación propuesta por Eisenberg⁽³⁸⁾.

$$Sh_c = \frac{K_m d_c}{D} = 0.0791 Re_c^{0.7} Sc^{0.356} \dots\dots\dots(36)$$



Donde:

Re_c = Número de Reynolds

Sc = Número de Schmidt

D = coeficiente de difusión en $m^2 s^{-1}$

2.11 CÁLCULO DEL NÚMERO DE REYNOLDS (Re)

Desde un punto de vista práctico flujo en régimen turbulento es el de principal interés, considerando la geometría TF, el flujo en régimen laminar se encuentra cuando el número de Reynolds es menor a 2000 según la ecuación:

$$Re_T = \frac{V_T d_T}{\nu} \leq 2000 \dots \dots \dots (37)$$

Donde:

Re_T = Número de Reynolds

V_T = Velocidad en $m s^{-1}$

d_T = Diámetro de la tubería en m

ν = Viscosidad cinemática en $m^2 s^{-1}$

Para el intervalo $2000 < Re_p < 3000$ el flujo se encuentra en transición hacia el turbulento. Considerando la geometría CR o ECR el régimen laminar es encontrado para números de Reynolds menores a 200 según la fórmula:

$$Re = \frac{V_c d_c}{\nu} < 200 \dots \dots \dots (38)$$



Donde:

Re_c = Número de Reynolds

d_c = Diámetro del cilindro en m

ν = Viscosidad cinemática en $m^2 s^{-1}$

V_c = Velocidad en la periferia del CR o ECR

La velocidad en la periferia del cilindro rotatorio es calculada mediante la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{\omega d_c}{2} \dots\dots\dots(39)$$

Donde:

ω = La rotación (velocidad angular) en $rad s^{-1}$

d_c = Diámetro del cilindro en m

2.12 MODELO PREDICTIVO DE VELOCIDAD DE CORROSIÓN AL EMPLEAR LA GEOMETRÍA CR O ECR PROPUESTO POR EFIRD

En investigaciones anteriores Efird, desarrolló una ecuación general para determinar la velocidad de corrosión en aceros al carbono expuestos a medios que simulan crudos tipo dulce bajo condiciones de turbulencia al hacer uso de la geometría TF, CR o ECR, esta ecuación relaciona la velocidad de corrosión con el esfuerzo de corte de superficie⁽¹⁰⁾.



La ecuación propuesta por Efird⁽³⁹⁾ es expresada de la siguiente manera:

$$R_{corr} = a \tau_{\omega}^b \dots\dots\dots(40)$$

Donde:

τ_{ω} = Esfuerzo cortante de superficie en $N\ m^{-2}$

R_{corr} = Velocidad de corrosión del acero al carbono en mm por año

a y b son constantes que relacionan el ambiente y solución química

Los valores empleados para a y b en la ecuación, son determinados en función del ambiente específico y solución química así como de la geometría utilizada para simular el flujo.

Dentro de esta misma investigación, Efird determinó los valores de a y b para las geometrías TF, CR o ECR para aceros al carbono expuestos a medios que simulan crudos tipo dulce bajo condiciones de turbulencia, obteniendo los valores de:

a = 2.8 y b = 0.1 ± 0.02 para la geometría CR o ECR

a = 7.7 y b = 0.1 ± 0.02 para la geometría TF

De esta forma, sustituyendo los valores propuestos por Efird para las constantes a y b para la geometría CR o ECR, se llega a obtener una ecuación que representa el modelo propuesto por Efird para determinar la velocidad de corrosión en forma teórica al trabajar con sistemas acero al carbono/crudo en régimen turbulento cuando se hace uso de la geometría cilíndrica rotatoria o electrodo cilíndrico rotatorio.



Así la ecuación general que relaciona en forma directa al esfuerzo de corte de superficie y que representa el modelo propuesto por Efirid es expresada de la siguiente manera:

$$R_{corr} = 2.8 \tau_{\omega}^{0.1} \dots\dots\dots(41)$$

Es de importancia aclarar que la ecuación anterior aún se encuentra en validación antes de poder ser aceptada como ecuación general para determinar velocidades de corrosión de aceros al carbono expuestos en ambientes corrosivos que involucren crudos o hidrocarburos.

Hasta el momento existen grandes controversias en su empleo ya que se han presentado casos en donde se ha podido observar una excelente correlación entre resultados obtenidos mediante el modelo y los obtenidos mediante técnicas electroquímicas aunque contrariamente a estos casos, han existido situaciones en donde no se ha presentado una buena correlación al emplear la ecuación.

De esta forma, la ecuación (41) que representa el modelo propuesto por Efirid será empleada en la presente investigación para determinar la velocidad de corrosión en forma teórica para, posteriormente mediante la comparación entre los resultados obtenidos haciendo uso de este modelo y los obtenidos aplicando técnicas electroquímicas (resistencia a la polarización), poder determinar si el modelo propuesto por Efirid es válido para los sistemas que se estudiarán.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

La Figura 11 muestra de manera esquemática la metodología experimental realizada para las diferentes pruebas experimentales en la presente investigación.

Metodología experimental

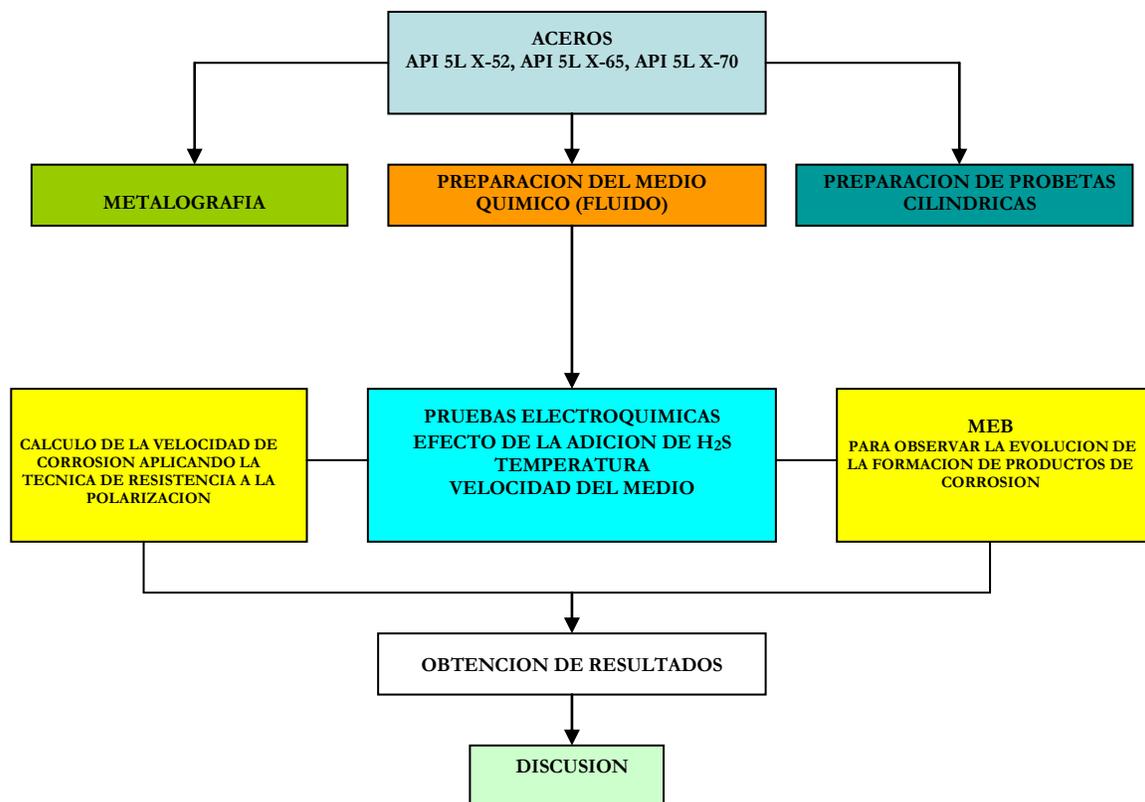


Figura 11.- Procedimiento experimental representado de manera esquemática.



3.1 MATERIALES Y EQUIPOS

Las pruebas se realizaron en un laboratorio dentro del DIMM (departamento de ingeniería en metalurgia y materiales) de la ESIQIE, el cual cuenta con todo lo necesario para realizar trabajos a nivel posgrado, incluyendo una campana extractora y equipos para poder evaluar la corrosión de manera segura, así mismo se cuenta con instalaciones para el suministro de H₂S y CO₂ necesarios para la presente investigación.

3.2 MATERIALES

- * Electrodo de trabajo, muestras cilíndricas de acero al carbono grados API 5L X-52, API 5L X-65 y API 5L X-70.
- * Electrodo de referencia (electrodo saturado de calomel).
- * Electrodo auxiliares (electrodos de grafito).
- * Celda de doble fondo de 800 ml aprox. de vidrio pirex (reactor).
- * Material de vidrio diverso (vasos de precipitado, matraces, etc.).

3.3 EQUIPOS

- * Unidad de electrodo de cilindro rotatorio con unidad de control de velocidad.
- * Potenciostato-galvanostato
- * Balanza analítica
- * Baño para el control de la temperatura
- * Microscopio electrónico de barrido marca JEOL-6300
- * Medidor de pH



3.4 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA QUE SE EMPLEO EN LAS DIFERENTES ETAPAS DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las diferentes etapas para evaluar la velocidad de corrosión que se midió en función del medio, la velocidad de rotación y la temperatura consistió en:

- 1.- Preparación del medio químico
- 2.- Determinación experimental de la densidad, viscosidad y pH del medio para cada condición que se propuso.
- 3.- Preparación de probetas cilíndricas
- 4.- Metalografía y análisis de composición química de cada tipo de acero.
- 5.- Ensamble de la celda electroquímica (uso del electrodo cilíndrico rotatorio).
- 6.- Pruebas de Polarización Potenciodinámica (resistencia a la polarización (R_p)).
- 7.- Caracterización de los productos de corrosión formados.

3.5 PREPARACIÓN DEL MEDIO QUÍMICO

El medio químico es uno de los factores de mayor importancia que afectan la velocidad de corrosión, por lo cual es de vital importancia poner mucha atención en la selección y preparación de éste. En el presente trabajo se empleó un medio corrosivo como se describe a continuación:

1.- MEDIO: El medio estuvo compuesto por un 90% en peso de salmuera sintética y un 10% de keroseno, posteriormente se le adicionó H_2S (1382.7 ppm equivalentes a 1 bar de presión).

Nota: La salmuera sintética se preparó de acuerdo a la norma NACE 1D-196⁽⁴⁰⁾.



La composición química de la salmuera sintética que se empleó en las mediciones electroquímicas para determinar la velocidad de corrosión en función de la velocidad del medio corrosivo se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.- Composición de la salmuera sintética.

COMPUESTO	COMPOSICIÓN
Cloruro de sodio	106.5789 g/l
Cloruro de calcio dihidratado	4.4773 g/l
Cloruro de magnesio hexahidratado	2.061 g/l

Nota: Aforar a 1 litro.

3.6 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD Y VISCOSIDAD PARA EL MEDIO QUÍMICO EMPLEADO

La densidad y viscosidad del medio a emplear en cada una de las pruebas se determinarán mediante técnicas analíticas, en el caso de la densidad, ésta se determinó mediante el uso de un densímetro, mientras que la viscosidad se determinó con la ayuda de un viscosímetro marca Brookfield y el pH empleando un medidor de pH de manera directa.

La densidad y la viscosidad sirvieron para calcular el esfuerzo de corte en la superficie del electrodo de trabajo y con este último poder desarrollar un modelo predictivo de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación del electrodo cilíndrico rotatorio (ECR).



3.7 PREPARACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS

En la preparación de las muestras (probetas cilíndricas) se partió de tramos de ductos que son proporcionados directamente de campo, de estos tramos se cortaron placas, para posteriormente formar barras y de estas últimas se maquinaron probetas cilíndricas de 1 cm de diámetro x 1 centímetro de altura aproximadamente, con lo cual el área de exposición del espécimen fue de aproximadamente de 3.5 cm².

Los materiales que se emplearon para las probetas cilíndricas fueron aceros al carbono API 5L grado 52, API-5L grado 65 y API-5L grado 70 ya que son materiales comúnmente empleados en la elaboración de ductos que transportan hidrocarburos.

Las superficies expuestas en todas las pruebas electroquímicas después del maquinado fueron desbastadas, usando papel abrasivo de SiC grado 200, 400 y 600.

3.8 METALOGRAFÍA Y ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE CADA TIPO DE ACERO

Para la metalografía se tomó una probeta de cada uno de los aceros, la cual una vez desbastada fue pulida a espejo (pasándolas por un paño utilizando alúmina de 1 micra y 0.3 micras como abrasivo, finalmente se lavaron con agua destilada y acetona) y se le realizó un ataque con NITAL 3 (3ml de ácido nítrico HNO₃ Y 97 ml de etanol CH₃-CH₂OH), durante 10 segundos aprox., después se enjuagaron con agua destilada o acetona y se secaron con aire para después observar cada muestra de acero al microscopio y ser fotografiada.



La finalidad de observar al microscopio cada una de las muestras fue la de examinar la microestructura , cuantificar las fases presentes y determinar además, que no existan otros factores que promuevan algún tipo de corrosión no contemplada en la presente investigación.

Para el análisis químico se tomaron muestras de cada uno de los aceros involucrados generalmente en forma de placa, para ser enviados al área de análisis, donde se utilizó la técnica de análisis por emisión óptica (chispa) para conocer los porcentajes de los elementos presentes.

3.9 ENSAMBLE DE LA CELDA ELECTROQUÍMICA (ELECTRODO CILÍNDRICO ROTATORIO)

Primeramente el electrodo de trabajo (probeta cilíndrica de cada acero a emplear) se montó en el porta muestras cilíndrico rotatorio, el cual es montado en una unidad rotatoria denominada “Unidad Electrodo Cilíndrica Rotatoria” (motor), la cual a su vez está conectada a un control de velocidad para poder así regular la velocidad de rotación del electrodo cilíndrico rotatorio (ECR). En la investigación se utilizó una unidad Electrodo Cilíndrica Rotatoria marca Radiometer analytical modelo EDI 10000 y una unidad de control de velocidad de la misma marca modelo TACHYPROCESSEUR. Estos dos últimos dispositivos los podemos apreciar en las Figuras 12 y 13.

El rango de velocidades del electrodo cilíndrico rotatorio se manejó desde 0 hasta un máximo de 6500 rpm, con incrementos de 500 en 500 rpm de tal manera que se lograran apreciar mejor los resultados obtenidos.

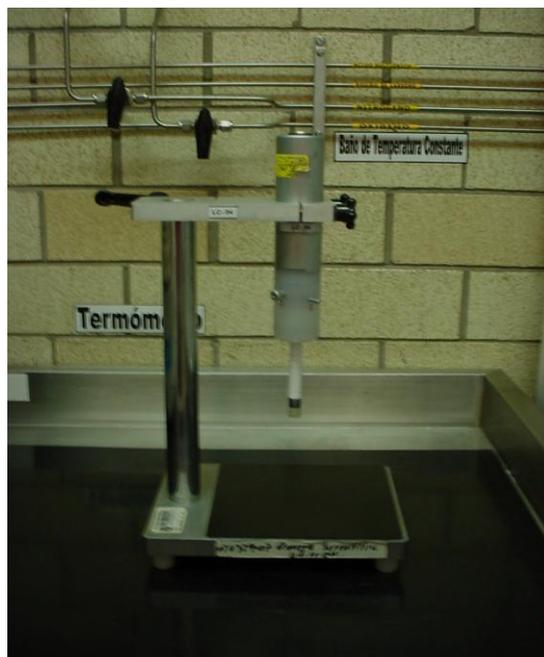


Figura 12.- Unidad Electrodo Cilíndrica Rotatoria (motor) marca Radiometer analytical modelo EDI 10000.



Figura 13.- Unidad de control de velocidad marca Radiometer analytical modelo TACHYPROCESSEUR.



El empleo de la geometría cilíndrica rotatoria, requiere una descripción detallada de la “Unidad Cilíndrica Rotatoria” (UCR), debido a que como ya fue mencionado, es en esta unidad en donde la velocidad de rotación del ECR es controlada para de esta forma poder caracterizar el flujo de fluidos.

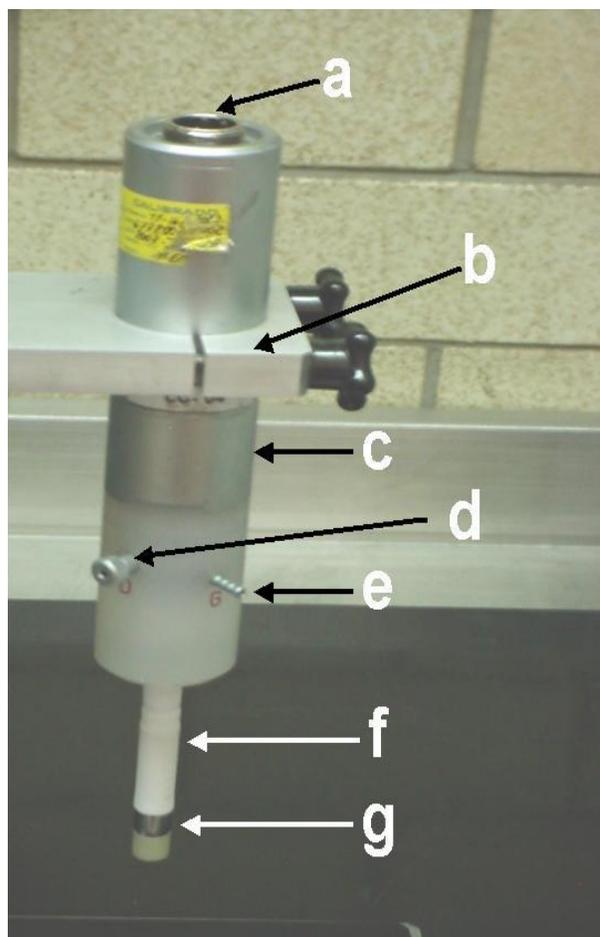
Así en el presente trabajo el ECR fue montado en la “Unidad Cilíndrica Rotatoria (UCR) modelo EDI 10000”, la cual consta de las siguientes partes:

a) Conexión de la Unidad Electrodo Cilíndrica Rotatoria modelo EDI 10000 con la unidad de control de velocidad modelo TACHYPROCESSEUR.

b) Cuerpo del Electrodo.- En el interior del cuerpo del electrodo se encuentra una flecha de acero inoxidable del tipo 304 que abarca desde la parte superior (donde hace conexión la Unidad Cilíndrica Rotatoria con la unidad de control de velocidad) y llega hasta el porta muestras cilíndrico rotatorio para hacer contacto con el ECR por medio de un resorte.

c) Porta muestras Cilíndrico Rotatorio.- El porta muestras Cilíndrico Rotatorio está elaborado de PTFE (teflón), en la parte inferior de éste, se conecta el ECR mediante una unión roscada y por medio de un resorte metálico se garantiza un buen contacto entre el ECR y la flecha.

A continuación en la Figura 14 pueden apreciarse las diferentes partes de las que consta la Unidad Electrodo Cilíndrica Rotatoria.



a) Conexión de la Unidad Cilíndrico Rotatoria con la unidad de control de velocidad.

b) Soporte fijo.

c) Cuerpo de la Unidad Cilíndrico Rotatoria (UCR).

d) Conexión del ECR hacia el potencióstato.

e) Entrada para gas inerte.

f) Porta muestras.

g) Electrodo de trabajo.

Figura 14.- Descripción de los componentes de la Unidad Cilíndrica Rotatoria (motor) marca Radiometer analytical modelo EDI 10000.

La celda electroquímica que se empleó para realizar la experimentación, consta de una celda de doble fondo con una capacidad de 800 ml aproximadamente, la cual fungió como reactor, se emplearon además 2 electrodos auxiliares de grafito, los cuales se colocaron a los lados del electrodo de trabajo empleando además como electrodo de referencia un Electrodo de Calomel Saturado (ECS).



Figura 15.- Ensamble de la celda electroquímica utilizada.

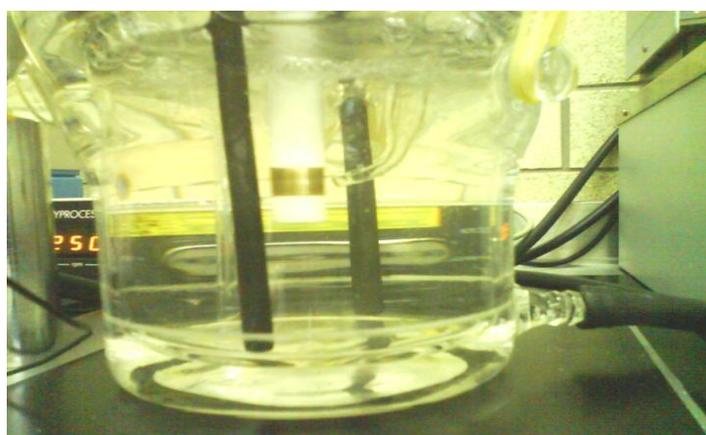


Figura 16.- Vista de la muestra cilíndrica dentro de la celda electroquímica.

Durante las pruebas que se llevaron a cabo a 30 y 60°C la celda electroquímica fue asistida con un baño de control de temperatura marca PolyScience-Digital Temperature Controller modelo 8001, el cual se muestra en la Figura 17, cuya característica es que cuenta con un sistema que recircula agua caliente mediante un par de mangueras, que se conectan a la celda de doble fondo utilizada, la temperatura del baño se controla mediante un sistema electrónico incluido en el baño, verificando además la temperatura del medio químico con ayuda de un termómetro.



Figura 17.- Baño para el control de la temperatura PolyScience-Digital Temperature Controller marca PolyScience modelo 8001.

Una vez ensamblada la celda electroquímica, finalmente se conecta al potenciostato, que cuenta con una computadora personal para de esta forma se realicen las pruebas de polarización potenciodinámica.

En las pruebas electroquímicas se utilizó un potenciostato (Potenciostat / Galvanostat Model 263 A) que se muestra en la figura 18 conectado a una computadora personal, empleando el software Power suit para poder determinar el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión para cada uno de los aceros empleados.



Figura 18.- Potenciostato empleado en las pruebas de Polarización Potenciodinámica: Potenciostat / Galvanostat Model 263A.



3.10 PRUEBAS DE POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICA Y CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN POR LA TÉCNICA DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN

Las condiciones experimentales bajo las cuales se llevaron a cabo las pruebas de polarización potenciodinámica (para el medio no inhibido) con el fin de determinar la velocidad de corrosión aplicando la técnica de “Resistencia a la polarización” se llevó a cabo polarizando el electrodo de trabajo (muestra de acero) ± 20 mV por arriba y por debajo del potencial de corrosión, con una velocidad de barrido de 0.17 mV/s.

Antes de iniciar cada prueba electroquímica se acondicionó el medio agitándolo por un espacio de 30 minutos y posteriormente burbujeando nitrógeno por espacio de otros 30 minutos, conforme lo establece una norma ASTM para este tipo de prueba, posteriormente se saturó el medio con H₂S, después de esto ya se podía sumergir el electrodo de trabajo para dar inicio a cada una de las pruebas electroquímicas.

Las mediciones electroquímicas se llevaron a cabo variando la velocidad de rotación del electrodo de trabajo en una serie de incrementos, hasta cubrir el rango propuesto, efectuando además tres mediciones para cada velocidad de rotación para que los resultados fueran más confiables, se utilizó el mismo medio y el mismo electrodo de trabajo para todo el intervalo propuesto.



3.11 EVOLUCIÓN DE LA FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN

Una de las principales aportaciones del presente trabajo es la de dar un seguimiento a la evolución de los productos de corrosión que se forman, para ello se inspeccionó la muestra al término de cada una de las pruebas electroquímicas hasta alcanzar la velocidad de rotación propuesta, llevando a cabo posteriormente una observación en el microscopio electrónico de barrido, para observar si existe algún cambio o en su caso si se lleva a cabo la formación de productos de corrosión, determinando de manera simultánea su morfología y composición.

Así mismo se llevó a cabo una cuantificación de fases (%ferrita y %perlita) presentes, para ver si tiene algún efecto la presencia de cada una de éstas con respecto a la velocidad de corrosión.

3.11.1 CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Los parámetros de operación utilizados en MEB fueron: una señal de electrones secundarios, a un potencial de 20 kV y una corriente de saturación del filamento de 220 μ A, con una distancia de trabajo de 39 mm. El equipo utilizado fue un microscopio JEOL JSM 6300 Japan Electron Optics Ltd. Tokio. Esta técnica se llevó a cabo para identificar los elementos presentes sobre la superficie de los electrodos de trabajo (muestras de acero) de los productos obtenidos luego de realizar la técnica electroquímica empleada en la presente investigación por medio de un Espectrómetro de Rayos X dispersivos de energía, el cual se encuentra adaptado dentro del mismo microscopio electrónico de barrido empleado. Se operó con un potencial de 20 kV, una corriente de saturación del filamento de 220 μ A, con una distancia de trabajo de 39 mm.



3.11.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE CORROSIÓN POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La caracterización de la estructura superficial y cristalina de las películas de productos de corrosión se realizó con la técnica de DRX, usando un difractómetro D8 Focus Bruker, el cual emplea radiación $\text{Cu K}\alpha$ en un rango de $2\theta = 20^\circ - 100^\circ$ a una velocidad de 2° min^{-1} e incrementos de 0.02° , para cada uno de los electrodos de trabajo utilizados.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 Medición de pH de manera directa para los distintos medios empleados

Con respecto al pH medido (tabla 4), para los medios utilizados en la investigación se observa que no se presentan cambios con el aumento de la temperatura para ambos medios. Sin embargo, para el que contiene únicamente salmuera con un 10% de keroseno (30 y 60°C) el valor obtenido fue de 5.98 siendo este ya un medio ácido en la escala de pH.

Para el medio con salmuera con 10% de keroseno adicionado y 1382.7 ppm de H₂S (p = 1 bar) el valor obtenido para 30 y 60°C fue de 3.89 siendo este aún más ácido con respecto al anterior resultando ser más agresivo debido a la adición del H₂S, debido a una mayor presencia de iones H⁺ provenientes de la disolución acuosa del H₂S.

Tabla 4.- Valores de pH medidos para los distintos medios empleados.

Medio	Temperatura (°C)	pH
SALMUERA-10% KEROSENO	30	5.98
SALMUERA-10% KEROSENO	60	5.98
SALMUERA-10% KEROSENO-H₂S (p = 1 bar)	30	3.89
SALMUERA-10% KEROSENO-H₂S (p = 1 bar)	60	3.89



4.2 Densidad y viscosidad dinámica evaluadas para los distintos medios utilizados en la presente investigación

Con respecto a los resultados obtenidos en la Tabla 5 para la densidad se observa que no cambió cuando la temperatura pasa de 30 a 60°C para el caso con salmuera + 10% de keroseno la cual se mantuvo en 943 kg/m³. Para el medio con salmuera + 10% de keroseno y con 1382.7 ppm de H₂S, la densidad varío con el incremento de la temperatura de 30 a 60°C registrándose un decremento en ella pasando de un valor de 1062 a 975 kg/m³, debido a que con el aumento de la temperatura hay un incremento en el volumen y como la densidad está dada por la relación de la masa entre el volumen un incremento de este provoca una disminución de la misma.

La viscosidad dinámica en ambos medios sufre una disminución con respecto a la temperatura pasando de un valor de 2.55 cp para 30°C a 1.90 cp para 60°C.

Tabla 5.- Valores de densidad y viscosidad dinámica obtenidos para los distintos medios empleados.

Medio	Temperatura (°C)	Densidad (ρ) (Kg m ³)	Viscosidad Dinámica (μ) (cp)
SALMUERA-10% KEROSENO	30	943	2.55
SALMUERA-10% KEROSENO	60	943	1.90
SALMUERA-10% KEROSENO-H ₂ S	30	1062	2.55
SALMUERA-10% KEROSENO-H ₂ S	60	975	1.90

4.3 Composición química de los aceros estudiados

La composición química fue determinada mediante la técnica de análisis por emisión óptica (chispa) con un espectrómetro de arco y chispa marca BELEC en los laboratorios de pruebas mecánicas del GAID.

De los datos proporcionados por los Laboratorios de Pruebas Mecánicas del GAID que se muestran en la Tabla 6 (porcentaje en peso) se observa en primer lugar que el contenido de carbono se incrementa conforme aumenta el grado del acero, es decir para el acero grado API 5L X-52 tiene un contenido de carbono de 0.111 % en peso pasando a un contenido de 0.154 % en peso para el acero grado API 5L X-65 hasta tener un 0.240 % en peso de carbono para el acero API 5L X-70. El contenido de fósforo (0.005-0.023) y azufre (0.014-0.022) es bajo para los tres aceros estudiados.

Tabla 6.- Composición química de los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70.

Acero	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Ni	Fe
API 5L X-52	0.111	0.955	0.175	0.005	0.022	0.037	0.293	0.013	98.3
API 5L X-65	0.154	1.357	0.231	0.023	0.014	0.061	0.001	0.022	98.0
API 5L X-70	0.240	1.081	0.284	0.019	0.021	0.156	0.185	0.088	97.8

Existen además tres elementos que son fundamentales en el comportamiento de los aceros con respecto a la velocidad de corrosión los cuales son el cromo, cobre y níquel.



El contenido de cromo más alto es para el acero API 5L X-70 (0.156 %peso), para el cobre el que tiene el mayor contenido es el acero API 5L X-52 con 0.293 %peso y finalmente para el caso del níquel el que tiene la mayor contenido es el acero API 5L X-70 con 0.088 %peso. En su conjunto estos tres elementos resultan muy importantes en el comportamiento de cada uno de los aceros con respecto a la velocidad de corrosión como se explica más adelante.

4.4 Metalografía de los aceros estudiados (microestructura)

En las Figuras 19 a la 21 se muestran las metalografías realizadas a los 3 tipos de acero propuestos en la presente investigación. Con respecto a la microestructura observada y fotografiada en el analizador de imágenes, en los tres aceros empleados se observa únicamente la presencia de 2 fases, la perlita (fase oscura) dentro de una matriz ferrítica (fase clara) tanto en la sección longitudinal como transversal, por lo cual se pudo determinar que no existen otros factores ajenos como por ejemplo algún tratamiento térmico o una gran cantidad de inclusiones que promuevan algún otro tipo de corrosión no contemplada en esta investigación.

Cabe señalar además que para el caso del acero API 5L X-65 se observa en la Figura 20 un bandeamiento en la microestructura debido al proceso de laminación en la fabricación de éste.

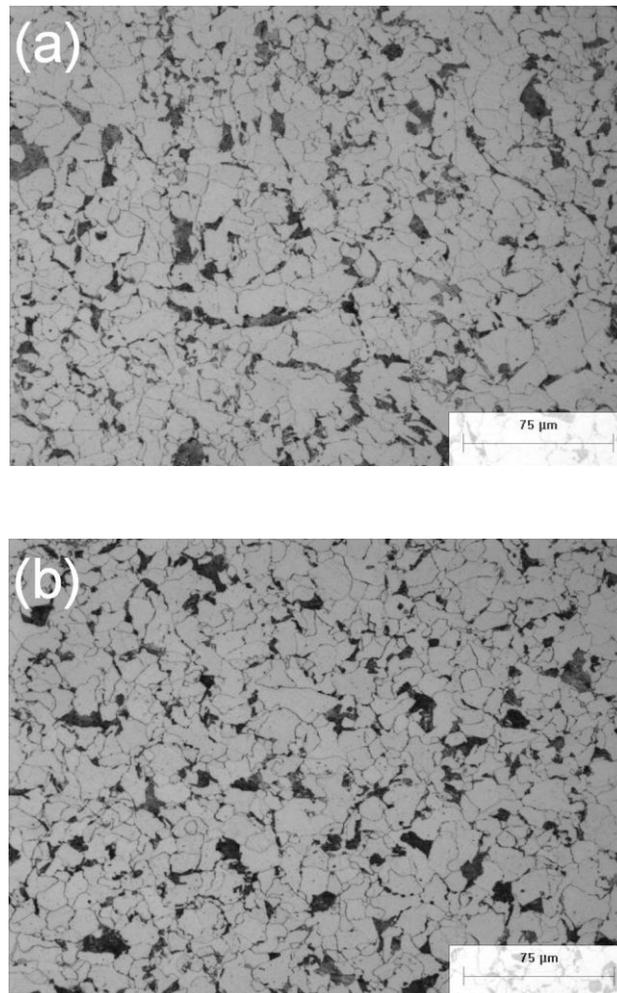


Figura 19.- Micrografías del acero API 5L X-52, (a) sección longitudinal y (b) sección transversal, atacadas con Nital 3.

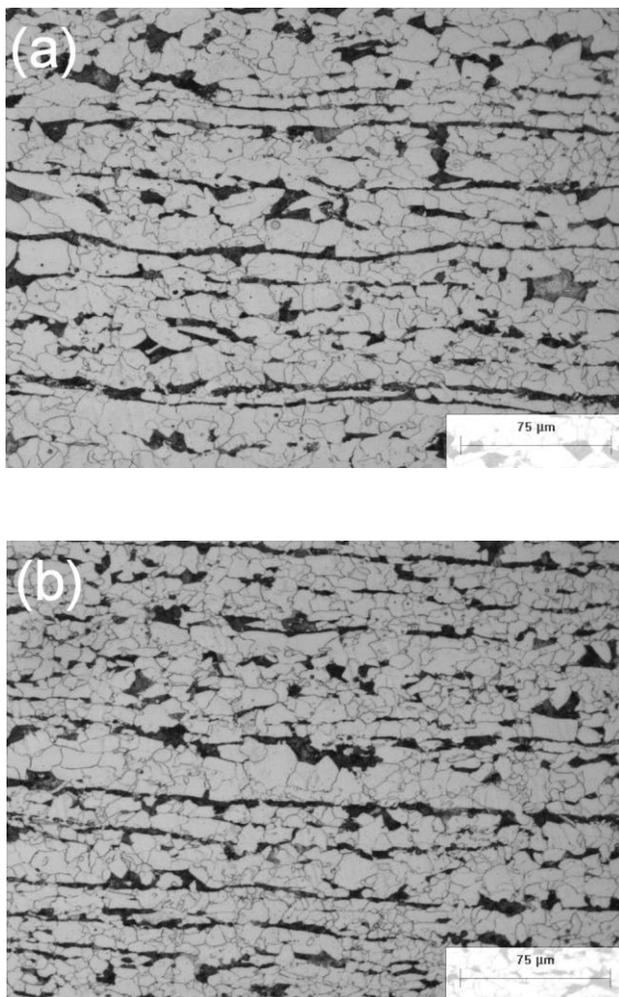


Figura 20.- Micrografías del acero API 5L X-65, (a) sección longitudinal y (b) sección transversal, atacadas con Nital 3.

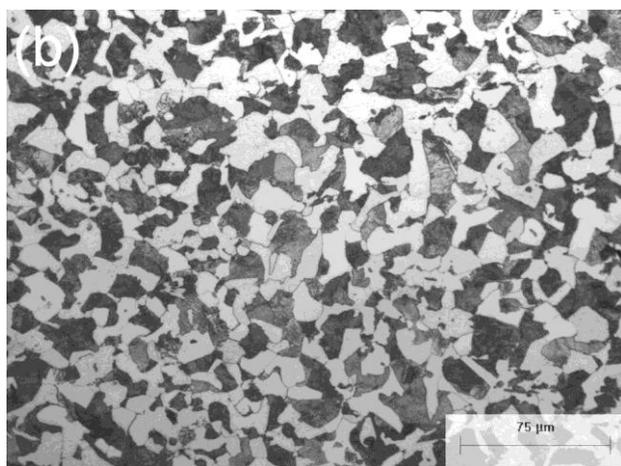
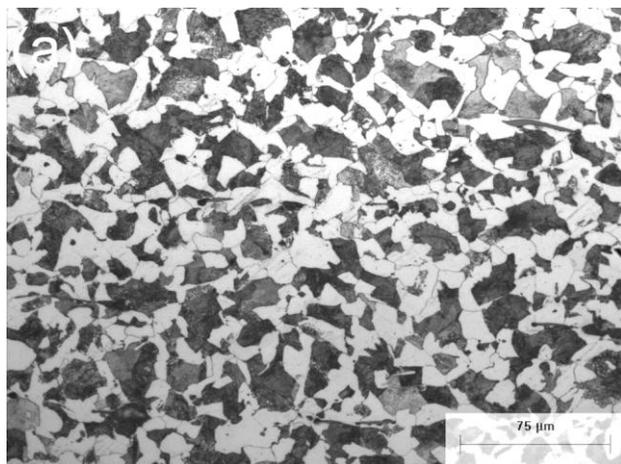


Figura 21.- Micrografías del acero API 5L X-70, (a) sección longitudinal y (b) sección transversal, atacadas con Nital 3.



4.4.1 Cuantificación de fases y tamaño de grano de los aceros estudiados

La cuantificación del porcentaje de fases presentes en la sección longitudinal y transversal de los aceros empleados y su tamaño de grano, se muestra en las tablas 7 y 8.

Tabla 7.- Fases presentes para cada uno de los aceros empleados en la sección longitudinal.

Acero Sección longitudinal	% Ferrita	% Perlita	Tamaño de grano (ASTM)
API 5L X-52	86.64	13.35	8
API 5L X-65	80.57	19.42	9
API 5L X-70	70.51	29.48	10

Tabla 8.- Fases presentes para cada uno de los aceros empleados en la sección transversal.

Acero Sección transversal	% Ferrita	% Perlita	Tamaño de grano (ASTM)
API 5L X-52	88.09	11.90	8
API 5L X-65	82.40	17.59	9
API 5L X-70	65.89	34.10	10



Para el contenido de las fases presentes en cada uno de los aceros se puede mencionar lo siguiente:

Para la sección longitudinal (Tabla 7) de donde fueron elaborados los cilindros que sirvieron como electrodos de trabajo en las pruebas electroquímicas, el acero que presenta la mayor cantidad de ferrita es el acero API 5L X-52 con un 86.64% seguido por el API 5L X-65 con 80.57% y finalmente el API 5L X-70 con 70.51%. El acero API 5L X-52 obtuvo un 13.35% de perlita, 9.42% para el API 5L X-65 y 29.48% para el API 5L X-70.

Para la sección transversal (Tabla 8) se observa una ligera variación en cuanto a los valores de % de las fases presentes, obteniéndose para el acero API 5L X-52 un 88.09% de ferrita, 82.40% para el API 5L X-65 y 65.89% para el API 5L X-70.

Los valores de perlita fueron los siguientes: 11.90% para el API 5L X-52, 17.59% para el API 5L X-65 y 34.10% para el API 5L X-70.

Se midió además el tamaño de grano para los tres aceros estudiados y tanto para la sección longitudinal y transversal los valores obtenidos presentaron un tamaño de grano ASTM 8 para el acero API 5L X-52, ASTM 9 para el acero API 5L X-65 y ASTM 10 para el API 5L X-70, es decir la microestructura es mucho más fina conforme el grado aumenta.

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⁽⁴³⁾ ya que la cementita que está contenida dentro de la perlita es electroquímicamente más estable que ésta⁽⁴⁴⁾. Lo anterior se explicará más adelante cuando se aborde el comportamiento de los aceros con respecto a la velocidad de corrosión.



4.5 Potencial y velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación

A continuación se muestra una serie de gráficas obtenidas a partir de los datos experimentales del **APENDICE 1**.

Análisis del potencial de corrosión en función de la velocidad de corrosión:

La Figura 22 muestra la variación del potencial de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 inmersos en salmuera con 10% de keroseno a 30°C. En todos los casos se observa que los aceros parten de un estado activo, debido a que tienen una superficie limpia y libre de productos de corrosión.

El potencial de corrosión posteriormente comienza a disminuir haciéndose menos negativo lo que indica que la superficie tiende a ser menos activa por la formación de productos de corrosión, para posteriormente aumentar de nueva cuenta a valores más negativos lo cual indica que el material se vuelve más activo por el desprendimiento de los productos de corrosión que se forman (en este caso únicamente se forman óxidos). A partir de las 2500 rpm los 3 aceros muestran un incremento muy parecido con un ligero incremento en su actividad, lo cual nos indica que los óxidos que se forman resultan ser hasta cierto punto protectores.

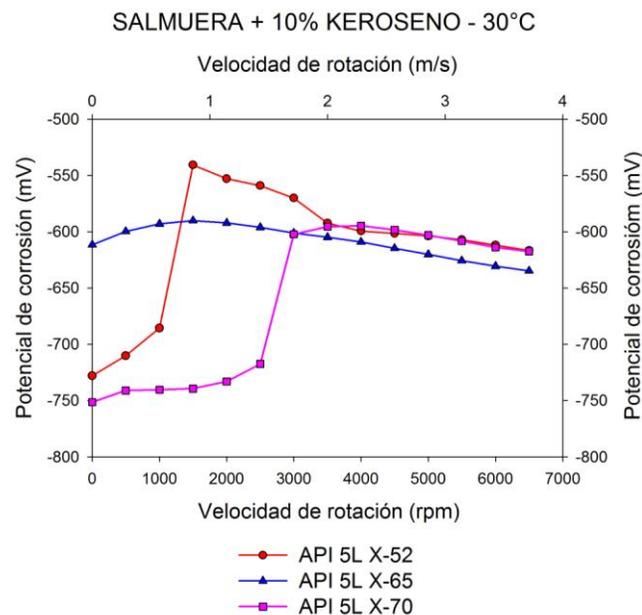


Figura 22.- Potencial de corrosión comparativo para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno a 30°C.

En la Figura 23 para una temperatura de 60°C para los tres aceros en el mismo medio, se observa un comportamiento muy similar con respecto al potencial de corrosión en cuanto a que los aceros parten de un estado más activo a uno menos activo. Esto se debe a la formación de productos de corrosión (óxidos los cuales llegan a ser hasta cierto punto protectores) y posteriormente hay un ligero incremento en el potencial a valores más negativos, debido a un ligero desprendimiento de los mismos con la diferencia que en este caso el potencial tiende a ser casi independiente de la velocidad de rotación a partir de las 2500 rpm para los aceros API 5L X-65 y X-70. Para el caso del API 5L X-52 esta tendencia se muestra hasta las 5500 rpm. En este caso el efecto de la temperatura se refleja en un incremento en la cantidad de productos de corrosión formados debido a una mayor presencia de oxígeno como se podrá observar en los resultados obtenidos en los EDS de los mismos.

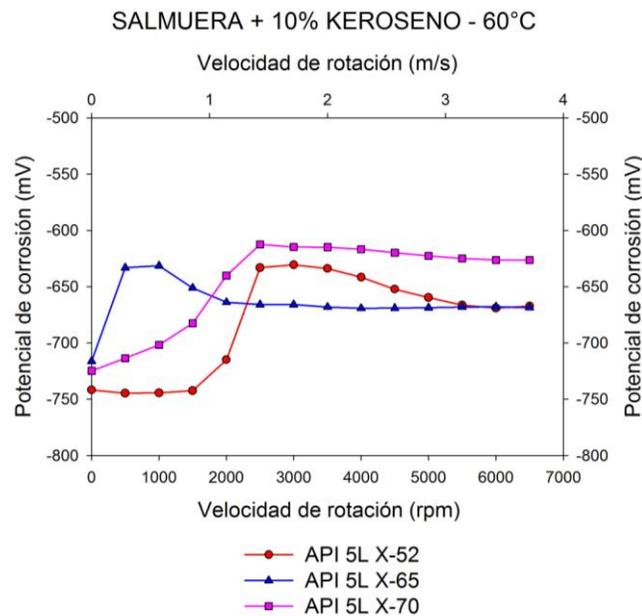


Figura 23.- Potencial de corrosión comparativo para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno a 60°C.

Efecto de la adición de H₂S: La Figura 24 muestra los resultados donde se adicionó H₂S a 30°C para los aceros API 5L X-52 y X-65 en un rango de 0 a 2000 rpm. Se observa un comportamiento de un estado más activo a uno menos activo para posteriormente mantener una tendencia a ser independiente de la velocidad de rotación a partir de las 2500 rpm para mantener una estabilidad en cuanto a la actividad debido a la formación de productos de corrosión (compuestos por una mezcla de óxidos con sulfuros y un sulfato). Sin embargo, para el acero API 5L X-70 desde un principio tiende a ser ligeramente menos activo y posteriormente se vuelve independiente de la velocidad de rotación a partir de las 2000 rpm. En éste caso se observa un grado de actividad uniforme, debido nuevamente a la formación de productos de corrosión aunado además a que estos no sufren un desprendimiento tan notorio por el efecto del flujo.

En este caso se forman productos de corrosión (mezcla de óxidos con sulfuros y un sulfato) los cuales resultan ser más protectores que los que se forman en la salmuera con keroseno sin H_2S .

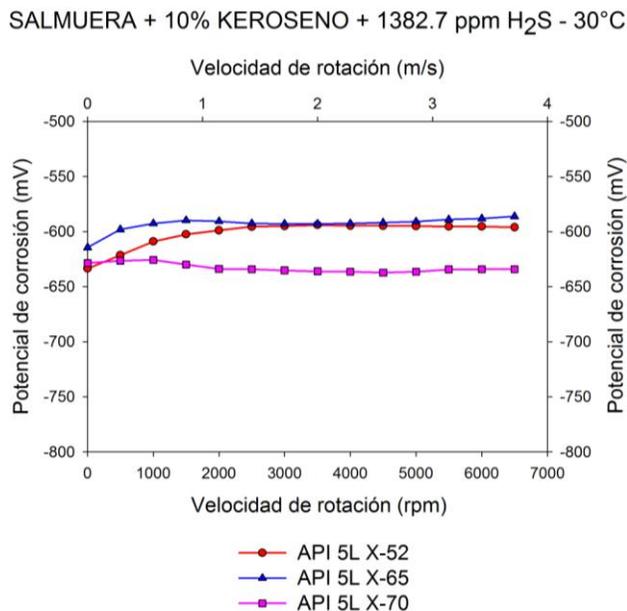


Figura 24.- Potencial de corrosión comparativo para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno + 1382.7 ppm H_2S ($p=1$ bar) a 30°C.

Efecto de la temperatura: La Figura 25 muestra el comportamiento del potencial de corrosión en función de la velocidad de rotación con la adición de H_2S a 60 °C. Se observa cómo todos los aceros parten de un estado activo debido a que poseen una superficie limpia y libre de productos de corrosión, para posteriormente pasar a un estado más activo. En el caso de los aceros API 5L X-52 y X-65 parten de un estado menos activo con una tendencia a incrementarse y volverse más activo conforme aumenta la velocidad de rotación pero con una ligera tendencia de volverse independiente de esta en un rango corto que va de las 5500 rpm a las 6500 rpm.

El acero API 5L X-70 posee un mayor grado de actividad inicial con respecto a los otros aceros ya mencionados, este caso tiende a disminuir y posteriormente hacerse independiente de la velocidad de rotación a partir de las 2000 rpm, debido a la formación de productos de corrosión más protectores y estables (mezcla de óxidos con sulfuros y un sulfato), los cuales no sufren algún deterioro o desprendimiento considerable debido a la acción del flujo del medio utilizado. El efecto de la temperatura fue el de disminuir la actividad (debido a la presencia de la mezcla de óxidos con sulfuros y un sulfato) para posteriormente incrementarla con la velocidad de rotación.

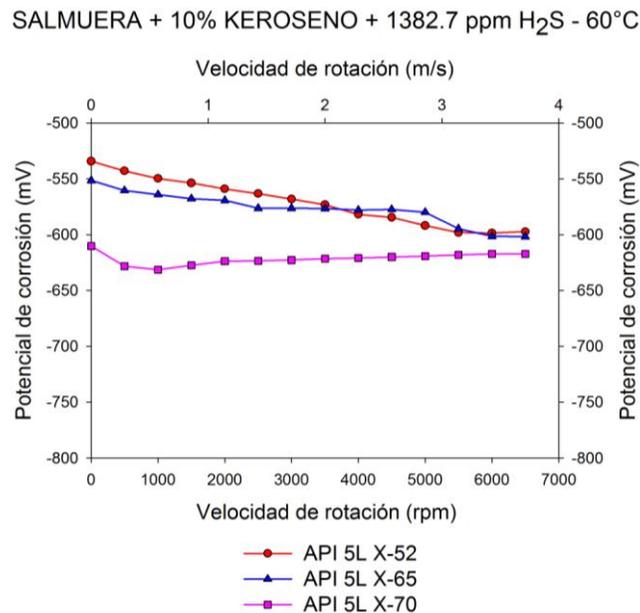


Figura 25.- Potencial de corrosión comparativo para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

**Análisis de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación:**

La Figura 26 muestra un estudio comparativo entre los 3 aceros empleados en la presente investigación, en el cual se observó que el medio que contiene salmuera + 10% de keroseno a 30°C la velocidad de corrosión se incrementa conforme aumenta la velocidad de rotación del electrodo, debido a que existe una mayor cantidad de especies electroquímicas en la superficie debido a la rotación que hace que unas se acerquen y otras se alejen y por lo tanto contribuyan al aumento de la velocidad de corrosión.

El acero que presenta el mejor comportamiento con respecto a la velocidad de corrosión es el API 5L X-52. En este caso la composición, influye en el mejor comportamiento y adquiere una mayor importancia debido a la presencia de elementos ya mencionados anteriormente en el análisis de la misma como son el cromo, el cobre y el níquel.

Para el caso del acero API 5L X-52 con respecto al X-70 tiene un comportamiento similar con respecto a la velocidad de corrosión aunque éste posee menores velocidades de corrosión debido a la presencia de una mayor cantidad de cobre la cual es de 0.293% peso contra 0.185% peso. El que posee muy poco cobre es decir 0.001% peso es el API 5L X-65 siendo en éste caso el elemento que influye en la velocidad de corrosión a pesar de que en conjunto con el cromo y el níquel se esperaba otro comportamiento no resulta en este caso.

Para todos los aceros la velocidad de corrosión tiende a estabilizarse debido a la formación de óxidos como productos de corrosión, los cuales resultan ser protectores.

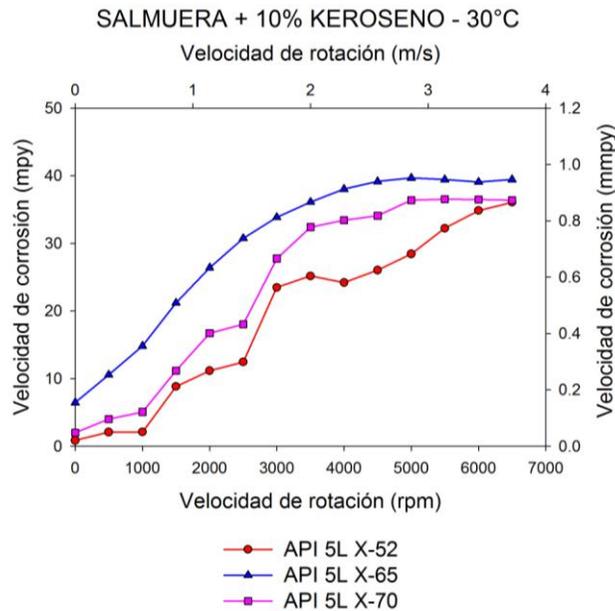


Figura 26.- Velocidad de corrosión comparativa para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno a 30°C.

Cuando se incrementa la temperatura ésta tiene un efecto mucho más notable con respecto a la velocidad de corrosión como se observa en la Figura 27, es decir se incrementa de manera significativa en cuanto a sus valores (órdenes de magnitud) comparados con los obtenidos a 30°C, debido al incremento de la temperatura (se acelera el proceso electroquímico como era de esperarse), pero de igual manera se incrementa conforme aumenta la velocidad de rotación. En éste caso desde las 0 hasta las 2000 rpm el acero que presenta el mejor comportamiento es el API 5L X-52 como en el caso anterior a 30°C. A partir de las 2500 rpm el comportamiento es distinto, el mejor comportamiento con respecto a la velocidad de corrosión lo presenta el acero API 5L X-70, atribuyendo esto a la presencia en conjunto del cromo, el cobre y el níquel ya que este acero posee las mayores cantidades con respecto a los otros 2 aceros. Los aceros API 5L X-65 y 70 tienden a estabilizar su velocidad de corrosión debido a que forman cantidades menores de óxidos protectores con respecto al X-52.

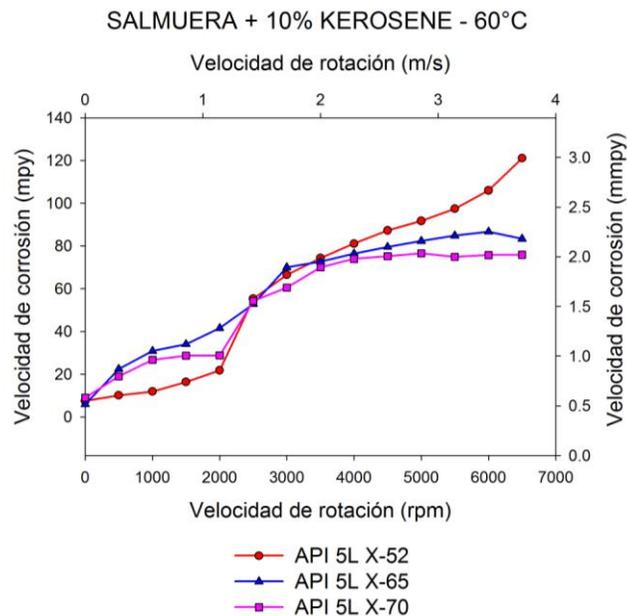


Figura 27.- Velocidad de corrosión comparativa para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno a 60°C.

En las Figuras 28 y 29 se muestra el comportamiento de los 3 aceros inmersos en un medio mucho más agresivo debido a la adición de H_2S a 30 y 60°C, siendo el acero que posee el mejor comportamiento el API 5L X-70 debido a que presenta menores velocidades de corrosión con respecto a los otros 2, conforme se incrementa la velocidad de rotación del electrodo de trabajo. Nuevamente este comportamiento se atribuye a la presencia del cromo, cobre y níquel en la composición química y que en conjunto logran abatir la velocidad de corrosión tal como lo reporta Yoon-Seok Choi y colaboradores⁽⁴⁵⁾. En este caso además podría influir la microestructura presente ya que el acero API 5L X-70 tiene la mayor cantidad de perlita (29.84%) y la menor cantidad de ferrita (70.51%) y como esta última es la que se puede disolver por el efecto galvánico, la corrosión no es tan severa como para los otros aceros confirmando que la perlita es electroquímicamente más estable y tiene el mayor porcentaje en comparación con los otros aceros.



También se observa la formación y el desprendimiento de productos de corrosión (mezcla de óxidos con sulfuros y un sulfato encontrados de acuerdo al análisis realizado) ya que se aprecian algunas caídas e incrementos en algunas de las curvas obtenidas para ambas temperaturas con un medio mucho más agresivo por la presencia de H_2S .

SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H_2S - 30°C

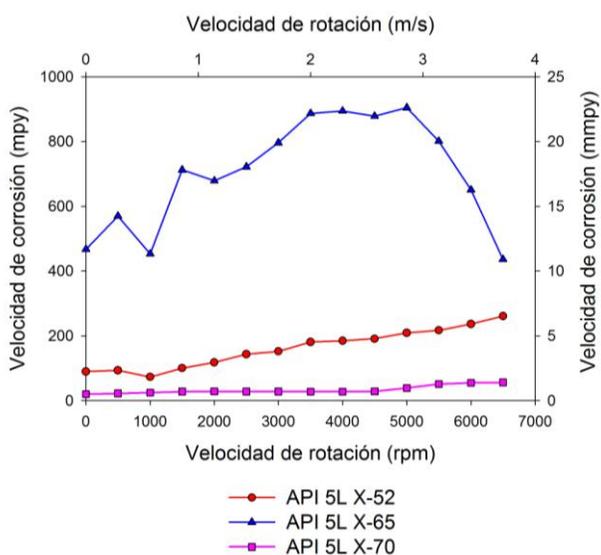


Figura 28.- Velocidad de corrosión comparativa para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno + 1382.7 ppm H_2S ($p=1$ bar) a 30°C.

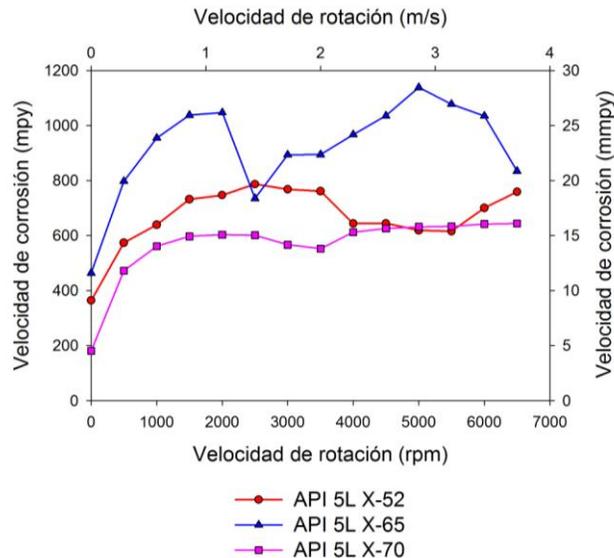
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S - 60°C

Figura 29.- Velocidad de corrosión comparativa para los tres distintos aceros empleados inmersos en salmuera con 10% de keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

4.6 Cálculo del número de Reynolds y el esfuerzo de corte de superficie

Para determinar el Número de Reynolds y el esfuerzo de corte de superficie, es necesario conocer las dimensiones del cilindro empleado, así como el valor de la densidad y viscosidad del medio bajo las condiciones de trabajo.

La forma en cómo se realizaron los cálculos para determinar el Re y el esfuerzo de corte de superficie pueden ser revisados en el anexo A, en donde puede observarse que las ecuaciones empleadas fueron desarrolladas a partir de la ecuación propuesta por Silverman para la geometría cilíndrica rotatoria.



Para todas las pruebas realizadas el diámetro del cilindro empleado fue de 1.1 cm es decir 0.011m y utilizando los valores de densidad y viscosidad mostrados en la tabla 5, se obtienen los resultados del número de Reynolds y del esfuerzo de corte de superficie, para los diferentes medios utilizados con respecto a las distintas velocidades de rotación del electrodo cilíndrico rotatorio utilizado.

De los resultados mostrados del **APENDICE 2** se obtienen las gráficas que se muestran en las Figuras 30 y 31 donde se representa el esfuerzo de corte de superficie con respecto a la velocidad de rotación del electrodo cilíndrico rotatorio (ECR) para los distintos medios empleados.

Análisis del esfuerzo cortante: El esfuerzo cortante sufre un aumento conforme se incrementa la velocidad de rotación en ambos medios utilizados en la investigación, pero éste a su vez tiene un ligero decremento con el aumento de la temperatura debido a la influencia de la densidad y viscosidad y su comportamiento de estas con el aumento de la temperatura en ambos medios utilizados. El efecto del esfuerzo de corte se observa de manera más detallada en el modelo propuesto para cada uno de los medios utilizados para cada uno de los aceros de la presente investigación.

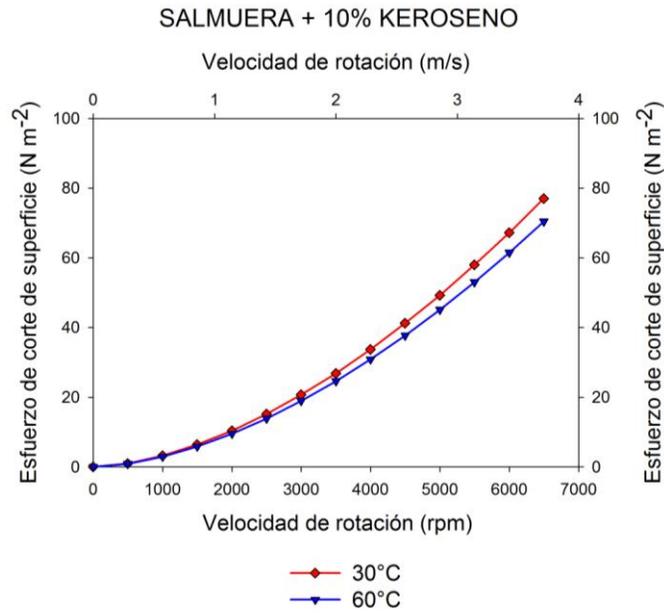


Figura 30.- Esfuerzo de corte de superficie vs velocidad de rotación del ECR para el medio que contiene salmuera + 10% Keroseno a 30 y 60°C.

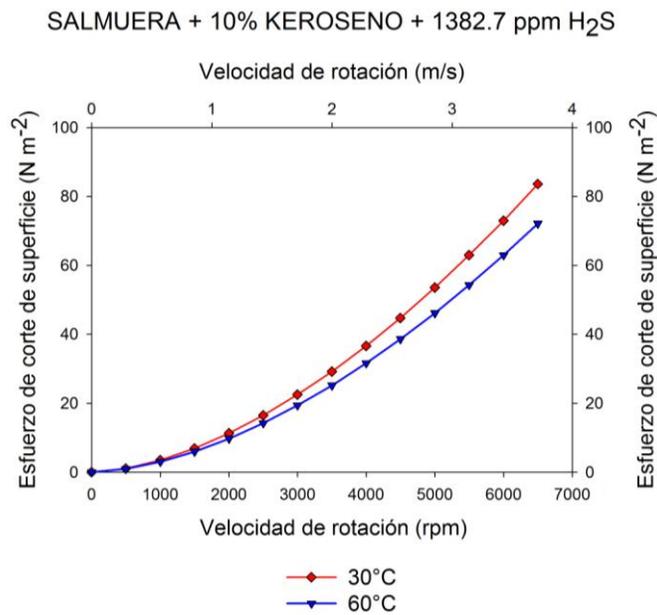


Figura 31.- Esfuerzo de corte de superficie vs velocidad de rotación del ECR para el medio que contiene salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30 y 60°C.



4.7 Cálculo de la velocidad de corrosión en función de la rotación por el modelo de Efid

Considerando la ecuación: $V_{corr} = a \tau_{\omega}^b$ (40)

Efid^(10,39) propuso un modelo teórico para el cálculo de la velocidad de corrosión para aceros al carbono expuestos a medios que simulan crudo bajo condiciones de flujo turbulento. En su modelo propone los valores de 2.8 y 0.1 para el coeficiente “a” y exponente “b” respectivamente, al emplear la geometría cilíndrica rotatoria.

Este modelo es para calcular la velocidad de corrosión, en forma teórica y ha presentado una buena correlación entre los resultados experimentales y los obtenidos mediante su uso para algunos ambientes específicos pero aún no ha sido aceptada en forma general.

En las gráficas de las Figuras 32 a la 35 se muestra una comparación entre la velocidad de corrosión obtenida mediante la técnica de la resistencia a la polarización y la obtenida mediante el uso del modelo de Efid. Dicho modelo toma en consideración el esfuerzo de corte de superficie calculado, observándose el siguiente comportamiento: para el medio con salmuera + 10% de keroseno a 30 y 60°C (figuras 32 y 33) para los 3 aceros la velocidad de corrosión obtenida experimentalmente está por debajo a la calculada por el modelo de Efid.

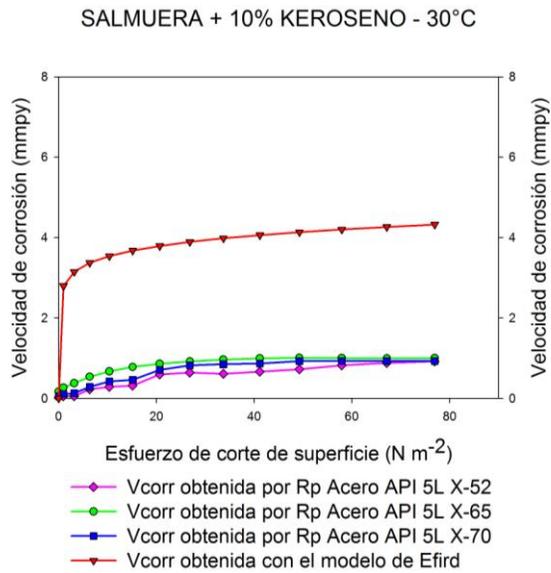


Figura 32.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo de Efir para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

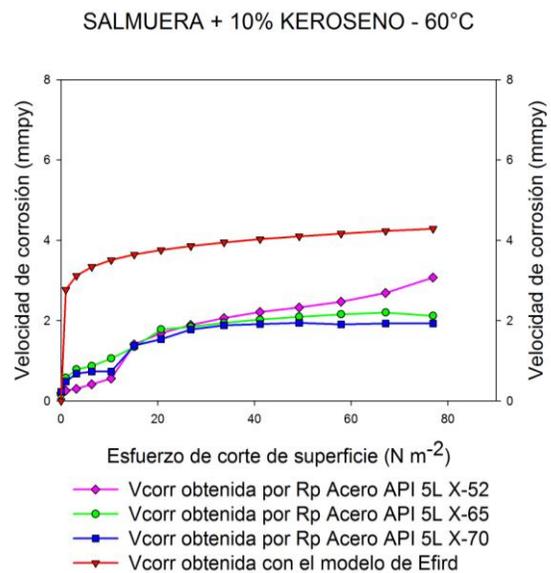


Figura 33.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo de Efir para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

Sin embargo con la adición de H₂S a 30 y 60°C (Figuras 34 y 35), la velocidad de corrosión obtenida experimentalmente por la técnica de la resistencia a la polarización los aceros API 5L X-52 y X-65 sobrepasa la obtenida por el modelo de Efird atribuyendo esto a que el modelo de Efird fue desarrollado en su momento únicamente para aceros al carbón en un medio dulce (con CO₂) y además las condiciones del medio cuando fue empleado (1977) eran diferentes a las de hoy en día como y además no tomaba en cuenta el efecto que tienen algunos elementos presentes en el acero como lo son el cromo, el cobre y el níquel. Aún hoy en día resulta difícil desarrollar un modelo general que independientemente de las condiciones del medio garantice una correcta predicción de la velocidad de corrosión basado en la ecuación general propuesta por Efird ($V_{corr} = a \tau_{\omega}^b$), debido a que a y b dependen de las propiedades del medio y en el transporte de hidrocarburos las condiciones y propiedades del medio son muy variadas.

SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S - 30°C

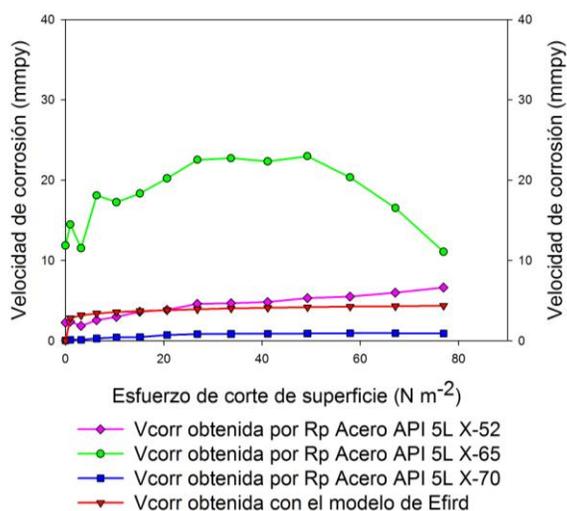


Figura 34.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo de Efird para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

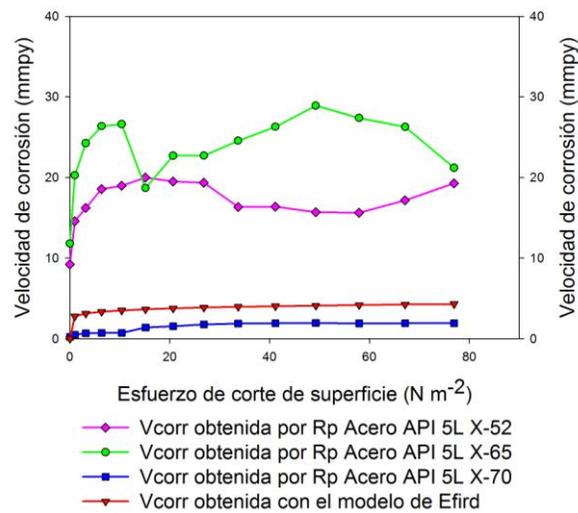
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S - 60°C

Figura 35.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo de Efird para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

4.8 Modelo predictivo de velocidad de corrosión propuesto (ajuste de datos experimentales)

En las Figuras 36 y 37 se muestran graficas la velocidad de corrosión vs el esfuerzo cortante de superficie para los medios con salmuera con un 10% de keroseno a 30 y 60°C y en general se observa que la velocidad de corrosión aumenta conforme se incrementa el esfuerzo cortante de superficie.

Con la adición de H₂S a 30 y 60°C (gráficas 38 y 39), de igual manera se observa un incremento en la velocidad de corrosión conforme aumenta el esfuerzo de corte de superficie aunque hay algunos decrementos debido a la formación de los productos de corrosión (mezcla de óxidos con sulfuros y un sulfato) y en algunos casos un nuevo incremento en la velocidad de corrosión causada por el desprendimiento de dichos productos.

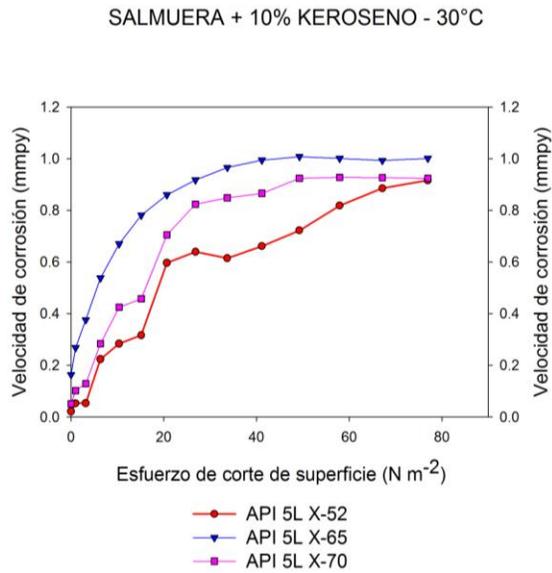


Figura 36.- Velocidad de corrosión obtenida por Rp vs esfuerzo cortante de superficie, para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

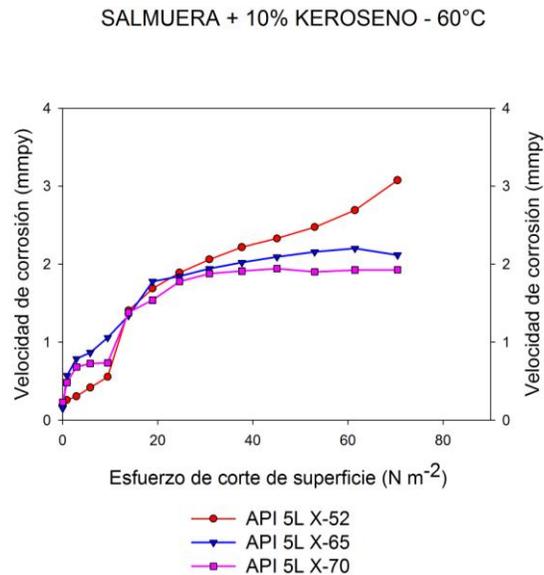


Figura 37.- Velocidad de corrosión obtenida por Rp vs esfuerzo cortante de superficie, para el acero API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.



SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S - 30°C

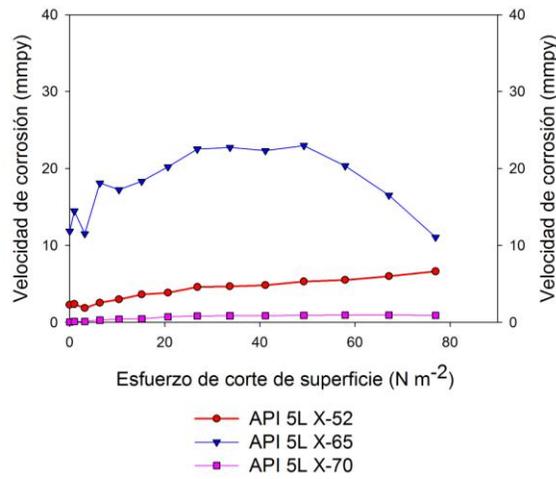


Figura 38.- Velocidad de corrosión obtenida por Rp vs esfuerzo cortante de superficie, para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S - 60°C

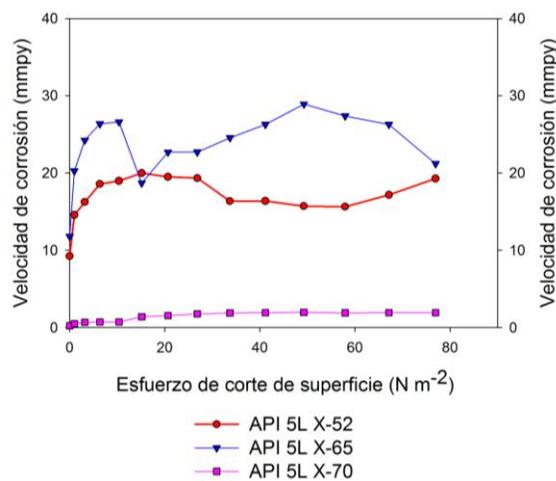


Figura 39.- Velocidad de corrosión obtenida por Rp vs esfuerzo cortante de superficie, para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

Partiendo ya de los resultados obtenidos de velocidad de corrosión, para las distintas velocidades en cada uno de los medios empleados, mediante la técnica de la resistencia a la polarización (R_p) en función del esfuerzo cortante de superficie, como se mostró ya en las gráficas anteriores, se realizó un ajuste de cada una de éstas mediante una regresión de potencia; obteniendo los valores para el coeficiente “a” y el exponente “b”.

De esta forma, sobre la base de la ecuación general de velocidad de corrosión, para aceros al carbono expuestos a medios que simulan crudos bajo condiciones de turbulencia propuesta por Efirid^(10,39), el modelo obtenido o propuesto en esta investigación para la predicción de la velocidad de corrosión en cada uno de los medios empleados y para cada uno de los aceros utilizados se muestran en las Tablas 49-51.

Tabla 49.- Modelo de la velocidad de corrosión propuesto para el acero API 5L X-52 en los diferentes medios empleados.

Acero	Medio utilizado	Modelo propuesto
API 5L X-52	Salmuera + 10% keroseno (30°C)	$V_{\text{corr}} = 0.0839\tau_w^{0.5600}$
API 5L X-52	Salmuera + 10% keroseno (60°C)	$V_{\text{corr}} = 0.2525\tau_w^{0.5876}$
API 5L X-52	Salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (30°C)	$V_{\text{corr}} = 1.427\tau_w^{0.3328}$
API 5L X-52	Salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (60°C)	$V_{\text{corr}} = 16.75\tau_w^{0.0155}$

Tabla 50.- Modelo de la velocidad de corrosión propuesto para el acero API 5L X-65 en los diferentes medios empleados.

Acero	Medio utilizado	Modelo propuesto
API 5L X-65	Salmuera + 10% keroseno (30°C)	$V_{\text{corr}} = 0.3501\tau_{\omega}^{0.2653}$
API 5L X-65	Salmuera + 10% keroseno (60°C)	$V_{\text{corr}} = 0.5901\tau_{\omega}^{0.3257}$
API 5L X-65	Salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (30°C)	$V_{\text{corr}} = 14.96\tau_{\omega}^{0.0663}$
API 5L X-65	Salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (60°C)	$V_{\text{corr}} = 22.04\tau_{\omega}^{0.0340}$

Tabla 51.- Modelo de la velocidad de corrosión propuesto para el acero API 5L X-70 en los diferentes medios empleados.

Acero	Medio utilizado	Modelo propuesto
API 5L X-70	Salmuera + 10% keroseno (30°C)	$V_{\text{corr}} = 0.1604\tau_{\omega}^{0.4347}$
API 5L X-70	Salmuera + 10% keroseno (60°C)	$V_{\text{corr}} = 0.5132\tau_{\omega}^{0.3385}$
API 5L X-70	Salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (30°C)	$V_{\text{corr}} = 0.1547\tau_{\omega}^{0.4347}$
API 5L X-70	Salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H ₂ S (60°C)	$V_{\text{corr}} = 0.5091\tau_{\omega}^{0.3385}$



De las Figuras 40 a la 51 se muestran gráficas obtenidas a partir de los resultados del **APENDICE 5**, donde se puede comparar la velocidad de corrosión obtenida por resistencia a la polarización (R_p) con respecto a la obtenida para cada uno de los modelos propuestos.

En general se observa un buen comportamiento del modelo propuesto para la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de corrosión obtenida de manera experimental tal como se aprecia en las Figuras 40- 45 para el medio con salmuera con un 10% de keroseno a 30 y 60°C ya que se observa una ligera variación de los datos experimentales con respecto a los que se obtienen con el modelo propuesto a través de la regresión de potencia ya antes mencionada.

Para el caso del medio con salmuera + 10% de keroseno pero además adicionado con H_2S a 30 y 60°C de la gráfica 46-51 nuevamente se observa una ligera variación en algunos casos de los datos obtenidos experimentalmente con respecto a los obtenidos por el modelo propuesto. Sin embargo, se aprecia un buen comportamiento de modelos propuestos y es posible predecir la velocidad de corrosión para cada medio utilizado en cada uno de los aceros empleados en la investigación.

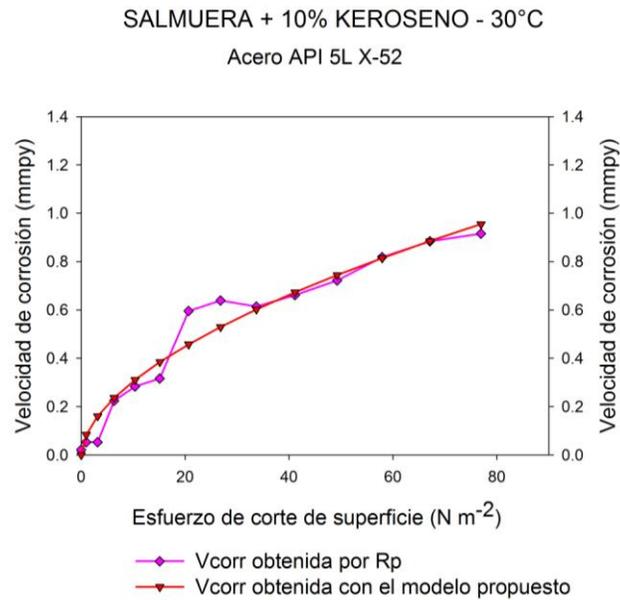


Figura 40.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

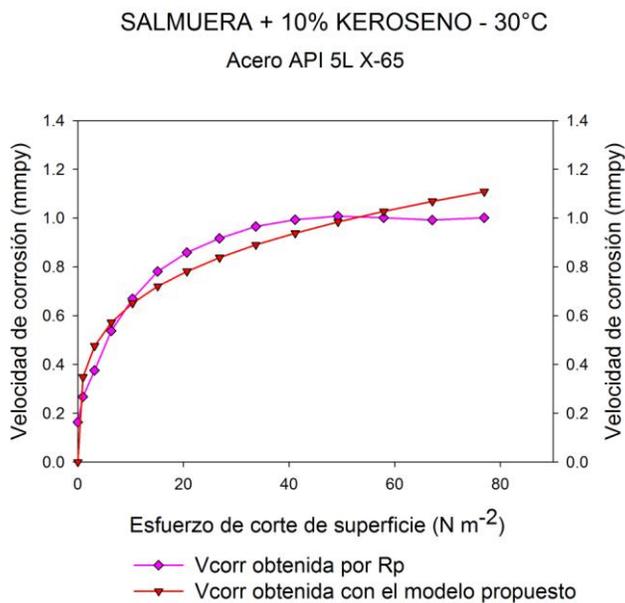


Figura 41.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

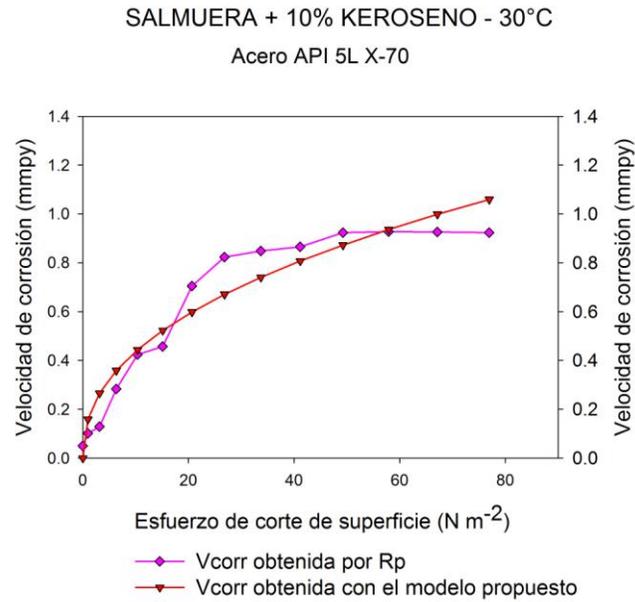


Figura 42.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

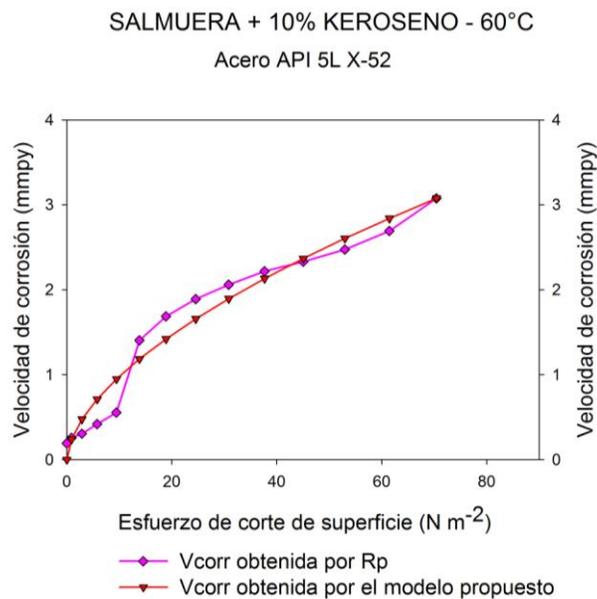


Figura 43.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

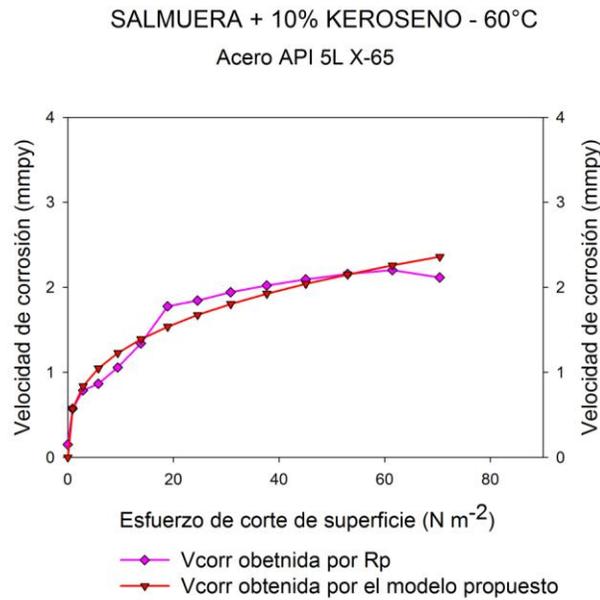


Figura 44.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

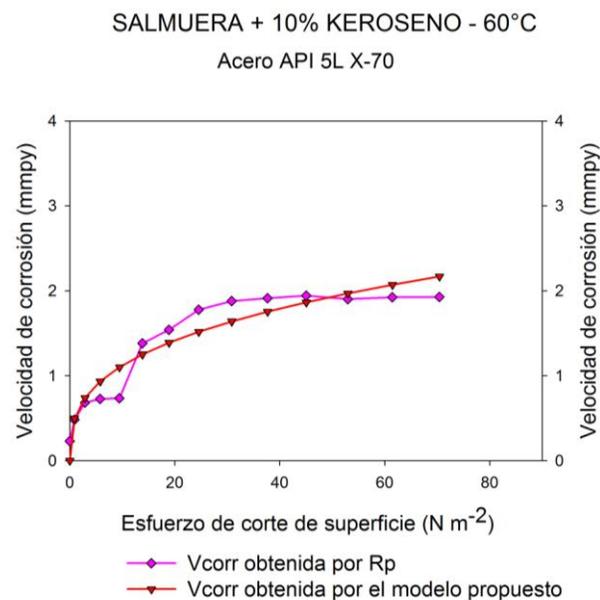


Figura 45.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S - 30°C

Acero API 5L X-52

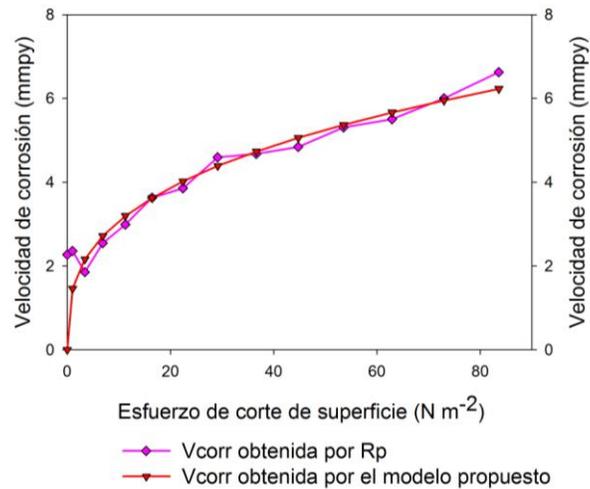


Figura 46.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S - 30°C

Acero API 5L X-65

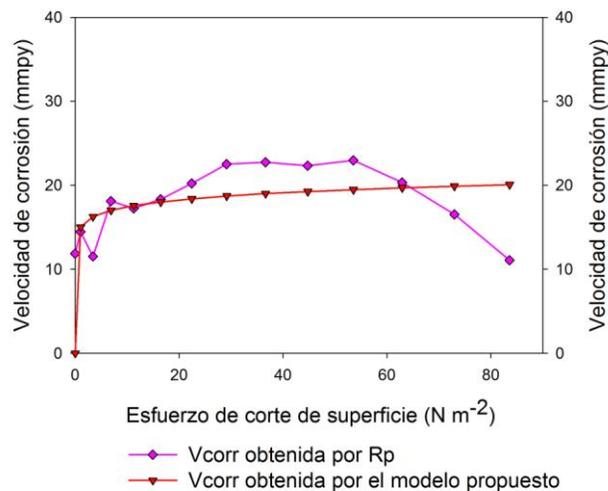


Figura 47.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S - 30°C

Acero API 5L X-70

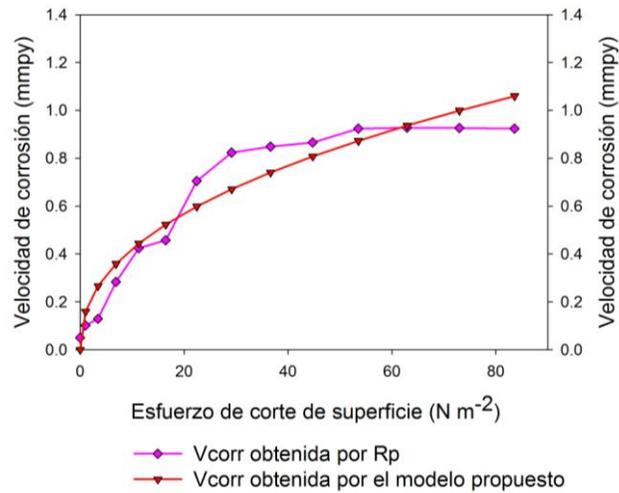


Figura 48.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S - 60°C

Acero API 5L X-52

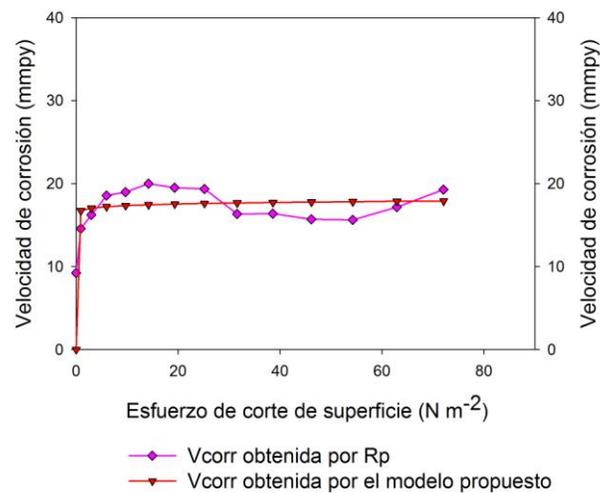


Figura 49.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S - 60°C

Acero API 5L X-65

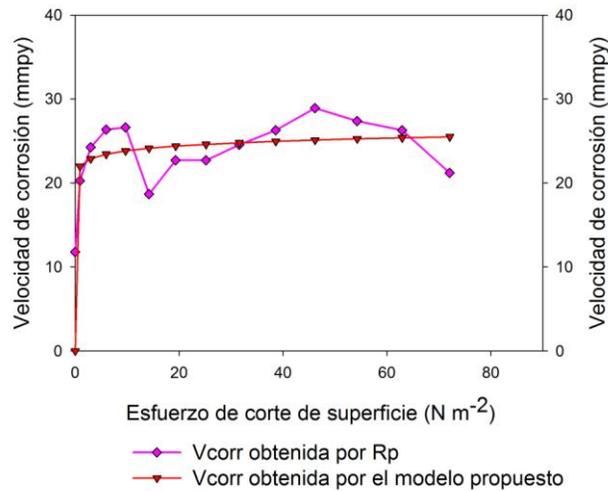


Figura 50.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S - 60°C

Acero API 5L X-70

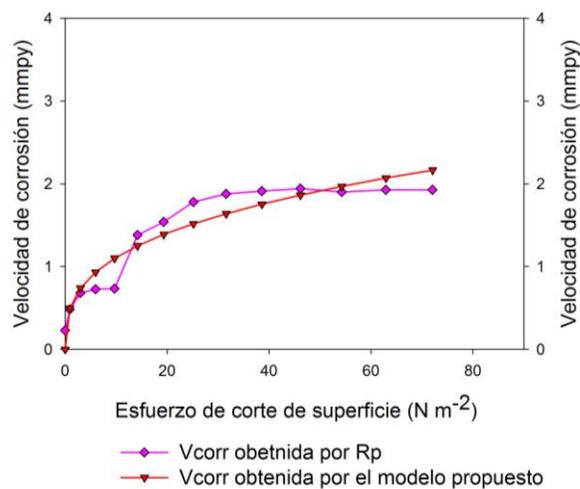


Figura 51.- Comparación entre la velocidad de corrosión obtenida por Rp y la obtenida por el modelo propuesto para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.



4.8.1 Efecto conjunto de todas las variables involucradas en el comportamiento de la velocidad de corrosión

Como ya se mencionó anteriormente el modelo de predicción de la velocidad de corrosión propuesto por Efirid fue desarrollado para un medio dulce (con CO_2) y además no toma en cuenta todas las variables involucradas como es el caso de la composición química del acero, es por eso que en esta investigación se trata de explicar el efecto de esta última en conjunto con las demás propiedades hidrodinámicas del fluido empleado (medio amargo con H_2S). Para ello se grafica ahora a todas las variables de las ecuaciones de los modelos propuestos (ajustes de datos experimentales) en términos logarítmicos para así obtener una serie de gráficas en las cuales sea posible ver el efecto conjunto de todas las variables involucradas en especial el efecto que tiene la composición química de cada uno de los aceros sobre la velocidad de corrosión.

De manera general se observa en las Figuras de la 52 a la 55 que entre más activa es la ordenada al origen (mayor tendencia hacia el sentido negativo) y mayor es el valor de la pendiente el efecto que tienen todas las variables incluyendo a la composición química de cada uno de los aceros el comportamiento será el mejor con respecto a la velocidad de corrosión.

Únicamente en el caso del medio empleando salmuera adicionada con keroseno a 60°C se observa en una región de la gráfica que el acero que tiene el mejor comportamiento resulta ser el API 5L X-52 pero posteriormente cambia la posición y el que al final de la prueba resulta ser el mejor es el API 5L X-70 siendo este último el que posee el mejor comportamiento en todos los demás casos incluyendo los medios adicionados además ya con el H_2S .

De tal manera el mejor comportamiento del acero API 5L X-70 se debe a que este posee una mayor cantidad de los elementos como son el cromo, el níquel y el cobre, reflejándose en un mayor inclinación de la pendiente debido a que tiene un valor más positivo como se observa en cada una de las gráficas ya mencionadas anteriormente y por ende se observa el efecto que puede llegar a tener la composición química sobre la velocidad de corrosión.

También se observa el efecto que tiene la parte hidrodinámica en conjunto con las propiedades del sistema (densidad y viscosidad) las cuales se contemplan en el esfuerzo de corte de superficie, es decir que conforme aumenta el esfuerzo de corte también lo hace la velocidad de corrosión para cada uno de los aceros empleados en la presente investigación.

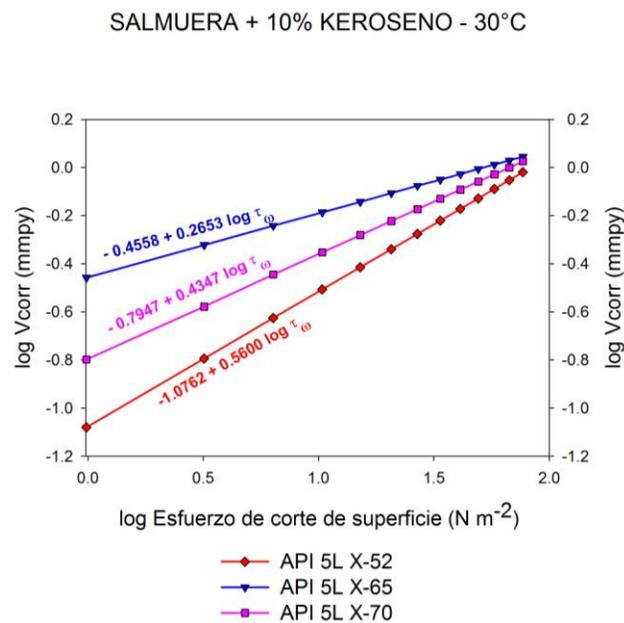


Figura 52.- log velocidad de corrosión obtenida por Rp vs log esfuerzo de corte de superficie para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.



SALMUERA + 10% KEROSENO - 60°C

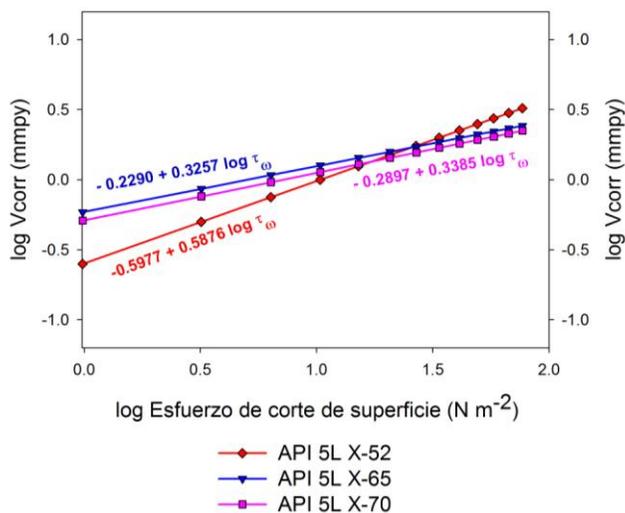


Figura 53.- log velocidad de corrosión obtenida por Rp vs log esfuerzo de corte de superficie para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

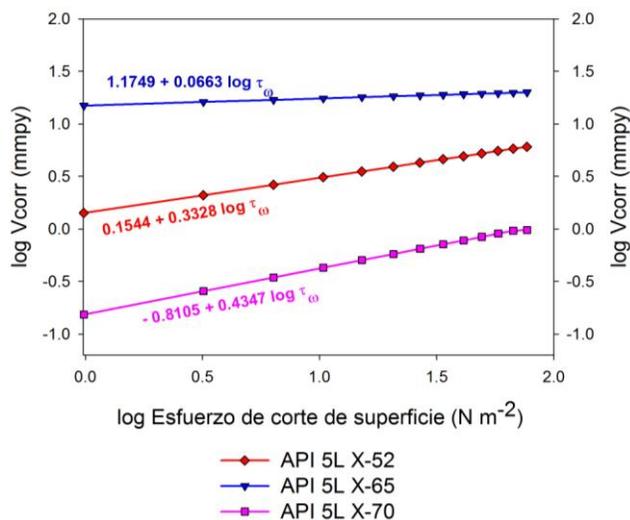
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S - 30°C

Figura 54.- log velocidad de corrosión obtenida por Rp vs log esfuerzo de corte de superficie para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

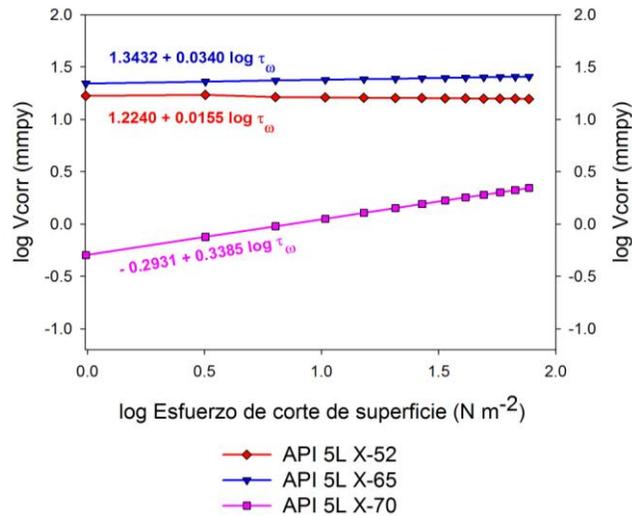
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S - 60°C

Figura 55.- log velocidad de corrosión obtenida por Rp vs log esfuerzo de corte de superficie para los aceros API 5L X-52, X-65 y X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

4.9 Observación macroscópica de los productos de corrosión

Análisis de los productos de corrosión a nivel macroscópico: Con respecto a los productos de corrosión formados a nivel macroscópico en la superficie de los aceros mostrados en la Figura 56 (salmuera + 10% de keroseno a 30 y 60°C), a 30°C se observa a simple vista la formación de una capa de polvo color naranja claro y una capa con tonos naranja pero a la vez otro tono de color café más oscuro para el acero API 5L X-52 a 60°C. Para el acero API 5L X-70 a 30°C se aprecia una ligera capa de color café muy claro no así a 60°C donde ya aparece una capa de color naranja y café siendo esta ya más notoria en la superficie del cilindro.

Salmuera + 10% keroseno

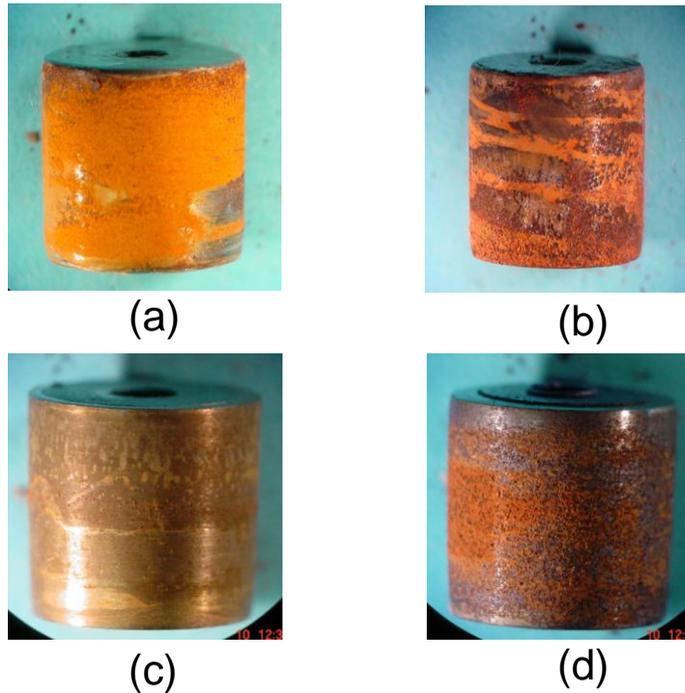


Figura 56.- Productos de corrosión formados de los aceros al final de cada prueba (salmuera + 10% Keroseno): (a) API 5L X-52 (30°C), (b) API 5L X-52 (60°C) y (c) API 5L X-70 (30°C), (d) API 5L X-70 (60°C).

En la Figura 57 (salmuera + 10% de keroseno adicionado además con H_2S), hay un efecto mucho más notorio en cuanto a la apariencia de los productos de corrosión formados. Para el caso del acero API 5L X-52 a 30°C se observa a simple vista la formación de una capa de color café en la mayor parte de la superficie, a 60°C la formación de dicha capa la cual es ahora mucho más notoria ya que además de tener un color café más intenso aparecen a la vez unas costras o cascarillas de un color negro intenso.

Salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar)

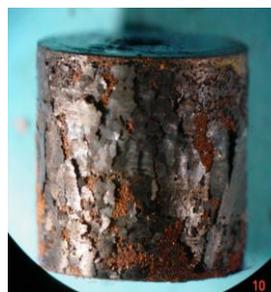
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 57.- Productos de corrosión formados de los aceros al final de cada prueba (salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p= 1 bar)): (a) API 5L X-52 (30°C), (b) API 5L X-52 (60°C) y (c) API 5L X-70 (30°C), (d) API 5L X-70 (60°C).

Para el caso del acero API 5L X-70 a los 30°C se observa en primer lugar una capa muy fina de color oscuro en toda la superficie del cilindro y por encima de esta una ligera formación de otra con apariencia de polvo de color café oscuro. A 60°C se ve una mayor formación de una capa en forma de costra o cascarilla de color negro intenso y debajo de esta se ve otra de un tono café oscuro.



4.10 Microscopía electrónica de barrido (MEB) de los productos de corrosión

Análisis de los productos de corrosión a nivel microscópico: Con respecto al análisis de los productos de corrosión mediante el empleo del microscopio electrónico de barrido (MEB) para ambos medios empleados a 30 y 60°C a bajas magnificaciones (100) en las Figuras 58, 60, 62 y 64 se observa la formación de capas uniformes de productos de corrosión y en el caso de la adición de H₂S además se llega a formar una especie de costra o cascarilla (Figura 60 (a)), la cual posteriormente llega a ser desprendida por la acción del flujo utilizado.

En las Figuras 59, 61, 63 y 65 a mayores magnificaciones (1000 o más) es posible observar de manera más detallada a los productos de corrosión, los cuales en todos los casos presentan formas de tipo poroso, las cuales van creciendo de manera irregular sobre una primera capa que se forma. También se puede observar en algunas imágenes como estos productos de corrosión son desprendidos por la acción del flujo empleado, ya que se presentan grietas, las cuales hacen que se fracturen y sean desprendidos reflejando esto un efecto en la velocidad de corrosión.

Salmuera + 10% keroseno (30°C)

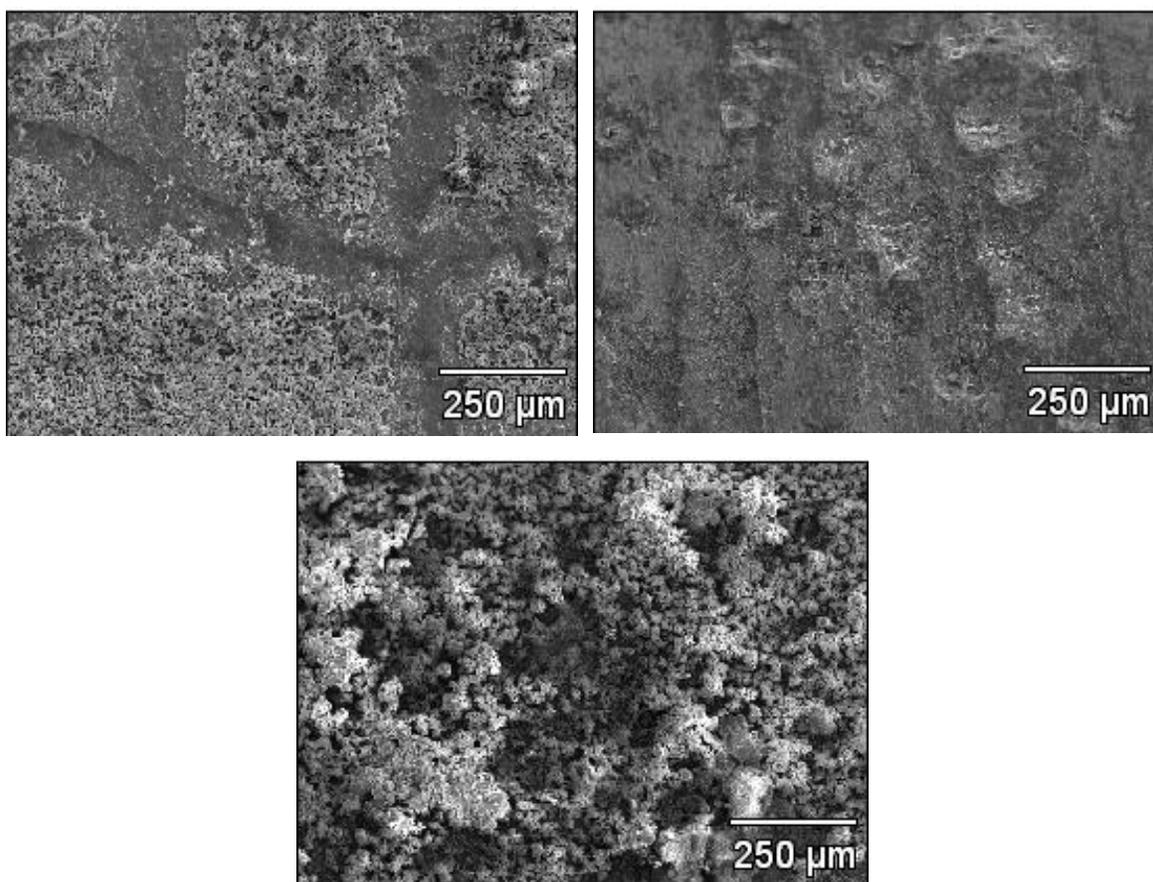


Figura 58.- Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 30°C tomados a bajos aumentos (100X).

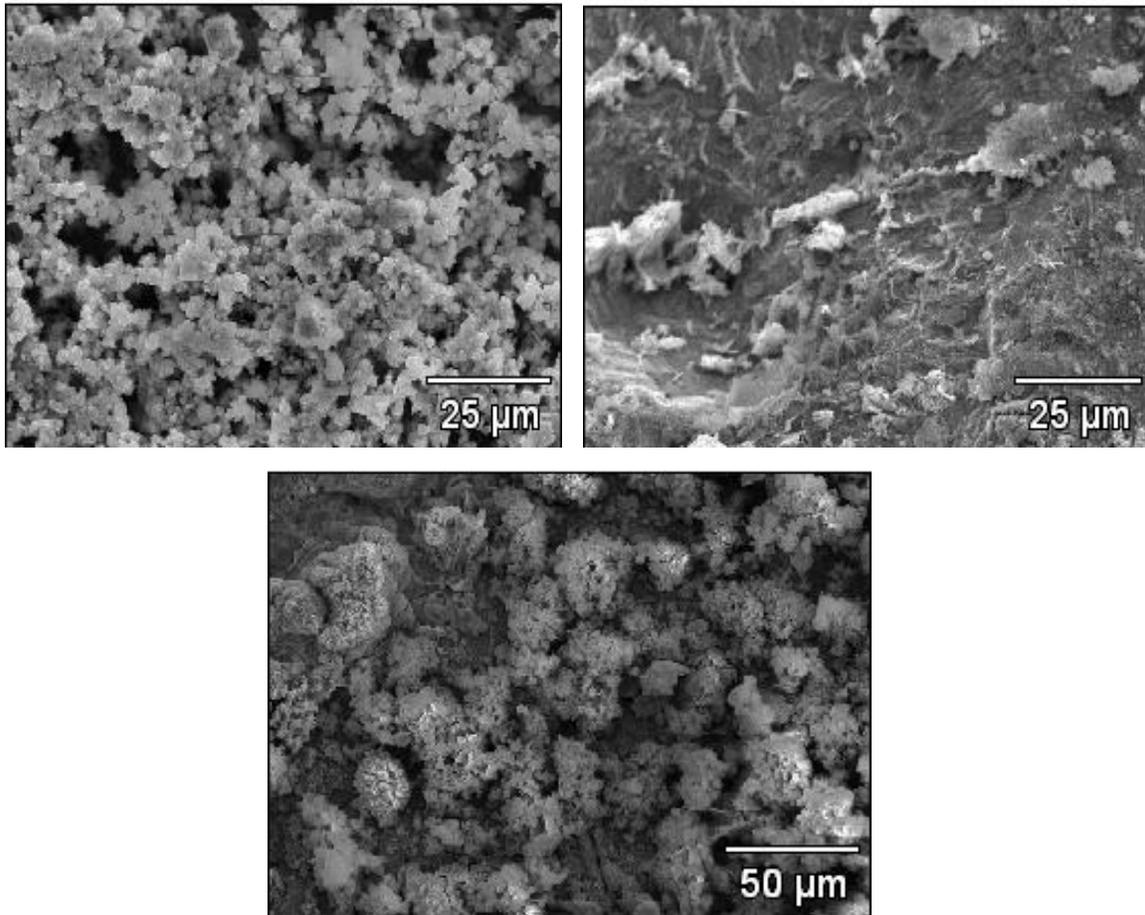


Figura 59.- Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 30°C tomados a mayores aumentos (a y b 1000X y c 500X).

Salmuera + 10% keroseno (60°C)

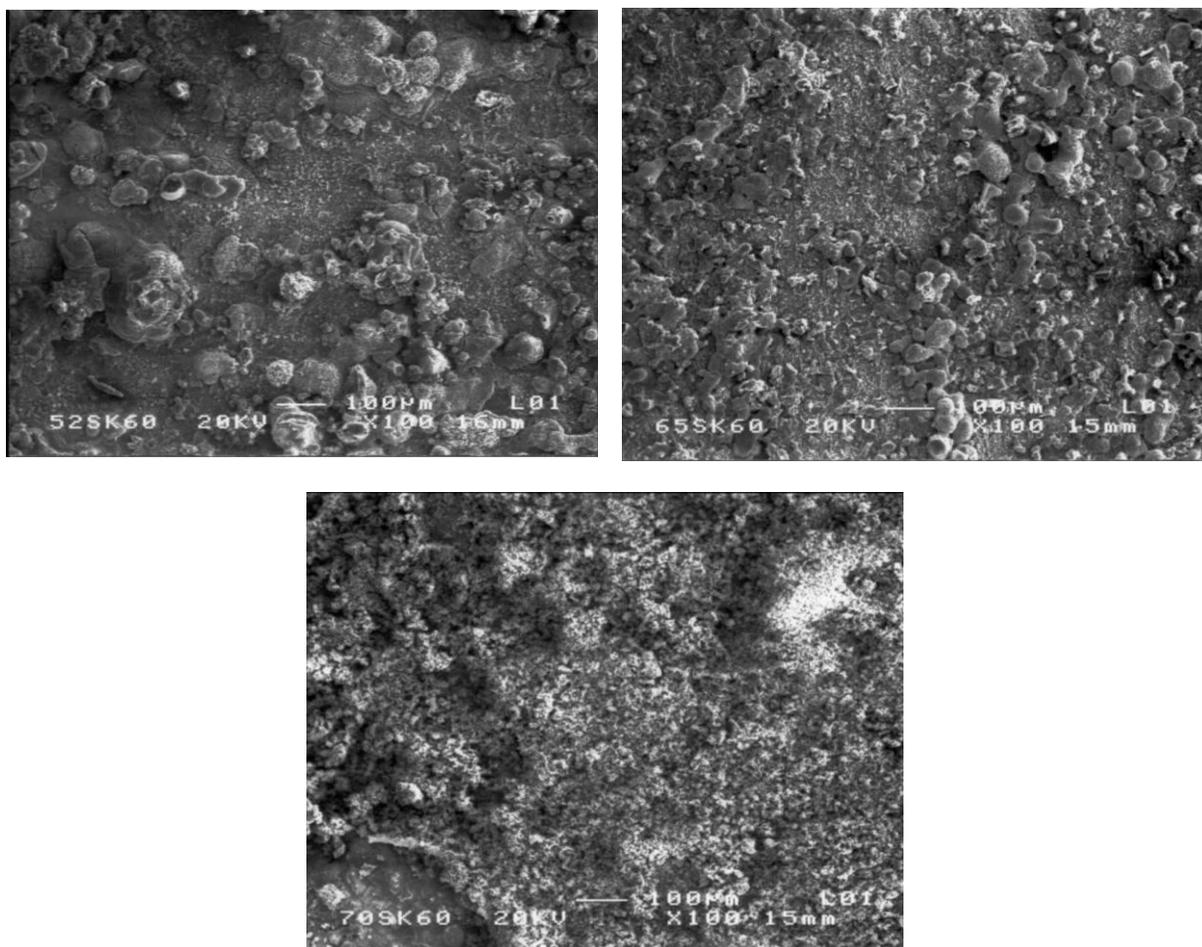


Figura 60.- Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 60°C tomados a bajos aumentos (100X).

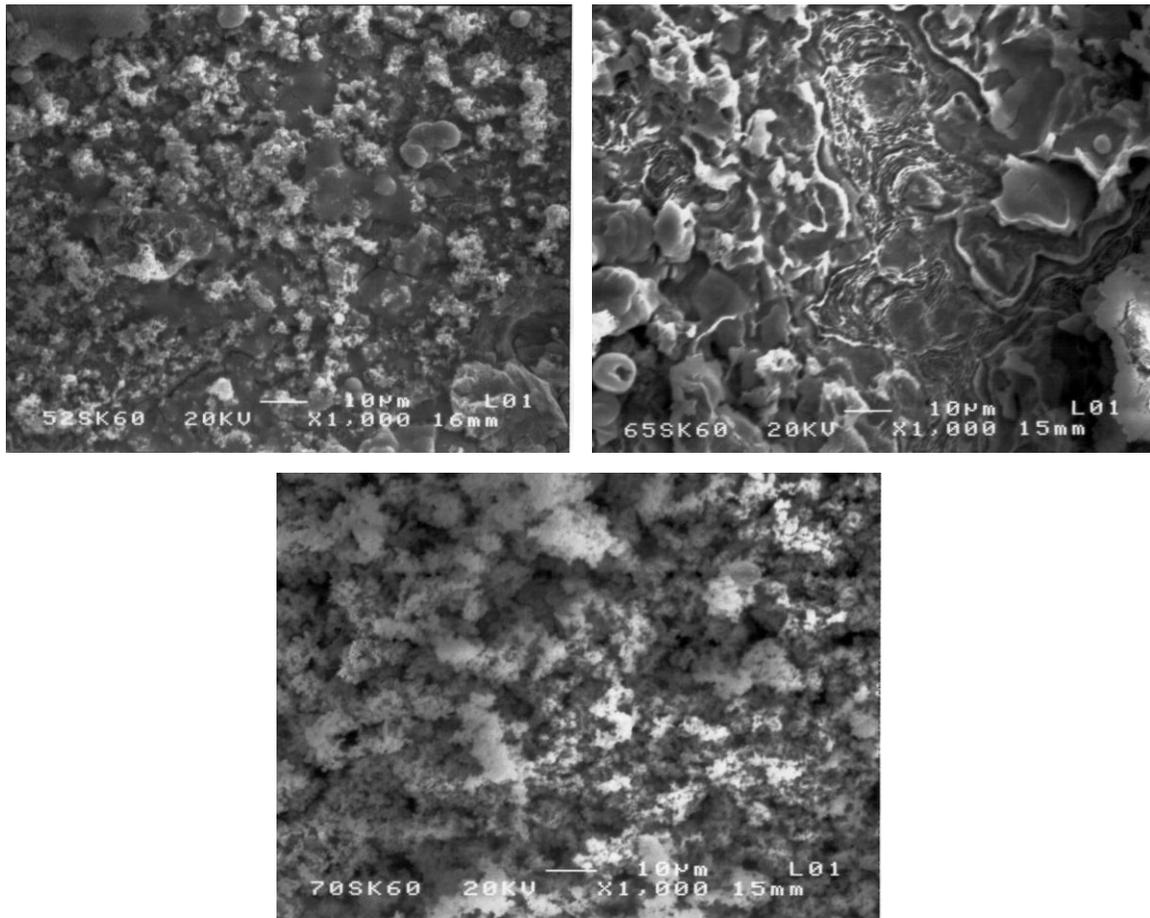


Figura 61.- Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 60°C tomados a mayores aumentos (1000X).

Salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (30°C)

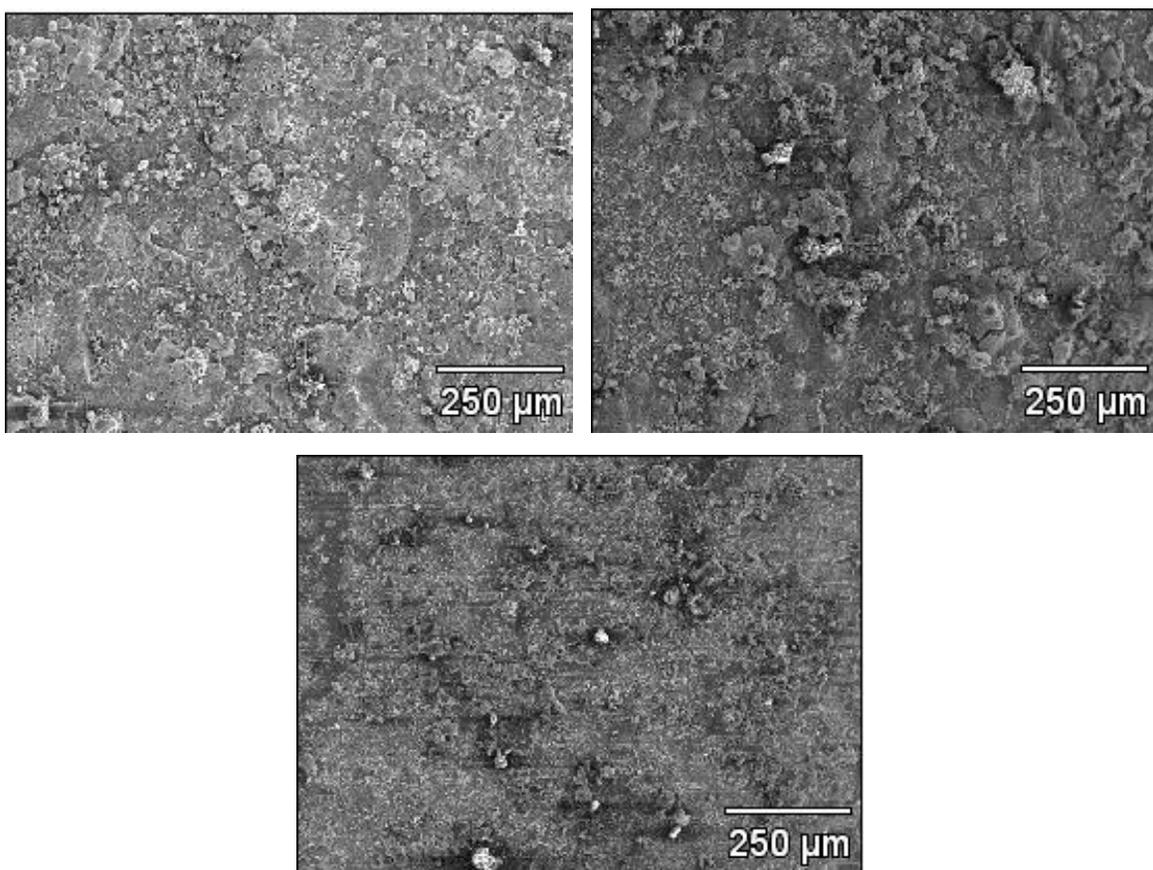


Figura 62.- Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C tomados a bajos aumentos (100X).

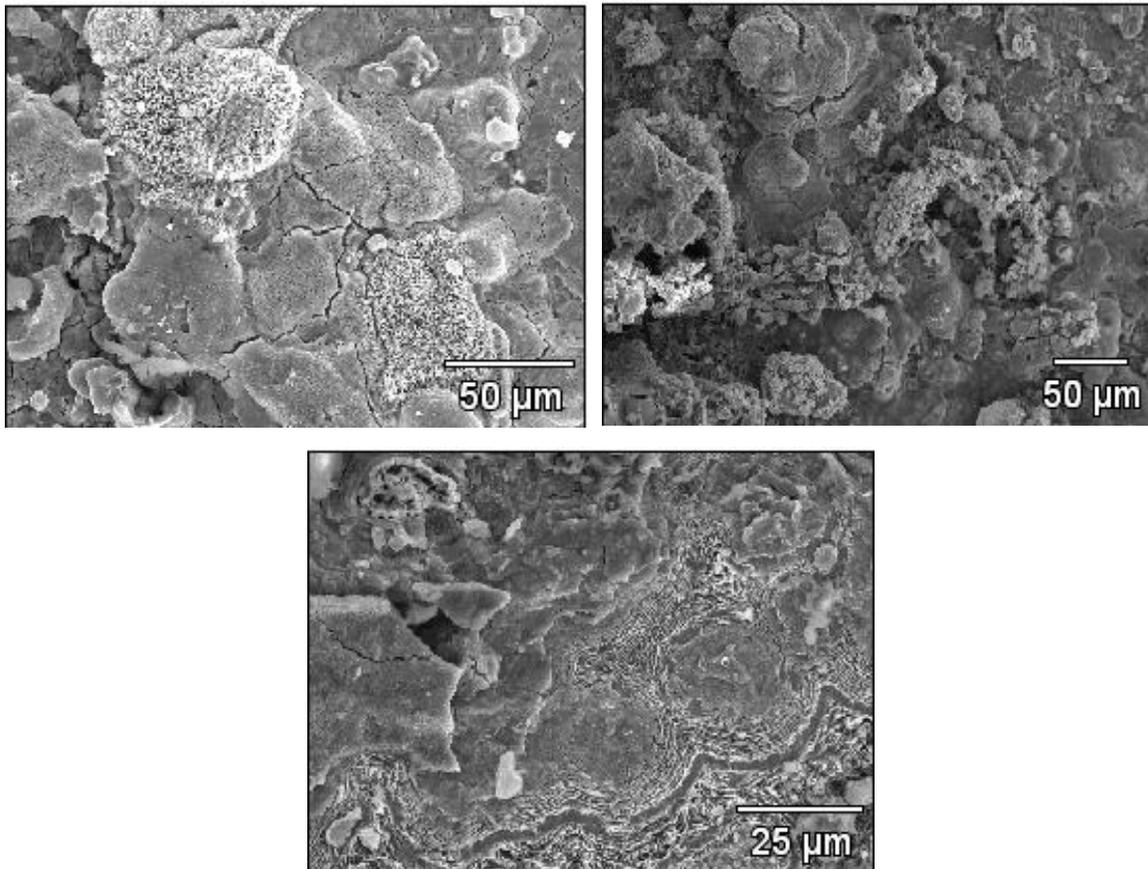


Figura 63.- Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C tomados a mayores aumentos (a y b 500X, c 1000X).

Salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (60°C)

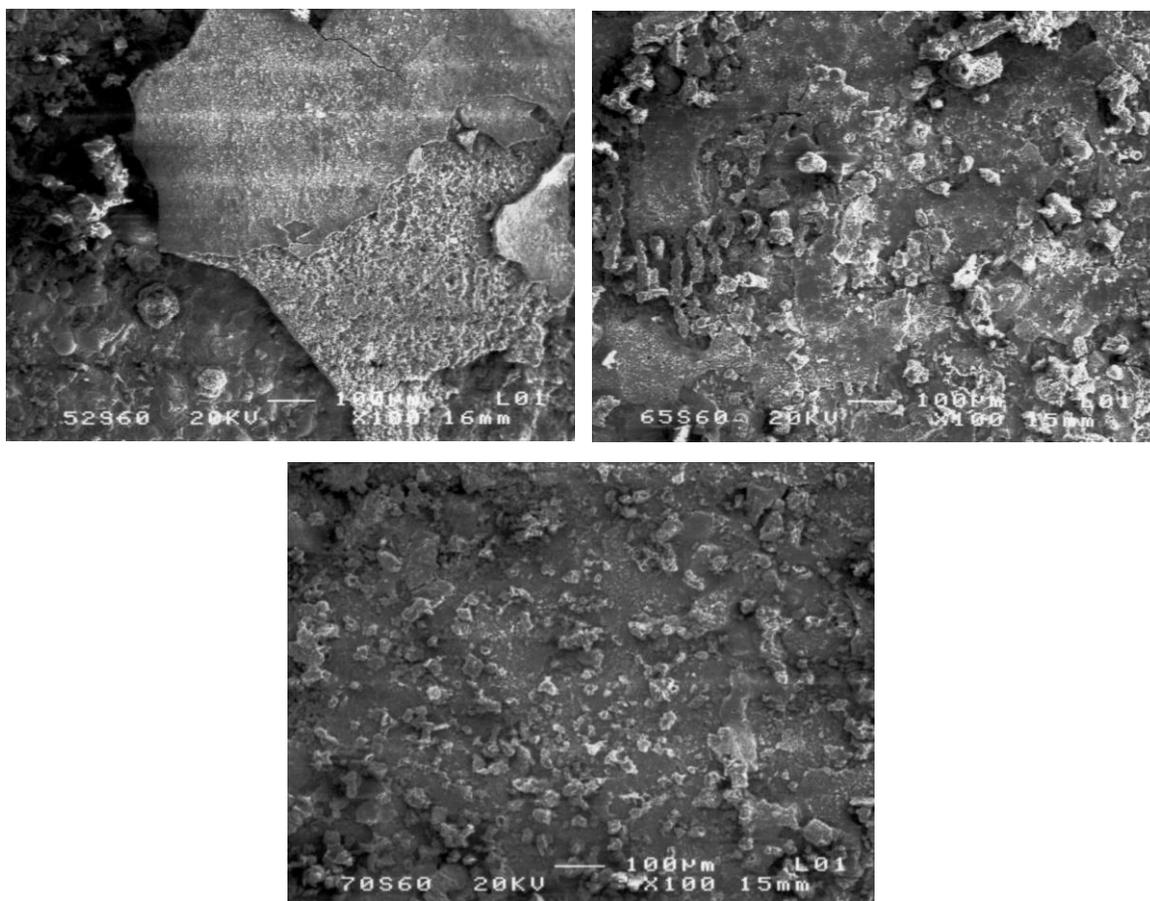


Figura 64.- Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C tomados a bajos aumentos (100X).

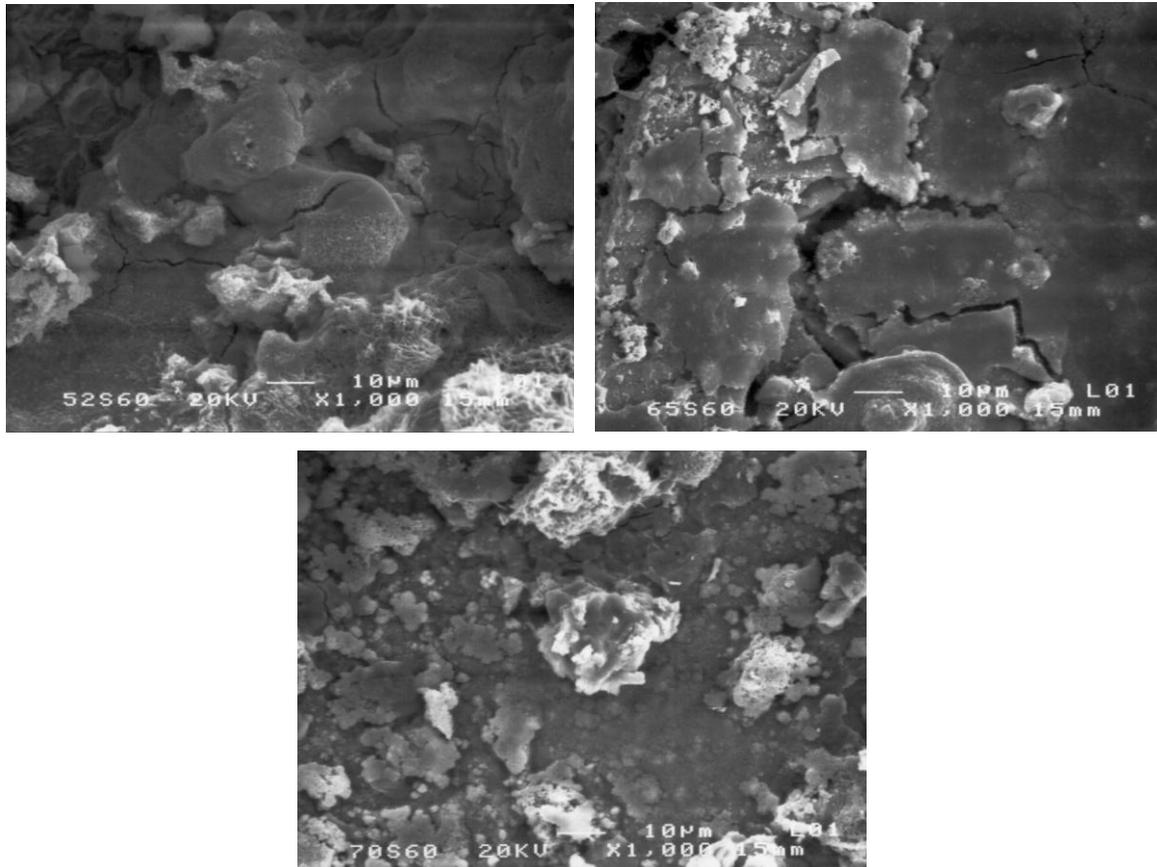


Figura 65.- Productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C tomados a mayores aumentos (1000X).

4.11 Clasificación de los productos de corrosión

De acuerdo algunos autores⁽⁴¹⁾ que han estudiado más a fondo los productos de corrosión que se forman con la presencia de diversos medios empleados existen tres tipos o formas que presentan los productos de corrosión y las cuales han denominado de la manera siguiente:

- 1.- Tipo o forma de cactus
- 2.- Tipo o forma de capullo de rosa
- 3.- Tipo o forma dentado

En la Figura 66 para el acero API 5L X-65 en salmuera con un 10% de keroseno a 60°C a altas magnificaciones (4300) se forma un producto de corrosión del tipo en forma de cactus.

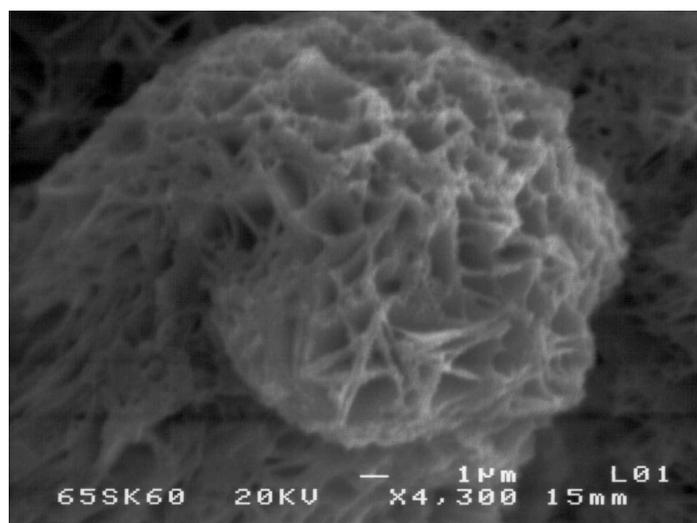


Figura 66.- Microfotografía del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C) a una magnificación de 4300X.

La Figura 67 muestra para el mismo acero API 5L X-65 pero ahora con salmuera + keroseno y H₂S a 60°C a más de 1000 magnificaciones otro tipo o forma de producto de corrosión conocido como capullo de rosa.

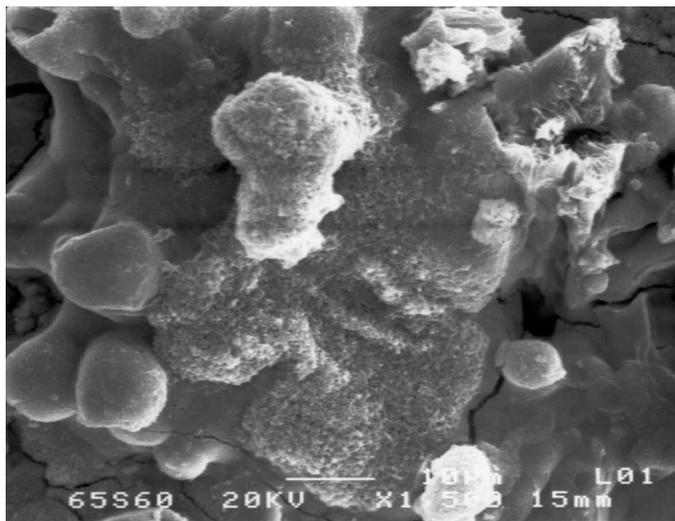


Figura 67.- Microfotografía del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 60°C) a una magnificación de 1000X.

En la Figura 68 para el acero API 5L X-52 para el medio con salmuera + 10% de keroseno a 30°C a más de 1000 magnificaciones, se identificó un producto de corrosión conocido como tipo dentado. Por lo anterior, en la investigación se identifican los 3 tipos o formas en que se clasifican los productos de corrosión de acuerdo con algunos autores⁽⁴¹⁾.

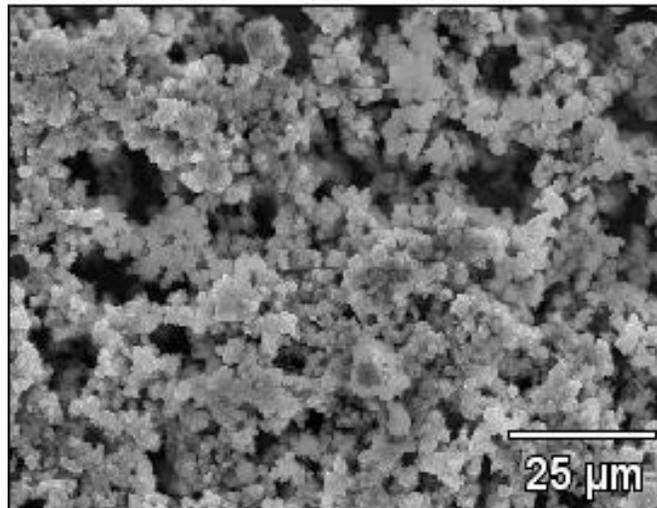


Figura 68.- Microfotografía del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C), a una magnificación de 1000X.

4.12 Efecto del flujo sobre los productos de corrosión y cómo influye sobre la velocidad de corrosión

Ahora se analiza con más detalle el efecto que tuvo el flujo sobre los productos de corrosión formados y a su vez con respecto a la velocidad de corrosión. Debido a la existencia de un alto esfuerzo de corte de superficie conforme se incrementa la velocidad de rotación del electrodo de trabajo se presenta un flujo turbulento además de la acción erosiva sobre la superficie de cada uno de los aceros empleados, se da origen a fracturas y por ende una ruptura de los productos de corrosión que se forman.

La turbulencia generada por el flujo además de causar una mayor corrosión a escala superficial, provoca el desprendimiento de los óxidos que se forman o en su caso junto con algunos sulfuros en la presencia de H_2S , dejando al descubierto parte del sustrato en la parte superficial del acero con lo cual el medio tiene una mayor interacción incrementándose con esto la velocidad de corrosión en algunos intervalos como se observa en algunas de las gráficas analizadas.

La turbulencia generada por el flujo además de causar una mayor corrosión a escala superficial provoca el desprendimiento de los óxidos que se forman, dejando al descubierto la parte del sustrato en la parte superficial del acero con lo cual el medio tiene una mayor interacción. Por lo anterior, se incrementa la velocidad de corrosión en algunos intervalos tal como se observa en las Figuras 28 y 29. El efecto del desprendimiento de los productos de corrosión es más notable cuando existe la presencia del H_2S tal como se observa en las Figuras 69-74. La letra A indica que existe un agrietamiento principalmente en la primera capa que se forma de los productos de corrosión y la letra D indica que hubo un desprendimiento de los productos de corrosión que van creciendo sobre la primera capa y los cuales son arrancados literalmente por la acción turbulenta del flujo conforme se incrementa la velocidad de rotación del electrodo de trabajo la cual llegó hasta las 6500 rpm.

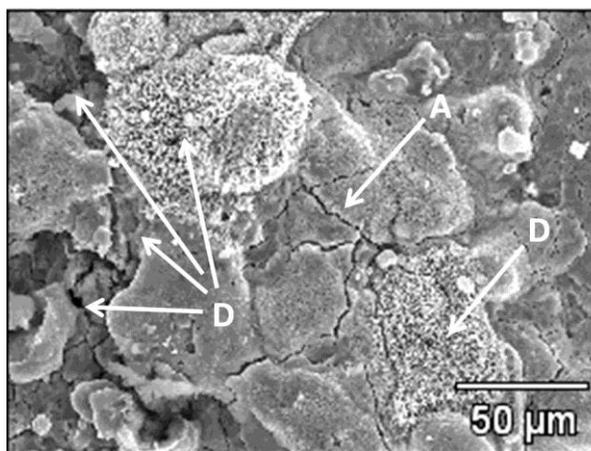


Figura 69.- Microfotografía del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H_2S a 30°C) donde se muestra el agrietamiento (A) y el desprendimiento (D) de los productos de corrosión (500X).

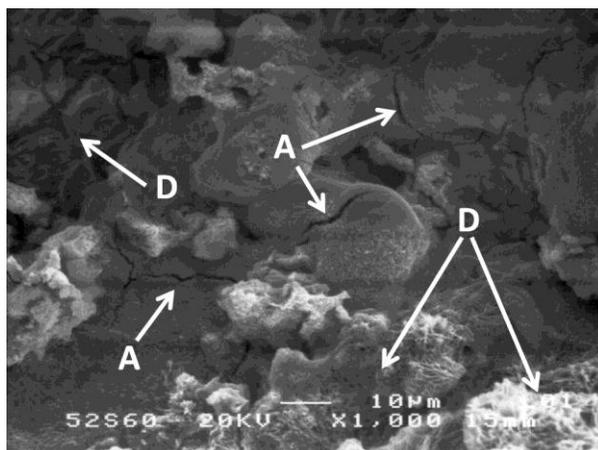


Figura 70.- Microfotografía del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 60°C) donde se muestra el agrietamiento (A) y el desprendimiento (D) de los productos de corrosión (1000X).

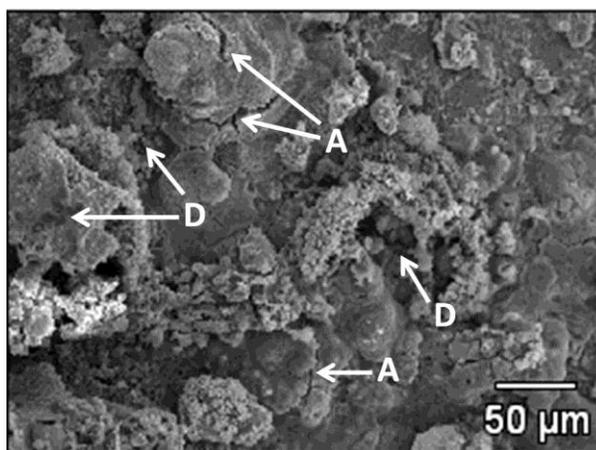


Figura 71.- Microfotografía del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C) donde se muestra el agrietamiento (A) y el desprendimiento (D) de los productos de corrosión (300X).

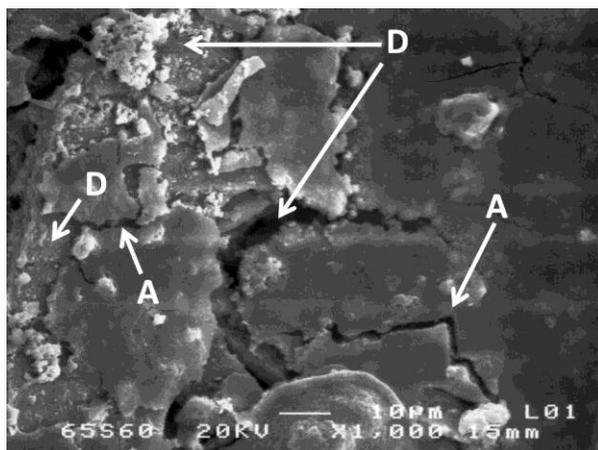


Figura 72.- Microfotografía del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C) donde se muestra el agrietamiento (A) y el desprendimiento (D) de los productos de corrosión (1000X).

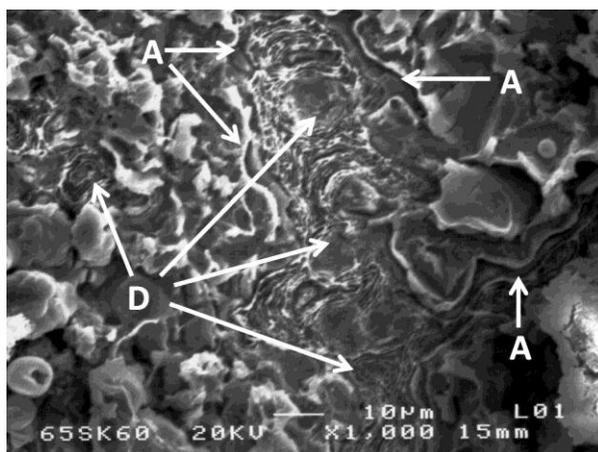


Figura 73.- Microfotografía del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C) donde se muestra el agrietamiento (A) y el desprendimiento (D) de los productos de corrosión (1000X).

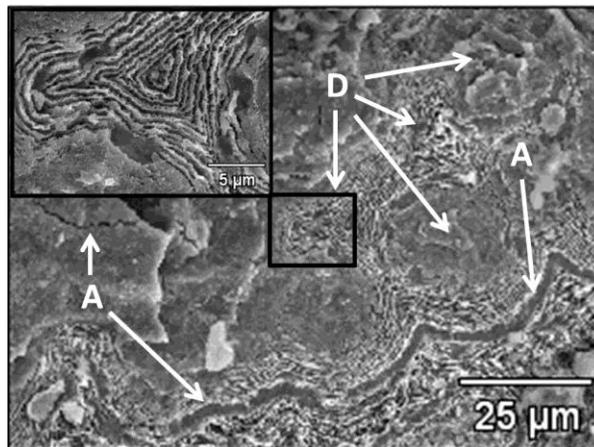
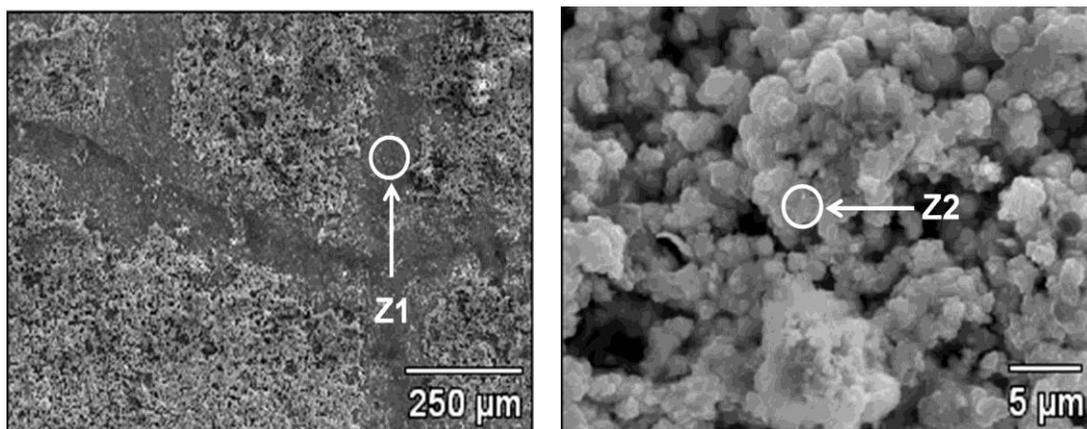


Figura 74.- Microfotografía del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C) donde se muestra el agrietamiento (A) y el desprendimiento (D) de los productos de corrosión (1000X y el recuadro a 5000X).

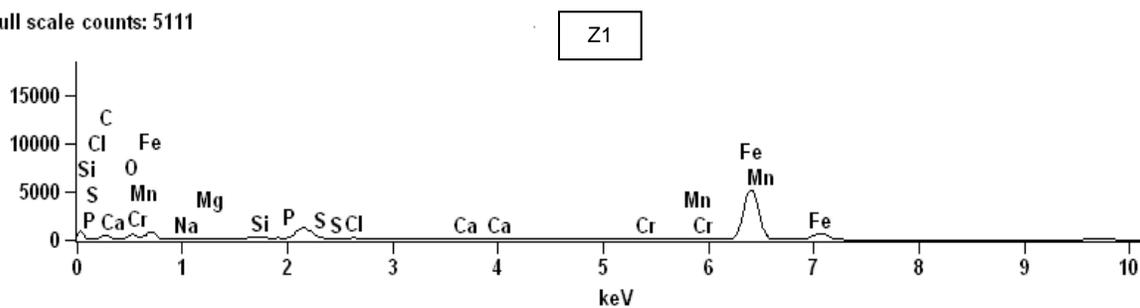
4.13 Microanálisis por EDS de los productos de corrosión

Se realizaron además microanálisis por EDS para determinar de qué elementos están constituidos los productos de corrosión formados en las superficies de cada uno de los aceros. Para el acero API 5L X-52 en el medio con salmuera + 10% de keroseno a 30°C, como se observa en la Figura 75 se realizan 2 análisis uno de la zona marcada como Z1 que corresponde a la primera capa que se forma de productos de corrosión (podríamos mencionarla también como base). La zona Z2 corresponde a los productos de corrosión que predominan y que crecieron de manera más significativa.

Acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C)



Full scale counts: 5111



Full scale counts: 2205

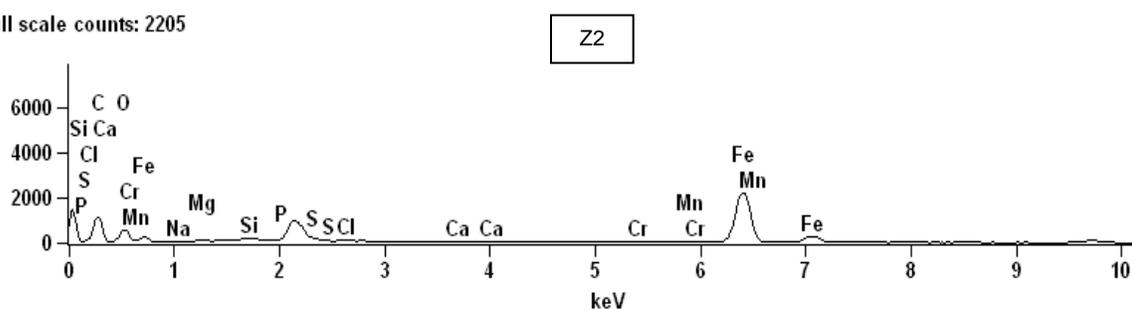


Figura 75.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).



En la Tabla 64 se observa como para la zona Z1 los elementos que tienen una mayor presencia en % en peso son el Fe con 55.61%, el C con 32.21% y el O con 10.27%, por lo que se asume que ésta podría estar compuesta en su mayor parte de algún óxido. Para la zona Z2 nuevamente predomina el Fe con 25.48%, C con 57.32% y el O con 16.37% siendo mucho mayor que en la Z1 lo cual indica que hay mayor cantidad de óxidos.

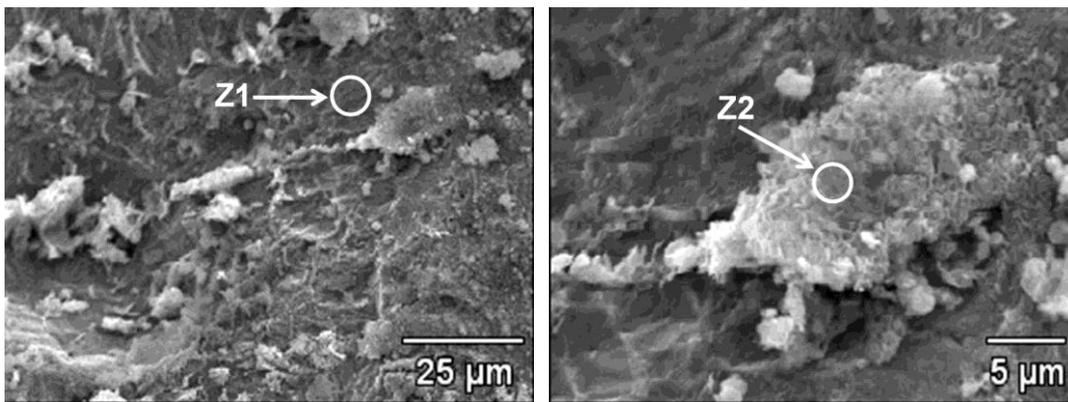
Tabla 64.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	32.21	61.31
O-K	10.27	14.67
Na-K	0.23	0.23
Mg-K	0.35	0.33
Si-K	0.18	0.15
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	0.29	0.19
Ca-K	0.02	0.01
Cr-K	0.09	0.04
Mn-K	0.74	0.31
Fe-K	55.61	22.77

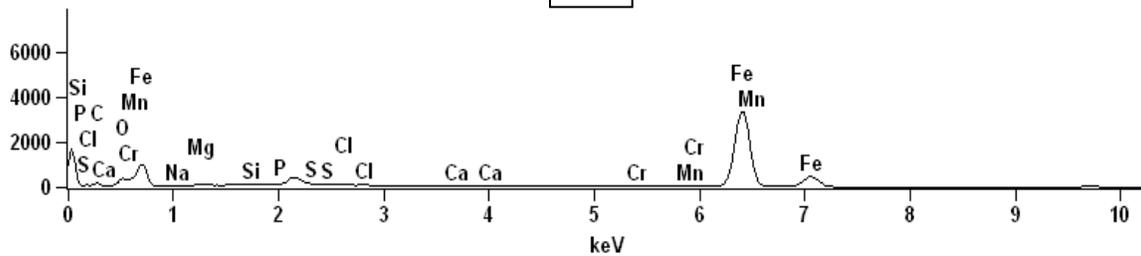
Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	57.32	76.03
O-K	16.37	16.30
Na-K	0.09	0.07
Mg-K	0.13	0.08
Si-K	0.20	0.11
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	0.17	0.07
Ca-K	0.01	0.00
Cr-K	0.01	0.00
Mn-K	0.22	0.07
Fe-K	25.48	7.27

Para el acero API 5L X-65 (Figura 76) de la Tabla 65 para la zona Z1 se tiene Fe con 73%, C con 15.70% y O con 8.15% formándose también algún óxido. Para la zona Z2 se tiene Fe con 66.88%, C con 20.87% y O con 10.23%, nuevamente aquí hay mayor cantidad de óxidos.

Acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C)



Full scale counts: 3330



Full scale counts: 3291

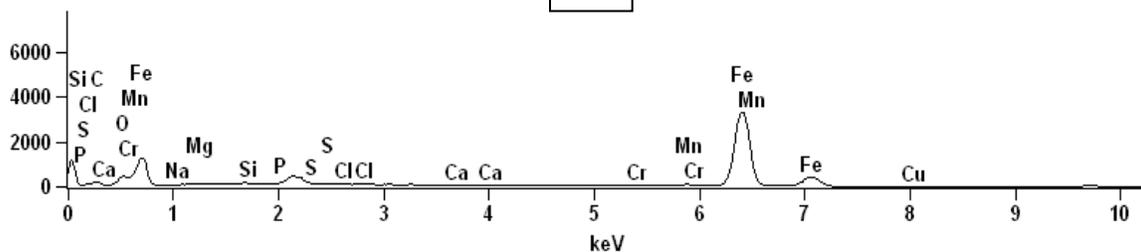


Figura 76.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).

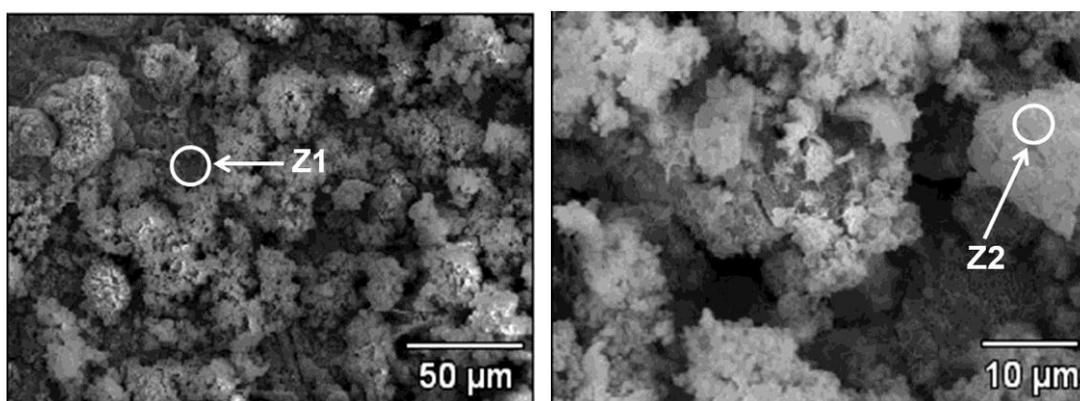
**Tabla 65.-** Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	15.70	40.62
O-K	8.15	15.83
Na-K	0.22	0.29
Mg-K	1.05	1.35
Si-K	0.34	0.37
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	0.09	0.08
Ca-K	0.00	0.00
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.88	0.50
Fe-K	73.58	40.95

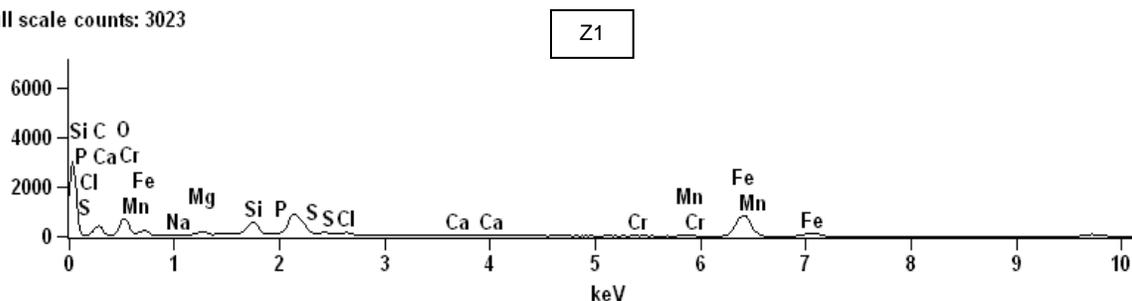
Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	20.87	48.02
O-K	10.23	17.66
Na-K	0.00	0.00
Mg-K	0.18	0.21
Si-K	0.24	0.24
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	0.00	0.00
Ca-K	0.05	0.04
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	1.03	0.52
Fe-K	66.88	33.09

Para el acero API 5L X-70 (Figura 77) de la Tabla 66 para la zona Z1 se tiene Fe con 17.69%, C con 45.90% y O con 31.58% formándose un óxido. Para la zona Z2 se tiene Fe con 42.21%, C con 16.83% y O con 37.64% existe una mayor cantidad de óxidos.

Acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C)



Full scale counts: 3023



Full scale counts: 3152

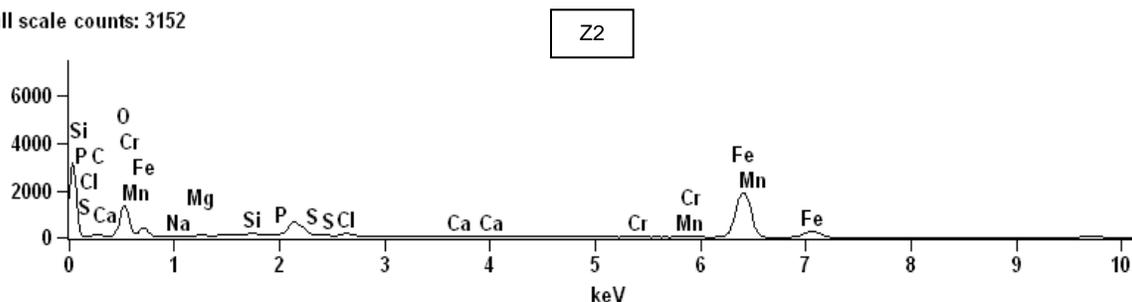


Figura 77.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).

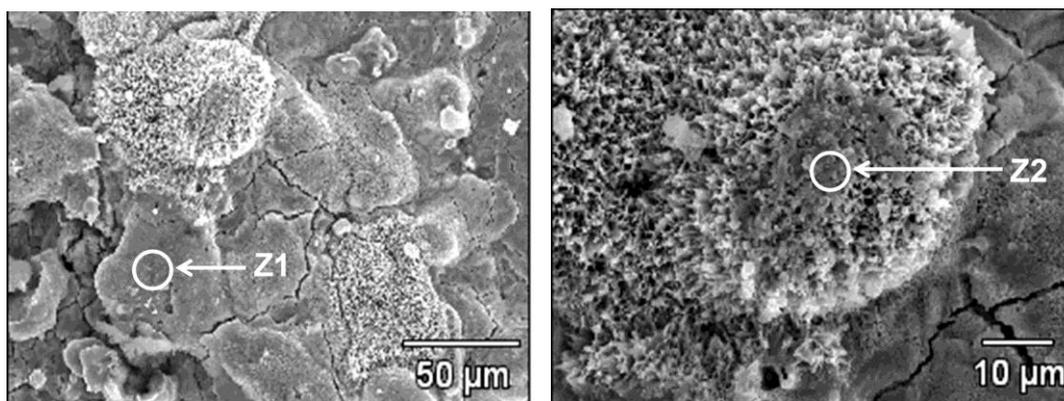
**Tabla 66.-** Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	45.90	60.76
O-K	31.58	31.39
Na-K	0.64	0.44
Mg-K	0.70	0.46
Si-K	3.14	1.78
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	0.15	0.07
Ca-K	0.05	0.02
Cr-K	0.08	0.02
Mn-K	0.06	0.02
Fe-K	17.69	5.04

Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	16.83	30.40
O-K	37.64	51.04
Na-K	0.59	0.56
Mg-K	0.40	0.36
Si-K	0.47	0.36
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	0.54	0.33
Ca-K	0.19	0.10
Cr-K	0.43	0.18
Mn-K	0.69	0.27
Fe-K	42.21	16.40

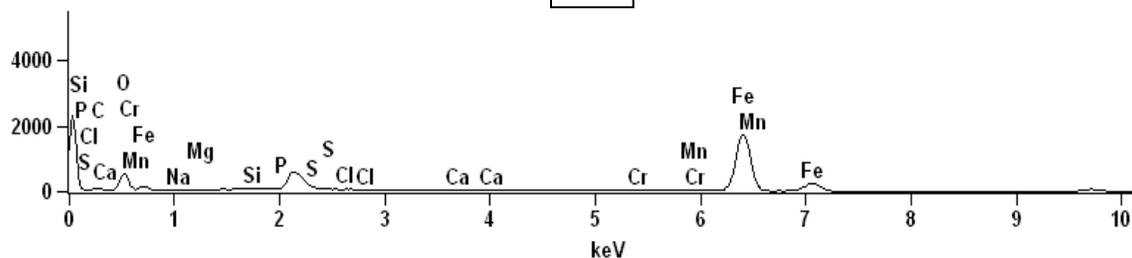
Para el acero API 5L X-52 (Figura 78) en el medio con salmuera + 10% de keroseno adicionado con H₂S a 30°C. De la Tabla 67 se observa que para la zona Z1 Fe con 58.09%, C con 19.17%, O con 21.69% y S con 0.00%, solamente se forma algún óxido sin la presencia de sulfuros.

Acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C)



Full scale counts: 2299

Z1



Full scale counts: 2386

Z2

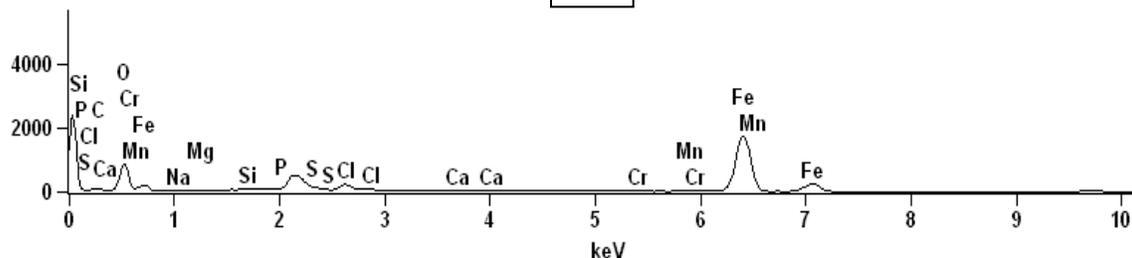


Figura 78.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C).



Para la zona Z2 Fe con 46.98%, C con 21.03%, O con 29.39% y S con 0.00% se forma un poco más de óxido que en la Z1 por la mayor cantidad de oxígeno que hay pero aún no se aprecia la existencia de algún sulfuro.

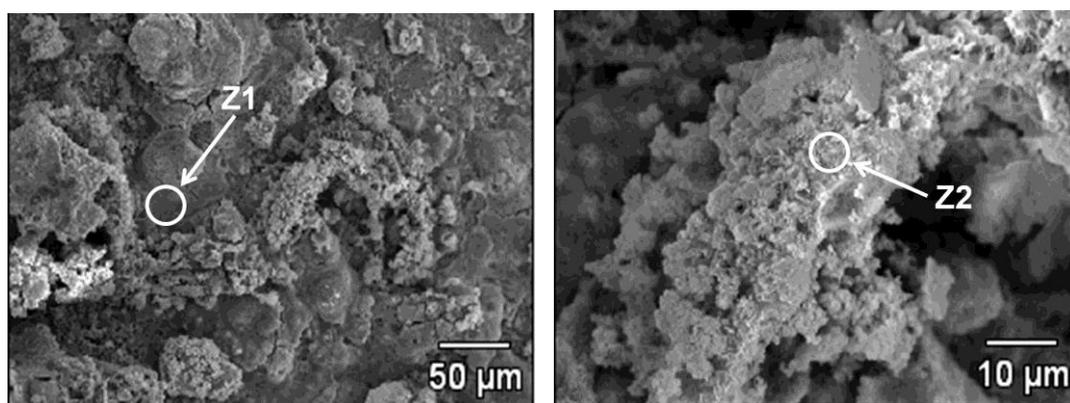
Tabla 67.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C).

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	19.17	39.73
O-K	21.69	33.74
Na-K	0.05	0.06
Mg-K	0.00	0.00
Si-K	0.28	0.25
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	0.09	0.06
Ca-K	0.00	0.00
Cr-K	0.08	0.04
Mn-K	0.55	0.25
Fe-K	58.09	25.89

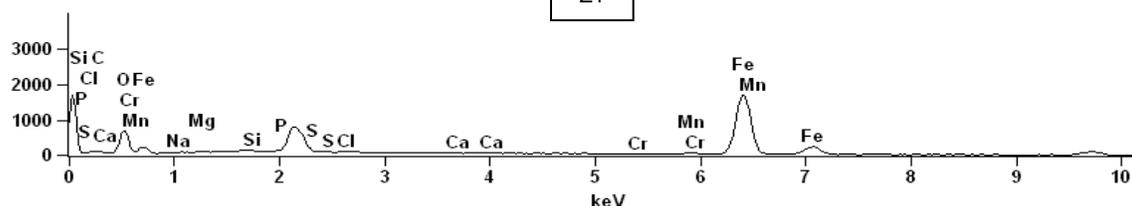
Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	21.03	38.86
O-K	29.39	40.77
Na-K	0.26	0.25
Mg-K	0.08	0.07
Si-K	0.24	0.19
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	1.70	1.07
Ca-K	0.00	0.00
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.32	0.13
Fe-K	46.98	18.67

Para el acero API 5L X-65 (Figura 79) de la Tabla 68 se tiene Fe con 51.17%, C con 19.70%, O con 26.53% y S con 0.00% solo se forma algún óxido. Para la zona Z2 Fe con 37.03%, C con 16.97%, O con 42.66% y S con 0.72%, en éste caso además de formarse una mayor cantidad de óxido se tiene la presencia de algún sulfuro de acuerdo al EDS realizado.

Acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C)



Full scale counts: 1679



Full scale counts: 3165

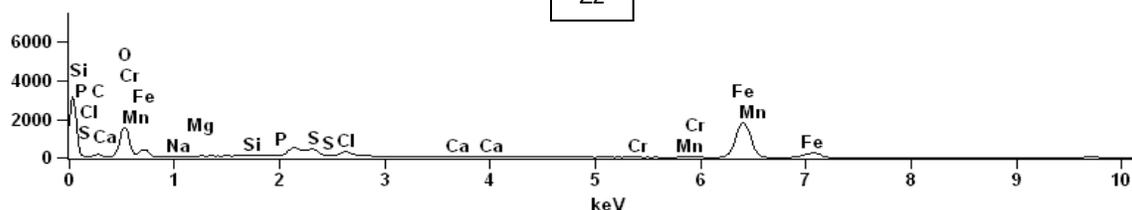


Figura 79.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C).



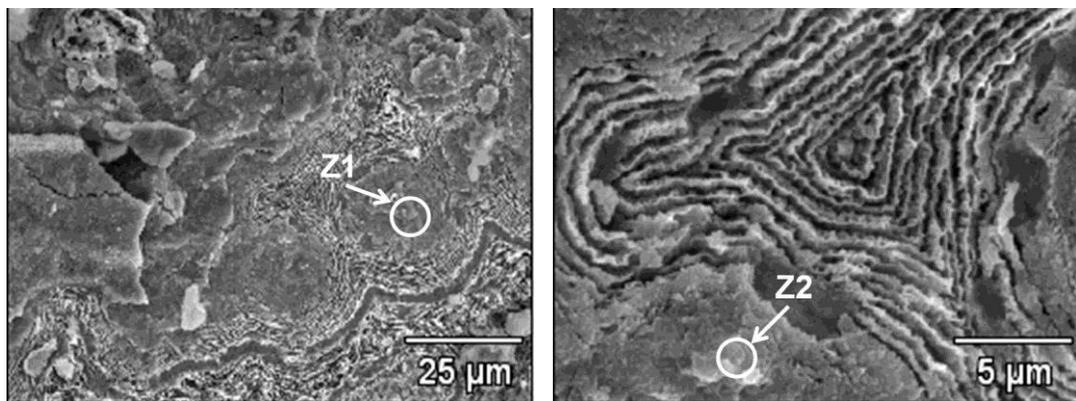
Tabla 68.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C).

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	19.70	38.09
O-K	26.53	38.52
Na-K	1.10	1.12
Mg-K	0.30	0.29
Si-K	0.24	0.20
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	0.44	0.29
Ca-K	0.00	0.00
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.52	0.22
Fe-K	51.17	21.28

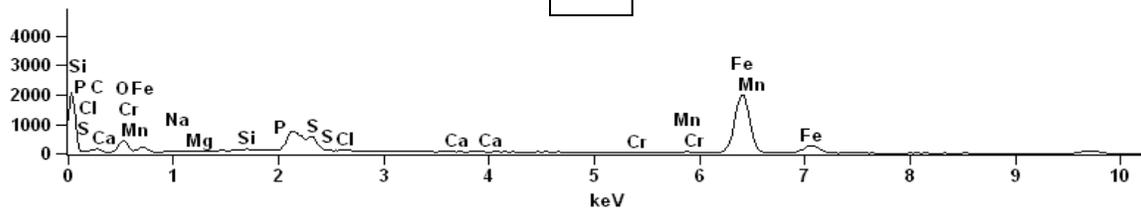
Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	16.97	29.20
O-K	42.66	55.09
Na-K	0.00	0.00
Mg-K	0.15	0.13
Si-K	0.20	0.15
P-K	0.00	0.00
S-K	0.72	0.47
Cl-K	2.01	1.17
Ca-K	0.08	0.04
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.19	0.07
Fe-K	37.03	13.70

Para el acero API 5L X-70 (Figura 80) de la Tabla 69 para la zona Z1 existe Fe con 52.62%, C con 25.03%, O con 18.66% y S con 0.96%, en este caso además de la formación de óxido desde la base, se aprecia de igual manera la presencia de sulfuros formados. Para la zona Z2 Fe con 34.46%, C con 18.30%, O con 44.55% y S con 0.89%, existe algún óxido mezclado con algún sulfuro.

Acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C)



Full scale counts: 2073



Full scale counts: 1874

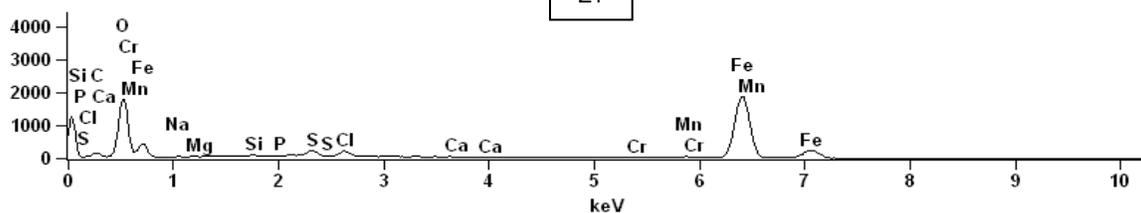


Figura 80.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C).



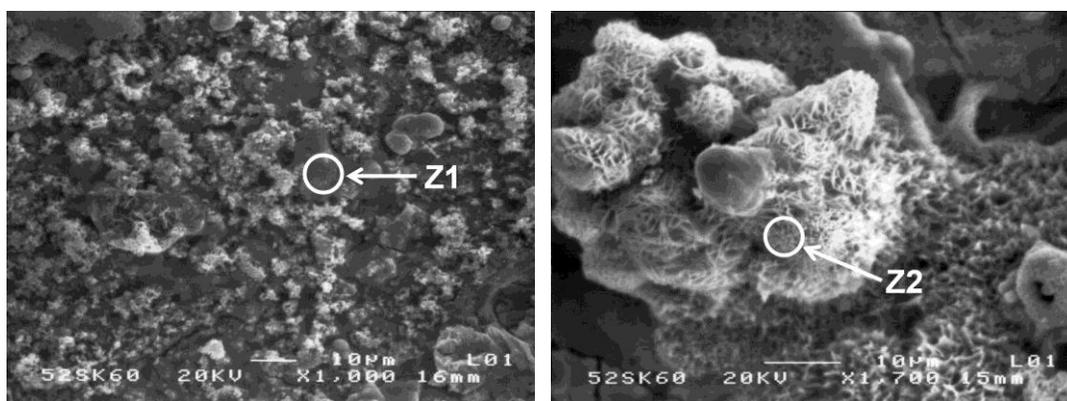
Tabla 69.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C).

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	25.03	48.35
O-K	18.66	27.05
Na-K	0.95	0.96
Mg-K	0.00	0.00
Si-K	0.39	0.32
P-K	0.00	0.00
S-K	0.96	0.69
Cl-K	0.76	0.50
Ca-K	0.00	0.00
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.63	0.27
Fe-K	52.62	21.86

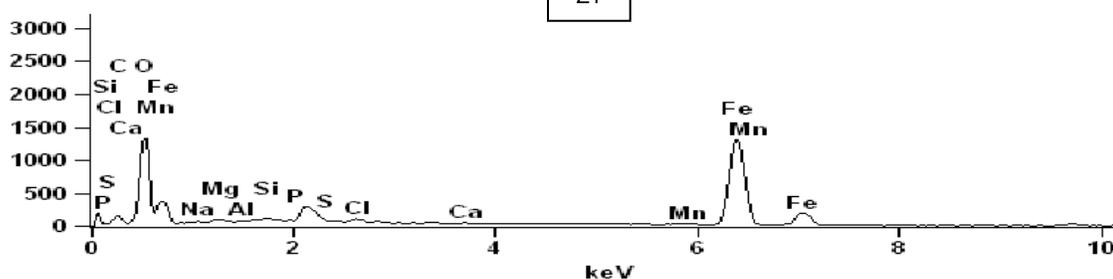
Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	18.30	30.44
O-K	44.55	55.63
Na-K	0.33	0.29
Mg-K	0.06	0.05
Si-K	0.09	0.07
P-K	0.00	0.00
S-K	0.89	0.55
Cl-K	0.87	0.49
Ca-K	0.00	0.00
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.44	0.16
Fe-K	34.46	12.33

Para el medio con salmuera + 10% de keroseno a 60°C el acero API 5L X-52 (Figura 81) de la Tabla 70 tiene para la zona Z1 Fe con 54.89%, C con 11.90%, O con 30.78% y S con 0.00%, se forma solamente óxido pero en mayor cantidad debido a que existe más oxígeno que a 30°C. Para la zona Z2 Fe con 61.15%, C con 7.91%, O con 26.69% y S con 0.00%, se forma de igual manera únicamente óxido.

Acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C)



Full scale counts: 1327



Full scale counts: 1365

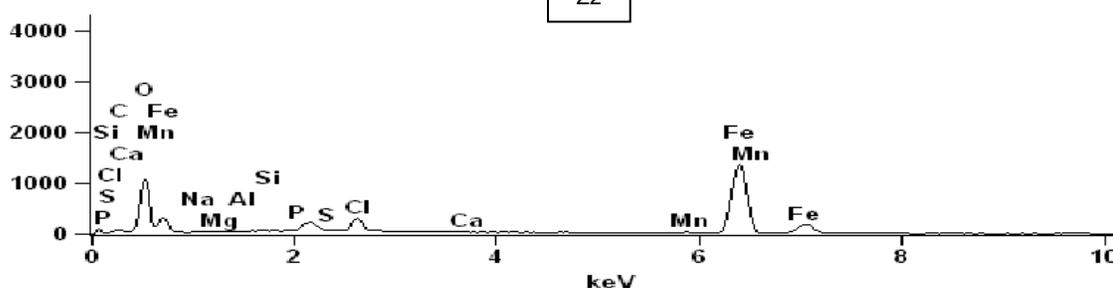


Figura 81.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno 60°C).

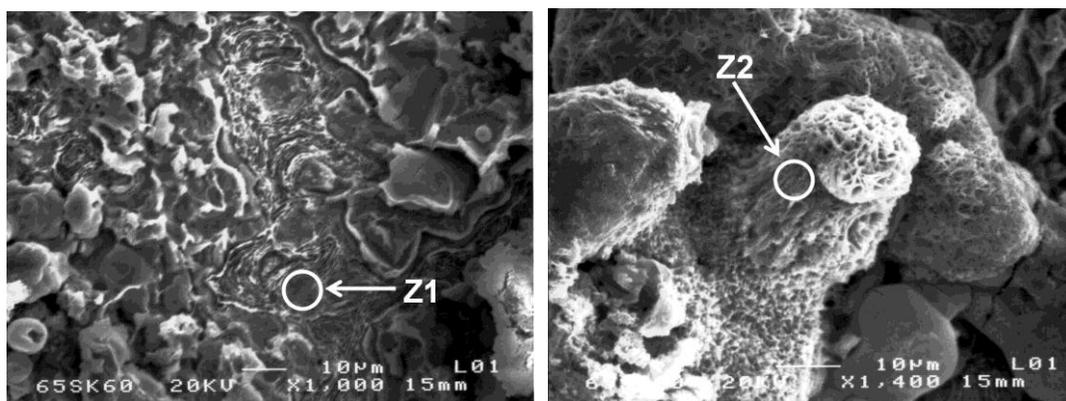
**Tabla 70.-** Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C).

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	11.9	25.11
O-K	30.78	48.40
Na-K	0.28	0.30
Mg-K	0.38	0.39
Si-K	0.30	0.27
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	0.60	0.42
Ca-K	0.14	0.09
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.65	0,30
Fe-K	54.89	24.73

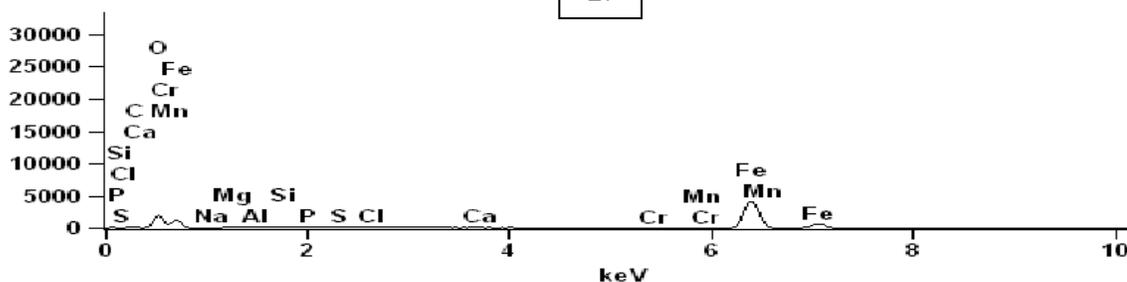
Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	7.91	18.60
O-K	26.69	47.09
Na-K	0.30	0.37
Mg-K	0.03	0.04
Si-K	0.08	0.08
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	3.34	2.66
Ca-K	0.01	0.00
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.50	0.26
Fe-K	61.15	30.91

Para el acero API 5L X-65 (Figura 82) de la Tabla 71 se tiene para la zona Z1 Fe con 67.85%, C con 11.04%, O con 18.04% y S con 0.00%, por lo que solo se forman óxidos. Para la zona Z2 Fe con 56.38%, C con 11.50%, O con 30.59% y S con 0.00%, nuevamente se forma una mayor cantidad de óxido por la presencia mucho mayor de Oxígeno.

Acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C)



Full scale counts: 4059



Full scale counts: 2528

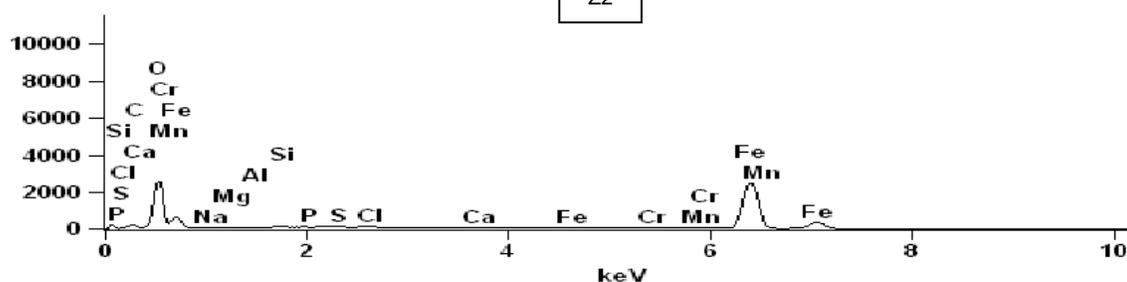


Figura 82.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno 60°C).

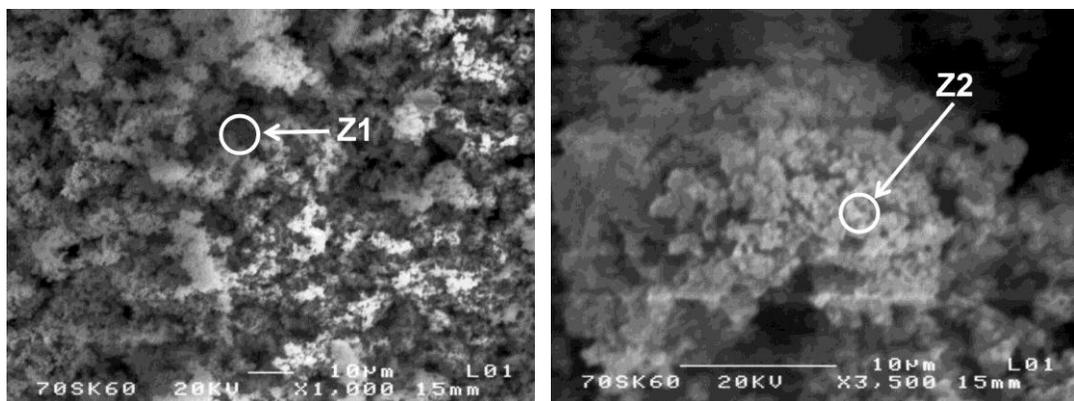
**Tabla 71.-** Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C).

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	11.04	27.35
O-K	18.04	33.55
Na-K	0.13	0.17
Mg-K	1.03	1,26
Si-K	0.63	0.67
P-K	0.05	0.05
S-K	0.00	0.00
Cl-K	0.28	0.24
Ca-K	0.11	0.08
Cr-K	0.07	0.04
Mn-K	0.70	0.38
Fe-K	67.85	36.15

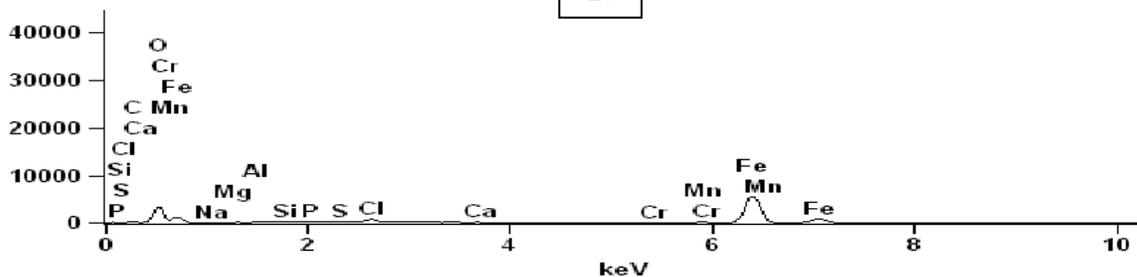
Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	11.50	24.42
O-K	30.59	48.78
Na-K	0.19	0.21
Mg-K	0.06	0.06
Si-K	0.20	0.188
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	0.29	0.21
Ca-K	0.00	0.00
Cr-K	0.14	0.07
Mn-K	0.60	0.28
Fe-K	56.38	25.75

En el caso del acero API 5L X-70 (Figura 83) de la Tabla 72 para la zona Z1 se tiene Fe con 66.72%, C con 6.47%, O con 23.00% y S con 0.59%, de nueva cuenta se forma un óxido, aunque aquí aparece ya una cantidad significativa de azufre cabe recordar que esta muestra en el análisis macroscópico se observa una ligera capa de producto de corrosión por lo que el azufre detectado corresponde a parte de la superficie.

Acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C)



Full scale counts: 5442



Full scale counts: 3652

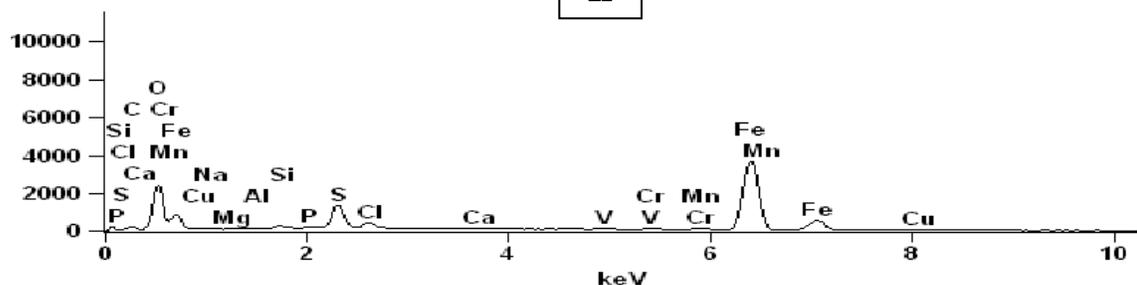


Figura 83.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno 60°C).



Para la zona Z2 Fe con 63.01%, C con 5.39%, O con 19.16% y S con 6.30%, al igual que en la zona Z1 se forma un óxido solamente y el azufre detectado corresponde a parte de la superficie del acero, debido a que se forma una capa muy delgada a simple vista de productos de corrosión formados como se puede observar en la Figura 56 y el haz de electrones pudo haber incidido en la superficie del acero.

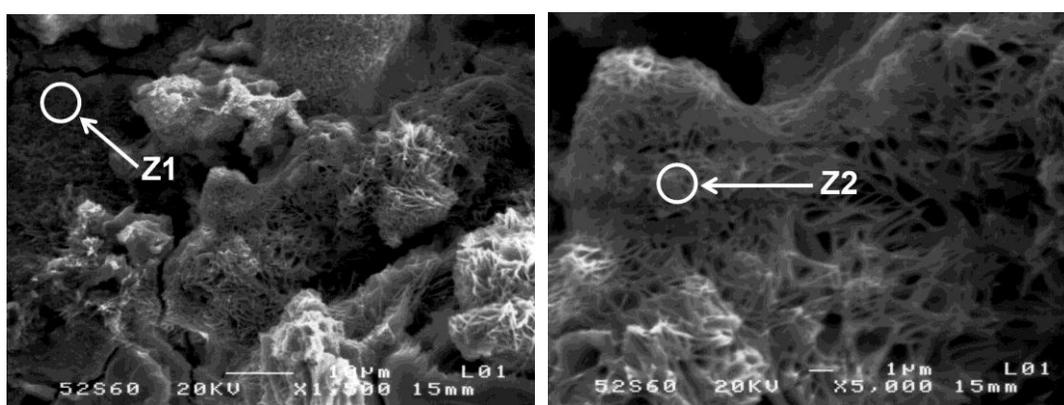
Tabla 72.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C).

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	6.47	16.45
O-K	23.00	43.91
Na-K	0.13	0.18
Mg-K	0.03	0.04
Si-K	0.12	0.13
P-K	0.00	0.00
S-K	0.59	0.56
Cl-K	1.99	1.72
Ca-K	0.00	0.00
Cr-K	0.09	0.05
Mn-K	0.85	0.47
Fe-K	66.72	36.49

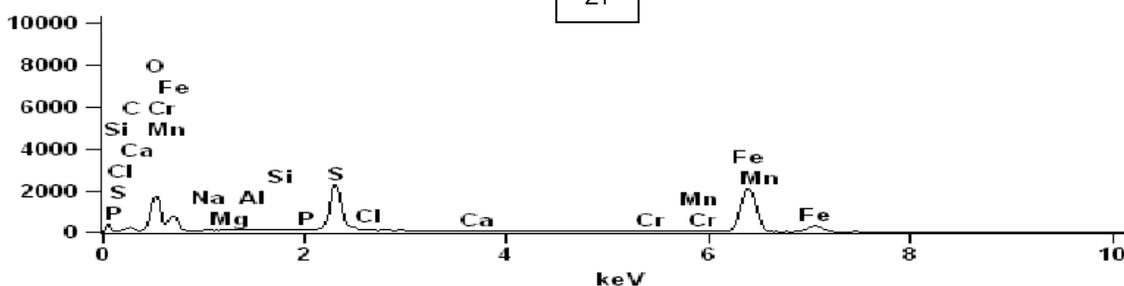
Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	5.39	14.37
O-K	19.16	38.38
Na-K	0.38	0.53
Mg-K	0.06	0.08
Si-K	0.55	0.63
P-K	0.09	0.09
S-K	6.30	6.30
Cl-K	1.66	1.50
Ca-K	0.06	0.04
Cr-K	0.32	0.19
Mn-K	0.91	0.53
Fe-K	63.01	36.15

Para el medio con salmuera + 10% de keroseno adicionado además con H_2S a $60^\circ C$ para el acero API 5L X-52 (Figura 84) de la Tabla 73 se tiene para la zona Z1 Fe con 44.51%, C con 15.5%, O con 26.4% y S con 12.59%, en este caso además de tener una mayor cantidad de óxido formado además se observa la presencia de una buena cantidad de sulfuro por un mayor porcentaje en peso de azufre.

Acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H_2S a $60^\circ C$)



Full scale counts: 2254



Full scale counts: 3511

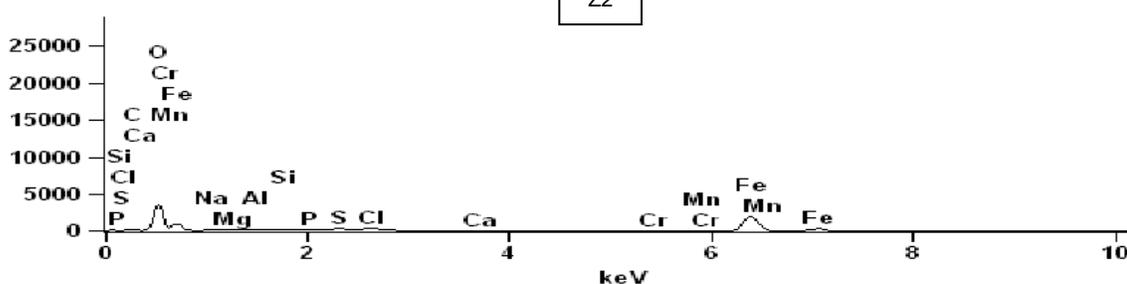


Figura 84.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H_2S a $60^\circ C$).



Para la zona Z2 se tiene Fe con 42.10%, C con 10.77%, O con 42.25% y S con 1.69 %, aquí nuevamente se forma un óxido y al mismo tiempo algún sulfuro pero en menor cantidad que en la zona Z1.

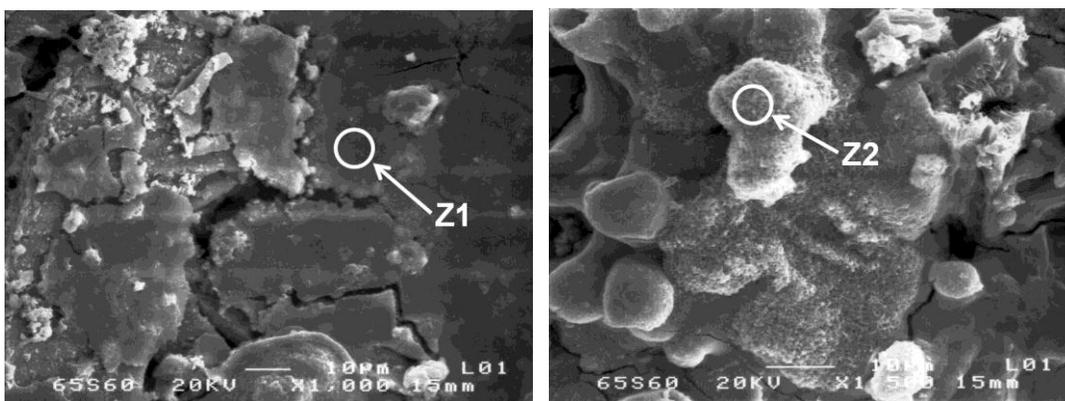
Tabla 73.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 60°C).

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	15.5	31.06
O-K	26.4	39.65
Na-K	0.28	0.29
Mg-K	0.00	0.00
Si-K	0.17	0.14
P-K	0.00	0.00
S-K	12.59	9.43
Cl-K	0.10	0.07
Ca-K	0.15	0.09
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.21	0.09
Fe-K	44.51	19.14

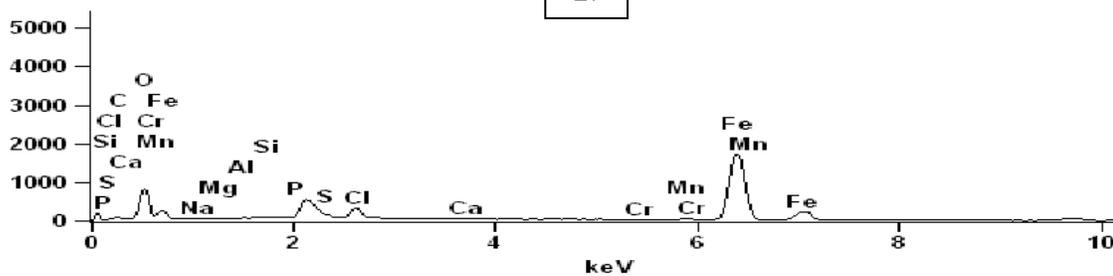
Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	10.77	20.18
O-K	42.25	59.43
Na-K	0.64	0.63
Mg-K	0.00	0.00
Si-K	0.17	0.13
P-K	0.03	0.02
S-K	1.69	1.18
Cl-K	2.13	1.35
Ca-K	0.08	0.05
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.14	0.06
Fe-K	42.10	16.97

Para el acero API 5L X-65 (Figura 85) de la Tabla 74 para la zona Z1 existe Fe con 70.07%, C con 7.20%, O con 18.19% y S con 0.00%, es decir que en esta zona solamente se forma algún óxido. Para la zona Z2 Fe con 55.80%, C con 15.30%, O con 20.81% y S con 5.04%, aquí además de algún óxido existe además un sulfuro.

Acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 60°C)



Full scale counts: 1718



Full scale counts: 1831

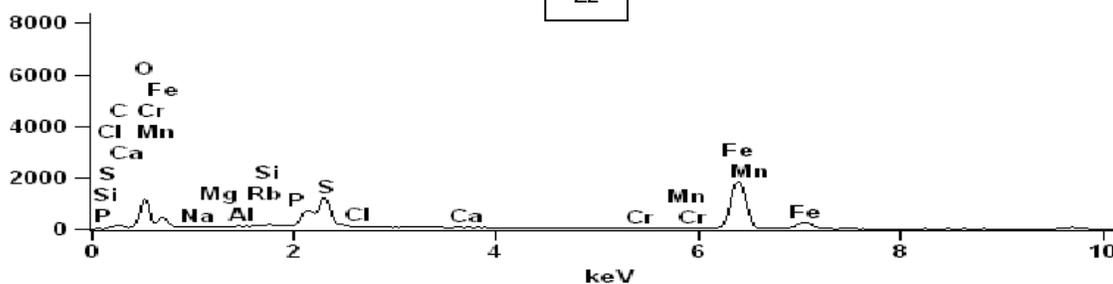


Figura 85.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 60°C).



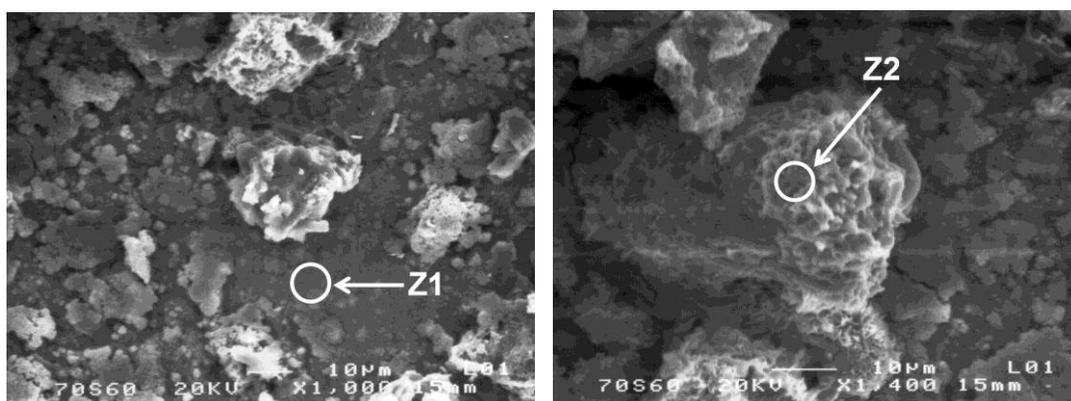
Tabla 74.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 60°C).

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	7.20	19.23
O-K	18.19	36.47
Na-K	0.17	0.24
Mg-K	0.00	0.00
Si-K	0.19	0.22
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	3.56	3.22
Ca-K	0.00	0.00
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.62	0.36
Fe-K	70.07	40.26

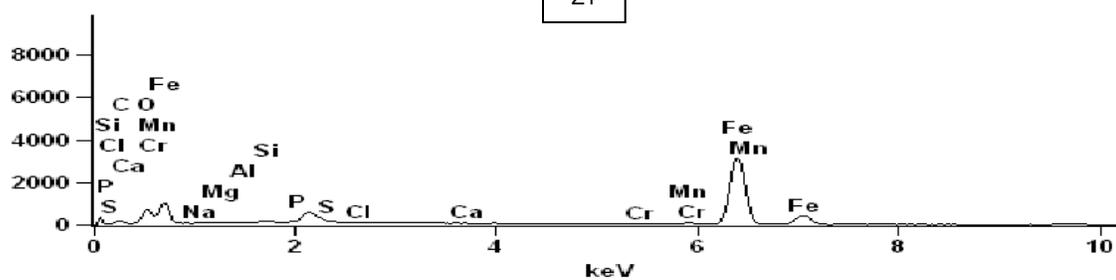
Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	15.30	33.57
O-K	20.81	34.29
Na-K	0.20	0.23
Mg-K	0.12	0.13
Si-K	0.05	0.05
P-K	0.00	0.00
S-K	5.04	4.14
Cl-K	0.32	0.24
Ca-K	0.04	0.03
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.97	0.46
Fe-K	55.80	26.34

Para el acero API 5L X-70 (Figura 86) de la Tabla 75 se tiene para la zona Z1 Fe con 81.78%, C con 7.74%, O con 8.99% y S con 0.00%, en este caso únicamente se forma algún óxido en la base. Para la zona Z2 tenemos Fe con 55.93%, C con 11.61%, O con 26.39% y S con 4.06%, además de formarse una buena cantidad de óxido existe una buena cantidad de sulfuro mezclado con este.

Acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 60°C)



Full scale counts: 3105



Full scale counts: 1782

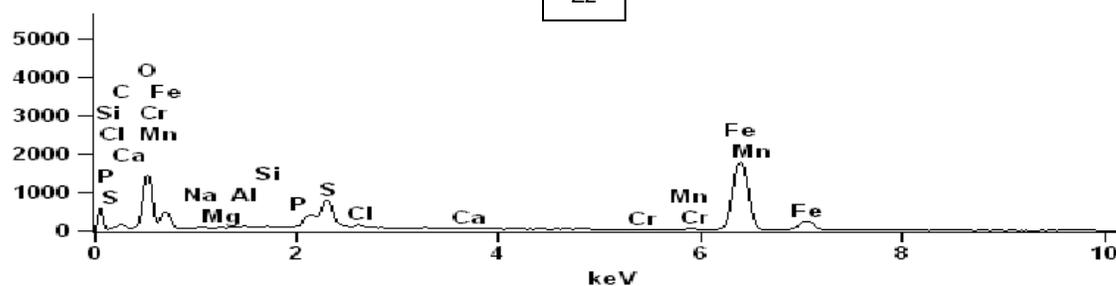


Figura 86.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 60°C).



Tabla 75.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 60°C).

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	7.74	23.82
O-K	8.99	20.76
Na-K	0.16	0.26
Mg-K	0.00	0.00
Si-K	0.21	0.27
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	0.12	0.12
Ca-K	0.03	0.03
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.97	0.66
Fe-K	81.78	54.09

Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	11.61	25.4
O-K	26.39	43.34
Na-K	0.43	0.49
Mg-K	0.03	0.03
Si-K	0.17	0.16
P-K	0.00	0.00
S-K	4.06	3.33
Cl-K	0.80	0.59
Ca-K	0.00	0.00
Cr-K	0.01	0.00
Mn-K	0.45	0.21
Fe-K	55.93	26.32



4.14 Mapeo para ver la distribución de los elementos identificados en los productos de corrosión formados

Se eligió para este caso al medio más agresivo, es decir al que contiene H_2S , ya que en él se forman mezclas de óxidos con sulfuros como productos de corrosión. Se consideran a los aceros que obtienen la mayor y menor velocidad de corrosión respectivamente (API 5L X-65 y X-70)

Para el acero API 5L X-65 (Figura 87) a 30 °C adicionado con H_2S , donde mediante una serie de colores se observa cómo está distribuido cada uno de los elementos seleccionados en la superficie del acero en este caso del área seleccionada, en cada una de las figuras.

De la Tabla 76 y de acuerdo a los colores se observa en primer lugar que el oxígeno (color amarillo) cuenta con un 21.83% en peso, seguido del carbono (rojo) con un 9.33% y fierro con un 66.16% (violeta claro), todos en las imágenes se observan estos elementos distribuidos en toda la superficie pero con los porcentajes ya mencionados.

Acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C)

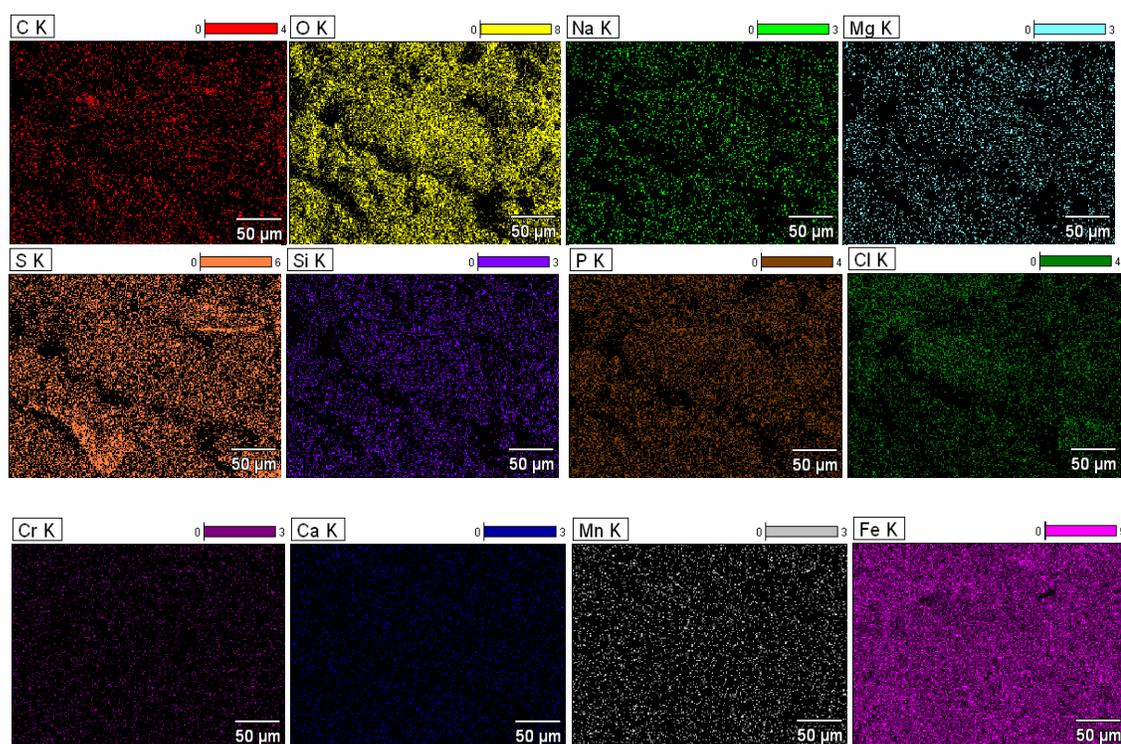
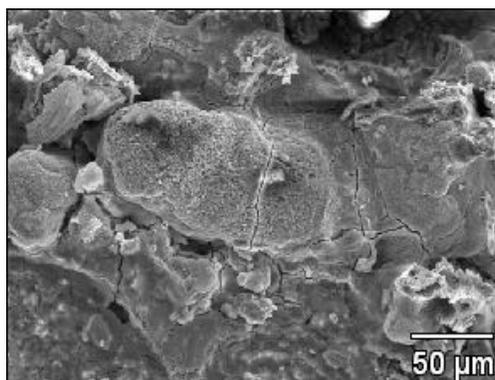


Figura 87.- Mapeo de C, O, Na, Mg, S, Si, P, Cl, Cr, Mn y Fe del acero API 5L X-65 en Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C.



Tabla 76.- Cuantificación de elementos en el mapeo del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C).

Mapeo	% en peso	% atómico
C-K	9.33	22.85
O-K	21.83	40.11
Na-K	0.37	0.47
Mg-K	0.04	0.05
Si-K	0.17	0.17
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	1.38	1.15
Ca-K	0.00	0.00
Cr-K	0.01	0.00
Mn-K	0.71	0.38
Fe-K	66.16	34.83

Para el acero API 5L X-70 (Figura 88) de la Tabla 77 se tiene que hay O con un 22.00% (amarillo), C con un 9.21% (rojo), Fe con un 34.83% (violeta claro), distribuidos también en toda la superficie.

Acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C)

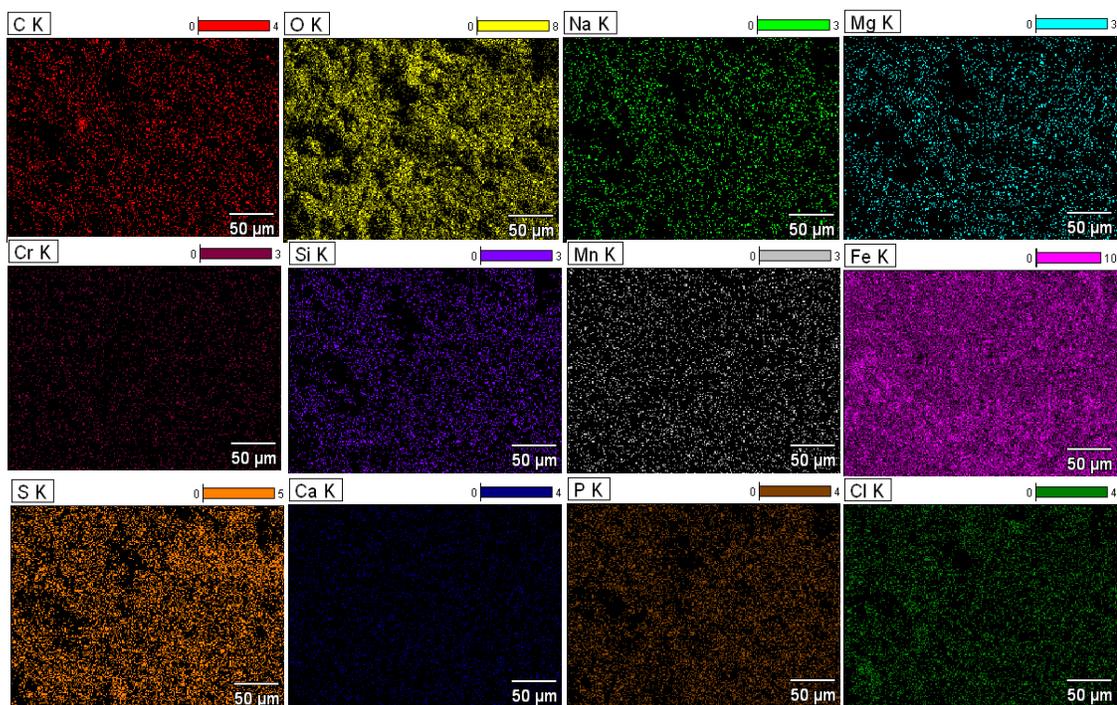
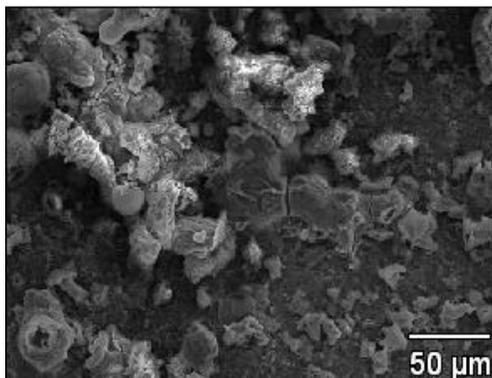


Figura 88.- Mapeo de C, O, Na, Mg, S, Si, P, Cl, Cr, Mn y Fe del acero API 5L X-70 en Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C.



Tabla 77.- Cuantificación de elementos en el mapeo del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C).

Mapeo	% en peso	% atómico
C-K	9.21	22.57
O-K	22.00	40.49
Na-K	0.33	0.43
Mg-K	0.03	0.03
Si-K	0.19	0.20
P-K	0.00	0.00
S-K	0.00	0.00
Cl-K	0.98	0.81
Ca-K	0.00	0.00
Cr-K	0.00	0.00
Mn-K	0.38	0.36
Fe-K	34.83	35.11

Para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% de keroseno adicionado además con H_2S pero a $60^\circ C$ (Figura 89) de la Tabla 78 se tiene: O con un 27.12% (amarillo), C con un 12.84% (rojo), Fe con un 57.81% (violeta claro) y S con un 0.01% (naranja), distribuidos de igual manera en toda la superficie.

Acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H_2S a $60^\circ C$)

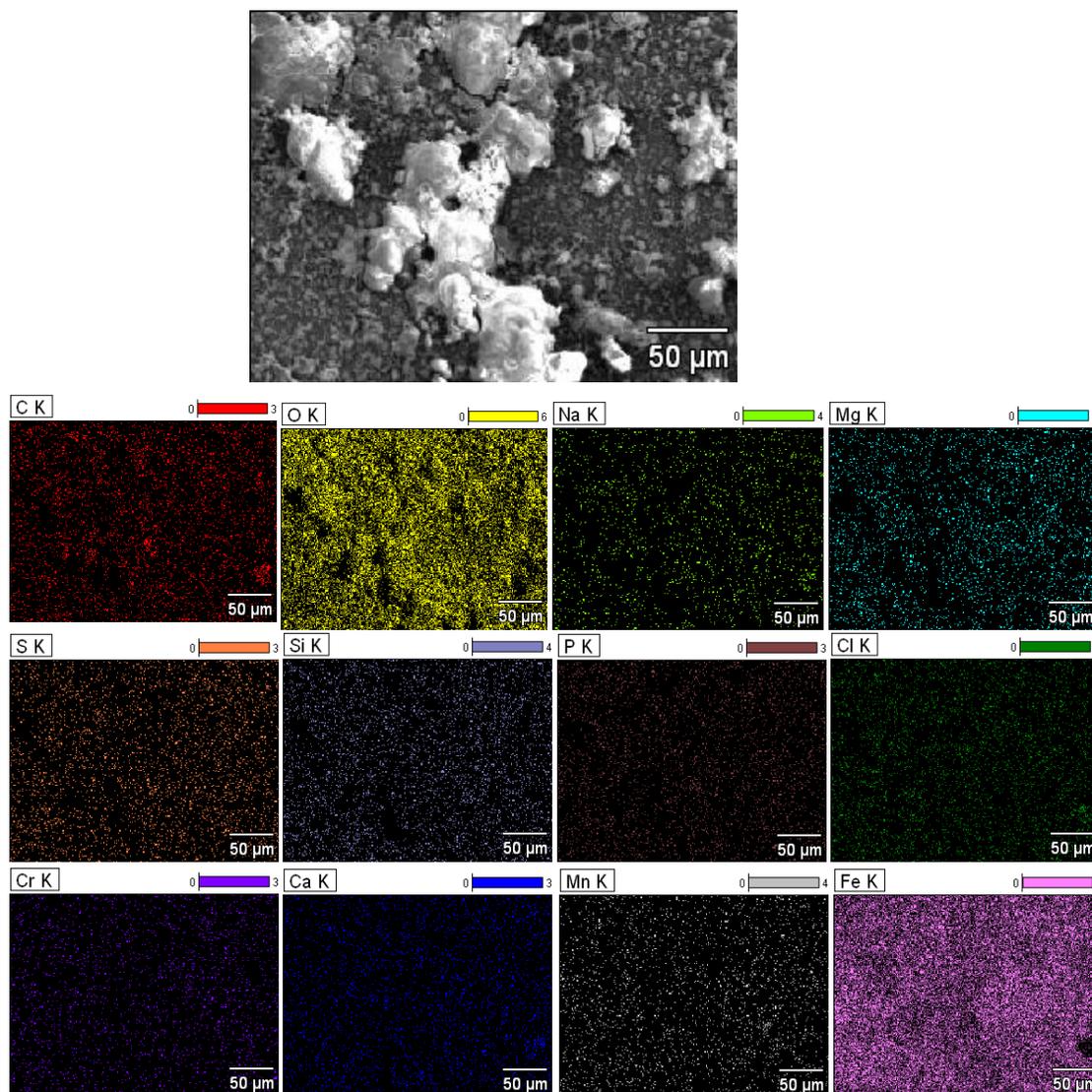


Figura 89.- Mapeo de C, O, Na, Mg, S, Si, P, Cl, Cr, Mn y Fe del acero API 5L X-65 en Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H_2S a $60^\circ C$.



Tabla 78.- Cuantificación de elementos en el mapeo del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 60°C).

Mapeo	% en peso	% atómico
C-K	12.84	27.65
O-K	27.12	43.85
Na-K	0.21	0.24
Mg-K	0.39	0.42
Si-K	0.38	0.35
P-K	0.00	0.00
S-K	0.01	0.01
Cl-K	0.32	0.23
Ca-K	0.17	0.11
Cr-K	0.04	0.02
Mn-K	0.68	0.32
Fe-K	57.81	26.78

Para el acero API 5L X-70 (Figura 90) de la Tabla 79 se tiene O con un 24.37% (amarillo), C con un 5.97% (rojo), Fe con un 64.60% (violeta claro) y S con un 1.40% (naranja), todos se encuentran distribuidos en toda la superficie.

Acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 60°C)

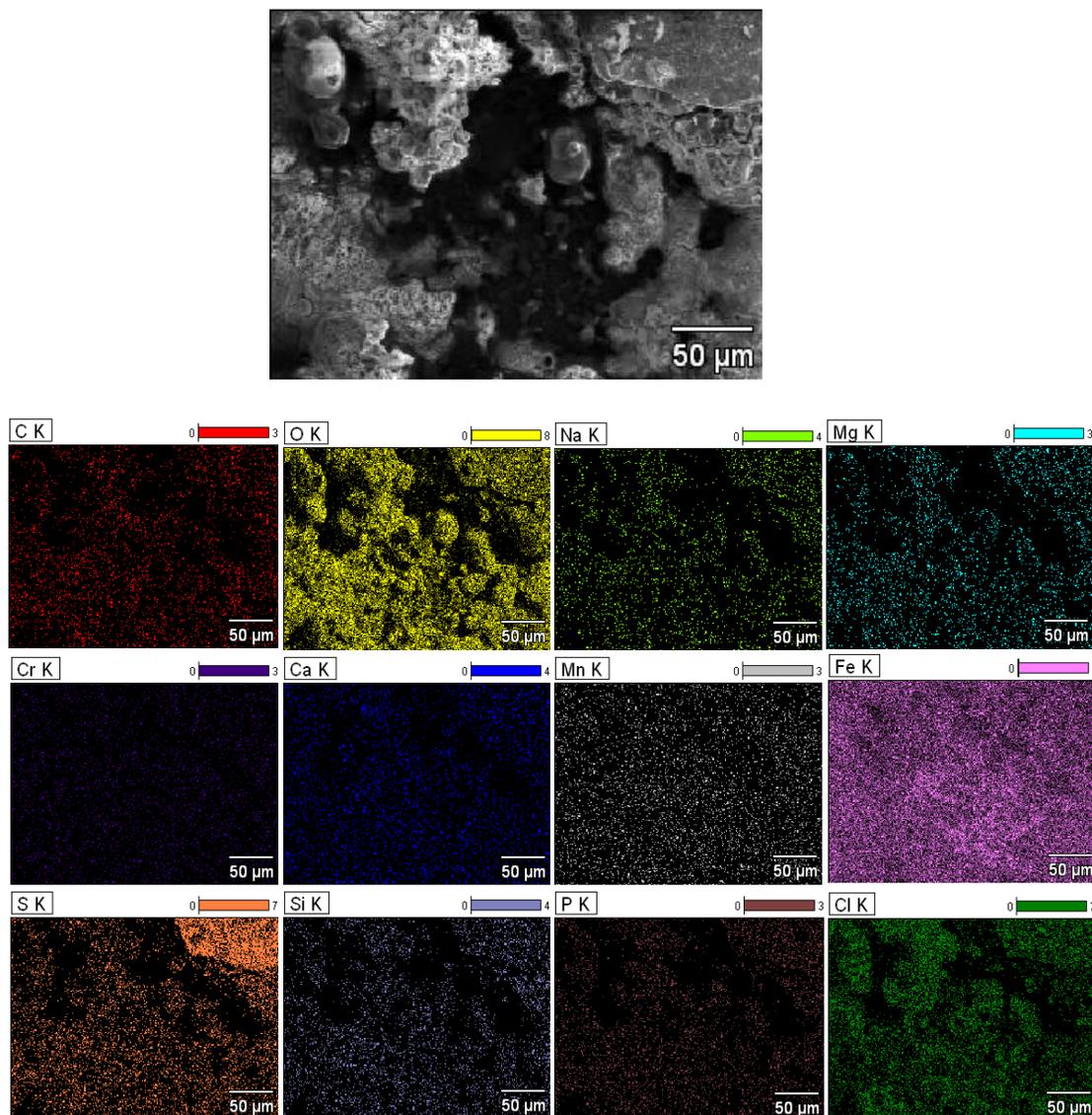


Figura 90.- Mapeo de C, O, Na, Mg, S, Si, P, Cl, Cr, Mn y Fe del acero API 5L X-70 en Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 60°C.



Cabe señalar que en este caso el azufre se concentra aun más en la parte de la esquina superior derecha donde se observa una pequeña porción de una costra o cascarilla que ya ha sido mencionada, por lo que se afirma que está compuesta por algún sulfuro.

Tabla 79.- Cuantificación de elementos en el mapeo del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 60°C).

Mapeo	% en peso	% atómico
C-K	5.97	14.98
O-K	24.37	45.86
Na-K	0.19	0.24
Mg-K	0.04	0.04
Si-K	0.11	0.12
P-K	0.00	0.00
S-K	1.40	1.31
Cl-K	2.51	2.13
Ca-K	0.01	0.01
Cr-K	0.04	0.02
Mn-K	0.73	0.40
Fe-K	64.60	34.83



4.15 Identificación de compuestos presentes en los productos de corrosión mediante la técnica de difracción de rayos X

Para la identificación de óxidos y sulfuros mencionados anteriormente en el EDS se llevó a cabo una mejor identificación de éstos mediante la técnica de difracción de rayos X utilizando además un programa llamado Creafit, el cual cuenta con una buena base de datos para la identificación de las fases presentes en cada uno de los compuestos identificados como se describirá a continuación de manera más detallada.

Todos los patrones de difracción obtenidos para los aceros empleados en los distintos medios, muestran picos asociados a los diferentes productos de corrosión formados sobre diferentes planos cristalográficos.

Para el caso del acero API 5L X-52 en salmuera + 10% de keroseno a 30°C (Figura 91) se tiene la presencia de: Oxido de hierro (Fe_2O_3) a $2\theta = 61.502^\circ$, Magemita cúbica (Fe_2O_3) y Magnetita cúbica (Fe_3O_4) a $2\theta = 75.053^\circ$, Magemita cúbica (Fe_2O_3) a $2\theta = 79.272^\circ$.

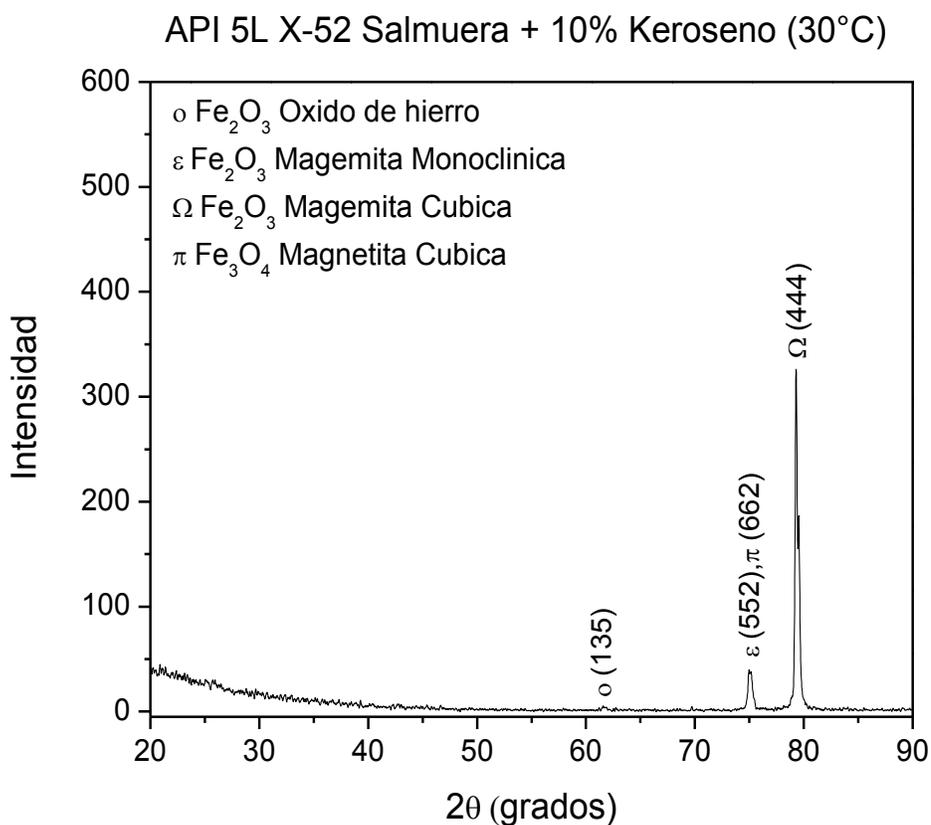
Salmuera + 10% keroseno (30°C)

Figura 91.- Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).

Para el acero API 5L X-65 (salmuera + 10% keroseno a 30°C), Figura 92 se tiene la presencia de Magemita monoclinica (Fe_2O_3) a $2\theta = 64.752^\circ$, Magnetita cúbica (Fe_3O_4) a $2\theta = 74.992^\circ$, Hematita rombohedral (Fe_2O_3) a $2\theta = 79.438^\circ$ y Magemita cúbica (Fe_2O_3) a $2\theta = 82.192^\circ$.

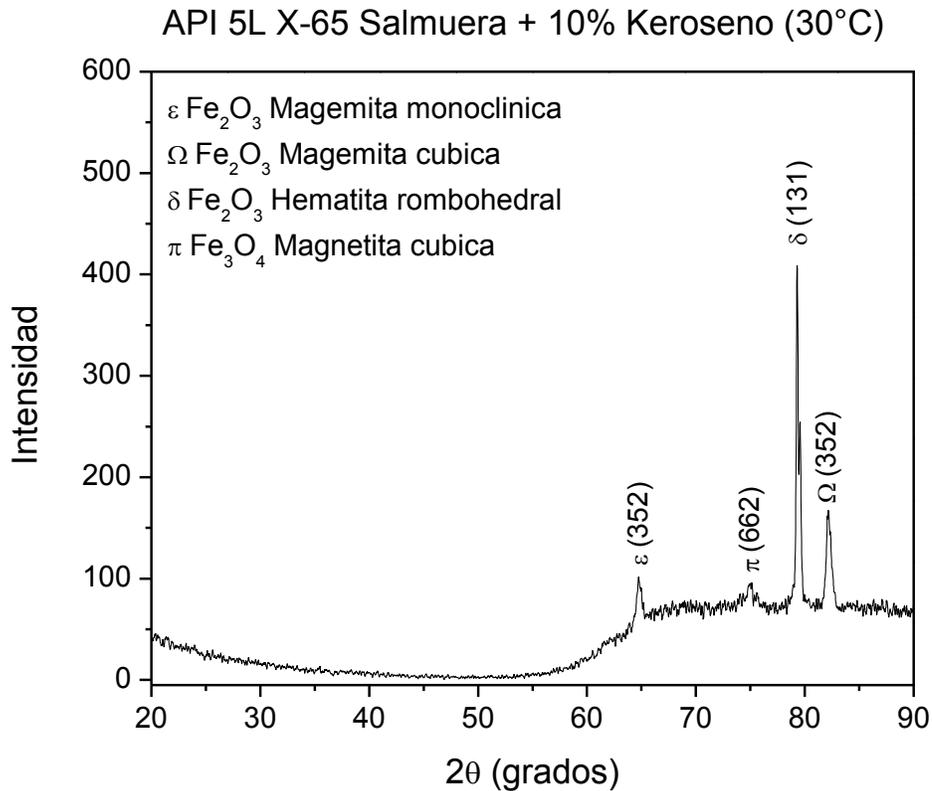


Figura 92.- Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).

Para el acero API 5L X-70 (salmuera + 10% keroseno a 30°C), Figura 93 se tiene la presencia de Oxido de hierro (Fe_2O_3) a $2\theta = 61.502^\circ$, Magemita monoclinica (Fe_2O_3) y Magnetita cúbica (Fe_3O_4) a $2\theta = 75.030^\circ$, Magemita cúbica (Fe_2O_3) a $2\theta = 79.292^\circ$.

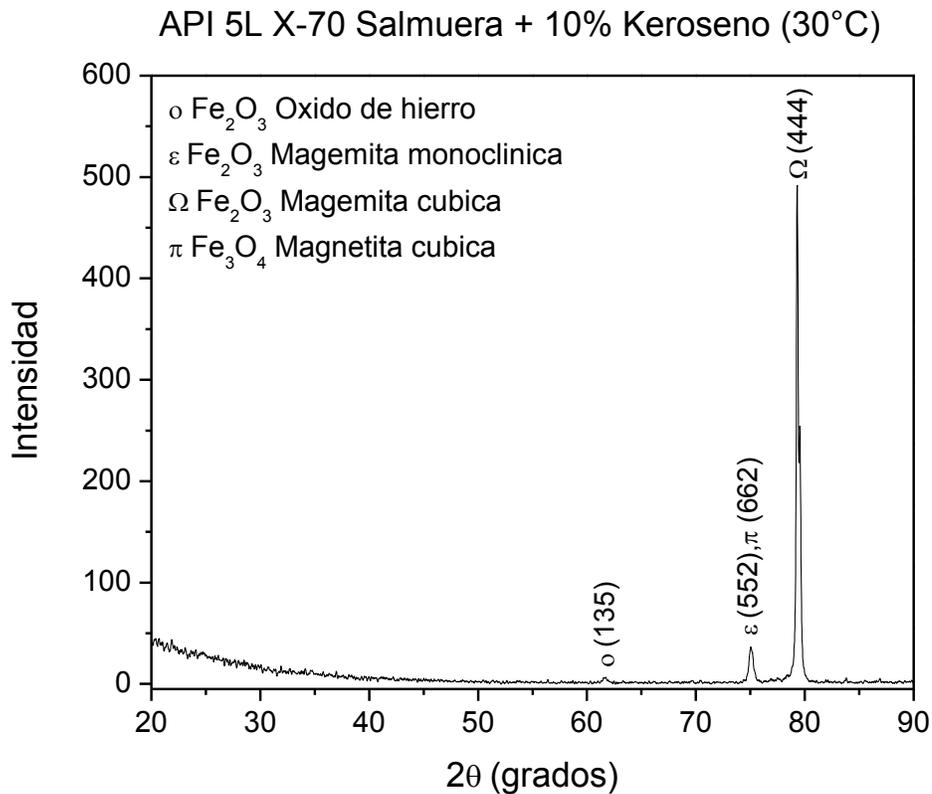


Figura 93.- Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C).

Para el acero API 5L X-52 (salmuera + 10% keroseno a 60°C), Figura 94 se tiene la presencia de Magemita cúbica (Fe_2O_3) a $2\theta = 26.666^\circ$, Magemita cúbica (Fe_2O_3) y Magnetita cúbica (Fe_3O_4) a $2\theta = 30.006^\circ$, Magemita cúbica (Fe_2O_3) y Magnetita cúbica (Fe_3O_4) a $2\theta = 35.266^\circ$, Magemita cúbica (Fe_2O_3) a $2\theta = 44.526^\circ$, Magemita cúbica (Fe_2O_3) a $2\theta = 46.492^\circ$, Hematita rombohedral (Fe_2O_3) a $2\theta = 55.906^\circ$, Oxido de hierro (Fe_2O_3) a $2\theta = 61.053^\circ$, Magemita cúbica (Fe_2O_3) a $2\theta = 64.146^\circ$, Magemita cúbica (Fe_2O_3) a $2\theta = 68.766^\circ$, Hematita rombohedral (Fe_2O_3) a $2\theta = 75.206^\circ$, Hematita rombohedral (Fe_2O_3) a $2\theta = 79.286^\circ$.

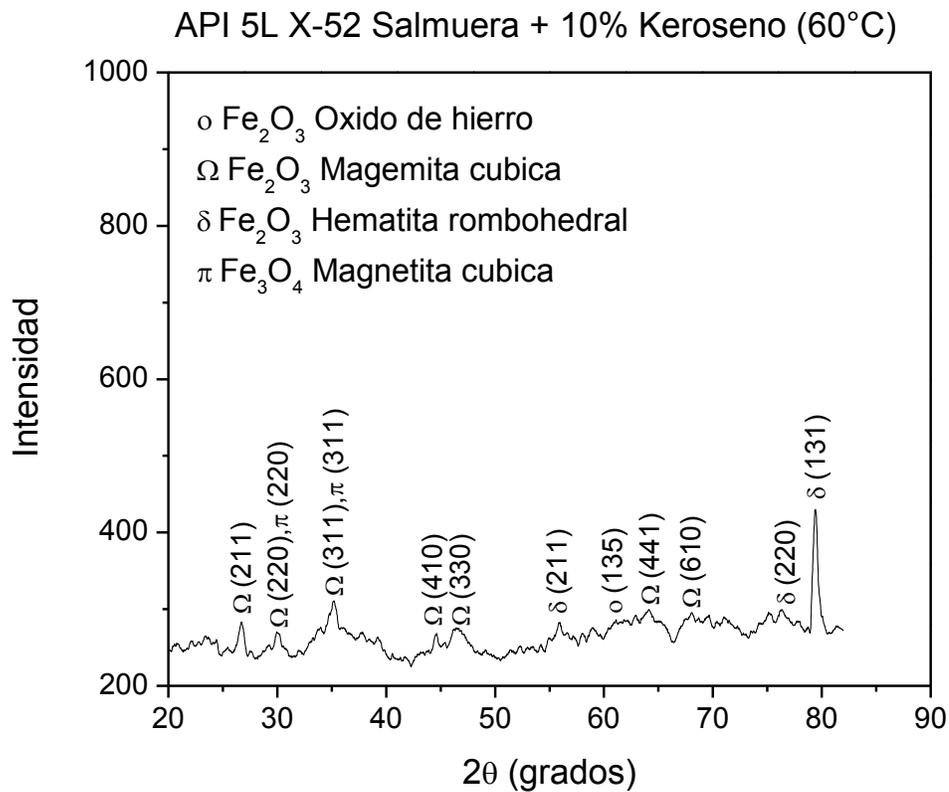
Salmuera + 10% keroseno (60°C)

Figura 94.- Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C).

Para el acero API 5L X-65 (salmuera + 10% keroseno a 60°C), Figura 95 se tiene la presencia de Magemita cúbica (Fe_2O_3) a $2\theta = 44.646^\circ$, Magemita monoclinica (Fe_2O_3) a $2\theta = 64.926^\circ$, Hematita rombohedral (Fe_2O_3) a $2\theta = 79.286^\circ$.

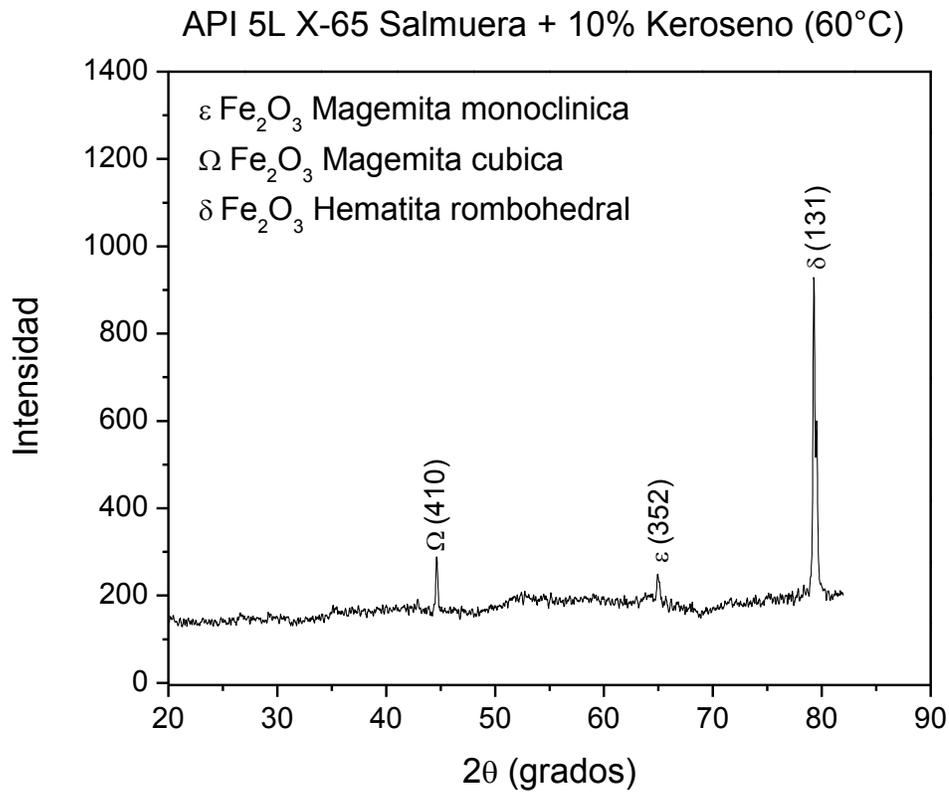


Figura 95.- Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C).

Para el acero API 5L X-70 (salmuera + 10% keroseno a 60°C), Figura 96 se tiene la presencia de Magemita cúbica (Fe₂O₃) a 2θ = 44.609°, Magemita monoclinica (Fe₂O₃) a 2θ = 64.809°, Hematita rombohedral (Fe₂O₃) a 2θ = 79.289°.

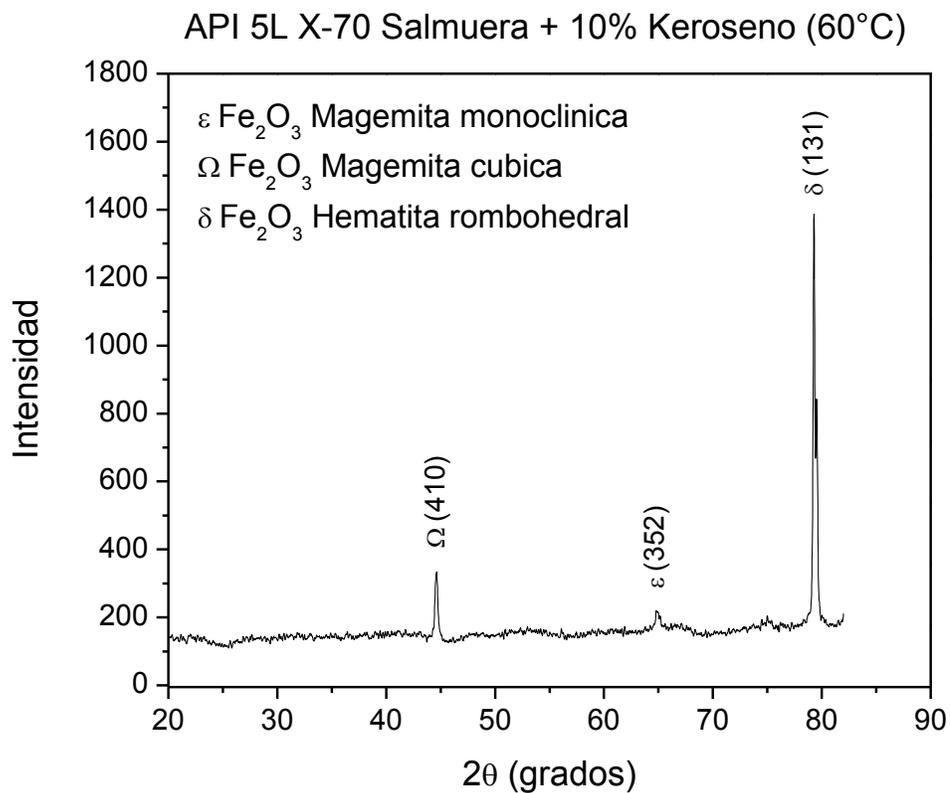


Figura 96.- Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C).

Salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (30°C)

Para el acero API 5L X-52 (salmuera + 10% keroseno + H₂S a 30°C), Figura 97 se tiene la presencia de Mikasaita rombohedral (Fe₂(SO₄)₃) a 2θ = 24.772°, Troilita hexagonal (FeS) a 2θ = 35.552°, Marcasita ortorrómbica (FeS) a 2θ = 61.652°, Magemita monoclinica (Fe₂O₃) y magnetita cúbica (Fe₃O₄) a 2θ = 75.053°, Hematita rombohedral (Fe₂O₃) a 2θ = 79.312°, Pirita cúbica (FeS₂) a 2θ = 83.712°, Marcasita ortorrómbica (FeS₂) a 2θ = 88.512°.

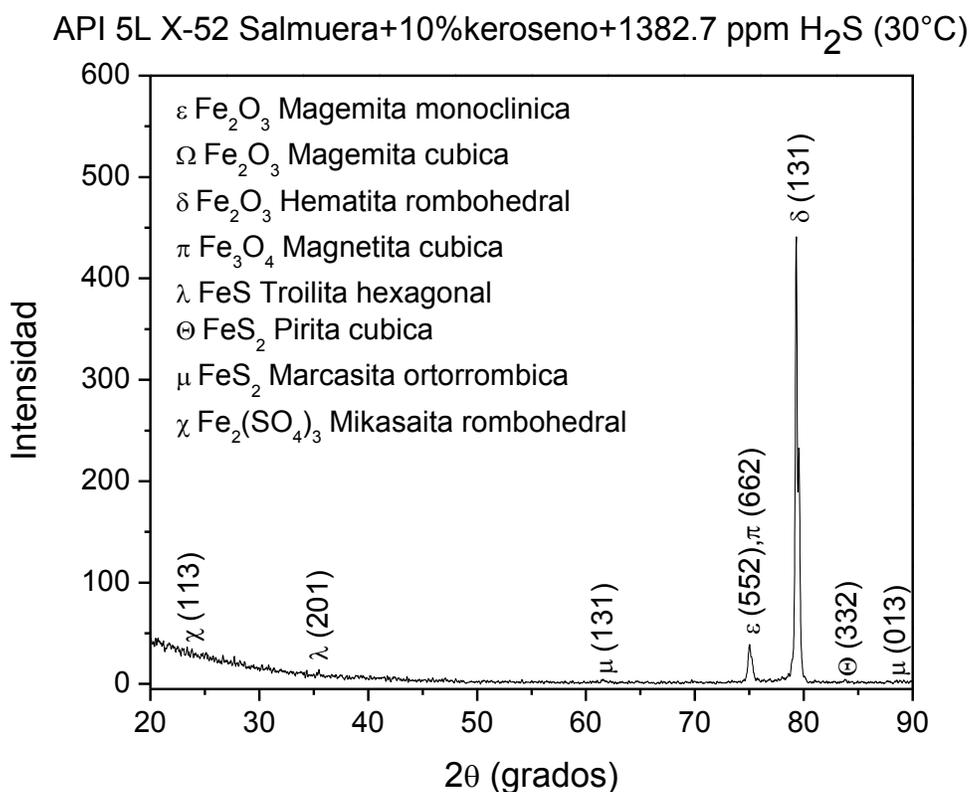


Figura 97.- Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1387.2 ppm H₂S a 30°C).

Para el acero API 5L X-65 (salmuera + 10% keroseno + H₂S a 30°C), Figura 98 se tiene la presencia de Mikasaita rombohedral (Fe₂(SO₄)₃) a 2θ = 32.652°, Marcasita ortorrómbica (FeS) a 2θ = 61.772°, Magemita monoclinica (Fe₂O₃) y magnetita cúbica (Fe₃O₄) a 2θ = 75.053°, Hematita rombohedral (Fe₂O₃) a 2θ = 79.319°, Hematita rombohedral (Fe₂O₃) a 2θ = 84.892° Marcasita ortorrómbica (FeS₂) a 2θ = 89.772°.

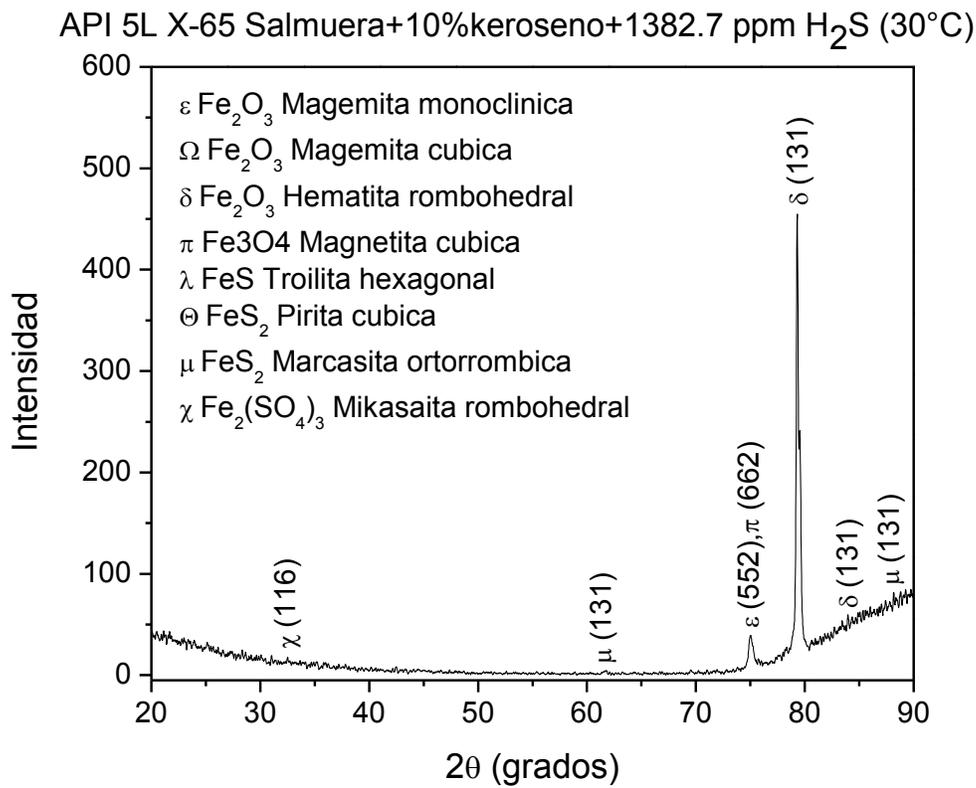


Figura 98.- Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1387.2 ppm H₂S a 30°C).

Para el acero API 5L X-70 (salmuera + 10% keroseno + H₂S a 30°C), Figura 99 se tiene la presencia de Mikasaita rombohedral (Fe₂(SO₄)₃) a 2θ = 32.892°, Marcasita ortorrómbica (FeS) a 2θ = 61.612°, Magemita monoclinica (Fe₂O₃) y magnetita cúbica (Fe₃O₄) a 2θ = 75.032°, Hematita rombohedral (Fe₂O₃) a 2θ = 79.292°, Hematita rombohedral (Fe₂O₃) a 2θ = 84.772°.

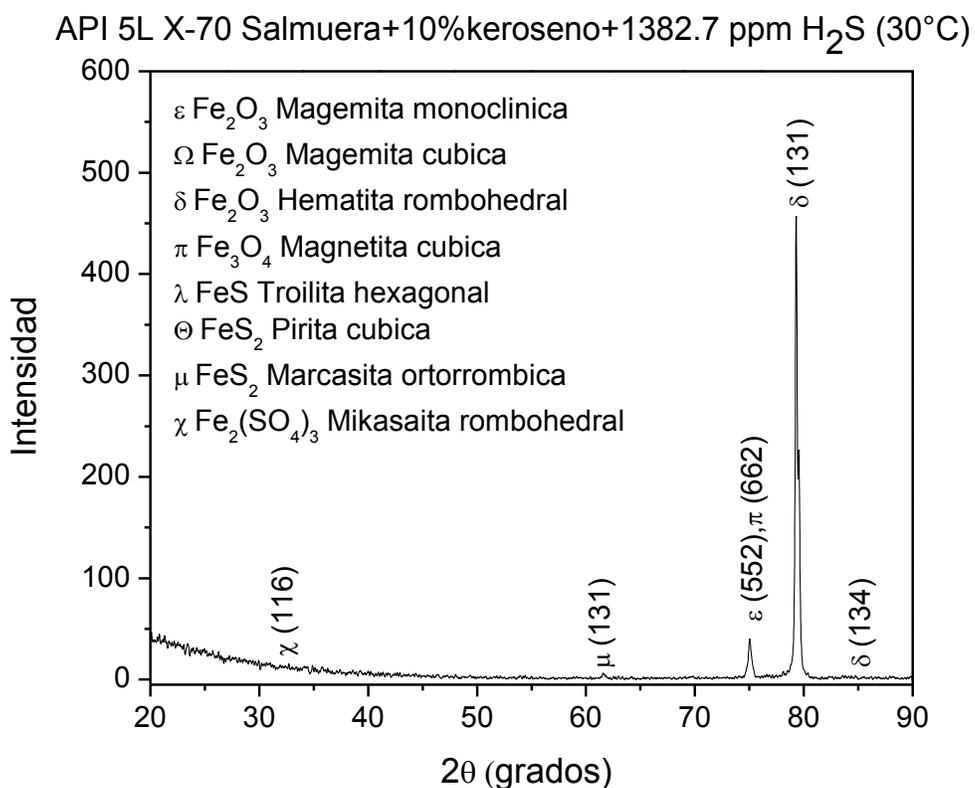


Figura 99.- Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1387.2 ppm H₂S a 30°C).

Salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (60°C)

Para el acero API 5L X-52 (salmuera + 10% keroseno + H₂S a 60°C), Figura 100 se tiene la presencia de Mikasaita rombohedral (Fe₂(SO₄)₃) a 2θ = 24.692°, Troilita hexagonal (FeS) a 2θ = 29.952°, Troilita hexagonal (FeS) a 2θ = 35.572°, magnetita cúbica (Fe₃O₄) a 2θ = 44.712°, Magemita monoclinica (Fe₂O₃) y magnetita cúbica (Fe₃O₄) a 2θ = 75.053°, Hematita rombohedral (Fe₂O₃) a 2θ = 79.352°, Mackinawita tetragonal (FeS) a 2θ = 82.332.

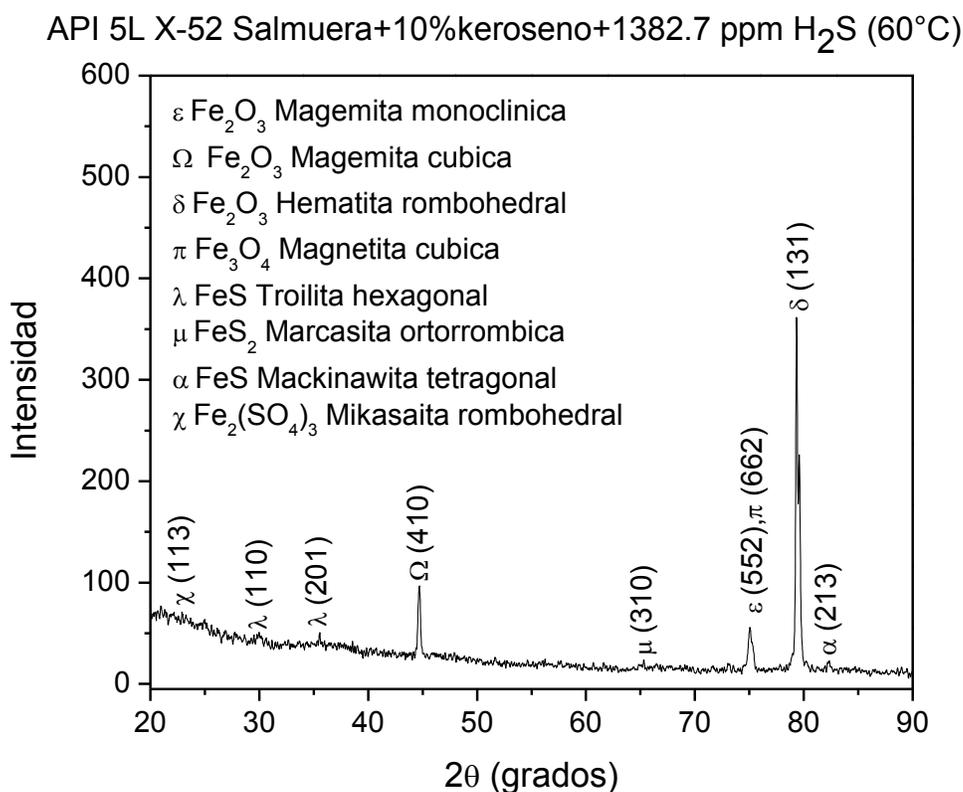


Figura 100.- Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1387.2 ppm H₂S a 60°C).

Para el acero API 5L X-65 (salmuera + 10% keroseno + H₂S a 60°C), Figura 101 se tiene la presencia de Mikasaita rombohedral (Fe₂(SO₄)₃) a 2θ = 24.652°, Troilita hexagonal (FeS) a 2θ = 29.852°, Pirita cúbica (FeS₂) a 2θ = 61.692°, magnetita cúbica (Fe₃O₄) a 2θ = 74.992°, Hematita rombohedral (Fe₂O₃) a 2θ = 79.303°, Magemita monoclinica (Fe₂O₃) y magnetita cúbica (Fe₃O₄) a 2θ = 83.872°, Troilita hexagonal (FeS) a 2θ = 88.832°.

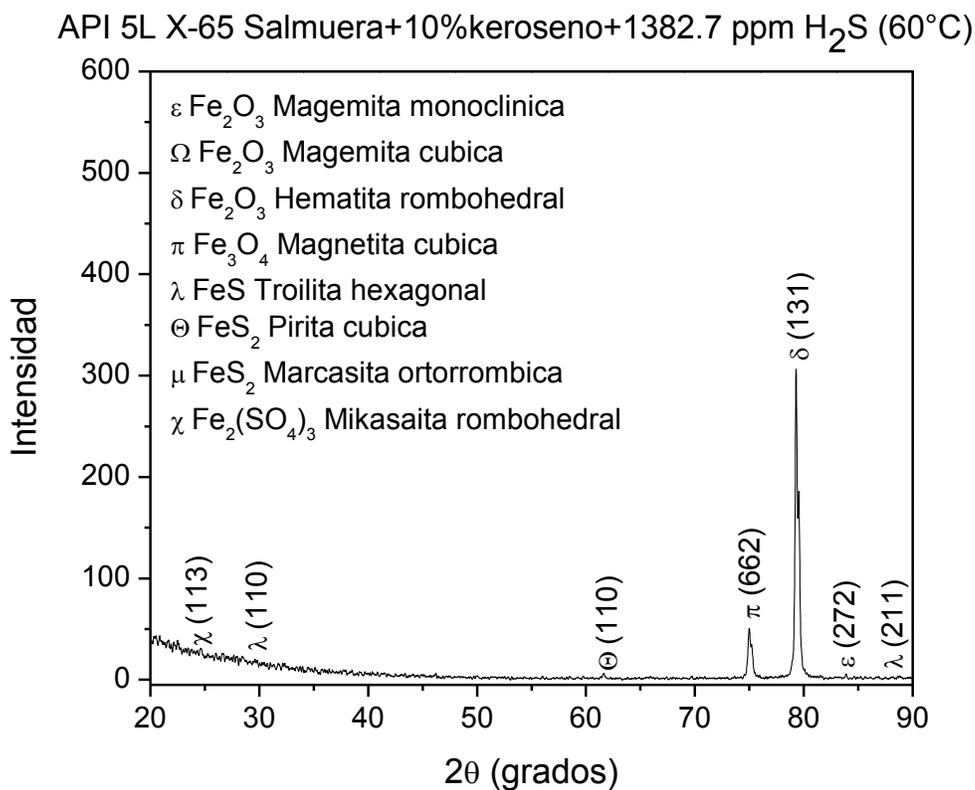


Figura 101.- Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1387.2 ppm H₂S a 60°C).

Para el acero API 5L X-70 (salmuera + 10% keroseno + H₂S a 60°C), Figura 102 se tiene la presencia de Mikasaita rombohedral (Fe₂(SO₄)₃) a 2θ = 21.312°, magnetita cúbica (Fe₃O₄) a 2θ = 30.032°, Mackinawita tetragonal (FeS) a 2θ = 34.529°, Smithita (Fe₉S₁₁) a 2θ = 61.432°, Magemita monoclinica (Fe₂O₃) y magnetita cúbica (Fe₃O₄) a 2θ = 75.053°, Hematita rombohedral (Fe₂O₃) a 2θ = 79.272°, Magemita monoclinica (Fe₂O₃) a 2θ = 83.812°, Troilita hexagonal (FeS) a 2θ = 88.912°.

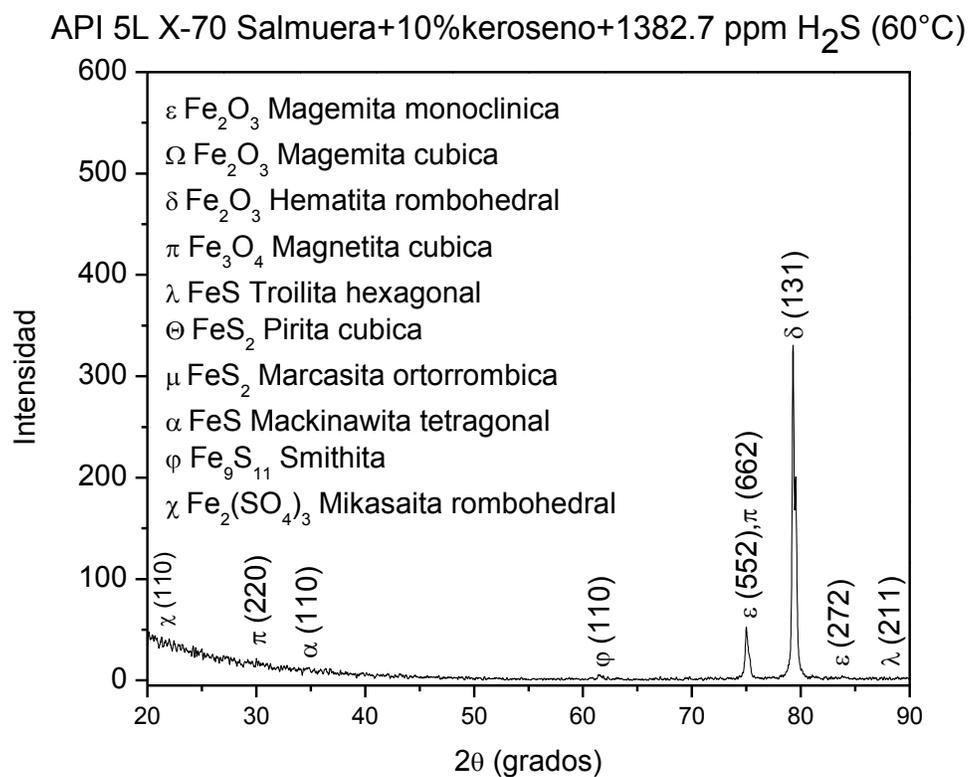


Figura 102.- Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1387.2 ppm H₂S a 60°C).



4.16 Microscopía electrónica de barrido (MEB) de la superficie de los aceros empleados después de remover los productos de corrosión

La remoción o limpieza de los productos de corrosión se llevó a cabo mediante el uso de una solución compuesta por HCl, agua destilada y el reactivo tetramina hexametileno la cual es utilizada en el análisis de fractura de superficie⁽⁴²⁾ y se adaptó para la limpieza de productos de corrosión obteniéndose buenos resultados como se verá más adelante en el análisis de las superficies.

Cada cilindro de acero fue sumergido en la solución antes mencionada por un espacio de 10 segundos, empleando además un baño de ultrasonido, por lo que este tiempo era suficiente para el desprendimiento de los productos de corrosión formados en cada una de las superficies. Se observó un ligero cambio en la coloración de la solución que antes de meter la muestra mostraba un color amarillo translucido y al final de cada limpieza se notaba un cambio con un tono ligero de color café como resultado del desprendimiento de los productos de corrosión adheridos en cada una de las superficies de los aceros empleados en la investigación. Una vez que se limpió la superficie de cada muestra de los aceros se llevaron al microscopio electrónico de barrido (MEB) para observar el estado en que se encontraban y observar si sufrieron algún daño como se muestra en las Figuras 103-110. En general se observa una buena remoción de los productos de corrosión a bajos aumentos y a mayores aumentos en todos los casos se observa que se forman picaduras en la superficie, en algunos casos mucho más grandes debidas a la disolución de la ferrita causada por la interacción de cada uno de los medios ácidos empleados.

De la Figura 103 se observa a bajas magnificaciones las micrografías de los aceros utilizados en la investigación en un medio con salmuera + 10% de keroseno a 30°C, donde se llevó a cabo de manera adecuada la limpieza o remoción de los productos de corrosión, además se observa que la superficie si sufre un daño en su superficie por lo que se decidió analizar las superficies a mayores aumentos.

Salmuera + 10% keroseno (30°C)

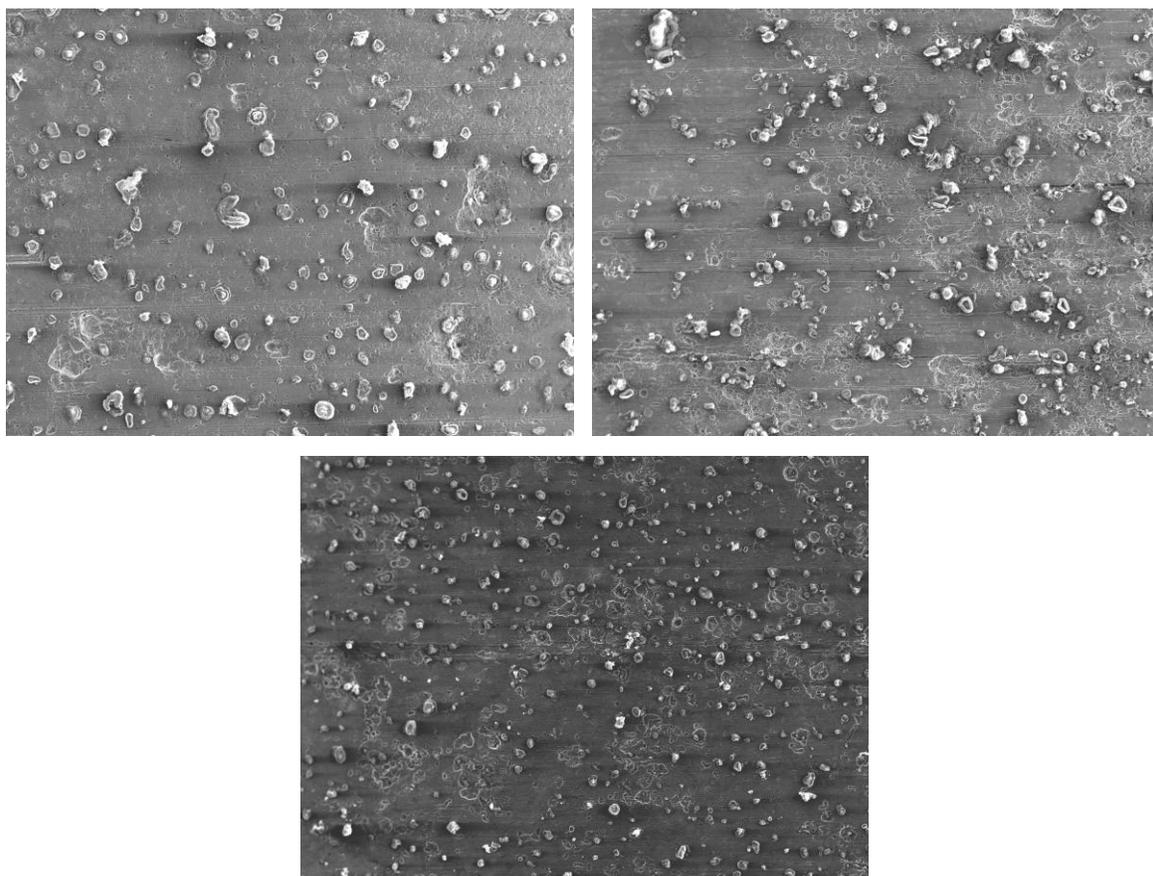


Figura 103.- Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 30°C tomados a bajos aumentos (100X).

En la Figura 104 las micrografías tomadas a mayores magnificaciones (500X) se observa en cada una de las superficies de los aceros un daño causado por el medio empleado en este caso con la salmuera + 10% de keroseno. Se observan picaduras de una profundidad considerable, provocadas por la disolución de material en los aceros API 5L X-52 y X-65. Se aprecian daños de menor consideración en el acero API 5L X-70 que a final de cuentas en la mayoría de los casos tuvo el mejor comportamiento con respecto a la velocidad de corrosión.

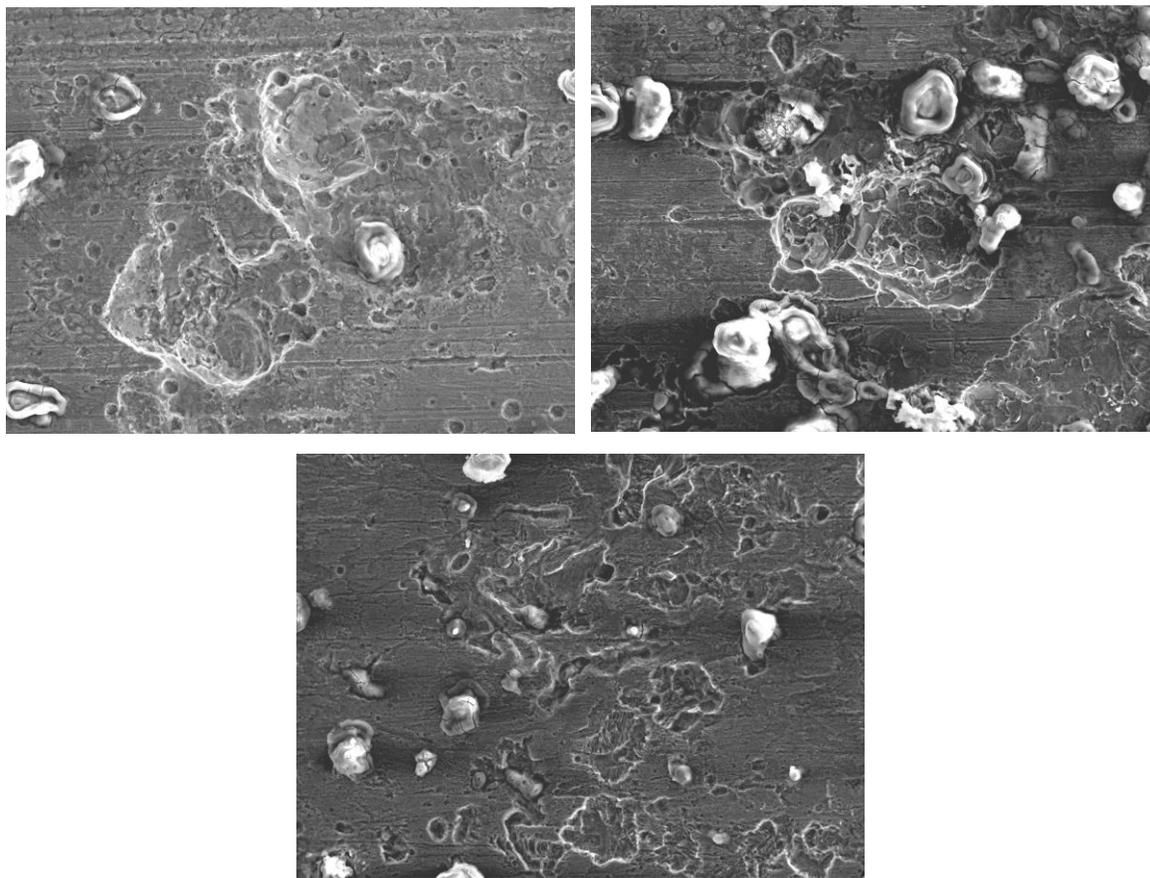


Figura 104.- Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 30°C tomados a mayores aumentos (1000X).

Para el medio con salmuera + 10% de keroseno pero ahora a 60°C a bajas magnificaciones en la Figura 105 nuevamente se tienen las superficies de los 3 aceros utilizados en la investigación y se observa también una buena remoción de los productos de corrosión para los aceros API 5L X-52 y X-65. Sin embargo, para el API 5L X-70 no se logra quitar en su totalidad a los productos de corrosión. En esta imagen ya se observa un mayor daño causado por el medio que junto con el incremento de la temperatura provocan un mayor deterioro de la superficie para los aceros API 5L X-52 y X-65.

Salmuera + 10% keroseno (60°C)

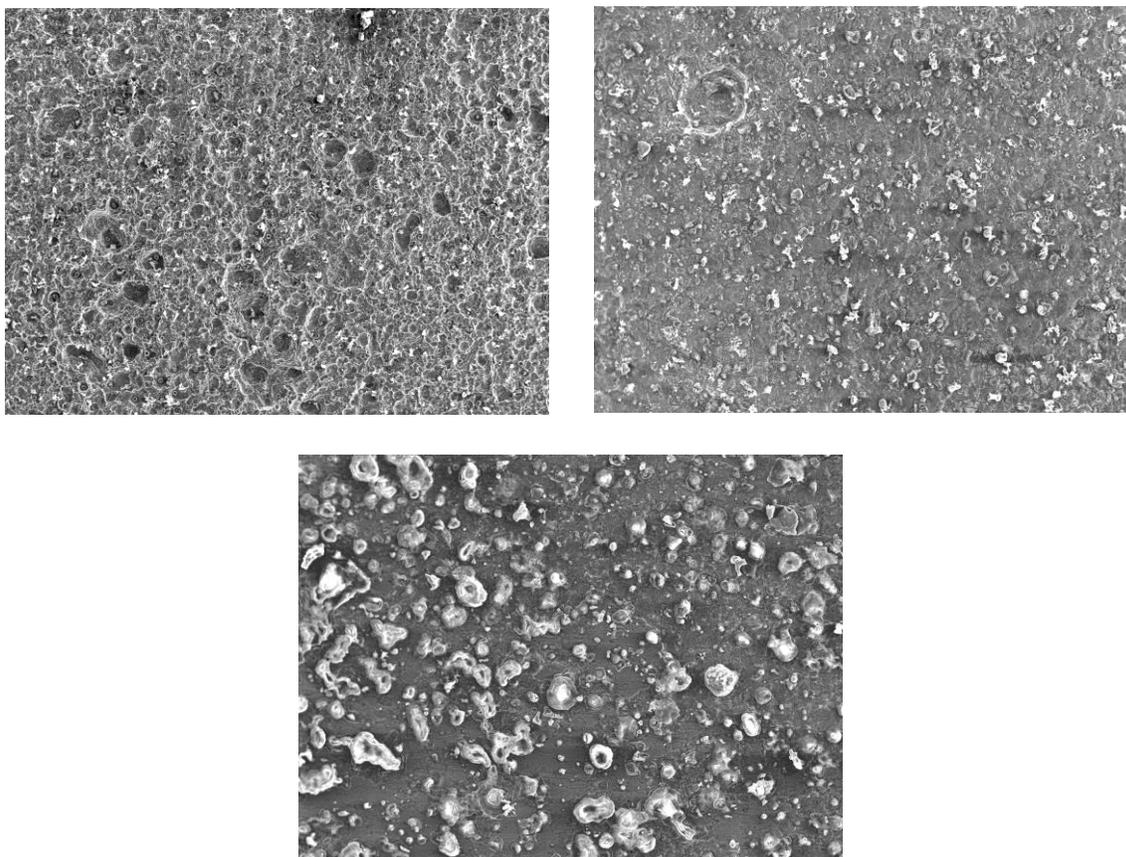


Figura 105.- Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 60°C tomados a bajas aumentos (100X).

El API 5L X-70 al parecer no sufre un daño visible en su superficie. Al pasar a mayores magnificaciones se observa en la Figura 106 que efectivamente los aceros que sufren un daño considerable en su superficie con picaduras de profundidad considerable y en casi toda su superficie fueron los API 5L X-52 y X-65, aquí el acero API 5L X-70 no sufre daño debido a que a pesar de la limpieza aun persisten restos de los productos de corrosión, por lo que se atribuye un mejor comportamiento ante la velocidad de corrosión de este acero ante los otros 2.

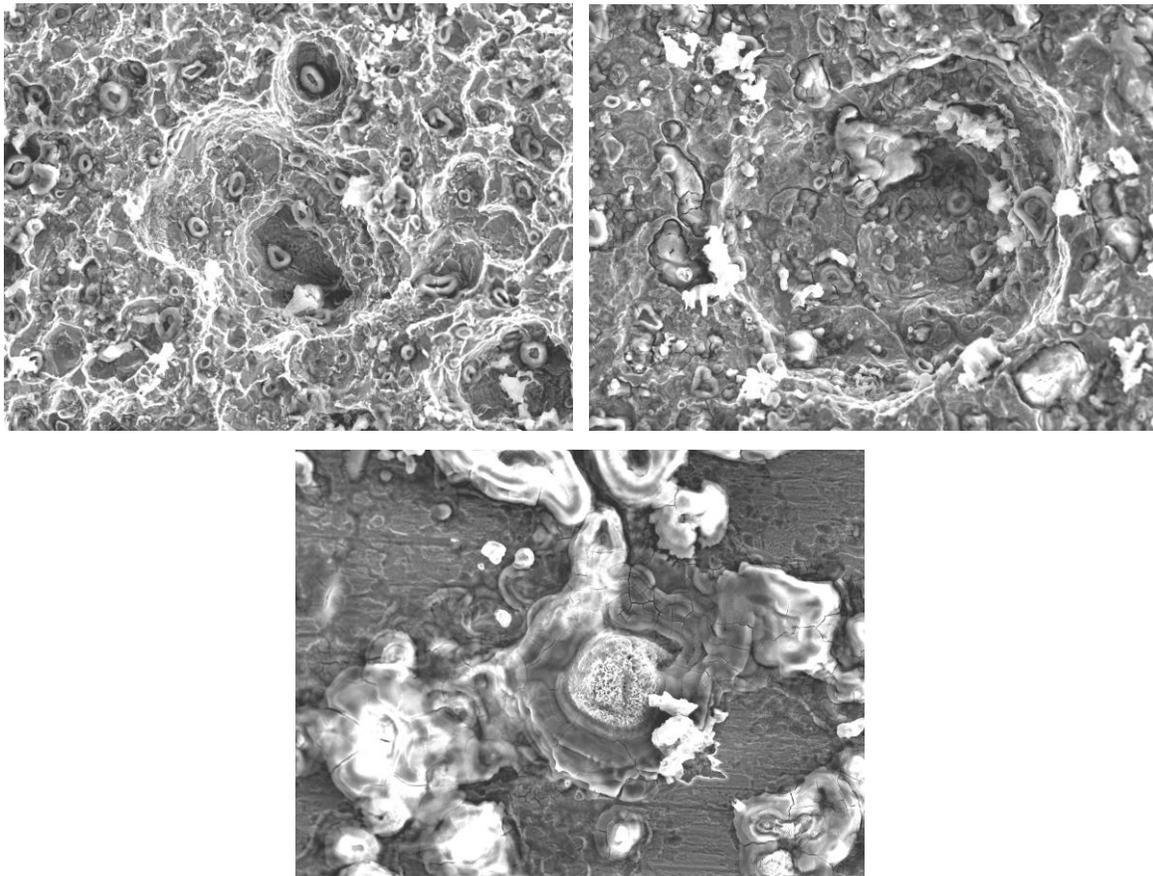


Figura 106.- Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno a 60°C tomados a mayores aumentos (1000X).



También como ya se mencionó con la labor que ejercen en conjunto elementos como el cromo, el cobre y el níquel que ayudan a abatir la corrosión por la estabilidad que logran dar en cuanto a la formación de sus óxidos como lo han estudiado algunos autores y se ha mencionado anteriormente en otra sección del análisis de resultados.

Para un medio ahora mucho más agresivo como lo es el que contiene salmuera + 10% de keroseno adicionado con H_2S a $30^\circ C$, en la Figura 107 nuevamente a bajas magnificaciones se observan las superficies de los 3 aceros empleados y se confirma de nuevo la buena remoción de los productos de corrosión, dejando al descubierto además el daño severo de la superficie de cada uno de ellos.

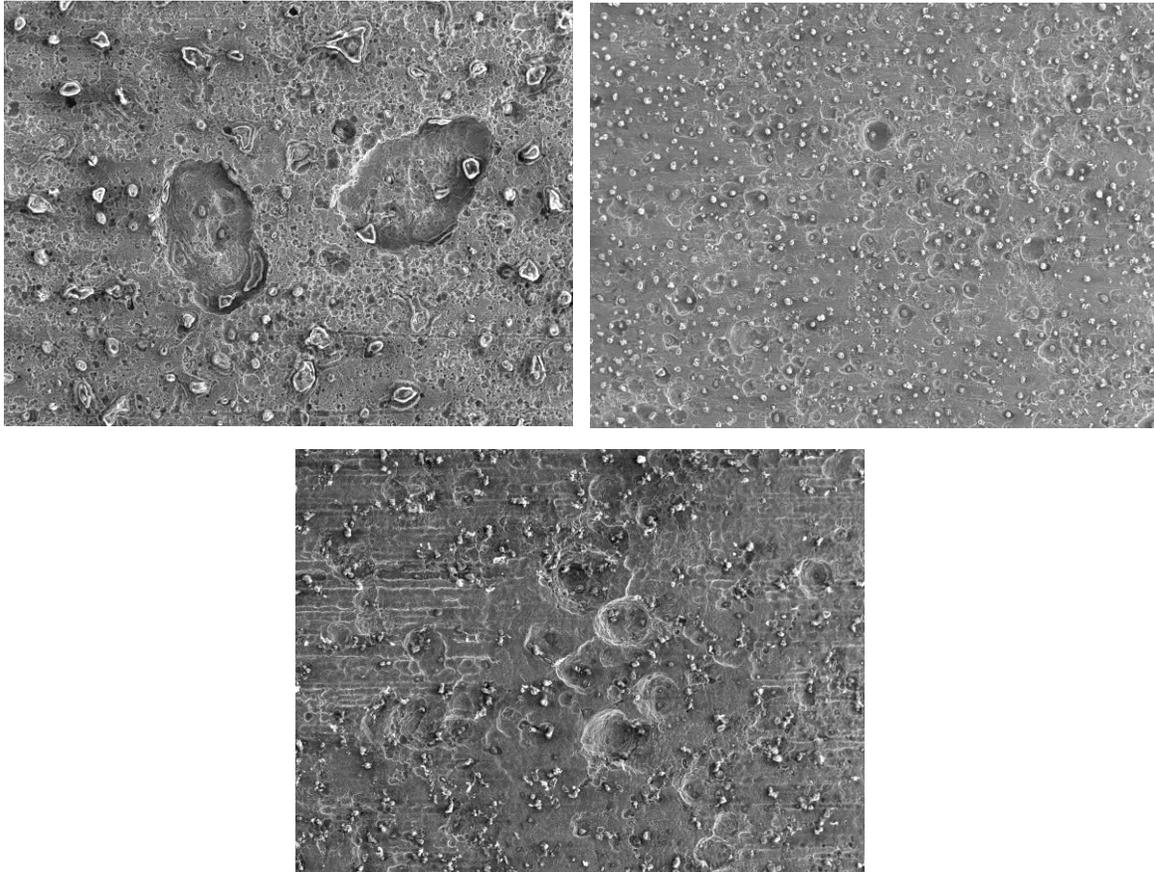
Salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (30°C)

Figura 107.- Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C tomados a bajos aumentos (100X).

El daño severo causado por el medio ahora más agresivo se observa en la Figura 108 con una mayor disolución de material dejando como resultado picaduras de gran profundidad en todos aceros utilizados, además se aprecia una especie de pequeños troncos que en principio se pensó fueran inclusiones pero al final resultó falso ya que se les efectuó un microanálisis como se observa más adelante.

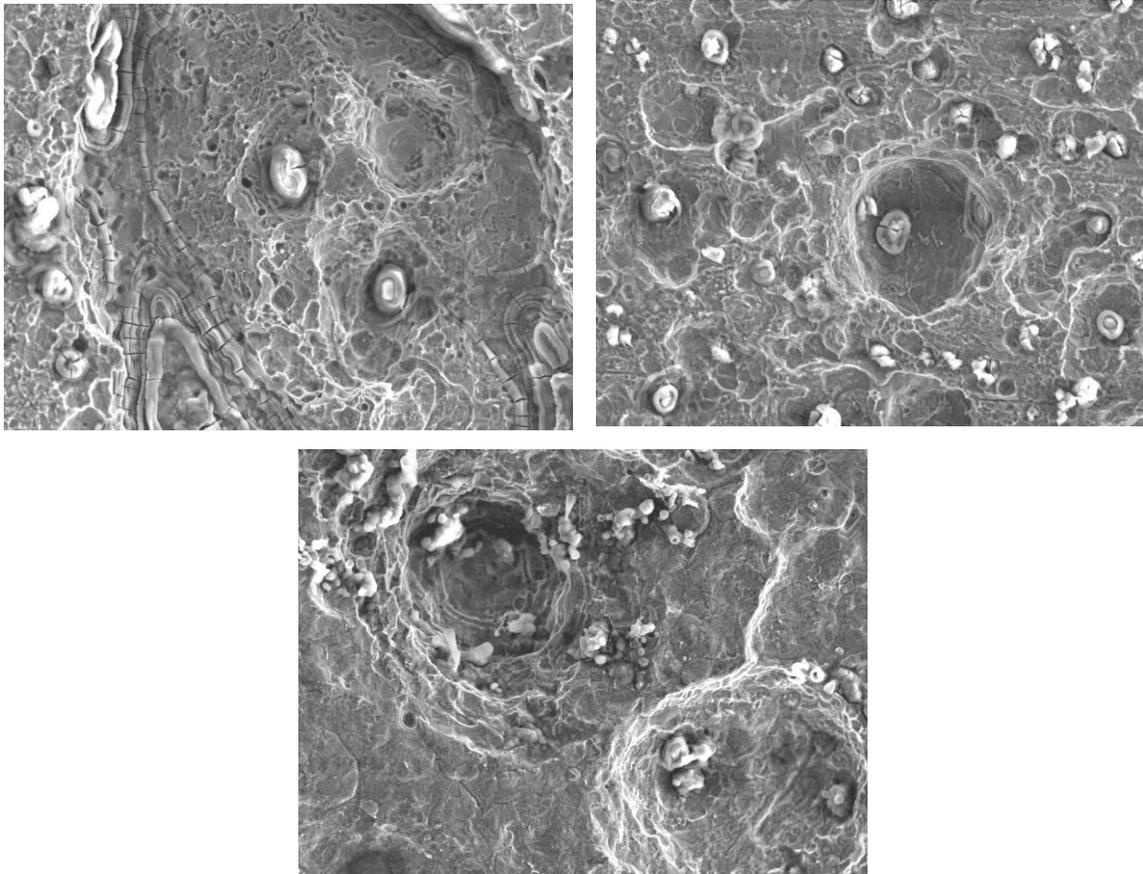


Figura 108.- Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C tomados a mayores aumentos (1000X).

Por último en esta sección se tiene el medio agresivo con salmuera + 10% de keroseno adicionado además con H₂S a 60°C de la Figura 109 a bajas magnificaciones de nueva cuenta existe una remoción satisfactoria de los productos de corrosión, aunque en este caso el acero que sufre menos daño en la superficie es el API 5L X-52 y los otros 2 es decir el API 5L X-65 y X-70 si presentan daños severos con picaduras considerables.

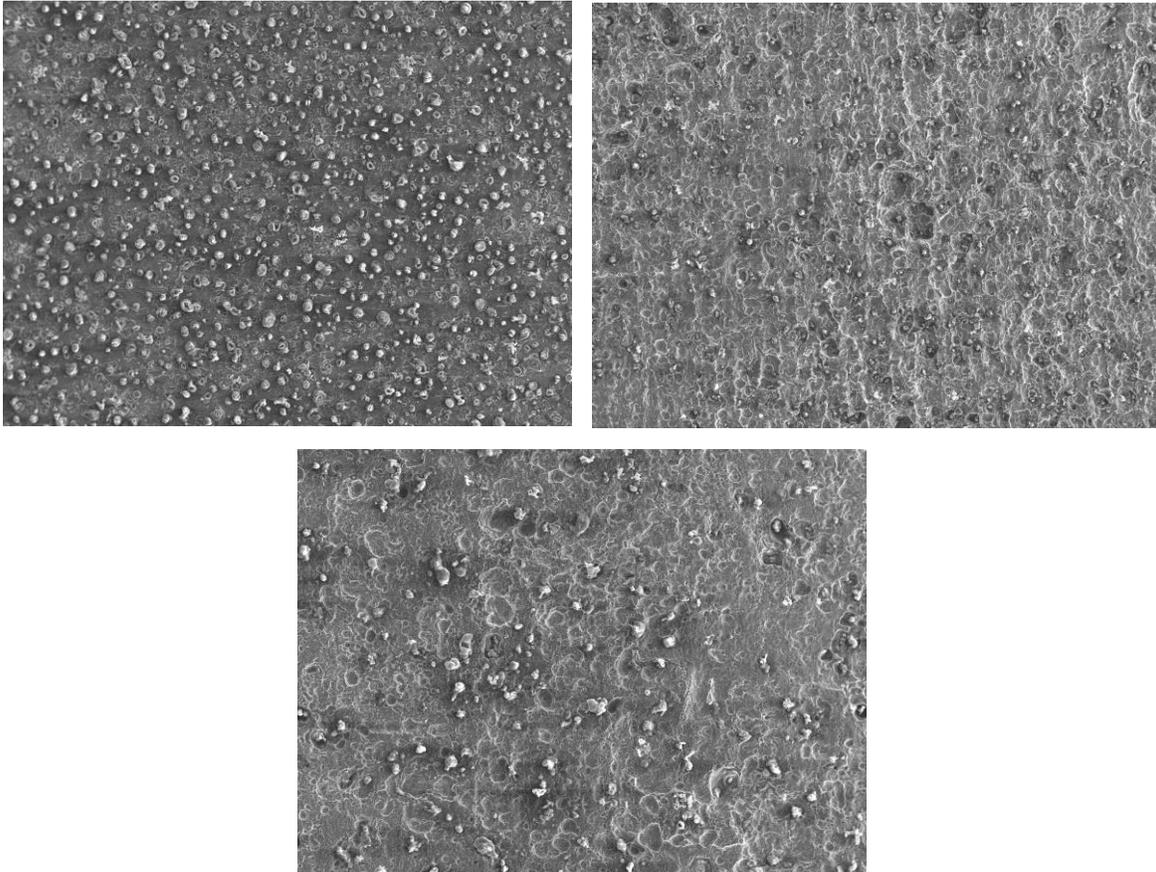
Salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (60°C)

Figura 109.- Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C tomados a bajos aumentos (100X).

Al pasar a mayores magnificaciones por encima de 1000 (Figura 110), efectivamente se logra observar que el acero que sufre un daño mínimo es el API 5L X-52 y los otros 2 al contrario presentan picaduras con una profundidad de consideración debida a la disolución de material en la superficie.

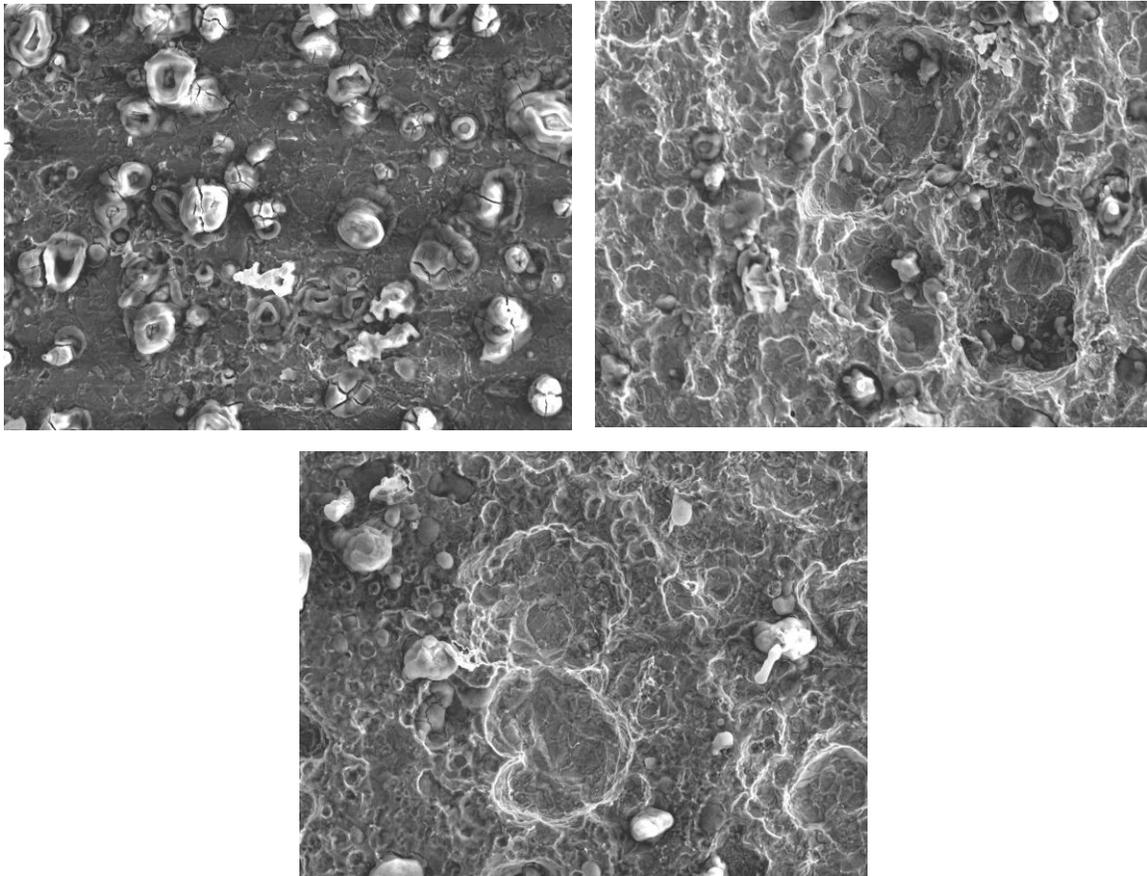


Figura 110.- Limpieza de los productos de corrosión formados para los aceros (a) API 5L X-52, (b) API 5L X-65 y (c) API 5L X-70 en salmuera + 10% keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C tomados a mayores aumentos (1000X).



4.17 Microanálisis por EDS en la superficie de cada uno de los aceros seleccionados, después de llevar a cabo la limpieza y remoción de productos de corrosión

Se llevó a cabo un análisis en 2 zonas de cada una de las superficies de los aceros estudiados. La zona denominada como Z1 representa una región en donde se pensaba en un principio se trataría de inclusiones por el aspecto que tienen comparándolas con algunos otros autores⁽⁴²⁾ que las han estudiado y tienen una forma similar a las zonas de análisis, pero con los resultados encontrados se descartó que se trataría de inclusiones más bien se trata aún de remanentes de los productos de corrosión y al parecer tienen la forma de una especie de raíz en donde crecen inicialmente dichos productos dando la pauta para futuros trabajos.

La zona denominada como Z2 en todos los casos presenta una considerable disminución de la cantidad de oxígeno y carbono pero a su vez existe ya una mayor presencia del Fe lo cual nos indica que se trata del contenido en cada uno de los aceros así como de la presencia de otros elementos característicos de estos como lo son el silicio y el manganeso.

En la Figura 111 se tiene al acero API 5L X-65 (salmuera + 10% keroseno a 30°C), se realizó el microanálisis en 2 zonas una marcada como la zona Z1 que se creía fuera alguna inclusión y la zona Z2 que corresponde a la superficie del acero ya limpia.

Acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C)

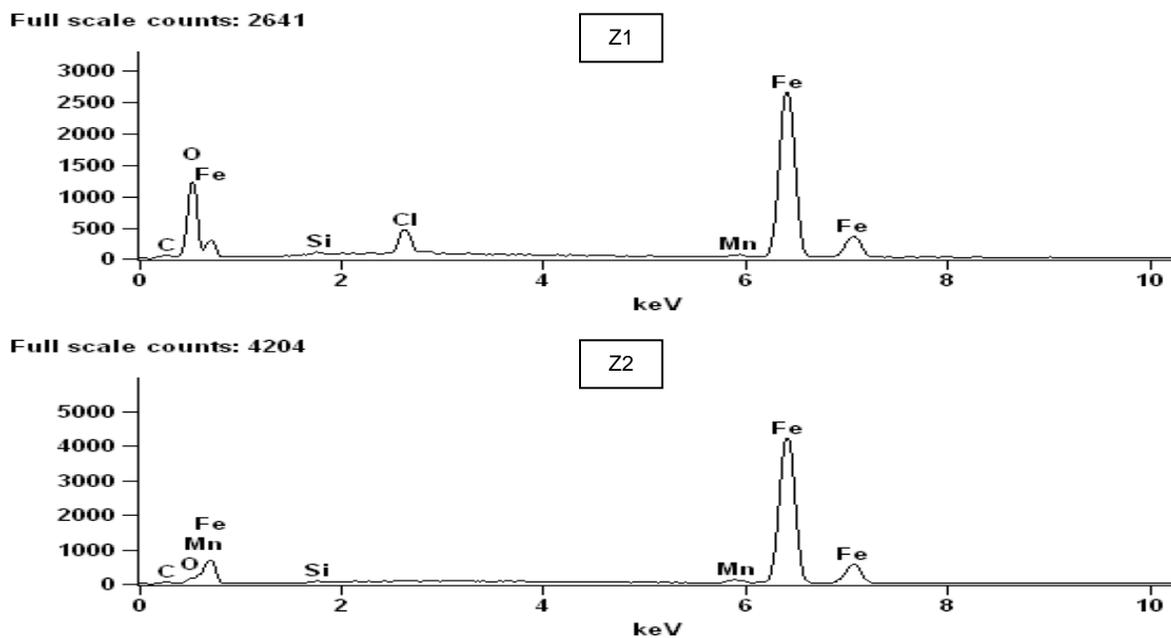
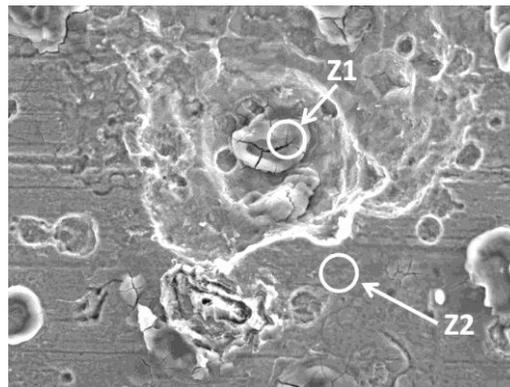


Figura 111.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C), después de limpiar la superficie (1000X).



De esta manera de la Tabla 80 se tiene para la zona Z1 Fe con un 58.22% en peso, C con un 9.06%, O con un 28.89%, por lo que esta zona está conformada por restos de los óxidos que formaron parte de los productos de corrosión. Para la zona Z2 se tiene ahora Fe con un 88%, C con un 8.65%, O con un 1.74%, Si con un 0.20% y Mn con un 1.22%, por lo que observa el contenido de oxígeno disminuyó considerablemente y aparecen ya cantidades mayores de silicio y manganeso pertenecientes al acero.

Tabla 80.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C), después de limpiar la superficie.

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	9.06	20.35
O-K	28.89	48.70
Si-K	0.17	0.17
Cl-K	3.04	2.31
Mn-K	0.62	0.30
Fe-K	58.22	28.13

Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	8.65	29.54
O-K	1.74	4.47
Si-K	0.20	0.29
Cl-K	0.00	0.00
Mn-K	1.22	0.91
Fe-K	88.19	64.79

En la Figura 112 para el acero API 5L X-70 (salmuera + 10% keroseno a 30°C), en donde para la zona Z1 a partir de la Tabla 81 se tiene Fe con un 59.90%, C con un 10.14%, O con un 27.38%, así de nueva cuenta se tienen restos de óxidos de los productos de corrosión. Para la zona Z2 Fe con un 74%, C con un 11.15%, O con un 12.35%, Si con un 0.32%, Mn con un 0.90% y ahora aparece el Cr con un 0.15%, por lo cual se trata de elementos correspondientes al acero.

Acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C)

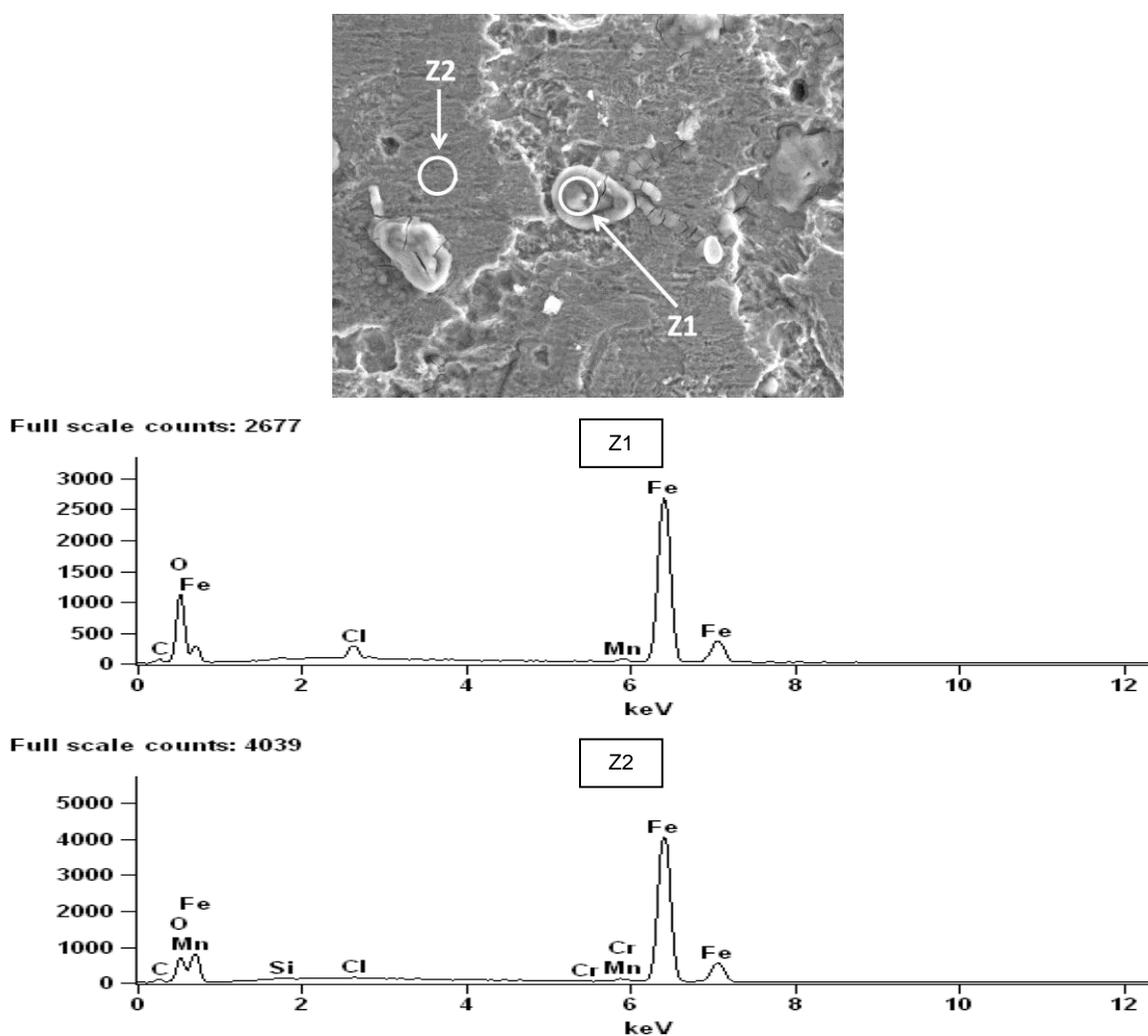


Figura 112.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C), después de limpiar la superficie (1000X).



Tabla 81.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno a 30°C), después de limpiar la superficie.

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	10.14	22.85
O-K	27.38	46.33
Si-K	0.00	0.00
Cl-K	1.86	1.42
Mn-K	0.72	0.35
Cr-K	0.00	0.00
Fe-K	59.90	29.04

Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	11.15	30.15
O-K	12.35	25.06
Si-K	0.32	0.00
Cl-K	0.33	0.30
Mn-K	0.90	0.53
Cr-K	0.15	0.09
Fe-K	74.81	43.50

En la Figura 113 el acero API 5L X-52 (salmuera + 10% keroseno a 60°C), y de acuerdo a la Tabla 82 para la zona Z1 se tiene Fe con un 55.37%, C con un 11.59%, O con un 30.61%, se trata de nuevo de la presencia de restos de óxidos. Para la zona Z2 se tiene Fe con un 87.06%, C con un 8.40%, O con un 3.16%, Si con un 0.21%, Mn con un 1.17%, siendo nuevamente elementos contenidos únicamente en el acero.

Acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C)

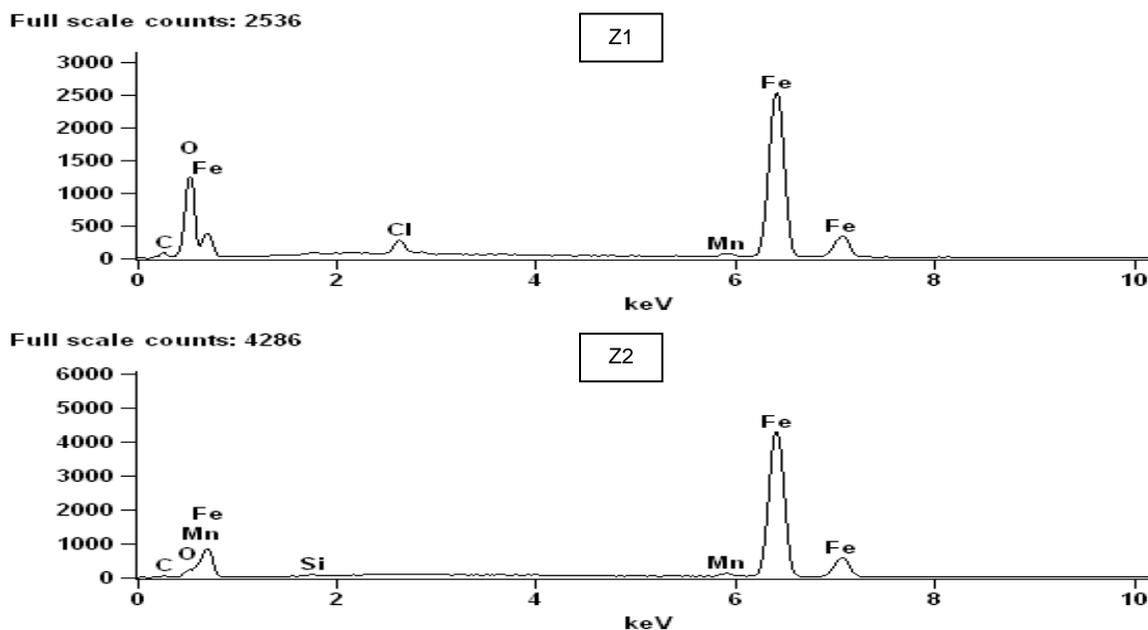
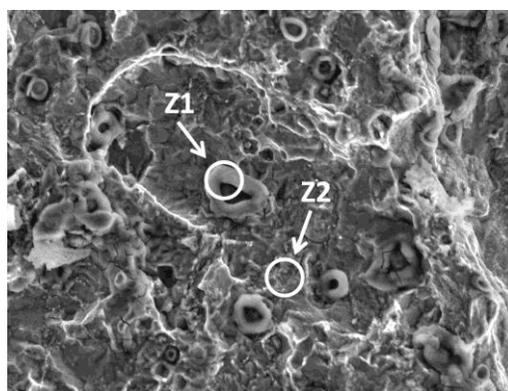


Figura 113.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C), después de limpiar la superficie (1000X).



Tabla 82.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno a 60°C), después de limpiar la superficie.

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	11.59	24.56
O-K	30.61	48.70
Si-K	0.00	0.00
Cl-K	1.50	1.08
Mn-K	0.93	0.43
Fe-K	55.37	25.23

Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	8.40	28.14
O-K	3.16	7.94
Si-K	0.21	0.30
Cl-K	0.00	0.00
Mn-K	1.17	0.86
Fe-K	87.06	62.75

En la Figura 114 el acero API 5L X-52 (salmuera + 10% keroseno + H₂S a 30°C), de la Tabla 83 para la zona Z1 se tiene Fe con un 52.15%, C con un 12.02%, O con un 33.48%, se trata de nueva cuenta de restos de óxidos. Para la zona Z2 existe Fe con un 74.80%, C con un 14.07%, O con un 9.76%, Si con un 0.34%, Mn con un 1.03%, siendo elementos correspondientes a la superficie del acero.

Acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C)

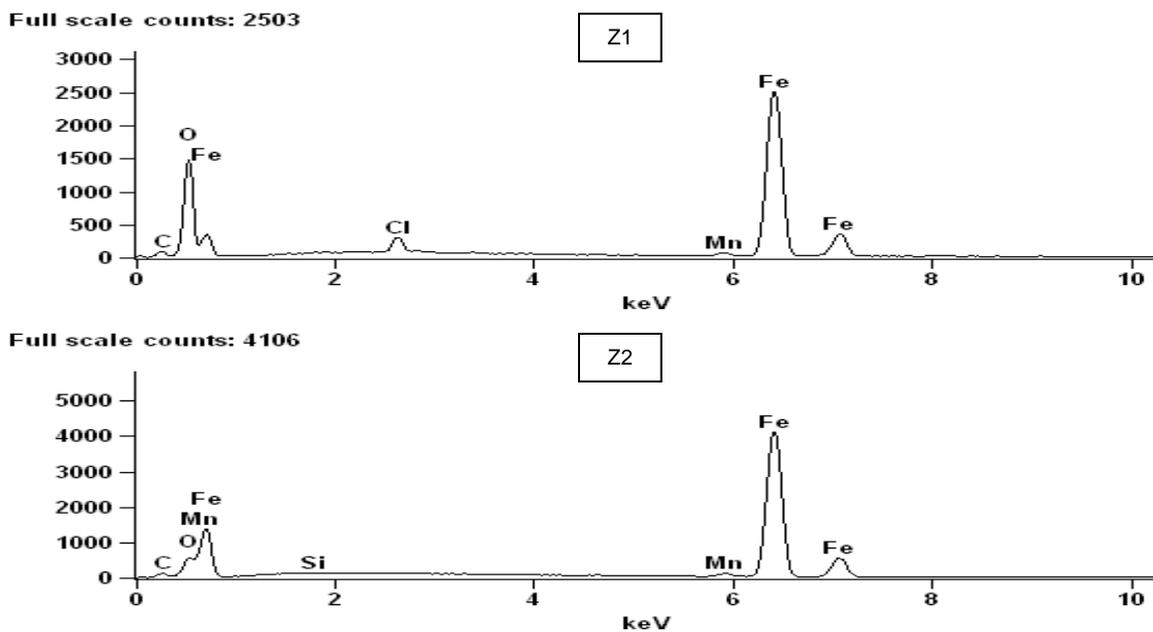
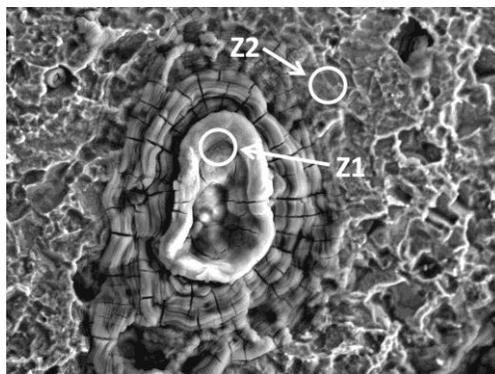


Figura 114.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C), después de limpiar la superficie (1000X).



Tabla 83.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-52 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C), después de limpiar la superficie.

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	12.02	24.49
O-K	33.48	51.23
Si-K	0.00	0.00
Cl-K	1.54	1.07
Mn-K	0.81	0.36
Fe-K	52.15	22.86

Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	14.07	37.18
O-K	9.76	19.36
Si-K	0.34	0.38
Cl-K	0.00	0.00
Mn-K	1.03	0.60
Fe-K	74.80	42.49

La Figura 115 muestra al acero API 5L X-65 (salmuera + 10 keroseno + H₂S a 30°C), en donde a partir de la Tabla 84 para la zona Z1 se tiene Fe con un 46.76%, C con un 10.74%, O con un 40.90%, correspondientes a los restos de óxidos que se formaron como productos de corrosión. Para la zona Z2 existe Fe con un 87.00%, C con un 11.51%, O con un 0.00%, Si con un 0.25%, Mn con un 1.24%, en este caso ya no se detecta la presencia de oxígeno y silicio que son elementos característicos del acero.

Acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C)

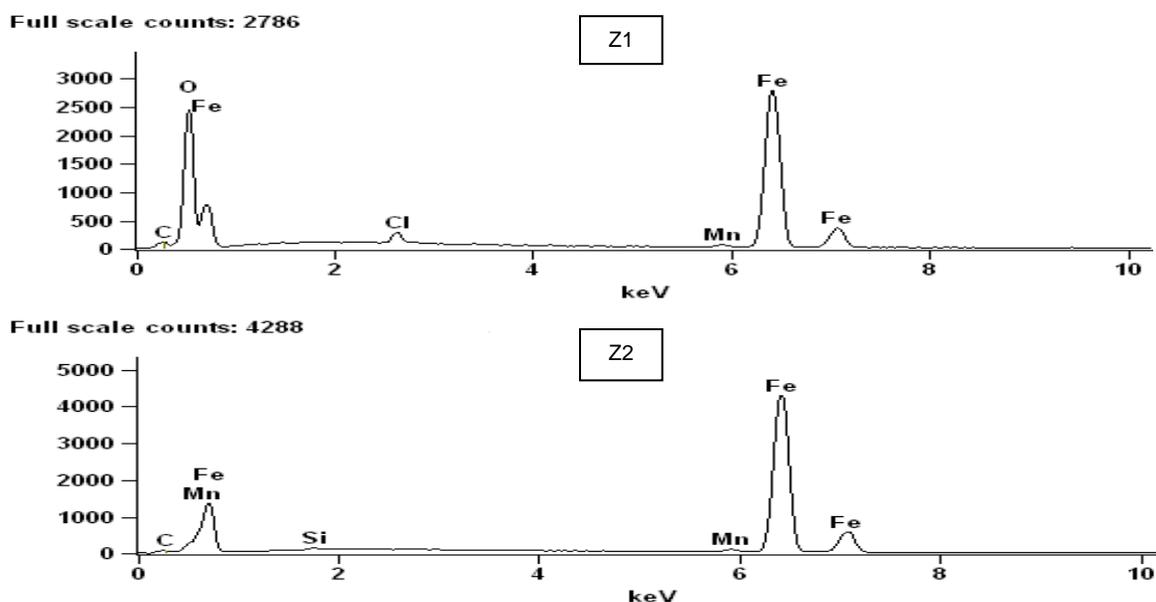
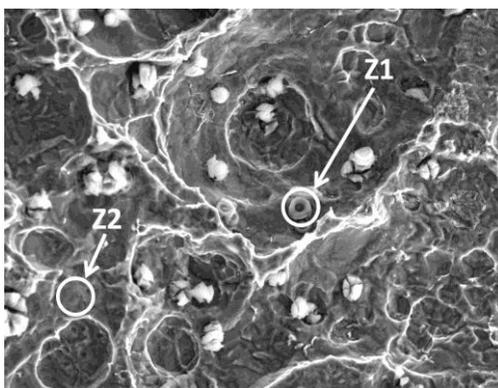


Figura 115.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C), después de limpiar la superficie (1000X).



Tabla 84.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-65 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C), después de limpiar la superficie.

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	10.74	20.68
O-K	40.90	59.09
Si-K	0.00	0.00
Cl-K	0.91	0.59
Mn-K	0.69	0.29
Fe-K	46.76	19.35

Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	11.51	37.62
O-K	0.00	0.00
Si-K	0.25	0.34
Cl-K	0.00	0.00
Mn-K	1.24	0.89
Fe-K	87.00	61.15

Para finalizar la presente investigación se tiene en la Figura 116 al acero API 5L X-70 (salmuera + 10% keroseno + H₂S a 30°C), y de la Tabla 85 para la zona Z1 existe Fe con un 20.38%, C con un 23.59%, O con un 54.48%, típicos nuevamente de restos de óxidos que se formaron de los productos de corrosión y al igual que en los casos anteriores ya mencionados de manera similar se descarta sean inclusiones como se había pensado.

Acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C)

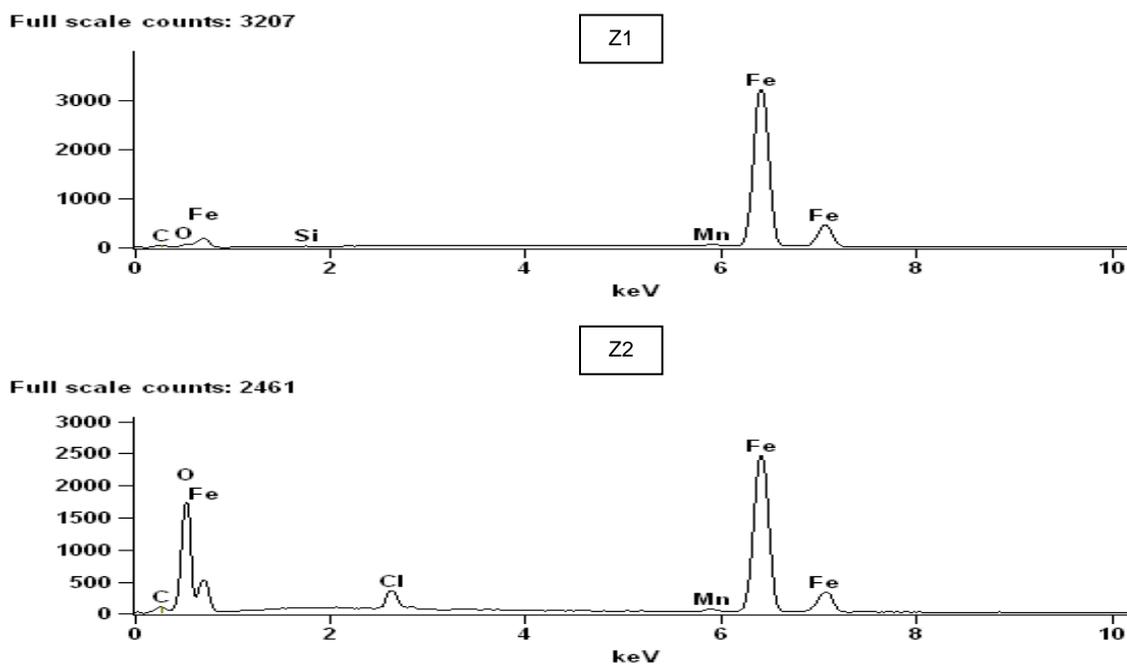
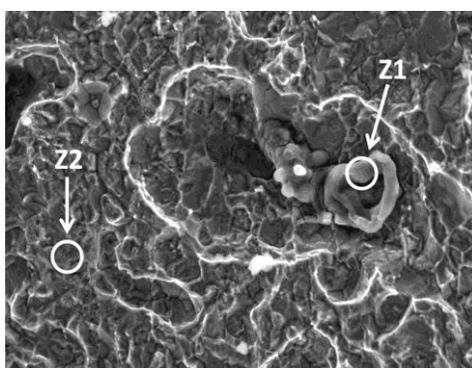


Figura 116.- Microanálisis Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C), después de limpiar la superficie (1000X).



Para la zona Z2 existe Fe con un 48.35%, C con un 12.04%, O con un 37.03%, Mn con un 0.30%, correspondientes al acero.

Tabla 85.- Elementos Zona 1 y 2 del acero API 5L X-70 (Salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S a 30°C), después de limpiar la superficie.

Zona1 (Z1)	% en peso	% atómico
C-K	23.59	27.16
O-K	54.48	3.93
Si-K	0.00	0.19
Cl-K	1.25	0.00
Mn-K	0.30	0.80
Fe-K	20.38	67.93

Zona2 (Z2)	% en peso	% atómico
C-K	12.04	7.71
O-K	37.03	1.49
Si-K	0.00	0.21
Cl-K	1.89	0.00
Mn-K	0.69	1.03
Fe-K	48.35	89.65



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

1.- El esfuerzo de corte de superficie se incrementa conforme lo hace la velocidad de rotación del electrodo, pero este a su vez tiene una ligera disminución cuando se eleva la temperatura debido a que la densidad y la viscosidad dinámica también disminuyen con respecto a esta.

2.- Al aumentar el esfuerzo de corte se origina mayor turbulencia, la cual causa una mayor corrosión a escala superficial provocando la fractura y el desprendimiento de los productos de corrosión que llegan a formarse, dejando al descubierto parte del sustrato el cual interactúa con el medio y por ende se incrementa la velocidad de corrosión.

3.- Bajo condiciones de flujo turbulento la velocidad de corrosión aumenta conforme se incrementa la velocidad de rotación y de manera más significativa con el incremento de la temperatura, siendo más notorio en el caso donde se induce la presencia del H_2S , debido a que se origina un medio mucho más agresivo por una mayor presencia de iones H^+ provenientes de la disolución acuosa del H_2S los cuales aceleran las reacciones de reducción y por ende las de oxidación reflejándose en una mayor velocidad de corrosión.

4.- La velocidad de corrosión no crece de manera drástica sino que tiende a estabilizarse por la formación de capas protectoras (óxidos y en otros casos una combinación de óxidos con sulfuros y la formación adicional de un sulfato).

5.- Si existe una mayor presencia de sulfuros la velocidad de corrosión tiende a ser más baja con respecto a que si solo existieran óxidos.



6.- La composición química juegan el papel más importante en el desempeño de los aceros, con respecto a la velocidad de corrosión, en especial la interacción que tienen en conjunto el cromo, el cobre y el níquel que ayudan en gran medida a abatir la corrosión aunque en esta investigación se nota que el que juega un papel importante es el cobre ya que en el caso del acero API 5L X-65 que es el que tiene muy poco y es el que tuvo el peor comportamiento en cuanto a la velocidad de corrosión a pesar que cuenta con cromo y níquel en su composición.

7.- Es posible proponer un modelo predictivo de la velocidad de corrosión, mediante un ajuste de los datos experimentales para cada uno de los aceros en cada uno de los medios utilizados con un comportamiento bastante aceptable.

8.- El acero que tiene el mejor comportamiento en la mayoría de las pruebas y medios utilizados resultó ser el API 5L X-70, debido a su microestructura y a su composición química cuya la labor en conjunto del cromo, el cobre y el níquel resulta ser muy eficiente para que éste se comporte de manera adecuada ante la velocidad de corrosión. Además posee la mayor cantidad de perlita la cual resulta ser una fase muy estable electroquímicamente y por ende tiene menos ferrita, la cual es la que puede llegar a disolverse debido al efecto galvánico con la perlita, por lo cual sufre una menor corrosión con respecto a los otros aceros utilizados en la investigación.



CAPÍTULO 6

REFERENCIAS

- 1.- Genescá J. y Ávila J., Más allá de la herrumbre vol.1, Fondo de Cultura Económico, México 1986, pp 2-61.
- 2.- John M. PIETRALIK, "The Role of Flow in Flow-Accelerated Corrosion under Nuclear Power Plant Conditions", E-Journal of Advanced Maintenance Vol.4 No.2 (2012) 63-78.
- 3.- Ayres G.H., Análisis químico cuantitativo, Ediciones del Castillo, Madrid 1970, pp. 37-54.
- 4.- G.K. Batchelor, An Introduction to Fluid Dynamics (Cambridge, England: Cambridge University Press, 1967).
- 5.- T. Thodorsen, A. Reiger, "Experiments on Drag of Revolving Disks, Cylinders, and Streamline Rods at High Speeds", Nat. Advisory Comm. Aeronaut, Report No. 793 (Washington, D.C: US Government Print Office, 1945)
- 6.- S. Nestic, J. Postlethwaite, Corrosion 46 (1990), pp. 874.
- 7.- L.W. Shemilt, C. Y. Cha, E. Fiadzigbe, A.B. Ponter, Corros. Sci. 20 (1980), pp. 443.
- 8.- D.C. Silverman, "Rotating Cylinder Electrode-An approach for Predicting Velocity-Sensitive Corrosion", Corrosion/90, paper no.13 (Houston, TX: NACE, 1990).
- 9.- k. Denpo, H. Ogava. "Fluid Flow Effects on Corrosion Resistance of Oil-Well Materials", Corrosion/90, paper no. 28 (Houston, TX: NACE, 1993).
- 10.- K.D. Effird, Corrosion, Vol.33, No. 1, 1977, pp. 3
- 11.- Walsh F. C., Un primer curso de ingeniería electroquímica, Editorial Club Universitario, UK 2000, pp. 1-168
- 12.- Stephen T. W., An introduction to electrochemical corrosion testing for practicing engineers and scientists, Pair O Docs, USA 1994, pp. 1-51



- 13.- Meas Y., Rodriguez F.J., Genescá J., Mendoza J., Duran R., Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión, Facultad de Química UNAM, México 2002, pp. 7-40, 245-261
- 14.- Norma: ASTM G59-03., Calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements.
- 15.- CRANE, Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, capítulo 1, Editorial Mc Graw Hill, pp: 1-13
- 16.- Levenspiel O., Flujo de fluidos e intercambio de calor, capítulo 2, Editorial Reverté, España 1993, pp. 17-27
- 17.- Norma ASTM D 2196-99., Estándar test methods for rheological properties of Non-Newtonian materials by rotacional (Brookfild type) viscosimeter.
- 18.- PINE Research Instrumentation., Study of mass-transport limited corrosion using pine rotated cylinder electrodes, Technical note 2006, pp. 1-6
- 19.- Gabe D. R., The rotating cylinder electrode, Journal applied electrochemistry, 4, 1974, pp. 91-104
- 20.- Gabe D. R., Wilcox G. D., The rotating cylinder electrode: its continued development and application, Journal applied electrochemistry, 28, 1998, pp. 759-780
- 21.- Eisenberg M., Tobias., C. W., Wilke C. R., Ionic mass transfer and concentration polarization at rotating electrodes, Journal electrochemistry society, vol. 101, 6, 1954, pp. 306-319
- 22.- Wright E. J. Eford K. D, Boros J. A., Hailey T. G., Rotating cylinder electrode (RCE) simulation of corrosion in sweet production, Corrosion NACE 2008, paper No. 08629
- 23.- Hong T., Jepson W. P., Corrosion inhibitor studies in large flow loop at high temperature and pressure, Corrosion Science, Vol. 43, 2001, pp. 1839-1849
- 24.- E. Heitz, "Chemo-Mechanical Effects of Flow On Corrosion", MTI Publication, N° 23, MTI Project N° 15 (Columbus, OH: Materials Technology Institute (1986).



- 25.- H. Schlichting, *Boundary-Layer Theory* (New York, NY: Mc Graw-Hill), 1979, pp. 28.
- 26.- M. T. Landahi, E. Mollo-Christensen, *Turbulence and Random Process in Fluid Mechanics* (Cambridge, England: Cambridge University Press), 1987, pp. 111.
- 27.- J. Postlethwaite and D.N. Holder, *Can J. Chem. Eng.*, vol. 53, 1975, pp. 31.
- 28.- J. F. Gülich, EPRI Report CS-5857 (Palo alto C.A: Electric Power Research Institute (EPRI)), June 1988; also Dissertation N° D17, TH Sarmstadt, Germany, 1989.
- 29.- H. Zeisel and F. Durst, *Werkstoffe u Korrosion* 1991, in press: *Corrosion/90*, paper N° 29 (Houston, TX, NACE, 1990).
- 30.- R. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lighfool, *Transport Phenomena* (New York, N.Y: Jhon Wiley and sons), 1960.
- 31.- R. Gordon, C. Akfirat, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 8, 1965, pp. 1, 261.
- 32.- A. A. Townsend, *The Structure of Turbulent Flow* (Cambridge, England: Cambridge University Press), 1956, pp. 194-196, 232-237.
- 33.- L. Cierbois, E. Heitz, F. P. Lisseling, J. C. Rowlands and J. P. Simpson, *Br. Corros. J.*, vol. 20, 1985, pp. 107.
- 34.- D. R. Gabe, F. C. Walsh, *J. appl. Electrochem*, vol. 13, 1983, pp. 3-22.
- 35.- D. C. Silverman, *Corrosion*, N° 40, vol. 5, 1984, pp. 220-226.
- 36.- T. Y. Chen, A. A. Moccari, D. D. Macdonald, "The Development of Controlled Hydrodynamic Techniques for Corrosion Testing", *Corrosion/91*, Paper N° 292 (Houston, TX, NACE), 1991.
- 37.- B. T. Ellison, C. J. Wen, "Hydrodynamic Effects on Corrosion", in *Tutorial Lectures in Electrochemical Engineering and Technology*, eds. R. Alkire, T. Beck, AIChE Symposium Series, vol. 77 (New York, N.Y: AIChE), 1981, pp. 161-169.



- 38.- D.C. Silverman, "Rotating Cylinder Electrode – Geometry Relationships for Prediction of Velocity – Sensitive Corrosion", *Corrosion*, vol. 44, 1988, pp. 42.
- 39.- F. Operkar and P. Beran, *J. Electroan. Chem.*, vol. 69, 1976, pp. 1.
- 40.- ASTM G59-97 (Reapproved 2003) "Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements" (Houston TX: NACE, 2003).
- 41.- 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.
- 42.- Z.Y. Liu, X.G. Li, C.W. Du, L. Lu, Y.R. Zhang, Y.F. Cheng, "Effect of inclusions on initiation of stress corrosion cracks in X70 pipeline steel in an acidic soil environment", *Corrosion Science*, 2009, 51, pp. 895-900.
- 43.- Du CW, Li XG, Liang P, Liu ZY, Jia GF and Cheng YF, "Effects of Microstructure on Corrosion of X70 Pipe Steel in an Alkaline Soil", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009, 18(2), pp.216-220.
- 44.- Gulbrandsen E, Nyborg R, Loland T and Nisancioglu K, "Effects of Steel Microstructure and Composition on Inhibition of CO₂ Corrosion". In: *Proceedings of the Corrosion/2000*, 2000, Orlando, Houston:NACE International, 2000, paper no. 00023.
- 45.- Yoon-Seok Choi, Jae-Joo Shim, Jung-Gu Kim, "Effects of Cr, Cu, Ni and Ca on the corrosion behavior of low carbon steel in synthetic tap water", *Journal of Alloys and Compounds* 391, 2005, pp. 162-169.



APENDICE 1

Valores obtenidos de potencial de corrosión y velocidad de corrosión para los distintos medios y cada uno de los aceros utilizados en la investigación.

Tabla 9.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-52 a 30°C, empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.

ACERO API 5L X-52 (30°C, pH = 5.98)			
SALMUERA-10% KEROSENO			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	E_{corr} (mv)	V_{corr} (mpy)	V_{corr} (mmpy)
0	-728.0040	0.8427	0.0214
500	-710.2023	2.0723	0.0526
1000	-685.6066	2.0920	0.0531
1500	-540.6623	8.8130	0.2238
2000	-553.0170	11.1550	0.2833
2500	-559.0585	12.4440	0.3161
3000	-570.0745	23.4650	0.5959
3500	-592.5360	25.1600	0.6391
4000	-599.4870	24.1766	0.6141
4500	-601.6046	26.0166	0.6608
5000	-603.8103	28.4200	0.7219
5500	-607.1123	32.2166	0.8182
6000	-612.0950	34.8333	0.8847
6500	-616.8080	36.0566	0.9158



Tabla 10.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-52 a 60°C, empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.

ACERO API 5L X-52 (60°C, pH = 5.98)			
SALMUERA-10% KEROSENO			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	E_{corr} (mv)	V_{corr} (mpy)	V_{corr} (mmpy)
0	-741.6990	7.5603	0.1920
500	-744.6540	10.1413	0.2576
1000	-744.3703	11.9620	0.3038
1500	-742.4640	16.4166	0.4169
2000	-714.9700	21.8333	0.5545
2500	-633.1776	55.3033	1.4050
3000	-630.6206	66.4700	1.6883
3500	-633.8796	74.3833	1.8893
4000	-641.6510	81.0966	2.0600
4500	-652.2820	87.2500	2.2165
5000	-659.6653	91.6666	2.3283
5500	-666.3673	97.4333	2.4746
6000	-668.9250	105.9500	2.6905
6500	-667.3470	121.0666	3.0746



A continuación se muestran los resultados para el acero API 5L X-52 a 30 y 60°C pero además con H₂S a 1 bar de presión.

Tabla 11.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-52 a 30°C adicionado con H₂S (p = 1 bar), empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.

ACERO API 5L X-52 (30°C, pH = 3.89)			
SALMUERA-10% KEROSENO-H₂S (p = 1 bar)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	E _{corr} (mv)	V _{corr} (mpy)	V _{corr} (mmpy)
0	-633.6626	89.4100	2.2710
500	-621.4920	92.9666	2.3613
1000	-609.0003	73.0333	1.8550
1500	-602.6123	100.1266	2.5426
2000	-599.0400	117.5666	2.9856
2500	-595.7553	142.9666	3.6313
3000	-595.1700	151.7666	3.8550
3500	-594.1060	180.7500	4.5910
4000	-594.7935	184.0500	4.6745
4500	-594.8575	190.5500	4.8400
5000	-595.1366	209.0666	5.3103
5500	-595.4360	216.8000	5.5070
6000	-595.5056	236.1666	5.9983
6500	-596.1890	260.7333	6.6230



Tabla 12.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-52 a 60°C adicionado con H₂S (p = 1 bar), empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.

ACERO API 5L X-52 (60°C, pH = 3.89)			
SALMUERA-10% KEROSENO-H₂S (p = 1 bar)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	E _{corr} (mv)	V _{corr} (mpy)	V _{corr} (mmpy)
0	-534.3633	364.0000	9.2456
500	-542.9973	573.6666	14.5700
1000	-549.7995	639.1000	16.2350
1500	-553.7886	731.4333	18.5766
2000	-559.0340	747.0666	18.9766
2500	-563.3590	786.5000	19.9800
3000	-568.3055	767.7000	19.5000
3500	-573.3190	761.0000	19.3300
4000	-581.9520	643.8500	16.3500
4500	-584.6540	644.5000	16.3700
5000	-591.8853	618.5333	15.7100
5500	-598.2285	615.2500	15.6300
6000	-598.8023	699.9000	17.1566
6500	-597.4380	758.4000	19.2633



Ahora se muestran los resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación del Electrodo Cilíndrico Rotatorio (ECR) para el acero API 5L X-65 a diferentes temperaturas y condiciones, aplicando también la técnica electroquímica de la resistencia a la polarización.

Tabla 13.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-65 a 30°C, empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.

ACERO API 5L X-65 (30°C, pH = 5.98)			
SALMUERA-10% KEROSENO			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	E_{corr} (mv)	V_{corr} (mpy)	V_{corr} (mmpy)
0	-611.6826	6.4403	0.1636
500	-599.7256	10.5466	0.2678
1000	-593.2186	14.8133	0.3761
1500	-590.1463	21.1866	0.5381
2000	-592.3380	26.3800	0.6700
2500	-596.2006	30.7466	0.7809
3000	-601.3206	33.8433	0.8596
3500	-605.0463	36.1033	0.9170
4000	-609.0300	38.0033	0.9653
4500	-614.7733	39.1300	0.9940
5000	-620.2336	39.6633	1.0074
5500	-625.7656	39.4166	1.0009
6000	-630.5810	39.0733	0.9923
6500	-634.7903	39.4133	1.0009



Tabla 14.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-65 a 60°C, empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.

ACERO API 5L X-65 (60°C, pH = 5.98)			
SALMUERA-10% KEROSENO			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	E_{corr} (mv)	V_{corr} (mpy)	V_{corr} (mmpy)
0	-716.2490	5.9960	0.1523
500	-633.2483	22.4600	0.5704
1000	-631.5443	30.9033	0.7849
1500	-651.1413	34.1300	0.8669
2000	-663.7623	41.6033	1.0566
2500	-666.0446	52.8500	1.3423
3000	-666.0240	69.9950	1.7780
3500	-668.1213	72.7733	1.8433
4000	-669.1753	76.4500	1.9416
4500	-669.0526	79.5766	2.0213
5000	-668.7290	82.3166	2.0910
5500	-668.1330	84.8750	2.1555
6000	-667.9435	86.6750	2.2015
6500	-668.6093	83.3666	2.1173



A continuación se muestran los resultados para el acero API 5L X-65 a 30 y 60°C pero además con H₂S a 1 bar de presión.

Tabla 15.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-65 a 30°C adicionado con H₂S (p = 1 bar), empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.

ACERO API 5L X-65 (30°C, pH = 3.89)			
SALMUERA-10% KEROSENO-H₂S (p = 1 bar)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	E _{corr} (mv)	V _{corr} (mpy)	V _{corr} (mmpy)
0	-614.5216	467.0666	11.8633
500	-598.1826	569.6000	14.4666
1000	-592.7835	453.0500	11.5065
1500	-589.8456	712.2666	18.0900
2000	-590.7383	678.5666	17.2366
2500	-592.7186	721.5333	18.3300
3000	-592.9016	796.0000	20.2200
3500	-592.9873	886.8333	22.5233
4000	-592.7053	894.3666	22.7166
4500	-591.9710	878.6333	22.3166
5000	-590.9923	904.2666	22.9666
5500	-589.1843	800.8666	20.3433
6000	-588.2506	650.6333	16.5266
6500	-586.3216	435.9000	11.0710



Tabla 16.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-65 a 60°C adicionado con H₂S (p = 1 bar), empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.

ACERO API 5L X-65 (60°C, pH = 3.89)			
SALMUERA-10% KEROSENO-H₂S (p = 1 bar)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	E _{corr} (mv)	V _{corr} (mpy)	V _{corr} (mmpy)
0	-551.6203	464.2333	11.7933
500	-560.4586	797.8000	20.2600
1000	-564.2410	954.1666	24.2333
1500	-567.8470	1037.6666	26.3600
2000	-569.3790	1047.0000	26.6000
2500	-576.4440	735.3000	18.6800
3000	-576.5000	893.7000	22.7000
3500	-576.7466	893.9333	22.7066
4000	-578.0586	966.9000	24.5633
4500	-577.4580	1035.2333	26.2900
5000	-580.0850	1138.0000	28.9000
5500	-594.9023	1077.6666	27.3733
6000	-601.6436	1034.9333	26.2800
6500	-601.8060	834.5000	21.1966



Por último se muestran los resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación del Electrodo Cilíndrico Rotatorio (ECR) para el acero API 5L X-70 a diferentes temperaturas y condiciones, aplicando también la técnica electroquímica de la resistencia a la polarización.

Tabla 17.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-70 a 30°C, empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.

ACERO API 5L X-70 (30°C, pH = 5.98)			
SALMUERA-10% KEROSENO			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	E_{corr} (mv)	V_{corr} (mpy)	V_{corr} (mmpy)
0	-751.5580	1.9910	0.0506
500	-741.1380	4.0120	0.1019
1000	-740.3160	5.0590	0.1285
1500	-739.4300	11.1600	0.2834
2000	-733.1760	16.7100	0.4244
2500	-717.4190	18.0100	0.4575
3000	-602.3150	27.7400	0.7046
3500	-595.6180	32.4000	0.8230
4000	-594.7880	33.3900	0.8482
4500	-598.4450	34.0800	0.8657
5000	-603.1000	36.3900	0.9242
5500	-608.3500	36.5200	0.9276
6000	-613.8420	36.4700	0.9263
6500	-617.4570	36.3800	0.9240



Tabla 18.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-70 a 60°C, empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.

ACERO API 5L X-70 (60°C, pH = 5.98)			
SALMUERA-10% KEROSENO			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	E_{corr} (mv)	V_{corr} (mpy)	V_{corr} (mmpy)
0	-724.7570	9.0400	0.2296
500	-713.7130	19.0200	0.4831
1000	-701.7260	26.7900	0.6804
1500	-682.5340	28.6600	0.7280
2000	-640.2990	28.8700	0.7334
2500	-612.5200	54.3300	1.3800
3000	-614.7900	60.5600	1.5380
3500	-614.9480	70.0500	1.7790
4000	-616.7650	73.9900	1.8790
4500	-619.7640	75.2650	1.9110
5000	-622.7630	76.5400	1.9440
5500	-624.9270	74.9000	1.9020
6000	-626.4360	75.7700	1.9250
6500	-626.3220	75.8900	1.9280



A continuación se muestran los resultados para el acero API 5L X-70 a 30 y 60°C pero además con H₂S a 1 bar de presión.

Tabla 19.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-70 a 30°C adicionado con H₂S (p = 1 bar), empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.

ACERO API 5L X-70 (30°C, pH = 3.89)			
SALMUERA-10% KEROSENO-H₂S (p = 1 bar)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	E _{corr} (mv)	V _{corr} (mpy)	V _{corr} (mmpy)
0	-610.3050	19.9133	0.0506
500	-628.4226	22.0300	0.1019
1000	-631.3960	24.3200	0.1285
1500	-627.5580	27.9150	0.2834
2000	-623.8046	28.1733	0.4244
2500	-623.5470	27.8350	0.4575
3000	-622.8123	27.9166	0.7046
3500	-621.6536	27.6133	0.8230
4000	-620.9610	27.6333	0.8482
4500	-620.0176	28.0933	0.8657
5000	-619.2520	38.4900	0.9242
5500	-618.2535	50.8400	0.9276
6000	-617.2870	54.7500	0.9263
6500	-617.4350	56.1100	0.9240



Tabla 20.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión en función de la velocidad de rotación de ECR para el acero API 5L X-70 a 60°C adicionado con H₂S (p = 1 bar), empleando la técnica Rp al determinar la velocidad de corrosión.

ACERO API 5L X-70 (60°C, pH = 3.89)			
SALMUERA-10% KEROSENO-H₂S (p = 1 bar)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	E _{corr} (mv)	V _{corr} (mpy)	V _{corr} (mmpy)
0	-610.3050	180.6333	0.2296
500	-628.4226	471.9000	0.4831
1000	-631.3960	561.0666	0.6804
1500	-627.5580	596.9000	0.7280
2000	-623.8046	603.0333	0.7334
2500	-623.5470	601.5000	1.3800
3000	-622.8123	566.6000	1.5380
3500	-621.6536	552.1000	1.7790
4000	-620.9610	612.0000	1,8790
4500	-620.0176	625.6000	1.9110
5000	-619.2520	631.9500	1.9440
5500	-618.2535	633.9000	1.9020
6000	-617.2870	641.9000	1.9250
6500	-617.4350	644.1000	1.9280



APENDICE 2

Valores obtenidos para el número de Reynolds (Re) y el esfuerzo de corte de superficie para los medios y aceros empleados en la investigación.

Tabla 21.- Resultados obtenidos del número de Reynolds y el esfuerzo de corte de superficie con respecto a la velocidad de rotación de ECR para el medio que contiene salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

SALMUERA + 10% KEROSENO (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s^{-1})	Número de Reynolds [Re]	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m^{-2})
0	0.0000	0.0000	0.0000
500	0.2880	968.1466	0.9829
1000	0.5760	1936.2933	3.1935
1500	0.8640	2904.4400	6.3624
2000	1.1520	3872.5866	10.3757
2500	1.4390	4840.7333	15.1623
3000	1.7280	5808.8800	20.6716
3500	2.0160	6777.0266	26.8648
4000	2.3040	7745.1733	33.7109
4500	2.5920	8713.3200	41.1841
5000	2.8790	9681.4666	49.2626
5500	3.1680	10649.6133	57.9276
6000	3.4560	11617.7600	67.1624
6500	3.7440	12585.9066	76.9523



Tabla 22.- Resultados obtenidos del número de Reynolds y el esfuerzo de corte de superficie con respecto a la velocidad de rotación de ECR para el medio que contiene salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

SALMUERA + 10% KEROSENO (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Número de Reynolds [Re]	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m ⁻²)
0	0.0000	0.0000	0.0000
500	0.2880	1299.3547	0.8998
1000	0.5760	2598.7094	2.9236
1500	0.8640	3898.0642	5.8246
2000	1.1520	5197.4189	9.4988
2500	1.4390	6496.7736	13.8808
3000	1.7280	7796.1284	18.9245
3500	2.0160	9095.4831	24.5942
4000	2.3040	10394.8378	30.8617
4500	2.5920	11694.1926	37.7033
5000	2.8790	12993.5473	45.0990
5500	3.1680	14292.9021	53.0316
6000	3.4560	15592.2568	61.4858
6500	3.7440	16891.6115	70.4483



Tabla 23.- Resultados obtenidos del número de Reynolds y el esfuerzo de corte de superficie con respecto a la velocidad de rotación de ECR para el medio que contiene salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Número de Reynolds [Re]	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m ⁻²)
0	0.0000	0.0000	0.0000
500	0.2880	1090.3200	1.0681
1000	0.5760	2180.6400	3.4704
1500	0.8640	3270.9600	6.9142
2000	1.1520	4361.2800	11.2756
2500	1.4390	5451.6000	16.4773
3000	1.7280	6541.9200	22.4644
3500	2.0160	7632.2400	29.1947
4000	2.3040	8722.5600	36.6346
4500	2.5920	9812.8800	44.7559
5000	2.8790	10903.2000	53.5350
5500	3.1680	11993.5200	62.9514
6000	3.4560	13083.8400	72.9871
6500	3.7440	14174.1600	83.6261



Tabla 24.- Resultados obtenidos del número de Reynolds y el esfuerzo de corte de superficie con respecto a la velocidad de rotación de ECR para el medio que contiene salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Número de Reynolds [Re]	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m ⁻²)
0	0.0000	0.0000	0.0000
500	0.2880	1343.4473	0.9211
1000	0.5760	2686.8947	2.9927
1500	0.8640	4030.3421	5.9625
2000	1.1520	5373.7894	9.7235
2500	1.4390	6717.2368	14.2092
3000	1.7280	8060.6842	19.3722
3500	2.0160	9404.1315	25.1761
4000	2.3040	10747.5789	31.5918
4500	2.5920	12091.0263	38.5953
5000	2.8790	13434.4736	46.1660
5500	3.1680	14777.9210	54.2862
6000	3.4560	16121.3684	62.9405
6500	3.7440	17464.8157	72.1150



APENDICE 3

Valores obtenidos de la velocidad de corrosión por Rp y la obtenida mediante el modelo propuesto por Efird para los medios y los aceros empleados.

Tabla 25.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

ACERO API 5L X-52			
SALMUERA + 10% KEROSENO (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto por Efird (mmpy)
0	0.0000	0.0214	0.0000
500	0.2880	0.0526	2.7951
1000	0.5760	0.0531	3.1447
1500	0.8640	0.2238	3.3691
2000	1.1520	0.2833	3.5380
2500	1.4390	0.3161	3.6748
3000	1.7280	0.5959	3.7904
3500	2.0160	0.6391	3.8911
4000	2.3040	0.6141	3.9804
4500	2.5920	0.6608	4.0609
5000	2.8790	0.7219	4.1343
5500	3.1680	0.8182	4.2019
6000	3.4560	0.8847	4.2645
6500	3.7440	0.9158	4.3229



Tabla 26.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efirid y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

ACERO API 5L X-65			
SALMUERA + 10% KEROSENO (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR ($m s^{-1}$)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto por Efirid (mmpy)
0	0.0000	0.1636	0.0000
500	0.2880	0.2678	2.7951
1000	0.5760	0.3761	3.1447
1500	0.8640	0.5381	3.3691
2000	1.1520	0.6700	3.5380
2500	1.4390	0.7809	3.6748
3000	1.7280	0.8596	3.7904
3500	2.0160	0.9170	3.8911
4000	2.3040	0.9653	3.9804
4500	2.5920	0.9940	4.0609
5000	2.8790	1.0074	4.1343
5500	3.1680	1.0009	4.2019
6000	3.4560	0.9923	4.2645
6500	3.7440	1.0009	4.3229



Tabla 27.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efirid y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

ACERO API 5L X-70			
SALMUERA + 10% KEROSENO (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR ($m s^{-1}$)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto por Efirid (mmpy)
0	0.0000	0.0506	0.0000
500	0.2880	0.1019	2.7951
1000	0.5760	0.1285	3.1447
1500	0.8640	0.2834	3.3691
2000	1.1520	0.4244	3.5380
2500	1.4390	0.4575	3.6748
3000	1.7280	0.7046	3.7904
3500	2.0160	0.8230	3.8911
4000	2.3040	0.8482	3.9804
4500	2.5920	0.8657	4.0609
5000	2.8790	0.9242	4.1343
5500	3.1680	0.9276	4.2019
6000	3.4560	0.9263	4.2645
6500	3.7440	0.9240	4.3229



Tabla 28.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efirid y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

ACERO API 5L X-52			
SALMUERA + 10% KEROSENO (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR ($m s^{-1}$)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto por Efirid (mmpy)
0	0.0000	0.1920	0.0000
500	0.2880	0.2576	2.7705
1000	0.5760	0.3038	3.1170
1500	0.8640	0.4169	3.3395
2000	1.1520	0.5545	3.5069
2500	1.4390	1.4050	3.6424
3000	1.7280	1.6883	3.7571
3500	2.0160	1.8893	3.8569
4000	2.3040	2.0600	3.9454
4500	2.5920	2.2165	4.0252
5000	2.8790	2.3283	4.0980
5500	3.1680	2.4746	4.1649
6000	3.4560	2.6905	4.2270
6500	3.7440	3.0746	4.2849



Tabla 29.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

ACERO API 5L X-65			
SALMUERA + 10% KEROSENO (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR ($m s^{-1}$)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto por Efird (mmpy)
0	0.0000	0.1523	0.0000
500	0.2880	0.5704	2.7705
1000	0.5760	0.7849	3.1170
1500	0.8640	0.8669	3.3395
2000	1.1520	1.0566	3.5069
2500	1.4390	1.3423	3.6424
3000	1.7280	1.7780	3.7571
3500	2.0160	1.8433	3.8569
4000	2.3040	1.9416	3.9454
4500	2.5920	2.0213	4.0252
5000	2.8790	2.0910	4.0980
5500	3.1680	2.1555	4.1649
6000	3.4560	2.2015	4.2270
6500	3.7440	2.1173	4.2849



Tabla 30.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

ACERO API 5L X-70			
SALMUERA + 10% KEROSENO (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR ($m s^{-1}$)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto por Efird (mmpy)
0	0.0000	0.2296	0.0000
500	0.2880	0.4831	2.7705
1000	0.5760	0.6804	3.1170
1500	0.8640	0.7280	3.3395
2000	1.1520	0.7334	3.5069
2500	1.4390	1.3800	3.6424
3000	1.7280	1.5380	3.7571
3500	2.0160	1.7790	3.8569
4000	2.3040	1.8790	3.9454
4500	2.5920	1.9110	4.0252
5000	2.8790	1.9440	4.0980
5500	3.1680	1.9020	4.1649
6000	3.4560	1.9250	4.2270
6500	3.7440	1.9280	4.2849



Tabla 31.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

ACERO API 5L X-52			
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto por Efird (mmpy)
0	0.0000	2.2710	0.0000
500	0.2880	2.3613	2.8185
1000	0.5760	1.8550	3.1709
1500	0.8640	2.5426	3.3972
2000	1.1520	2.9856	3.5675
2500	1.4390	3.6313	3.7054
3000	1.7280	3.8550	3.8221
3500	2.0160	4.5910	3.9236
4000	2.3040	4.6745	4.0137
4500	2.5920	4.8400	4.0948
5000	2.8790	5.3103	4.1689
5500	3.1680	5.5070	4.2370
6000	3.4560	5.9983	4.3001
6500	3.7440	6.6230	4.3590



Tabla 32.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

ACERO API 5L X-65			
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto por Efird (mmpy)
0	0.0000	11.8633	0.0000
500	0.2880	14.4666	2.8185
1000	0.5760	11.5065	3.1709
1500	0.8640	18.0900	3.3972
2000	1.1520	17.2366	3.5675
2500	1.4390	18.3300	3.7054
3000	1.7280	20.2200	3.8221
3500	2.0160	22.5233	3.9236
4000	2.3040	22.7166	4.0137
4500	2.5920	22.3166	4.0948
5000	2.8790	22.9666	4.1689
5500	3.1680	20.3433	4.2370
6000	3.4560	16.5266	4.3001
6500	3.7440	11.0710	4.3590



Tabla 33.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

ACERO API 5L X-70			
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto por Efird (mmpy)
0	0.0000	0.0506	0.0000
500	0.2880	0.1019	2.8185
1000	0.5760	0.1285	3.1709
1500	0.8640	0.2834	3.3972
2000	1.1520	0.4244	3.5675
2500	1.4390	0.4575	3.7054
3000	1.7280	0.7046	3.8221
3500	2.0160	0.8230	3.9236
4000	2.3040	0.8482	4.0137
4500	2.5920	0.8657	4.0948
5000	2.8790	0.9242	4.1689
5500	3.1680	0.9276	4.2370
6000	3.4560	0.9263	4.3001
6500	3.7440	0.9240	4.3590



Tabla 34.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

ACERO API 5L X-52			
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto por Efird (mmpy)
0	0.0000	9.2456	0.0000
500	0.2880	14.5700	2.7770
1000	0.5760	16.2350	3.1243
1500	0.8640	18.5766	3.3473
2000	1.1520	18.9766	3.5151
2500	1.4390	19.9800	3.6510
3000	1.7280	19.5000	3.7659
3500	2.0160	19.3300	3.8659
4000	2.3040	16.3500	3.9547
4500	2.5920	16.3700	4.0347
5000	2.8790	15.7100	4.1076
5500	3.1680	15.6300	4.1747
6000	3.4560	17.1566	4.2369
6500	3.7440	19.2633	4.2949



Tabla 35.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

ACERO API 5L X-65			
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto por Efird (mmpy)
0	0.0000	11.7933	0.0000
500	0.2880	20.2600	2.7770
1000	0.5760	24.2333	3.1243
1500	0.8640	26.3600	3.3473
2000	1.1520	26.6000	3.5151
2500	1.4390	18.6800	3.6510
3000	1.7280	22.7000	3.7659
3500	2.0160	22.7066	3.8659
4000	2.3040	24.5633	3.9547
4500	2.5920	26.2900	4.0347
5000	2.8790	28.9000	4.1076
5500	3.1680	27.3733	4.1747
6000	3.4560	26.2800	4.2369
6500	3.7440	21.1966	4.2949



Tabla 36.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo predictivo propuesto por Efird y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

ACERO API 5L X-70			
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1387.2 ppm H₂S (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto por Efird (mmpy)
0	0.0000	0.2296	0.0000
500	0.2880	0.4831	2.7770
1000	0.5760	0.6804	3.1243
1500	0.8640	0.7280	3.3473
2000	1.1520	0.7334	3.5151
2500	1.4390	1.3800	3.6510
3000	1.7280	1.5380	3.7659
3500	2.0160	1.7790	3.8659
4000	2.3040	1,8790	3.9547
4500	2.5920	1.9110	4.0347
5000	2.8790	1.9440	4.1076
5500	3.1680	1.9020	4.1747
6000	3.4560	1.9250	4.2369
6500	3.7440	1.9280	4.2949

APENDICE 4

Datos obtenidos de la velocidad de corrosión obtenida mediante la técnica de Rp que fueron graficados en función del esfuerzo cortante de superficie para cada uno de los aceros con lo cual se obtuvo un modelo predictivo.

Tabla 37.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

ACERO API 5L X-52			
SALMUERA + 10% KEROSENO (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR ($m\ s^{-1}$)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] ($N\ m^{-2}$)
0	0.0000	0.0214	0.0000
500	0.2880	0.0526	0.9829
1000	0.5760	0.0531	3.1935
1500	0.8640	0.2238	6.3624
2000	1.1520	0.2833	10.3757
2500	1.4390	0.3161	15.1623
3000	1.7280	0.5959	20.6716
3500	2.0160	0.6391	26.8648
4000	2.3040	0.6141	33.7109
4500	2.5920	0.6608	41.1841
5000	2.8790	0.7219	49.2626
5500	3.1680	0.8182	57.9276
6000	3.4560	0.8847	67.1624
6500	3.7440	0.9158	76.9523



Tabla 38.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

ACERO API 5L X-65			
SALMUERA + 10% KEROSENO (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR ($m s^{-1}$)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] ($N m^{-2}$)
0	0.0000	0.1636	0.0000
500	0.2880	0.2678	0.9829
1000	0.5760	0.3761	3.1935
1500	0.8640	0.5381	6.3624
2000	1.1520	0.6700	10.3757
2500	1.4390	0.7809	15.1623
3000	1.7280	0.8596	20.6716
3500	2.0160	0.9170	26.8648
4000	2.3040	0.9653	33.7109
4500	2.5920	0.9940	41.1841
5000	2.8790	1.0074	49.2626
5500	3.1680	1.0009	57.9276
6000	3.4560	0.9923	67.1624
6500	3.7440	1.0009	76.9523



Tabla 39.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

ACERO API 5L X-70			
SALMUERA + 10% KEROSENO (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s^{-1})	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mppy)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m^{-2})
0	0.0000	0.0506	0.0000
500	0.2880	0.1019	0.9829
1000	0.5760	0.1285	3.1935
1500	0.8640	0.2834	6.3624
2000	1.1520	0.4244	10.3757
2500	1.4390	0.4575	15.1623
3000	1.7280	0.7046	20.6716
3500	2.0160	0.8230	26.8648
4000	2.3040	0.8482	33.7109
4500	2.5920	0.8657	41.1841
5000	2.8790	0.9242	49.2626
5500	3.1680	0.9276	57.9276
6000	3.4560	0.9263	67.1624
6500	3.7440	0.9240	76.9523



Tabla 40.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

ACERO API 5L X-52			
SALMUERA + 10% KEROSENO (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR ($m s^{-1}$)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mppy)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] ($N m^{-2}$)
0	0.0000	0.1920	0.0000
500	0.2880	0.2576	0.8998
1000	0.5760	0.3038	2.9236
1500	0.8640	0.4169	5.8246
2000	1.1520	0.5545	9.4988
2500	1.4390	1.4050	13.8808
3000	1.7280	1.6883	18.9245
3500	2.0160	1.8893	24.5942
4000	2.3040	2.0600	30.8617
4500	2.5920	2.2165	37.7033
5000	2.8790	2.3283	45.0990
5500	3.1680	2.4746	53.0316
6000	3.4560	2.6905	61.4858
6500	3.7440	3.0746	70.4483



Tabla 41.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

ACERO API 5L X-65			
SALMUERA + 10% KEROSENO (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s^{-1})	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m^{-2})
0	0.0000	0.1523	0.0000
500	0.2880	0.5704	0.8998
1000	0.5760	0.7849	2.9236
1500	0.8640	0.8669	5.8246
2000	1.1520	1.0566	9.4988
2500	1.4390	1.3423	13.8808
3000	1.7280	1.7780	18.9245
3500	2.0160	1.8433	24.5942
4000	2.3040	1.9416	30.8617
4500	2.5920	2.0213	37.7033
5000	2.8790	2.0910	45.0990
5500	3.1680	2.1555	53.0316
6000	3.4560	2.2015	61.4858
6500	3.7440	2.1173	70.4483



Tabla 42.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

ACERO API 5L X-70			
SALMUERA + 10% KEROSENO (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR ($m s^{-1}$)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] ($N m^{-2}$)
0	0.0000	0.2296	0.0000
500	0.2880	0.4831	0.8998
1000	0.5760	0.6804	2.9236
1500	0.8640	0.7280	5.8246
2000	1.1520	0.7334	9.4988
2500	1.4390	1.3800	13.8808
3000	1.7280	1.5380	18.9245
3500	2.0160	1.7790	24.5942
4000	2.3040	1.8790	30.8617
4500	2.5920	1.9110	37.7033
5000	2.8790	1.9440	45.0990
5500	3.1680	1.9020	53.0316
6000	3.4560	1.9250	61.4858
6500	3.7440	1.9280	70.4483



Tabla 43.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

ACERO API 5L X-52			
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_0] (N m ⁻²)
0	0.0000	2.2710	0.0000
500	0.2880	2.3613	1.0681
1000	0.5760	1.8550	3.4704
1500	0.8640	2.5426	6.9142
2000	1.1520	2.9856	11.2756
2500	1.4390	3.6313	16.4773
3000	1.7280	3.8550	22.4644
3500	2.0160	4.5910	29.1947
4000	2.3040	4.6745	36.6346
4500	2.5920	4.8400	44.7559
5000	2.8790	5.3103	53.5350
5500	3.1680	5.5070	62.9514
6000	3.4560	5.9983	72.9871
6500	3.7440	6.6230	83.6261



Tabla 44.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

ACERO API 5L X-65			
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m ⁻²)
0	0.0000	11.8633	0.0000
500	0.2880	14.4666	1.0681
1000	0.5760	11.5065	3.4704
1500	0.8640	18.0900	6.9142
2000	1.1520	17.2366	11.2756
2500	1.4390	18.3300	16.4773
3000	1.7280	20.2200	22.4644
3500	2.0160	22.5233	29.1947
4000	2.3040	22.7166	36.6346
4500	2.5920	22.3166	44.7559
5000	2.8790	22.9666	53.5350
5500	3.1680	20.3433	62.9514
6000	3.4560	16.5266	72.9871
6500	3.7440	11.0710	83.6261



Tabla 45.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

ACERO API 5L X-70			
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (30°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m ⁻²)
0	0.0000	0.0506	0.0000
500	0.2880	0.1019	1.0681
1000	0.5760	0.1285	3.4704
1500	0.8640	0.2834	6.9142
2000	1.1520	0.4244	11.2756
2500	1.4390	0.4575	16.4773
3000	1.7280	0.7046	22.4644
3500	2.0160	0.8230	29.1947
4000	2.3040	0.8482	36.6346
4500	2.5920	0.8657	44.7559
5000	2.8790	0.9242	53.5350
5500	3.1680	0.9276	62.9514
6000	3.4560	0.9263	72.9871
6500	3.7440	0.9240	83.6261



Tabla 46.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

ACERO API 5L X-52			
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_0] (N m ⁻²)
0	0.0000	9.2456	0.0000
500	0.2880	14.5700	0.9211
1000	0.5760	16.2350	2.9927
1500	0.8640	18.5766	5.9625
2000	1.1520	18.9766	9.7235
2500	1.4390	19.9800	14.2092
3000	1.7280	19.5000	19.3722
3500	2.0160	19.3300	25.1761
4000	2.3040	16.3500	31.5918
4500	2.5920	16.3700	38.5953
5000	2.8790	15.7100	46.1660
5500	3.1680	15.6300	54.2862
6000	3.4560	17.1566	62.9405
6500	3.7440	19.2633	72.1150



Tabla 47.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

ACERO API 5L X-65			
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_o] (N m ⁻²)
0	0.0000	11.7933	0.0000
500	0.2880	20.2600	0.9211
1000	0.5760	24.2333	2.9927
1500	0.8640	26.3600	5.9625
2000	1.1520	26.6000	9.7235
2500	1.4390	18.6800	14.2092
3000	1.7280	22.7000	19.3722
3500	2.0160	22.7066	25.1761
4000	2.3040	24.5633	31.5918
4500	2.5920	26.2900	38.5953
5000	2.8790	28.9000	46.1660
5500	3.1680	27.3733	54.2862
6000	3.4560	26.2800	62.9405
6500	3.7440	21.1966	72.1150



Tabla 48.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto al esfuerzo de corte de superficie para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

ACERO API 5L X-70			
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (60°C)			
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_0] (N m ⁻²)
0	0.0000	0.2296	0.0000
500	0.2880	0.4831	0.9211
1000	0.5760	0.6804	2.9927
1500	0.8640	0.7280	5.9625
2000	1.1520	0.7334	9.7235
2500	1.4390	1.3800	14.2092
3000	1.7280	1.5380	19.3722
3500	2.0160	1.7790	25.1761
4000	2.3040	1,8790	31.5918
4500	2.5920	1.9110	38.5953
5000	2.8790	1.9440	46.1660
5500	3.1680	1.9020	54.2862
6000	3.4560	1.9250	62.9405
6500	3.7440	1.9280	72.1150



APENDICE 5

Datos obtenidos de la velocidad de corrosión para cada uno de los modelos predictivos propuestos para los medios y los aceros empleados en la investigación.

Tabla 52.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

ACERO API 5L X-52				
SALMUERA + 10% KEROSENO (30°C)				
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m ⁻²)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto en la investigación $V_{corr} = 0.0839\tau_w^{0.5600}$ (mmpy)
0	0.0000	0.0000	0.0214	0.0000
500	0.2880	0.9829	0.0526	2.7951
1000	0.5760	3.1935	0.0531	3.1447
1500	0.8640	6.3624	0.2238	3.3691
2000	1.1520	10.3757	0.2833	3.5380
2500	1.4390	15.1623	0.3161	3.6748
3000	1.7280	20.6716	0.5959	3.7904
3500	2.0160	26.8648	0.6391	3.8911
4000	2.3040	33.7109	0.6141	3.9804
4500	2.5920	41.1841	0.6608	4.0609
5000	2.8790	49.2626	0.7219	4.1343
5500	3.1680	57.9276	0.8182	4.2019
6000	3.4560	67.1624	0.8847	4.2645
6500	3.7440	76.9523	0.9158	4.3229



Tabla 53.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

ACERO API 5L X-65				
SALMUERA + 10% KEROSENO (30°C)				
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m ⁻²)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto en la investigación $V_{\text{corr}} = 0.3501\tau_w^{0.2653}$ (mmpy)
0	0.0000	0.0000	0.1636	0.0000
500	0.2880	0.9829	0.2678	0.3485
1000	0.5760	3.1935	0.3761	0.4764
1500	0.8640	6.3624	0.5381	0.5719
2000	1.1520	10.3757	0.6700	0.6512
2500	1.4390	15.1623	0.7809	0.7201
3000	1.7280	20.6716	0.8596	0.7819
3500	2.0160	26.8648	0.9170	0.8382
4000	2.3040	33.7109	0.9653	0.8902
4500	2.5920	41.1841	0.9940	0.9388
5000	2.8790	49.2626	1.0074	0.9845
5500	3.1680	57.9276	1.0009	1.0277
6000	3.4560	67.1624	0.9923	1.0688
6500	3.7440	76.9523	1.0009	1.1081



Tabla 54.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 30°C.

ACERO API 5L X-70				
SALMUERA + 10% KEROSENO (30°C)				
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m ⁻²)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto en la investigación $V_{\text{corr}} = 0.1604\tau_w^{0.4347}$ (mmpy)
0	0.0000	0.0000	0.0506	0.0000
500	0.2880	0.9829	0.1019	0.1592
1000	0.5760	3.1935	0.1285	0.2657
1500	0.8640	6.3624	0.2834	0.3585
2000	1.1520	10.3757	0.4244	0.4434
2500	1.4390	15.1623	0.4575	0.5229
3000	1.7280	20.6716	0.7046	0.5984
3500	2.0160	26.8648	0.8230	0.6706
4000	2.3040	33.7109	0.8482	0.7401
4500	2.5920	41.1841	0.8657	0.8074
5000	2.8790	49.2626	0.9242	0.8728
5500	3.1680	57.9276	0.9276	0.9365
6000	3.4560	67.1624	0.9263	0.9987
6500	3.7440	76.9523	0.9240	1.0596



Tabla 55.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

ACERO API 5L X-52				
SALMUERA + 10% KEROSENO (60°C)				
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m ⁻²)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto en la investigación $V_{corr} = 0.2525\tau_w^{0.5876}$ (mmpy)
0	0.0000	0.0000	0.1920	0.0000
500	0.2880	0.8998	0.2576	0.2373
1000	0.5760	2.9236	0.3038	0.4742
1500	0.8640	5.8246	0.4169	0.7111
2000	1.1520	9.4988	0.5545	0.9478
2500	1.4390	13.8808	1.4050	1.1845
3000	1.7280	18.9245	1.6883	1.4211
3500	2.0160	24.5942	1.8893	1.6577
4000	2.3040	30.8617	2.0600	1.8942
4500	2.5920	37.7033	2.2165	2.1307
5000	2.8790	45.0990	2.3283	2.3672
5500	3.1680	53.0316	2.4746	2.6037
6000	3.4560	61.4858	2.6905	2.8401
6500	3.7440	70.4483	3.0746	3.0765



Tabla 56.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

ACERO API 5L X-65				
SALMUERA + 10% KEROSENO (60°C)				
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m ⁻²)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto en la investigación $V_{corr} = 0.5901\tau_w^{0.3257}$ (mmpy)
0	0.0000	0.0000	0.1523	0.0000
500	0.2880	0.8998	0.5704	0.5701
1000	0.5760	2.9236	0.7849	0.8369
1500	0.8640	5.8246	0.8669	1.0475
2000	1.1520	9.4988	1.0566	1.2284
2500	1.4390	13.8808	1.3423	1.3899
3000	1.7280	18.9245	1.7780	1.5376
3500	2.0160	24.5942	1.8433	1.6746
4000	2.3040	30.8617	1.9416	1.8031
4500	2.5920	37.7033	2.0213	1.9246
5000	2.8790	45.0990	2.0910	2.0402
5500	3.1680	53.0316	2.1555	2.1508
6000	3.4560	61.4858	2.2015	2.2569
6500	3.7440	70.4483	2.1173	2.3592



Tabla 57.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno a 60°C.

ACERO API 5L X-70				
SALMUERA + 10% KEROSENO (60°C)				
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m ⁻²)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto en la investigación $V_{corr} = 0.5132\tau_w^{0.3385}$ (mmpy)
0	0.0000	0.0000	0.2296	0.0000
500	0.2880	0.8998	0.4831	0.4951
1000	0.5760	2.9236	0.6804	0.7379
1500	0.8640	5.8246	0.7280	0.9318
2000	1.1520	9.4988	0.7334	1.0995
2500	1.4390	13.8808	1.3800	1.2502
3000	1.7280	18.9245	1.5380	1.3885
3500	2.0160	24.5942	1.7790	1.5173
4000	2.3040	30.8617	1.8790	1.6385
4500	2.5920	37.7033	1.9110	1.7534
5000	2.8790	45.0990	1.9440	1.8630
5500	3.1680	53.0316	1.9020	1.9680
6000	3.4560	61.4858	1.9250	2.0691
6500	3.7440	70.4483	1.9280	2.1666



Tabla 58.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

ACERO API 5L X-52				
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (30°C)				
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_{ω}] (N m ⁻²)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto en la investigación $V_{corr} = 1.427\tau_{\omega}^{0.3328}$ (mmpy)
0	0.0000	0.0000	2.2710	0.0000
500	0.2880	1.0681	2.3613	1.4586
1000	0.5760	3.4704	1.8550	2.1590
1500	0.8640	6.9142	2.5426	2.7157
2000	1.1520	11.2756	2.9856	3.1957
2500	1.4390	16.4773	3.6313	3.6257
3000	1.7280	22.4644	3.8550	4.0197
3500	2.0160	29.1947	4.5910	4.3860
4000	2.3040	36.6346	4.6745	4.7302
4500	2.5920	44.7559	4.8400	5.0562
5000	2.8790	53.5350	5.3103	5.3667
5500	3.1680	62.9514	5.5070	5.6641
6000	3.4560	72.9871	5.9983	5.9499
6500	3.7440	83.6261	6.6230	6.2255



Tabla 59.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

ACERO API 5L X-65				
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (30°C)				
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_{ω}] (N m ⁻²)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto en la investigación $V_{\text{corr}} = 14.96\tau_{\omega}^{0.0663}$ (mmpy)
0	0.0000	0.0000	11.8633	0.0000
500	0.2880	1.0681	14.4666	15.0255
1000	0.5760	3.4704	11.5065	16.2474
1500	0.8640	6.9142	18.0900	17.0078
2000	1.1520	11.2756	17.2366	17.5687
2500	1.4390	16.4773	18.3300	18.0165
3000	1.7280	22.4644	20.2200	18.3909
3500	2.0160	29.1947	22.5233	18.7134
4000	2.3040	36.6346	22.7166	18.9974
4500	2.5920	44.7559	22.3166	19.2515
5000	2.8790	53.5350	22.9666	19.4816
5500	3.1680	62.9514	20.3433	19.6922
6000	3.4560	72.9871	16.5266	19.8864
6500	3.7440	83.6261	11.0710	20.0668



Tabla 60.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 30°C.

ACERO API 5L X-70				
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (30°C)				
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m ⁻²)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto en la investigación $V_{\text{corr}} = 0.1547\tau_w^{0.4347}$ (mmpy)
0	0.0000	0.0000	0.0506	0.0000
500	0.2880	1.0681	0.1019	15.0255
1000	0.5760	3.4704	0.1285	16.2474
1500	0.8640	6.9142	0.2834	17.0078
2000	1.1520	11.2756	0.4244	17.5687
2500	1.4390	16.4773	0.4575	18.0165
3000	1.7280	22.4644	0.7046	18.3909
3500	2.0160	29.1947	0.8230	18.7134
4000	2.3040	36.6346	0.8482	18.9974
4500	2.5920	44.7559	0.8657	19.2515
5000	2.8790	53.5350	0.9242	19.4816
5500	3.1680	62.9514	0.9276	19.6922
6000	3.4560	72.9871	0.9263	19.8864
6500	3.7440	83.6261	0.9240	20.0668



Tabla 61.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-52 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

ACERO API 5L X-52				
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (60°C)				
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_{ω}] (N m ⁻²)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto en la investigación $V_{\text{corr}} = 16.75\tau_{\omega}^{0.0155}$ (mmpy)
0	0.0000	0.0000	9.2456	0.0000
500	0.2880	0.9211	14.5700	16.7286
1000	0.5760	2.9927	16.2350	17.0370
1500	0.8640	5.9625	18.5766	17.2200
2000	1.1520	9.7235	18.9766	17.3510
2500	1.4390	14.2092	19.9800	17.4533
3000	1.7280	19.3722	19.5000	17.5374
3500	2.0160	25.1761	19.3300	17.6088
4000	2.3040	31.5918	16.3500	17.6708
4500	2.5920	38.5953	16.3700	17.7258
5000	2.8790	46.1660	15.7100	17.7750
5500	3.1680	54.2862	15.6300	17.8197
6000	3.4560	62.9405	17.1566	17.8606
6500	3.7440	72.1150	19.2633	17.8983



Tabla 62.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-65 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

ACERO API 5L X-65				
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (60°C)				
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_{ω}] (N m ⁻²)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto en la investigación $V_{\text{corr}} = 22.04\tau_{\omega}^{0.0340}$ (mmpy)
0	0.0000	0.0000	11.7933	0.0000
500	0.2880	0.9211	20.2600	21.9784
1000	0.5760	2.9927	24.2333	22.8769
1500	0.8640	5.9625	26.3600	23.4194
2000	1.1520	9.7235	26.6000	23.8120
2500	1.4390	14.2092	18.6800	24.1212
3000	1.7280	19.3722	22.7000	24.3767
3500	2.0160	25.1761	22.7066	24.5949
4000	2.3040	31.5918	24.5633	24.7854
4500	2.5920	38.5953	26.2900	24.9547
5000	2.8790	46.1660	28.9000	25.1072
5500	3.1680	54.2862	27.3733	25.2459
6000	3.4560	62.9405	26.2800	25.3731
6500	3.7440	72.1150	21.1966	25.4908



Tabla 63.- Resultados obtenidos de la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de rotación de ECR, haciendo uso del modelo propuesto y los obtenidos mediante la técnica de Rp para el acero API 5L X-70 en salmuera + 10% Keroseno + 1382.7 ppm H₂S (p=1bar) a 60°C.

ACERO API 5L X-70				
SALMUERA + 10% KEROSENO + 1382.7 ppm H₂S (60°C)				
Velocidad de rotación del ECR (rpm)	Velocidad en la periferia del ECR (m s ⁻¹)	Esfuerzo de corte de superficie [τ_w] (N m ⁻²)	Velocidad de corrosión obtenida por Rp (mmpy)	Velocidad de corrosión obtenida por el modelo propuesto en la investigación $V_{\text{corr}} = 0.5091\tau_w^{0.3385}$ (mmpy)
0	0.0000	0.0000	0.2296	0.0000
500	0.2880	0.9211	0.4831	0.4951
1000	0.5760	2.9927	0.6804	0.7378
1500	0.8640	5.9625	0.7280	0.9317
2000	1.1520	9.7235	0.7334	1.0994
2500	1.4390	14.2092	1.3800	1.2501
3000	1.7280	19.3722	1.5380	1.3883
3500	2.0160	25.1761	1.7790	1.5171
4000	2.3040	31.5918	1,8790	1.6383
4500	2.5920	38.5953	1.9110	1.7532
5000	2.8790	46.1660	1.9440	1.8628
5500	3.1680	54.2862	1.9020	1.9678
6000	3.4560	62.9405	1.9250	2.0689
6500	3.7440	72.1150	1.9280	2.1664



ANEXO A

CÁLCULO DEL NÚMERO DE REYNOLDS

Al determinar el Re partiendo de la velocidad de rotación del ECR en rpm es necesario conocer la velocidad en la periferia del cilindro en m s^{-1} para de esta forma realizar el cálculo del número de Reynolds (Re).

La manera en como el número de Reynolds fue calculado partiendo de la rotación del ECR en rpm se describe a continuación:

1.- Conversión de velocidad angular a velocidad lineal

Considerando las equivalencias:

$$1 \text{ min} = 60 \text{ seg}$$

$$1 \text{ revolución} = 2\pi \text{ radianes}$$

La velocidad de rotación ω [en radianes s^{-1}] será:

$$\omega \left[\frac{\text{radianes}}{\text{s}} \right] = \left[\omega \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \right]$$

Así:

$$\omega \left[\frac{\text{radianes}}{\text{s}} \right] = \omega[\text{en rpm}] \times 0.1042 \dots\dots\dots(1)$$



Sustituyendo la ecuación (1) en (2)

$$V_c = \frac{\omega d_c}{2} \dots\dots\dots(2)$$

Dónde:

- ω = Rotación del CR (velocidad angular) en rad s^{-1}
- D_c = Diámetro del cilindro en m
- V_c = Velocidad en la periferia m s^{-1}

$$V_c = \omega \times 0.05236 \times d_c \dots\dots\dots(3)$$

Dónde:

- ω = Rotación del CR (velocidad angular) en rpm
- D_c = Diámetro del cilindro en m
- V_c = Velocidad en la periferia m s^{-1}

Esta última ecuación (3) fue empleada para llevar a cabo la transformación de velocidad angular (velocidad de rotación del ECR en rpm) a velocidad lineal (velocidad en la periferia del ECR) en la presente investigación.

2.- Cálculo del número de Reynolds para la geometría cilíndrica rotatoria

Para el caso específico de la geometría cilíndrica rotatoria, el cálculo del Re se realizó empleando la siguiente ecuación:



$$Re = \frac{V_c d_c}{\nu} < 200 \dots\dots\dots(4)$$

Dónde:

Re = Número de Reynolds

d_c = Diámetro del cilindro en m

ν = Viscosidad cinemática en $m^2 s^{-1}$

V_c = Velocidad en la periferia del CR en $m s^{-1}$

Si la viscosidad cinemática (ν) es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad se tiene entonces ahora:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots(5)$$

Dónde:

ν = Viscosidad cinemática en $m^2 s^{-1}$

μ = Viscosidad dinámica en $Kg m^{-1} s^{-1}$

ρ = Densidad en $kg m^{-3}$

Realizando la transformación de unidades para la viscosidad dinámica de cp a $Kg m^{-1} s^{-1}$ se aplica:

$$\mu \left[\frac{Kg}{m s} \right] = \mu [en cp] \times 0.001 \dots\dots\dots(6)$$

Sustituyendo la ecuación (6) en la ecuación (5) se tiene:

$$\nu = \frac{\mu \times 0.001}{\rho} \dots\dots\dots(7)$$



Dónde:

ν = Viscosidad cinemática en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

μ = Viscosidad dinámica en cp

ρ = Densidad en Kg m^{-3}

Al sustituir las ecuaciones (3) y (7) en la ecuación (4) y simplificando; se obtuvo la ecuación empleada en la investigación para el cálculo del Re a partir de ecuaciones desarrolladas para la geometría cilíndrica rotatoria:

$$Re_c = \frac{Vc \, dc}{\nu} = \frac{[\omega \times 0.05236 \times dc] \, dc}{\frac{\mu \times 0.001}{\rho}} = \frac{\omega \times 0.05236 \times d^2 \, c \times \rho}{\mu \times 0.001} \dots\dots\dots(8)$$

$$Re_c = \frac{\omega \times 52.36 \times d^2 \, c \times \rho}{\mu} \dots\dots\dots(9)$$

Dónde:

Re_c = Número de Reynolds

dc = Diámetro del cilindro en m

μ = Viscosidad dinámica en cp

ω = Velocidad de rotación del CR (velocidad angular) en rpm

ρ = Densidad en Kg m^{-3}

Cabe recordar que para la geometría cilíndrica rotatoria se conoce que Reynolds mayores a 200 representan un régimen turbulento.



CÁLCULO DEL ESFUERZO DE CORTE DE SUPERFICIE

El esfuerzo de corte de superficie es calculado para cada velocidad de rotación del electrodo de trabajo, aplicando la ecuación propuesta por Silverman:

$$\tau_{\omega} = 0.0791 \text{ Re}^{-0.3} \rho r^2 \omega^2 \dots\dots\dots(10)$$

Dónde:

τ_{ω} = Esfuerzo cortante de superficie en $\text{g cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$

Re = Número de Reynolds

ρ = Densidad en g cm^{-3}

ω = Velocidad de rotación en radianes s^{-1}

r = Radio del cilindro en cm

Sustituyendo la ecuación (1) en la (10) se obtiene:

$$\tau_{\omega} = 0.0791 \text{ Re}^{-0.3} \rho r^2 [\omega \times 0.10472]^2 \dots(11)$$

Dónde:

τ_{ω} = Esfuerzo cortante de superficie en $\text{g cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$

Re = Número de Reynolds

ρ = Densidad en g cm^{-3}

ω = Velocidad de rotación en rpm

r = Radio del cilindro en cm



Si se desea obtener el valor de τ_{ω} en N m^{-2} las unidades que deberán emplearse en la ecuación (11) deberán ser:

Re = Número de Reynolds [Adimensional]

ρ = Densidad en Kg m^{-3}

ω = Velocidad de rotación en rpm

r = Radio del cilindro en m