



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

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

Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales

“Estudio de la corrosión asistida por flujo (FAC) de un material bimetalico con respecto al acabado superficial en la formación de productos de corrosión”

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE INGENIERO EN
METALURGIA Y MATERIALES PRESENTA:

JOSE LUIS HERNANDEZ NAVA

DIRECTORES DE TESIS

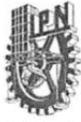
DRA. MANUELA DIAZ CRUZ

DR. JUAN VICENTE MENDEZ MENDEZ



MEXICO, CD.MX

Febrero 2019



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Escuela Superior de
Ingeniería Química e
Industrias
Extractivas

Departamento de
Evaluación y
Seguimiento
Académico

Asunto
Autorización de tema

Folio
T-DEySA-122-18

Lugar
Ciudad de México

Fecha
08 de enero de 2019.

CRG/mlcp.

Pasante
JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ NAVA

Boleta
2014320406

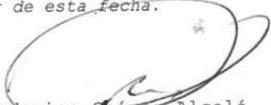
Programa Académico
I.M.M.

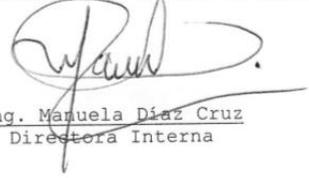
Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica a través de este Departamento autoriza a la **Ing. Manuela Díaz Cruz** y el **Ing. Juan Vicente Méndez Méndez** sean asesores en el tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Individual**, con el título y contenido siguiente:

"Estudio de la corrosión asistida por flujo (FAC) de un material bimetálico con respecto al acabado superficial en la formación de productos de corrosión"

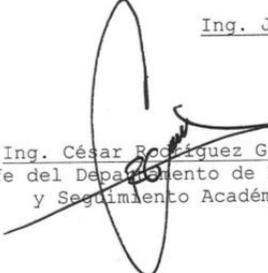
Resumen
Introducción
I: Marco Teórico.
II: Desarrollo experimental.
III: Resultados y discusión.
Conclusiones
Referencias

De acuerdo al artículo 28 del Reglamento de Titulación Profesional del Instituto Politécnico Nacional, el trabajo deberá ser concluido en un término no mayor de un año, a partir de esta fecha.


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


Ing. Manuela Díaz Cruz
Directora Interna


Ing. Juan Vicente Méndez Méndez
Director Externo


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


M. en C. Isaura García Maldonado
Subdirectora Académica

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Edificio 7, Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P.
07738, Ciudad de México, Conmutador 01 (55) 57296000 ext. 55103 y 55104

www.esiqie.ipn.mx : www.ipn.mx



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Folio
T-DEySA-122-18

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"
60 años de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos
70 Aniversario del CECyT No. 3 "Estanislao Ramírez Ruiz"
60 años de XEIPN Canal Once, orgullosamente politécnico
60 Aniversario del CECyT No. 4 "Lázaro Cárdenas"

Asunto
Autorización de Impresión

CDMX, 01 de febrero de 2019

Pasante
JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ NAVA
PRESENTE

Boleta
2014320406

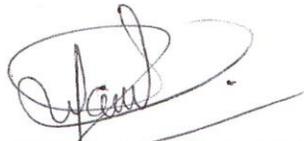
Programa Académico
I.M.M.

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

"Estudio de la corrosión asistida por flujo (FAC) de un material bimetalico con respecto al acabado superficial en la formación de productos de corrosión"

encontramos que el citado trabajo escrito de **Tesis Individual**, reúne los requisitos para **autorizar el examen profesional y proceder a su impresión** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.

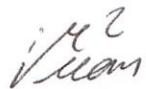
Atentamente
JURADO


Ing. Manuela Díaz Cruz
Presidenta


Dr. Román Cabrera Sierra
Secretario


Ing. Sergio Javier García Núñez
Vocal 1


M. en C. Arturo Cervantes Tobón
Vocal 2


Ing. Juan Vicente Méndez Méndez
Vocal 3

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar
CRG/mlcp

Edificio 7, 1er piso, Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Col. Zacatenco,
Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México,
Conmutador 01 (55) 57296000 ext. 55103 Y 55104 www.esiqie.ipn.mx; www.ipn.mx



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

"2019. Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapala"
60 años de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos
70 Aniversario del CECyT No. 3 "Eslanlao Ramírez Ruiz"
60 años de XEIPN Canal Once, orgullosamente politécnico
60 Aniversario del CECyT No. 4 "Lázaro Cárdenas"

Folio
T-DEySA-122-18

Asunto
Cesión de derechos

CDMX, 01 de febrero de 2019

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

El/La que suscribe: **José Luis Hernández Nava** estudiante del Programa de: **Ingeniería en Metalurgia y Materiales** con número de Boleta: **2014320406**, manifiesta que es autor/a intelectual del presente trabajo escrito, por la opción: **Tesis Individual**, bajo la dirección del profesor/a **Ing. Manuela Díaz Cruz**, ceden los derechos del trabajo: **"Estudio de la corrosión asistida por flujo (FAC) de un material bimetálico con respecto al acabado superficial en la formación de productos de corrosión"** 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 de correo electrónico **navaurban@live.com.mx**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Atentamente


José Luis Hernández Nava
Nombre y Firma del/la
estudiante


Manuela Díaz Cruz
Nombre y Firma
Del/la director(a)

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis padres Bertha y Bernabé por ser los que me dieron la vida y por todo el apoyo que me han otorgado con su cariño y sacrificios durante este tiempo que he dedicado al estudio, porque todo lo que me han enseñado, me ha servido en mi formación como persona y experiencias de mi vida.

A mi hermana Angely por ser una persona que ha influido en mi vida y que los momentos que he pasado con ella me han servido como experiencia tanto de felicidad como de tristeza.

A la Dra. Manuela Díaz Cruz por su tiempo, paciencia y consejos que me ofreció, porque todo lo que aprendí me ha llevado a un gran avance en mi carrera profesional.

Al Dr. Juan Vicente Méndez Méndez por su apoyo, dedicación y conocimientos que me brindo durante esta investigación, y que todos los consejos que de igual forma me otorgo, servirán de experiencia profesional.

Al Dr. Arturo Cervantes Tobón por su amistad y conocimientos valiosos que aprendí durante todo este tiempo.

A mis compañeros de laboratorio, Brandon y Lulú con quienes con su amistad compartí buenos momentos y además por el compañerismo recibido cuando lo necesitaba.

A mis compañeros de la carrera, principalmente a Jonathan, Evani y Víctor porque sin su compañía, no hubiera tenido agradables momentos durante la universidad.

Al M. en C. Sergio Javier García Núñez y Dr. Román Cabrera Sierra porque gracias a ustedes, este trabajo se mejoró positivamente.

Al Instituto Politécnico Nacional por la gran oportunidad otorgada de estudiar en esta gran casa de estudios y por dejarme explotar los conocimientos académicos brindados para la realización de esta tesis.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	IV
INDICE	V
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	XIV
RESUMEN	XVI
INTRODUCCIÓN	XVII
OBJETIVOS	XIX
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	XIX
CAPÍTULO 1	1
MARCO TEÓRICO	1
1.1.- Definición de corrosión	1
1.2.- Principios básicos	1
1.2.1.- Potencial del electrodo en las celdas electroquímicas.....	3
1.2.2.- Numero de Reynolds.....	5
1.2.3.- Formas de corrosión.....	5
1.3.- FAC (Flow Accelerated Corrosion)- Corrosión Asistida por Flujo	7
1.3.1.- Flujo monofásico	9
1.3.2.-Flujo bifásico	10
1.4.- Corrosión por CO ₂	11
1.5.-Cladding o revestimiento	12
1.5.1.- Procesos de fabricación de un cladding	13
1.5.2.-Clasificación de un revestimiento (Clad-Metal)	15
1.6.- Técnicas electroquímicas	16
1.6.1.-Metodología básica de montaje electroquímico	16
1.6.2.- Potencial a circuito abierto (OCP).....	17
1.6.3.- Resistencia a la polarización lineal (LPR)	18
1.6.4.- Técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica	21
1.7.- Técnicas de caracterización	23
1.7.1.- Difracción de Rayos X (DRX).....	23
1.7.2.- Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	25
1.7.3.- Perfilómetro Óptico.....	26

1.7.3.1.- La textura superficial.....	27
1.7.3.2.- El perfil	28
1.7.3.3.- Parámetros de rugosidad	29
CAPÍTULO 2.....	32
ESTADO DEL ARTE	32
CAPÍTULO 3.....	37
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	37
3.1.- Equipo y materiales.....	39
3.1.1.- Equipo experimental.....	39
3.1.2.- Celda de impacto.....	40
3.1.3.- Equipo para pruebas electroquímicas de resistencia a la polarización y espectroscopia de impedancia electroquímica	42
3.2.-Material bimetálico	42
3.2.1.- Preparación de las probetas para las pruebas electroquímicas	43
3.2.2.-Preparación del medio electroquímico	44
3.3.- Condiciones experimentales.....	44
3.4.- Técnica de resistencia a la polarización lineal e Impedancia electroquímica	45
3.5.- Caracterización de los productos de corrosión	45
3.5.1.- Microscopio electrónico de barrido	45
3.5.2.-Difracción de rayos X- haz rasante.....	46
3.5.3.- Perfilometro óptico.....	47
CAPÍTULO 4.....	48
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
4.1.- Resultados de la caracterización inicial de los aceros API 5L X65 y el revestimiento del inconel 825.....	48
4.2.- Análisis de Potencial a Circuito Abierto (OCP, por sus siglas en inglés).....	50
4.2.1.- Potencial a circuito abierto (OCP) para el ángulo de 30° para un acabado de lija #2000 y pulido a espejo	50

4.2.2.- Potencial a circuito abierto (OCP) para ángulo de 60° acabado lija #2000 y pulido a espejo	51
4.2.3.- Potencial a circuito abierto (OCP) para ángulo de 90° acabado lija #2000 y pulido a espejo	52
4.3.- Análisis de velocidad de corrosión mediante resistencia a la polarización (RPL).....	52
4.4. Análisis de espectroscopia de impedancia electroquímica	55
4.5. Resultados de caracterización superficial mediante microscopia electrónica de barrido (MEB)	55
4.5.1.- Caracterización superficial de los productos de corrosión mediante MEB para un ángulo de 30° con acabado superficial a lija #2000 y pulido a espejo.....	56
4.5.2.- Análisis de los productos de corrosión por EDS para un ángulo de 30° con acabado superficial a lija #2000 y pulido a espejo	57
4.5.3.- Análisis puntual para un ángulo de 30° con acabado superficial a lija #2000	57
4.5.4.- Análisis puntual para un ángulo de 30° con acabado superficial pulido a espejo	59
4.5.5.- Caracterización superficial de los productos de corrosión mediante MEB para un ángulo de 60° con acabado superficial a lija #2000 y pulido a espejo.....	60
4.5.6.- Análisis de los productos de corrosión por EDS para un ángulo de 60° con acabado superficial a lija #2000 y pulido a espejo	61
4.5.7.- Análisis puntual para un ángulo de 60° con acabado superficial a lija #2000	61
4.5.8.- Análisis puntual para un ángulo de 60° con acabado superficial pulido a espejo	62
4.5.9.- Caracterización superficial de los productos de corrosión mediante MEB para un ángulo de 90° con acabado superficial a lija #2000	63
4.5.10.- Análisis de los productos de corrosión por EDS para un ángulo de 90° con acabado superficial a lija #2000	64
4.5.11.- Caracterización superficial de los productos de corrosión mediante MEB para un ángulo de 90° con acabado superficial pulido a espejo	65
4.5.12.- Análisis de los productos de corrosión por EDS para un ángulo de 90° con acabado superficial pulido a espejo	66
4.5.13. Análisis puntual para un ángulo de 90° con acabado superficial pulido a espejo	66
4.6. Resultados de caracterización superficial mediante difracción de rayos X haz rasante	67
4.6.1. Resultados de caracterización superficial mediante difracción de rayos X para un ángulo de 30° acabado superficial lija #2000 y pulido a espejo.....	68
4.6.2. Resultados de caracterización superficial mediante difracción de rayos X para un ángulo de 60° acabado superficial lija #2000 y pulido a espejo.....	69
4.6.3. Resultados de caracterización superficial mediante difracción de rayos X para un ángulo de 90° acabado superficial lija #2000 y pulido a espejo.....	70

4.7. Resultados de caracterización superficial mediante perfilometría óptica	72
4.7.1.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado a lija #2000 previo a la prueba electroquímica	72
4.7.2.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado pulido a espejo previo a la prueba electroquímica	73
4.7.3.- Parámetros de rugosidad con acabado superficial lija #2000 y pulido a espejo previos al ataque electroquímico.....	74
4.7.4.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado superficial a lija #2000 en un ángulo de 30°	75
4.7.5.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado a lija #2000 en un ángulo de 90°	77
4.7.6.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado pulido a espejo en un ángulo de 30°	79
4.7.7.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado pulido a espejo en un ángulo de 90°	82
4.7.8.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado a lija #2000 en un ángulo de 60°	84
4.7.9.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado pulido a espejo en un ángulo de 60°	86
CONCLUSIONES.....	89
BIBLIOGRAFIA.....	90
APÉNDICE A.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquemática de una celda electroquímica del acero sumergido en agua.	2
Figura 2	Ilustración esquemática de la disolución del hierro sumergido en agua.	2
Figura 3	Diagrama de la clasificación de los tipos de corrosión.	7
Figura 4	Esquema de la disolución del material a través de la película de óxido de la superficie y eliminación de las especies disueltas en el agua.	9
Figura 5	Gráfica hipotética de la resistencia a la polarización.	19
Figura 6	Representación gráfica hipotética de diagrama de Nyquist.	22
Figura 7	Representación de geometría de difracción de Rayos X, en planos hipotéticos cristalinos A, B y C.	24
Figura 8	Representación de obtención de patrones de difracción.	24
Figura 9	Representación de la columna de un microscopio electrónico de barrido convencional.	25
Figura 10	Representación del funcionamiento de un perfilometro óptico.	26
Figura 11	Representación hipotética de una superficie topográfica.	27
Figura 12	Rugosidad de una superficie, en i) en una distancia de $Y'-Y'$ a 5000X aumentos, pero en ii) la distancia de $X'-X'$ a 1000 X aumentos, ambas rugosidades se cuantifican en un perfil de alturas en iii) son exactamente el mismo material.	29
Figura 13	Representación de la rugosidad media R_a en un perfil hipotético.	30
Figura 14	Representación de un perfil que muestra 5 valores de R_p y 5 valores de R_v , p_1 , p_2 , p_3 , p_4 y p_5 como los picos más altos y v_1 , v_2 , v_3 , v_4 y v_5 los valles más profundos en todo el perfil	31
Figura 15	Representación de un perfil de los parámetros $R_p=R_{p3}$, el parámetro $R_v=R_{v4}$, R_{pm} el promedio de los valores de R_{pi} , R_{vm} el promedio de los valores R_{vi} y el parámetro $R_t=R_{p3}+R_{v4}$	31

Figura 16	Material bimetálico	37
Figura 17	Metodología experimental.	38
Figura 18	Arreglo del equipo experimental.	39
Figura 19	Geometría de la celda de impacto.	41
Figura 20	Diferentes ángulos de incidencia en la cámara de impacto, (a) 90°, (b) 60° y (c) 30°.	41
Figura 21	Potenciostato Versastat 3, Princeton Applied Research	42
Figura 22	Forma de la cuponera con el material de estudio.	43
Figura 23	Microscopio Electrónico de Barrido marca JEOL JSM-6300.	46
Figura 24	Difractómetro D8 Focus Bruker.	46
Figura 25	Perfilómetro óptico marca Bruker modelo Contour GT-K 3D	47
Figura 26	Zona de escaneo.	47
Figura 27	Metalografía del acero API 5L X65 (a) zona transversal X50 magnificaciones (b) zona longitudinal X50 magnificaciones.	48
Figura 28	Metalografía del inconel825 (a) zona longitudinal X20 magnificaciones (b) zona transversal X50.	49
Figura 29	Potencial a circuito abierto que muestra la variación de potencial en función del tiempo del acabado superficial para un ángulo de 30°.	50
Figura 30	Potencial a circuito abierto que muestra la variación de potencial en función del tiempo del acabado superficial para un ángulo de 60°.	51
Figura 31	Potencial a circuito abierto que muestra la variación de potencial en función del tiempo del acabado superficial para un ángulo de 90°.	52
Figura 32	Graficas de resistencia a la polarización lineal correspondientes al ángulo de 30° (a) lija #2000 y (b) pulido a espejo.	53

Figura 33	Velocidad de corrosión generada para los ángulos de 30°, 60° y 90° con acabado superficial lija #2000 y pulido a espejo.	55
Figura 34	Micrografías de la superficie del material bimetálico en la interface a (a) lija #2000 y (b) pulido a espejo.	56
Figura 35	Análisis puntual del material bimetálico en la interface con acabado a lija #2000 en un ángulo de 30° a 300X magnificaciones.	58
Figura 36	Análisis puntual del material bimetálico en la interface con acabado pulido a espejo en un ángulo de 30° a 1000X magnificaciones.	59
Figura 37	Micrografías de la superficie del material bimetálico en la interface a 300X y 3000X magnificaciones en ángulo de 60° a (a) lija #2000 y (b) pulido a espejo.	60
Figura 38	Análisis puntual del material bimetálico en la interface con acabado lija #2000 en un ángulo de 60° a 300X magnificaciones.	62
Figura 39	Análisis puntual del material bimetálico en la interface con acabado pulido a espejo en un ángulo de 60° a 1000X magnificaciones.	63
Figura 40	Micrografías de la superficie del material bimetálico en la interface a 300X magnificaciones en ángulo de 90° lija #2000 (a) Superficie del Inconel y (b) Superficie del Acero API.	64
Figura 41	Micrografías de la superficie del material bimetálico en la interface a 300X y 3000X magnificaciones en ángulo de 90° pulido a espejo.	65
Figura 42	Análisis puntual del material bimetálico en la interface con acabado pulido a espejo en un ángulo de 90° a 1000X magnificaciones.	67
Figura 43	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados en el material bimetálico para un ángulo de 30° con acabado de lija #2000 y pulido a espejo.	68
Figura 44	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados en el material bimetálico para un ángulo de 60° con acabado de lija #2000 y pulido a espejo.	69
Figura 45	Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados en el material bimetálico para un ángulo de 90° con acabado de lija #2000 y pulido a espejo.	70

Figura 46	Caracterización por perfilometría óptica del material bimetálico con desbaste a lija #2000 sin corrosión (a) imagen óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) perfil del eje x.	73
Figura 47	Caracterización por perfilometría óptica del material bimetálico con pulido sin corrosión (a) imagen óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) perfil del eje x.	74
Figura 48	Caracterización por perfilometría óptica del material bimetálico desbaste a lija #2000 con corrosión ángulo de 30°(a) imagen óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) perfiles del eje x.	76
Figura 49	Caracterización por perfilometría óptica del material bimetálico desbaste a lija #2000 con corrosión ángulo de 90°(a) imagen óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) Perfiles del Eje X.	78
Figura 50	Caracterización por perfilometría óptica del material bimetálico superficie pulida con corrosión ángulo de 30°(a) imagen óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) Perfiles del eje X.	80
Figura 51	Caracterización por perfilometría óptica del material bimetálico pulida con corrosión ángulo de 90°(a) imagen óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) Perfiles del Eje X.	83
Figura 52	Caracterización por perfilometría óptica del material bimetálico a lija #2000 con corrosión ángulo de 60°(a) fotografía óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) Perfiles del Eje X.	85

Figura 53	Caracterización por perfilometría óptica del material bimetálico pulido con corrosión ángulo de 60°(a) fotografía óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) Perfiles del Eje X.	87
Figura 54	Espectros de Nyquist de espectroscopia de impedancia electroquímica correspondientes a lija #2000 (a) para ángulos de 30° (b) ángulo de 60° y (c) ángulo de 90°.	94
Figura 55	Espectros de Nyquist de espectroscopia de impedancia electroquímica correspondientes a pulido a espejo (a) para ángulos de 30° (b) ángulo de 60° y (c) ángulo de 90°.	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Potenciales de electrodo estándar (llamada serie FEM) de metales para medias celdas de reducción, respecto al electrodo de hidrogeno estándar.	4
Tabla 2	Parámetros de amplitud.	30
Tabla 3	Salmuera elaborada NACE 1D-196 (12L)	44
Tabla 4	Cantidades de reactivos para la formación de CO ₂	44
Tabla 5	Condiciones experimentales para las pruebas electroquímicas.	45
Tabla 6	Composición química acero API 5L X65.	49
Tabla 7	Composición química inconel 825.	49
Tabla 8	Promedio de las velocidades de corrosión para acabados de lija 2000 y pulido a espejo para ángulos de 30°, 60° y 90°.	54
Tabla 9	Composición de los productos de corrosión distribuidos sobre la superficie en ángulo de 30° acabado a lija #2000 y pulido a espejo.	57
Tabla 10	Composición del análisis puntual en ángulo de 30° a lija #2000 del material bimetálico en la interface.	58
Tabla 11	Composición del análisis puntual en ángulo de 30° pulido a espejo del material bimetálico en la interface.	59
Tabla 12	Composición de los productos de corrosión distribuidos sobre la superficie en ángulo de 60° acabado a lija #2000 y pulido a espejo.	61
Tabla 13	Composición del análisis puntual en ángulo de 60° a lija #2000 del material bimetálico en la interface.	62
Tabla 14	Composición del análisis puntual en ángulo de 60° con pulido a espejo del material bimetálico en la interface.	63

Tabla 15	Composición de los productos de corrosión distribuidos sobre la superficie en ángulo de 90° acabado lija #2000.	65
Tabla 16	Composición de los productos de corrosión distribuidos sobre la superficie en ángulo de 90° acabado pulido a espejo.	66
Tabla 17	Composición del análisis puntual en ángulo de 90° pulido a espejo del material bimetálico en la interface.	67
Tabla 18	Análisis comparativo de los productos de corrosión formados en la superficie del material bimetálico en un ángulo de 30°, 60° y 90°.	71
Tabla 19	Parámetros de amplitud de rugosidad previo a la prueba electroquímica con acabado a lija #2000 y pulido a espejo.	75
Tabla 20	Rugosidades cupón lija #2000 en posición de 30°.	77
Tabla 21	Rugosidades cupón lija #2000 en posición de 90°.	79
Tabla 22	Rugosidades cupón pulido en posición de 30°.	81
Tabla 23	Rugosidades cupón pulido en posición de 90°.	84
Tabla 24	Rugosidades cupón lija #2000 en posición de 60°.	86
Tabla 25	Rugosidades cupón pulido a espejo en posición de 60°.	88

RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo con el fin de estudiar la velocidad de corrosión asistida por flujo (FAC) de un material bimetálico compuesto por un acero API 5L X65 y un Inconel 825 a dos acabados superficiales (pulido y lija #2000) los cuales fueron sometidos a una salmuera dulce para estudiar la formación de productos de corrosión. Las pruebas electroquímicas se realizaron en una cámara de impacto (jet impingement) con 3 diferentes ángulos de impacto sobre el material bimetálico previamente desbastado (#2000 y pulido a espejo), además se utilizó un electrodo auxiliar y un electrodo de referencia (electrodo de grafito y un electrodo de calomel respectivamente). Las pruebas fueron realizadas a una velocidad de flujo de 2.36 m/s para tres ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°.

Mediante resistencia a la polarización lineal (RPL) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) se determinaron las velocidades de corrosión para los diferentes casos de acabado de la superficie y ángulo de impacto. Los resultados demostraron que a 30° presento la mayor velocidad de corrosión con un acabado superficial a pulido a espejo. Este comportamiento se atribuye a que los esfuerzos de corte afectan la superficie, además, la menor rugosidad superficial provoca que los productos de corrosión no se anclen y los escasos productos que se anclaron son removidos de la superficie por efecto del flujo proporcionando una mínima protección al material.

Los productos de corrosión se caracterizaron por microscopia electrónica de barrido (MEB) observándose diferente morfología, dichos productos depositados presentan diferentes composiciones químicas a causa de la salmuera y por el efecto de la reacción química. Las especies cristalinas de los productos de corrosión se determinaron mediante difracción de rayos X por haz rasante (DRX) para los 3 ángulos con sus respectivos acabados superficiales, observado que las estructuras cristalinas que proporcionan la menor velocidad de corrosión en las muestras lijadas a #2000 es la siderita (FeCO_3) y en el caso de las muestras pulidas a espejo fue la cementita (Fe_3C) principalmente.

Mediante perfilometría óptica se determinaron las diferentes rugosidades antes y después de la formación de los productos de corrosión, observando que a mayor rugosidad del material bimetálico se tiene una disminución de la velocidad de corrosión, debido a la formación de valles y crestas.

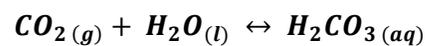
INTRODUCCIÓN

El comportamiento del flujo en tuberías cobra gran importancia debido a las velocidades que se alcanzan, ya que el flujo es capaz de remover mecánicamente las capas de óxido protectoras que se forman en las paredes del acero, seguido de la liberación de cationes ferrosos en la superficie del metal y el constante desprendimiento y arrastre de éstas capas, a este fenómeno se le conoce *Corrosión Asistida por Flujo (Flow Accelerated Corrosion, FAC)*.^[1, 2] El adelgazamiento de las paredes del material es causado por reacciones químicas o electroquímicas que ocurren en la superficie del metal, las cuales son las causantes de la degradación del mismo.^[1]

La FAC puede ser afectada por diferentes variables tales como, composición química del material, temperatura, pH, el contenido de oxígeno, la velocidad de fluido, así como del medio que se transporte ya sea dulce (CO₂) y/o amargo (H₂S). Sin embargo, los principales factores son la velocidad de flujo y su turbulencia debido a que afectan la capa límite en el interior de la tubería y por la solubilidad de los iones en disolución.^[3]

Por lo anterior el objetivo del presente trabajo es evaluar la corrosión asistida por flujo de un material bimetálico al utilizar un medio dulce (CO₂) debido a que en la industria petrolera presenta las mayores pérdidas de material debido a la presencia de este medio^[3]. En estudios realizados en la década de los 70's, se observó que el 28% de las fallas en los campos petroleros son originadas principalmente por la presencia del CO₂. Por lo tanto, la importancia de estudiar este tipo de corrosión es vital para encontrar soluciones y reducir el daño de las tuberías y, por ende, reducir costos de operación. Con la presencia de CO₂ e interactuando con el acero se forma el carbonato ferroso conocido como Siderita (FeCO₃), el cual proporciona protección en la corrosión dulce de las tuberías. La corrosión por CO₂ se puede explicar con las siguientes reacciones^[4, 5, 6, 7]:

Disolución del gas



Primera disociación del ácido

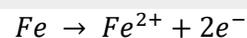


Segunda disociación del ácido

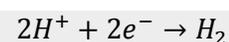


Reacciones electroquímicas

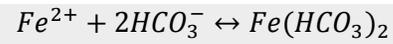
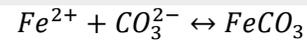
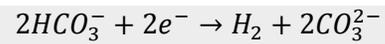
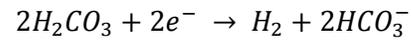
Disolución del ánodo



Reacción catódica



**Precipitación de carbonato de hierro
(FeCO₃)**



Como ya se mencionó, la corrosión en general es afectada por las diferentes variables, adicionalmente en esta investigación se considera la rugosidad como un parámetro importante en la velocidad de corrosión. En estudios previos, se ha observado que un incremento de la rugosidad superficial del material aumenta la susceptibilidad a las picaduras y como consecuencia un incremento de la velocidad de corrosión. [8, 9]

OBJETIVOS

Evaluación del acabado superficial (rugosidad) con respecto a la corrosión asistida por flujo (FAC) de un material bimetálico compuesto de un acero API 5L X65 e Inconel825 en un medio dulce (CO_2).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterización microestructural y química del material bimetálico.
- Obtención de la velocidad de corrosión mediante técnicas electroquímicas tales como resistencia a la polarización lineal (LRP) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) a 3 diferentes ángulos (30° , 60° y 90°) y diferente acabado superficial (lija #2000 y pulido a espejo).
- Caracterización de la morfología de los productos de corrosión mediante Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).
- Caracterización de las especies cristalinas mediante Difracción de Rayos X (DRX).
- Determinación de los valores de rugosidad antes y después de las pruebas electroquímicas.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1.- Definición de corrosión

La corrosión es el deterioro natural y el posterior desgaste del material debido a las reacciones electroquímicas generadas por su entorno, tanto en el interior como en exterior.

Algunos ejemplos comunes del proceso de corrosión son el deterioro de los objetos electrodomésticos, la oxidación de tuberías del gas o suministro de agua y aun siendo consecuencias comunes, estos suelen ser costosos.

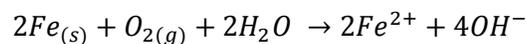
De manera indirecta, la corrosión afecta en otras formas, por ejemplo:

- Tiempo de inactividad por remplazo de equipo corroído
- Pérdida de producto, es decir, algún derrame de cierto producto ya sea orgánico o inorgánico.
- Además, desencadenamiento de contaminación y pérdida de eficiencia en una respectiva industria.

Por lo tanto, investigaciones recientes están enfocadas a la prevención de la corrosión buscando métodos para prolongar la vida útil del material. ^[10, 11, 12, 13]

1.2.- Principios básicos

La corrosión acuosa es uno de los problemas más comunes en la industria y habitualmente se ven afectados por estar en ambientes húmedos. ^[11] En las Figuras 1 y 2 se muestra el acero al estar en contacto con el agua, el cual pasa a su estado iónico Fe^{2+} debido a la oxidación del hierro:



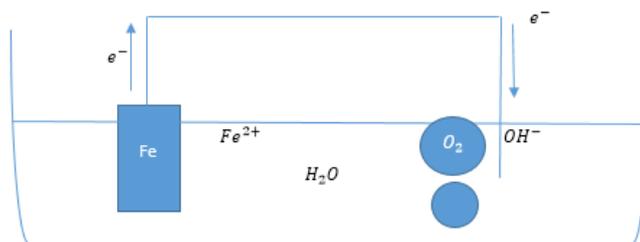


Figura 1 Esquemática de una celda electroquímica del acero sumergido en agua.

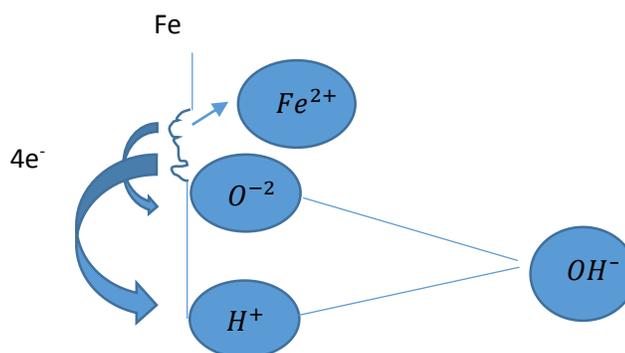
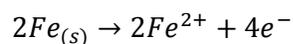


Figura 2 Ilustración esquemática de la disolución del hierro sumergido en agua.

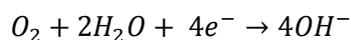
En la Figura 1, se puede notar la presencia de 3 fases que forman la celda electroquímica los cuales son:

- Una fase ion-conductor (solución de agua)
- Fase metálica (ánodo) (el hierro)
- Una fase gas (cátodo)(las burbujas de O_2)

Así que el hierro transfiere electrones a la fase de $O_2 + 2H_2O$ y el hierro se empieza a disolver en la solución de agua.



Esto ocasiona que el metal se disuelva cediendo electrones y los electrones transferidos dan lugar a la reacción del lado derecho:



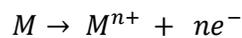
De esta forma los átomos de un metal pierden electrones y se convierten en iones conforme se va disolviendo el metal es decir el hierro; esto significa que dentro de la solución están

presentes los iones de Fe, OH, H. Este proceso comúnmente es conocido como una celda electroquímica de circuito cerrado. [10, 11, 13]

Los elementos de una celda electroquímica son:

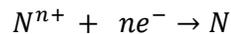
Ánodo: donde sucede la reacción anódica y es el material que se oxida.

- Reacción anódica o de oxidación: es donde se lleva a cabo la corrosión del material, debido a que el ánodo cede electrones, esto es conocido como el fenómeno de oxidación; debido a que el material se ioniza, entonces el material cede iones al electrolito y este se corroe, mientras que los electrones salen del ánodo (-) al circuito eléctrico.



Cátodo: donde sucede la reacción catódica y, por ende, el material se reduce.

- Reacción catódica o de reducción: es el material que recibe los electrones y debido a la reacción se produce la reducción de especies.



Electrolito: medio que está en contacto con ambos electrodos y es conductor.

Puente químico: es el dispositivo o una unión que permite la conexión entre los materiales formando la celda galvánica, permitiendo un flujo de electrones.

1.2.1.- Potencial del electrodo en las celdas electroquímicas

La diferencia de potenciales de un material es el factor principal que describe una reacción de corrosión. Para determinar esa diferencia de potencial se utiliza la serie de fuerza electromotriz. La Tabla 1 indica cuando un metal tiene una tendencia a disolverse o depositarse, por lo tanto:

- Si un metal o aleación cede más electrones que el hidrogeno, el potencial de electrodo es negativo y se convierte en ánodo.
- Pero si el metal o aleación cede menos electrones que el hidrogeno, el potencial de es positivo y se convierte en cátodo.

Tabla 1 Potenciales de electrodo estándar (llamada serie FEM) de metales para medias celdas de reducción, respecto al electrodo de hidrogeno estándar.

Reacción del electrodo	Potencial estándar a 25° C (77°F), volts contra EHE
$Au^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Au$	1.50
$Pd^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Pd$	0.987
$Hg^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Hg$	0.854
$Ag^{+} + e^{-} \rightarrow Ag$	0.800
$Hg_2^{2+} + 2e^{-} \rightarrow 2Hg$	0.789
$Cu^{+} + e^{-} \rightarrow Cu$	0.521
$Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu$	0.337
$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$	0.000
<i>(Referencia)</i>	
$Pb^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Pb$	-0.126
$Sn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Sn$	-0.136
$Ni^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Ni$	-0.250
$Co^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Co$	-0.277
$Tl^{+} + e^{-} \rightarrow Tl$	-0.336
$In^{3+} + 3e^{-} \rightarrow In$	-0.342
$Cd^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cd$	-0.403
$Fe^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Fe$	-0.440
$Ga^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Ga$	-0.53
$Cr^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Cr$	-0.74
$Cr^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cr$	-0.91
$Zn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Zn$	-0.763
$Mn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Mn$	-1.18
$Zr^{4+} + 4e^{-} \rightarrow Zr$	-1.53
$Ti^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Ti$	-1.63
$Al^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Al$	-1.66
$U^{3+} + 3e^{-} \rightarrow U$	-1.80
$Be^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Be$	-1.85
$Mg^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Mg$	-2.37
$Na^{+} + e^{-} \rightarrow Na$	-2.71
$Ca^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Ca$	-2.87
$K^{+} + e^{-} \rightarrow K$	-2.93
$Li^{+} + e^{-} \rightarrow Li$	-3.05

Cuando más negativo sea el valor de potencial E_o , más anódico se convierte con respecto a un segundo material por lo tanto tendrá mayor tendencia a llevarse a cabo una reacción de oxidación.

Pero cuando un metal tiene un potencial de electrodo positivo, este tiende a ser más noble y la reacción de oxidación puede beneficiar al material, es decir genera una capa de óxido que puede proteger al material retrasando el deterioro. ^[14]

1.2.2.- Numero de Reynolds

Este valor es utilizado para establecer qué tipo de flujo tiene un fluido. Generalmente este valor se ve afectado por la velocidad, densidad, viscosidad y el diámetro de la tubería. ^[10]

La Ec. 1 describe el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (1)$$

Donde:

$\rho \rightarrow$ Densidad de Fluido $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

$V \rightarrow$ Velocidad característica del fluido $\left(\frac{m}{s}\right)$

$D \rightarrow$ Diametro de la tubería a través de la cual circula el fluido (m)

$\mu \rightarrow$ Viscosidad del fluido (Pa * s)

$Re \rightarrow$ Numero de Reynolds (adimensional)

Con el número de Reynolds, se puede clasificar el flujo dentro de una tubería los cuales se clasifican en:

- **Flujo laminar:** Este tipo de flujo ocurre a velocidades de fluido bajas y a viscosidades altas, el movimiento del fluido es ordenado debido a que las capas del fluido se deslizan unas sobre otras. $Re \leq 2100$
- **Flujo turbulento:** Este tipo de flujo se ve afectado por la velocidad de un flujo, esto ocasiona que ahora el movimiento del fluido sea desordenado y genere remolinos $Re \geq 4000$

1.2.3.- Formas de corrosión

El fenómeno de la corrosión sucede de distintas maneras dependiendo de su naturaleza o mecanismo. Por ello, la corrosión puede clasificarse basándose en uno de los siguientes factores ^[15, 16]:

1.- Mecanismo de corrosión: Dependiendo del mecanismo por el cual los metales se

corroen es su clasificación. Este mecanismo puede ser electroquímico o simplemente químico.

2.- Naturaleza de la sustancia corrosiva: La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca. Cuando el metal se encuentra en contacto con una solución acuosa se le denomina corrosión húmeda. Cuando el metal se encuentra en contacto con gases a alta temperatura se denomina corrosión seca.

3.- Apariencia: Dependiendo de la apariencia de la zona corroída, la corrosión puede ser generalizada o puede ser localizada. En la corrosión generalizada toda la superficie del metal se corroe a la misma velocidad, mientras que en la corrosión localizada solamente resultan afectadas áreas pequeñas.

La corrosión generalizada o localizada permite establecer la naturaleza y consecuencias del fenómeno, es decir, permite crear una mayor diferencia entre los tipos de corrosión explicando el mecanismo por el cual se lleva a cabo el fenómeno y cuáles son los factores que lo determinan.

La Figura 3 muestra un esquema de la clasificación de la corrosión de acuerdo a la apariencia dividida en dos grupos: Corrosión generalizada y Corrosión localizada. En la Corrosión generalizada se observa un aspecto corroído, desgastado y áspero en toda la superficie del material, siendo este aspecto producto de las reacciones electroquímicas que han ocurrido de una manera uniforme en toda la superficie expuesta a un medio. Mientras que la Corrosión localizada se suscita en áreas de la superficie del material perfectamente ubicadas concentrándose en esos sitios el fenómeno de corrosión.

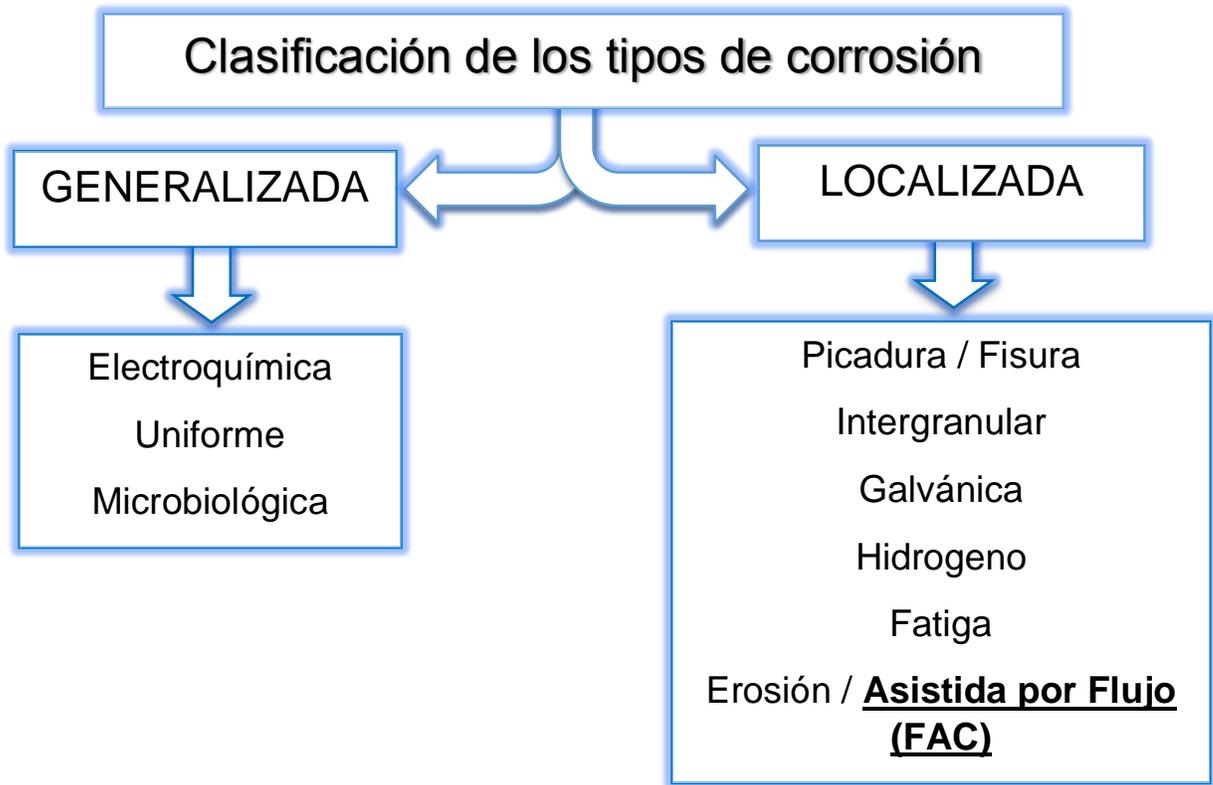


Figura 3 Diagrama de la clasificación de los tipos de corrosión.

Se puede observar que dentro de la corrosión generalizada y la corrosión localizada existen diferentes maneras en las que se puede presentar el fenómeno de corrosión. En esta investigación se estudia la Corrosión Asistida por Flujo (FAC por sus siglas en ingles).

1.3.- FAC (Flow Accelerated Corrosion)- Corrosión Asistida por Flujo

Este tipo de corrosión es similar a la corrosión por erosión sin embargo en el FAC involucra factores electroquímicos y no de desgaste mecánico como corrosión por erosión.

En FAC se forma debido a 2 factores principalmente, por disolución química y transferencia de masa.

Los mecanismos que se atribuyen a que exista una mayor transferencia de masa es la turbulencia del flujo que es ocasionada por cambios de dirección o de ángulo y por orificios en la superficie del material.

Un dato importante, es que la disolución puede suceder a lo largo de la tubería por donde pasa el fluido, pero igual la falla puede generarse principalmente en zonas localizadas. Dicho adelgazamiento genera una falla al material de forma repentina y catastrófica, tal como se muestra en la Figura 4. Debido a un flujo muy turbulento la corrosión puede aumentar y generar mayor adelgazamiento, por lo tanto, debe estar bajo supervisión. Sin embargo, un cambio de turbulencia puede afectarse por geometrías que promueven un aumento de velocidad y una mayor velocidad de corrosión por flujo acelerado (FAC).

Además, esta forma de corrosión FAC puede ser prolongada debido al contenido de cromo, se ha demostrado que en materiales con un contenido de Cr mayor a 0.3% Cr o aleaciones Cr-Mo reduce la velocidad de corrosión. [3, 4]

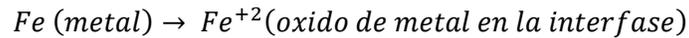
La FAC se ve afectado por otros parámetros tales como^[17]:

- ❖ Composición de material
- ❖ Temperatura
- ❖ pH
- ❖ Contenido de oxígeno disuelto
- ❖ Geometría de tubería
- ❖ Velocidad de flujo
- ❖ Rugosidad del material

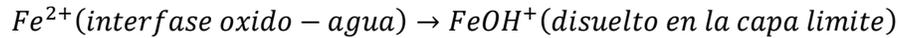
Existe un modelo que muestra el mecanismo de FAC en el acero el cual es^[3, 18]:

1. La oxidación genera la disolución del material formando iones del metal en la superficie.
2. Empieza la difusión de los iones ferrosos en el electrolito y en la capa del óxido formado por la corrosión interna los iones precipitan formando magnetita y en la capa externa es la que se sigue disolviendo.
3. Así que la transferencia de masa de los iones ferrosos en la interfaz óxido – agua a través de la capa límite de agua cerca de la superficie se forma el producto de los iones de hierro con el agua un hidróxido de hierro que se remueve.
4. Como existe pérdida de masa, es decir el espesor puede ir disminuyendo, existe mayor cantidad de agua aumentado la velocidad de corrosión.

Esto podría simplificarse de esta forma:



Fe^{2+} (Óxido) difunde a través de la interfase óxido – agua



$FeOH^+$ (disuelto) difunde a través de la capa límite al agua

$FeOH^+$ debe ser arrastrado por el flujo del agua



La transferencia de masa dependerá de la porosidad de la capa de óxido y de su grosor.

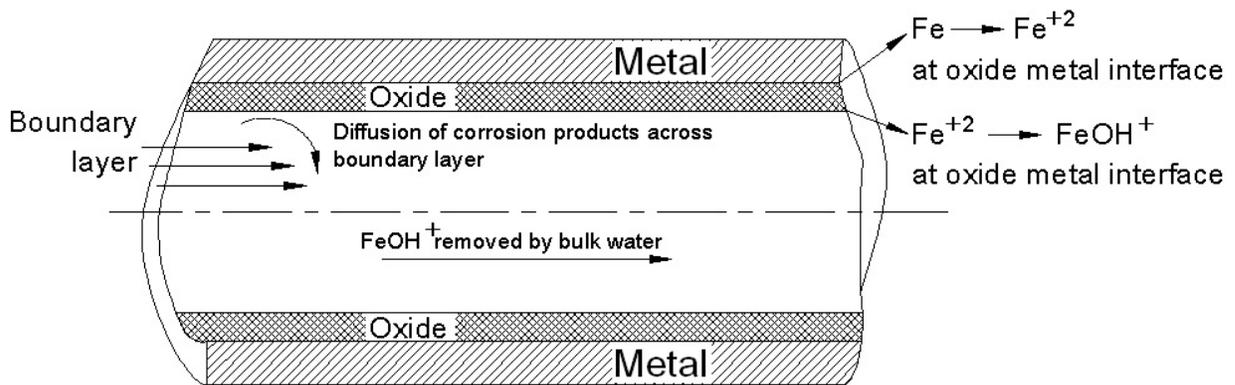


Figura 4 Esquema de la disolución del material a través de la película de óxido de la superficie y eliminación de las especies disueltas en el agua.

Existen 2 formas de ataque de corrosión por flujo acelerado, las cuales son ^[3]:

- **Flujo monofásico**
- **Flujo bifásico**

1.3.1.- Flujo monofásico

Es denominado FAC monofásico al adelgazamiento de la pared y disolución de la capa protectora de óxido del metal al estar fluyendo una solución de una fase sobre la superficie, además que el FAC no solo se afecta por factores físicos del material, sino que se ve

afectado por factores hidrodinámicos. En general los factores que afectan al flujo monofásico son:

- Velocidad de fluido
- Geometría de tubería
- Rugosidad
- Variables metalúrgicas: de composición química debido a los elementos incluyentes
- Variables del ambiente: temperatura, del medio, pH y concentración de oxígeno.

Cuando se manejan fluidos, es importante mantener en supervisión la temperatura y el pH, debido a que la solubilidad de la magnetita (Fe_3O_4) aumenta al incrementar la temperatura y el valor de pH se reduce, se ha demostrado que el pH de 10, reduce severamente la corrosión por FAC.

Sin embargo, el cambio de velocidad de fluido es un factor que debe tomarse en cuenta debido a que favorece a problemas de disolución:

- a. Si la velocidad de fluido aumenta, la velocidad en que se forma la capa protectora es mayor acelerando la velocidad de corrosión por flujo acelerado (FAC).
- b. Si la velocidad de fluido disminuye, la velocidad en que se forma la capa protectora es menor disminuyendo la velocidad de corrosión por flujo acelerado (FAC).

El efecto que por consecuencia aparece en la superficie del material corroído, es una formación de “huecos de herradura”, que dan la apariencia de cascara de naranja. ^[3]

1.3.2.-Flujo bifásico

La corrosión por flujo bifásico FAC es muy similar al flujo monofásico, sin embargo, la disolución de la capa delgada de óxido formada es decir la magnetita (Fe_3O_4) se disuelve por efectos de vapor húmedo, entonces por presencia de un fluido que además lleva vapor es a lo que se le conoce como mecanismo de FAC de fase doble.

En este mecanismo al estar fluyendo la fase líquida en una línea donde igual fluye vapor húmedo que viaja a una velocidad aún más alta que la líquida, esta diferencia de velocidades genera esfuerzos de corte en la interface líquido-vapor, si la fuerza de tensión

se sobrepasa formara pequeñas cantidades de líquido en forma de gotitas que viajaran con el vapor húmedo. [18]

Como las gotitas viajaran a una velocidad mayor, estas se impactan incidiendo en la capa de óxido ferroso, rompiendo la película y por lo tanto se queda expuesta la base del metal a un ataque corrosivo. Se establece el factor que aumentaría la corrosión por FAC es un aumento del vapor.

En el caso de presentarse en la geometría de la tubería un codo, esto favorece a un choque de gotitas, debido que en el codo se impactarían las gotitas directamente en la película de óxido.

Este tipo de corrosión genera la disolución de la capa de óxido en zonas locales que ataca de forma subyacente, pero el FAC bifásico genera velocidades de adelgazamiento mayores que el FAC monofásico.

La apariencia que se genera por este efecto se le conoce como “rayas de tigre”. [3]

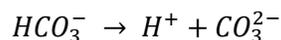
1.4.- Corrosión por CO₂

La corrosión por CO₂ es la más común presentada en industrias petroleras y del gas [19]. Cuando CO₂ aparece en un medio en la superficie de un acero, la formación del carbonado de hierro se forma como un producto de la corrosión en el acero.

La reacción que describe este proceso químico está dada por las reacciones:

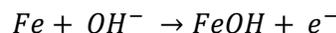
➤ Reacciones catódicas

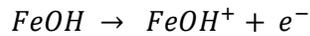
Primeramente, el CO₂ se hidrata con agua y posteriormente en solución se liberan los iones:



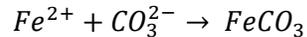
➤ Reacciones anódicas

En el ánodo, el hierro primero se disuelve formando iones de fierro

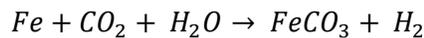




Finalmente, la película de carbonado de hierro se forma al precipitar sobre la superficie del acero.



Por las reacciones, se puede concluir que la disolución del acero ocurre en el ánodo, pero en el cátodo la formación de hidrogeno sigue ocurriendo:



Debido a la formación de esta capa, se ha encontrado que la velocidad de corrosión disminuye porque protege al acero cuando se forman los productos de siderita ($FeCO_3$) en la superficie, evidentemente esta capa podría afectarse cuando la dinámica del fluido cambia. ^[19]

1.5.-Cladding o revestimiento

Una forma de mejorar la resistencia a la corrosión son los revestimientos que protegen o aíslan a otro material para evitar que se corroe y presente mayor tiempo de vida ya que se está evitando la corrosión y degradación, estos a su vez funcionan como ánodo, protegiendo al lado catódico. ^[20]

Los revestimientos pueden ser de 3 tipos: metales, polímeros y cerámicos.

En el caso de los metales, estos funcionan como ánodo y el segundo metal como cátodo, los ejemplos más comunes y usados industrialmente son cromados y aceros galvanizados.

Para el caso de recubrimientos cerámicos, principalmente protegen a un metal cuando son sometidos a medios con altas temperaturas y el material cerámico tenga coeficiente de dilatación cercana al metal protegido.

Para el caso de los polímeros, interactúan de manera similar a los cerámicos.

Sin embargo, un revestimiento metálico es un compuesto de 2 o más metales similares metalúrgicamente ^[21], que unidos logran funciones específicas y debido a su composición química similar la corrosión por par galvánico se prolongue. Se ha visto que un cladding o revestimiento presenta mayor resistencia a la corrosión que una aleación porque presentan mejores comportamientos los cuales son:

- Mejor resistencia a la corrosión
- Hay menor porosidad
- Mejor formabilidad
- Mejor conductividad eléctrica y térmica

Un cladding puede ser usado en distintas aplicaciones como pueden ser:

- Flujo de gases y aceites
- Procesos químicos
- Sistemas de construcción
- Hidrometalurgia

Ejemplos más comunes de cladding o revestimiento son placa revestida, varilla con revestimiento, tubería revestida, hoja revestida y alambre revestido. ^[22]

1.5.1.- Procesos de fabricación de un cladding

- Unión por laminación en caliente

Este proceso es el más común y más amplio a nivel mundial, su principio básico consiste en un calentamiento y en una unión por medio de presión, ya que se tiene que preparar cuidadosamente las superficies de los materiales o de las 2 capas y posteriormente, se realiza un tratamiento térmico al calentar a temperatura que sea lo más cercana al $0.80T_f$ (T_f –temperatura de fusión) y juntarlos para que pasen por los laminadores a presión.

Los materiales que son unidos comúnmente son aceros de bajo carbono con aceros inoxidables de la serie 300 austeníticos. ^[23]

- Unión por laminación en frío

Este proceso se compone principalmente de 3 etapas que son:

-
1. Limpieza de la superficie con un ataque químico o ya sea una limpieza mecánica, con el objetivo de remover cualquier tipo de suciedad.
 2. Se realiza la reducción en los laminadores y aquí a diferencia de la laminación en caliente, la temperatura tiene que ser por debajo de la temperatura homologa y su primera deformación en el laminador debe ser de un 50 a 80 % de reducción.
 3. El material es sometido a un tratamiento térmico y se espera que la unión se lleve a cabo por la difusión de ambos materiales y su interacción atómica entre ellos (material nº 1- material nº2) y que sus propiedades sean aun superiores a la de los materiales individuales.

➤ Unión explosiva

La unión por explosión es un proceso que se genera en un corto tiempo, este proceso de manera básica consiste en que por medio de una explosión los materiales se unan de manera simultánea y que a su vez por la alta energía de la unión se eliminan los óxidos y se genere el enlace, como consecuencia de la colisión de ambos materiales se genera una deformación plástica de los materiales.

➤ Fundición centrífuga

Este proceso principalmente es aplicado para tuberías y es el método que más se utiliza para fabricar tubería con revestimiento sin costura, el principio es básico y consiste en un vaciado del metal fundido del revestimiento de acero inoxidable en un molde que está girando es decir que es rotatorio, monitoreando temperatura, velocidad de enfriamiento y velocidad de vaciado principalmente, y buscando que el espesor requerido se controle para tener la capa del cladding homogéneamente en toda la pared del tubo, posteriormente se tiene que realizar un tratamiento térmico para eliminar la microestructura dendrítica por medio de un normalizado del revestimiento y un templado y revenido del tubo exterior del acero al carbono en el caso que se busquen mejores propiedades mecánicas.

Para que al final el producto sea maquinado para la remoción de los defectos superficiales y buscar el espesor exacto. ^[24]

➤ Soldadura

En este proceso principalmente se realiza la unión del metal de respaldo y el revestimiento de acero inoxidable uniéndolas las placas en forma de sándwich con soldadura, además se aplica en la interface y calentando las placas como una operación anterior y aplicando un

vacío y que se forme un intermetalico en la interface del acero inoxidable y el material de respaldo. [25, 26]

➤ Deposición de soldadura

Este tipo de revestimiento es una deposición de soldadura de un material que no es intrínseco a un materia base, este tipo de deposición le va a impartir propiedades a la superficie [27], algunos tipos de deposiciones de soldadura existentes son [28, 29]:

- Revestimiento de soldadura
- Material de revestimiento duro
- Aleaciones de acumulación
- Aleación de mantequilla

1.5.2.-Clasificación de un revestimiento (Clad-Metal)

Un (Clad-Metal) metal revestido para corrosión, puede ser clasificado en 5 diferentes formas [25]:

➤ Sistema revestido de metal noble

Este tipo de revestido está compuesto principalmente de 2 capas, ya que por lo general uno de los 2 o 3 materiales es relativamente barato, mientras que está recubierto por un material que suele ser resistente a la corrosión. Así que la selección del material está en función del ambiente corrosivo al que se someterá el material, pero no olvidando los otros factores como por ejemplo la temperatura o pH.

Un gran rango de aleaciones para substratos de acero ha sido utilizado, por ejemplo, los metales que se usan como revestimiento más común son el acero inoxidable 304 y 302. [30]

➤ Sistema de barrera para algún tipo de corrosión

Este tipo de revestimiento se compone por 2 o más metales y se utiliza para evitar totalmente una perforación al material debido u ocasionado por la corrosión.

➤ Como material de sacrificio

Este tipo de sistema de protección se basa a la serie electromotriz, ya que el metal que se sacrifica funge como el lado anódico para proteger el lado catódico.

➤ Sistema de metal de transición

Este funciona cuando en algún diseño se necesita juntar distintos metales para evitar que se corroan por la diferencia de electropotenciales de un par galvánico, se recubre con 2 metales incompatibles, esto permite una lentitud en la corrosión galvánica.

➤ Sistema complejo de múltiples capas

Este tipo de revestimiento de tres materiales solo está diseñado cuando se necesitan propiedades específicas que no se pueden adquirir con un solo material, por ejemplo revestimiento de (Cu/stainless Steel/Ni) ya que el cobre proporciona una mejor conductividad eléctrica y funciona como contacto entre el acero inoxidable y el níquel, es decir como puente, el níquel proporciona la protección de la atmosfera y baja resistencia, y el acero inoxidable proporciona resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión en caso de que se maneje algún flujo de un agente corrosivo y que funcione como barrera y no se de alguna perforación.

1.6.- Técnicas electroquímicas

1.6.1.-Metodología básica de montaje electroquímico

Los 2 principales elementos para llevar a cabo un estudio de corrosión es:

1. Una metodología para simular el proceso corrosivo.
2. Técnica para monitorear el proceso que se simula.

Los elementos más importantes para poder llevar a cabo esto son necesario los accesorios que son ^[12, 31]:

- Electrodo auxiliar: Este electrodo es un material inerte, los materiales más típicos son de grafito o de platino. Este electrodo va montado de la misma como un electrodo de trabajo y conduce la corriente desde la fuente a través de la solución hasta el electrodo de trabajo.
- Electrodo de trabajo: Es el electrodo primario donde es medido la velocidad de corrosión, debido a que este es el electrodo de prioridad.

-
- Electrodo de referencia: Es el electrodo que necesariamente se necesita conocer su valor de potencial, estos electrodos son del tipo reversibles porque una pequeña corriente produce la reacción de reducción, pero para que no se polarice se genera una reacción de oxidación lo cual revierte la reacción.

Este electrodo es el que se coloca en el capilar de Luggin que funciona como un puente de sal con el medio o electrolito, además que evita que el electrodo de referencia se dañe con productos de corrosión.

- Electrolito conductor: Requerimiento básico para cualquier medida electroquímica ya que sirve como conductor de baja resistencia.
- Potenciostato con su software correspondiente: es el equipo que mantiene el potencial del electrodo de trabajo. Muchas de las reacciones ocurren entre el rango de -2 a +2 V y entre un rango de corriente de 1 a 10^6 μ A.

Este equipo es utilizado ya con otros componentes incluidos, tal como un software que puede ir monitoreando el proceso de corrosión y analizar los datos para producir resultados.

Al menos 2 electrodos son necesarios, ya que la técnica de resistencia a la polarización y extrapolación de Tafel utiliza diferencia de potenciales aplicados en el electrodo de trabajo y el de referencia, pero para que se pueda medir la corrosión en el electrodo de trabajo se utiliza un tercer electrodo auxiliar que conduce la electricidad ya que se polariza en dirección opuesta al electrodo de trabajo y manda la señal a través de la solución al electrodo de trabajo para que no circule corriente por el electrodo auxiliar.

1.6.2- Potencial a circuito abierto (OCP)

Esta técnica es usada principalmente para dar información del comportamiento de la capa pasiva que se forma en los metales por efecto del medio que está presente en el proceso de corrosión.^[12, 32]

Cuando aún no existe corrosión, los electrodos catódicos y anódicos poseen un potencial que es el potencial estándar, pero cuando la corrosión se genera por el efecto de un medio, esta técnica ayuda a monitorear cuando los valores de potencial toman un solo valor de potencial, haciendo que tanto el ánodo como el cátodo se polaricen entre sí, esto es lo que se conoce como potencial de circuito abierto o potencial de corrosión (E_{corr})

$$E_{corr} = E_c - E_a = 0$$

La corriente que fluctúa con relación al potencial en un medio conductor se escribe por la Ec. 2:

$$I = \frac{E_c E_a}{\Sigma R} \quad (2)$$

E_c y E_a corresponden al potencial del ánodo y cátodo y cambian con el tiempo, la suma de resistencias ΣR corresponden al paso de corriente en el sistema.

El potencial del ánodo principalmente está relacionado con la interacción del metal con sus iones en la solución y se evalúa con la ecuación de Nernst cuando establece un equilibrio [33], la Ec. 3 muestra la ecuación de Nernst:

$$E_e = E_o + \frac{RT}{nF} \ln[Mn +] \quad (3)$$

Donde:

$E_o \rightarrow$ Potencial en estado estandar (V)

$R \rightarrow$ Constante de gases = $8.31 \frac{J}{mol * K}$

$T \rightarrow$ Temperatura (K)

$n \rightarrow$ Numero de cargas (e^-)

$F \rightarrow$ Constante de Faraday = $96500 \frac{C}{mol e^-}$

Esta técnica no proporciona un análisis real de la corrosión por lo que siempre se integra en otras técnicas.

1.6.3.- Resistencia a la polarización lineal (LPR)

La polarización es conocida como la variación de potencial mientras hay un paso de densidad de corriente (i). Para la realización de esta técnica se van registrando los barridos de potencial y la intensidad con el uso de un potencióstato y típicamente la prueba tiene una duración de algunos minutos.

Pero teóricamente el equipo utiliza las ecuaciones de Stearn and Geary donde encontraron que las pendientes de corriente/potencial de la gráfica es lineal tal como se muestra en la Figura 5.

La densidad de corriente está definida por la siguiente ecuación:

$$\frac{V_c}{A} = K \frac{I}{A} = Ki \quad (4)$$

Donde:

$V_c \rightarrow$ Velocidad de corrosión

$A \rightarrow$ Area

$K \rightarrow$ Constante = $\frac{Eq}{96500}$

$i \rightarrow \frac{I}{A}$

$I \rightarrow$ Corriente que esta pasando en la celda

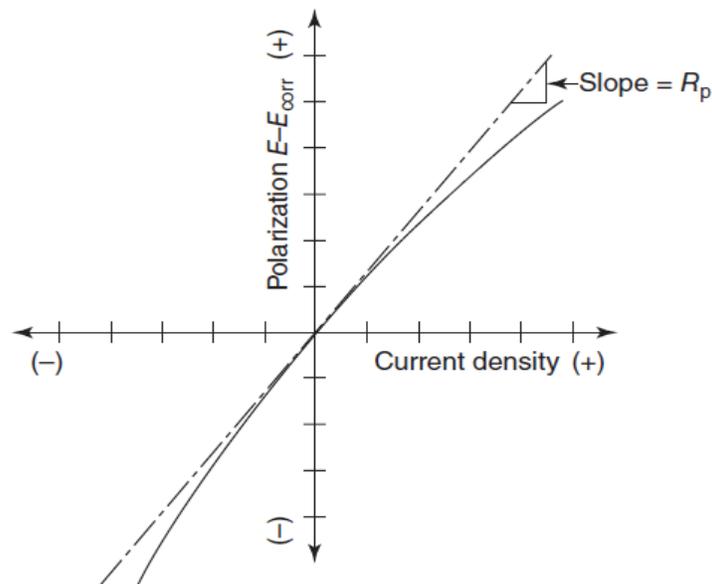


Figura 5 Gráfica hipotética de la resistencia a la polarización.

La Resistencia a la polarización (R_p) se determina mediante la Ec. 5:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} \quad (5)$$

Donde:

$R_p \rightarrow$ Resistencia a la polarización

$\Delta E \rightarrow$ Diferencia de potencial

$\Delta i \rightarrow$ Diferencia de intensidad de corriente

Stern- Geary^[12] relacionan i_{corr} con R_p a partir la Figura 4 obteniendo la Ec. 6 y 7.

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (6)$$

La constante B es definida mediante la Ec. 7:

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \quad (7)$$

β_a y β_c son las constantes de Tafel anódica y catódica.

Por lo tanto, la Ec. 8 es la ecuación final:

$$i_{corr} = \frac{1}{R_p} \left(\frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \right) \quad (8)$$

Los valores de β_a y β_c para calcular la corriente de corrosión podrían ser obtenidos mediante la extrapolación de Tafel.

Finalmente, para determinar la velocidad de corrosión se puede utilizar la Ec. 9:

$$V_{corr} = \frac{0.13 i_{corr} (P.E.)}{\rho} \quad (9)$$

Donde:

$i_{corr} \rightarrow$ Densidad de corriente

$P.E. \rightarrow$ Peso equivalente = $\frac{g}{eq}$

$\rho \rightarrow$ Densidad del material = $\frac{g}{cm^3}$

$V_{corr} \rightarrow$ Velocidad de corrosion = mpy

En conclusión, la técnica lo que se obtiene es:

- La I_{corr} y genera un estudio de corrosión general en términos de minutos.
- Solo se aplican en cantidades muy pequeñas de potencial (menos de ± 30 mV, típicamente menos de ± 10 mV).
- Se puede usar para medir bajas velocidades de corrosión.

Norma que pueden ser revisadas son: ASTM G3, ASTM G5, ASTM G59, ASTM G102. ^[12]

1.6.4.- Técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica

Esta técnica es no destructiva, y es utilizada para estudiar el comportamiento del material bajo recubrimientos orgánicos o inorgánicos. [34]

La técnica toma en cuenta resistencia de la solución, resistencia del revestimiento y capacitancia del revestimiento.

El procedimiento experimental aplica un potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias y así es como un equipo mide el potencial con el tiempo y corriente con el tiempo, dando valores de impedancia a diferentes frecuencias.

Esta técnica genera gráficamente un resultado de impedancia llamado diagrama de Nyquist para demostrar cómo se comporta el revestimiento cuando esta al ataque un medio corrosivo, porque el cambio de capacitancia del recubrimiento demuestra la absorción del medio al recubrimiento. [35]

➤ El diagrama de Nyquist:

La impedancia $Z(\omega)$ podría ser expresada en términos de un valor real y un valor imaginario:

$$Z(\omega) = Z'(w) + Z''(w)$$

$Z'(w)$ = valor de impedancia real

$Z''(w)$ = valor de impedancia imaginario

El comportamiento de la impedancia es expresado en una gráfica de Nyquist donde $Z''(w)$ se encuentra en el componente Y y $Z'(w)$ se encuentra en el componente X.

La Figura 6 se muestra un ejemplo de un diagrama de Nyquist.

Además, la teoría nos dice que:

- En altas frecuencias, la impedancia del sistema es causado por una resistencia a la solución $R\Omega$ o por productos de corrosión presentes en la superficie.
- La frecuencia angular (ω) alcanza su valor en el límite superior en el extremo izquierdo del semicírculo donde toca el eje real ($Z'(w)$)

- El extremo derecho del semicírculo, la impedancia es causada por una resistencia óhmica y una resistencia de polarización del material debido a la actividad del material.

En la gráfica la Ec. 10 describe la frecuencia angular:

$$\omega \rightarrow \frac{1}{Cdl \times R_t} = 2\Omega f \quad (10)$$

$\omega \rightarrow$ Frecuencia angular maxima

$R_t \rightarrow$ Resistencia a la transferencia de carga

$C_{dl} \rightarrow$ Capacitancia de la doble capa material – electrolito

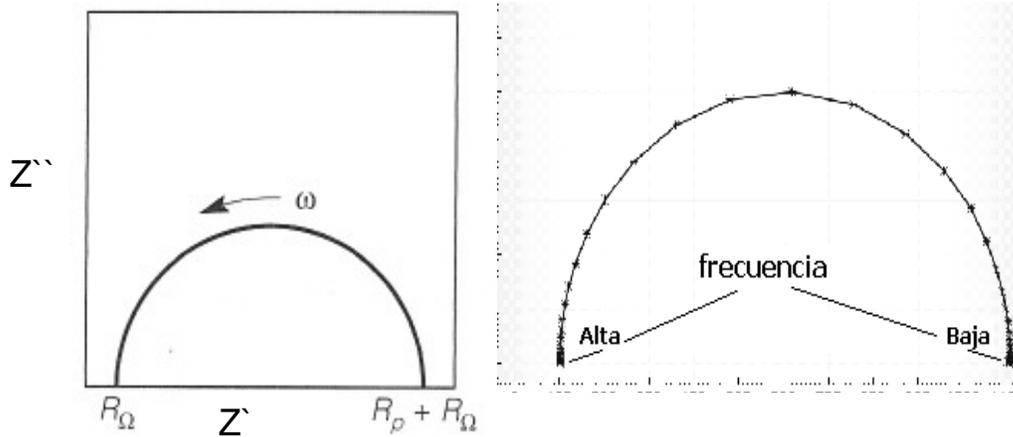


Figura 6 Representación gráfica hipotética de diagrama de Nyquist.

La desventaja de esta técnica es su costo y la dificultad para interpretar los resultados, por lo que softwares especiales podrían calcular la velocidad de corrosión con exactitud y el comportamiento de la capa formada durante una prueba electroquímica.

Esta grafica de manera general interpreta el comportamiento de la disolución de un metal en la capa pasiva o de productos porosos formados durante la prueba, por esa razón cambia la forma del semicírculo en un diagrama de Nyquist.

En general un diagrama de Nyquist se puede comportar según lo siguiente:

- Una baja velocidad de corrosión, la R_p de la gráfica de Nyquist es alta y una gran contribución imaginaria.

-
- Una alta velocidad de corrosión, la R_p de la gráfica de Nyquist es baja.
 - A medida que la frecuencia es grande, el valor de impedancia imaginario tiende a cero.

Sin embargo, puede cambiar dependiendo de condiciones adicionales, por lo tanto, la R_p es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión.

Además, en esta técnica si tiene importancia la resistencia del medio electroquímico.

1.7.- Técnicas de caracterización

1.7.1.- Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X es una técnica experimental que se utiliza para conocer los diferentes componentes cristalinos de un material y sus parámetros reticulares de manera cualitativa y cuantitativa, además que es considerada como no destructiva.

Este método consiste en que al emitirse rayos X (longitud de onda muy corta) a una superficie de un material, los electrones de un cristal se excitan y saltan mientras se emiten los rayos X sobre el material permitiendo conocer cuáles son los componentes y estructuras cristalinas que conforman el material.

De manera teórica, al incidir los rayos X sobre los planos cristalinos del material, al variar el ángulo de incidencia, los rayos difractados generan ondas con intensidades diferentes que corresponden a diversos planos cristalinos y que se encuentran en fase, es decir que al ángulo en que se emite el rayo genera una difracción de haz con ángulo igual al haz emitido tanto en un plano inferior como superior de planos paralelos de un cristal.

Este principio se lleva a cabo mediante la ley de Bragg, tal como se muestra en la Figura 7 mediante la Ec.11:

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen}\theta \quad (11)$$

Donde:

$n \rightarrow$ Orden de difracción (se considera $n = 1$)

$\theta \rightarrow$ Angulo de incidencia

$d \rightarrow$ Separación de los planos

$\lambda \rightarrow$ Longitud de onda

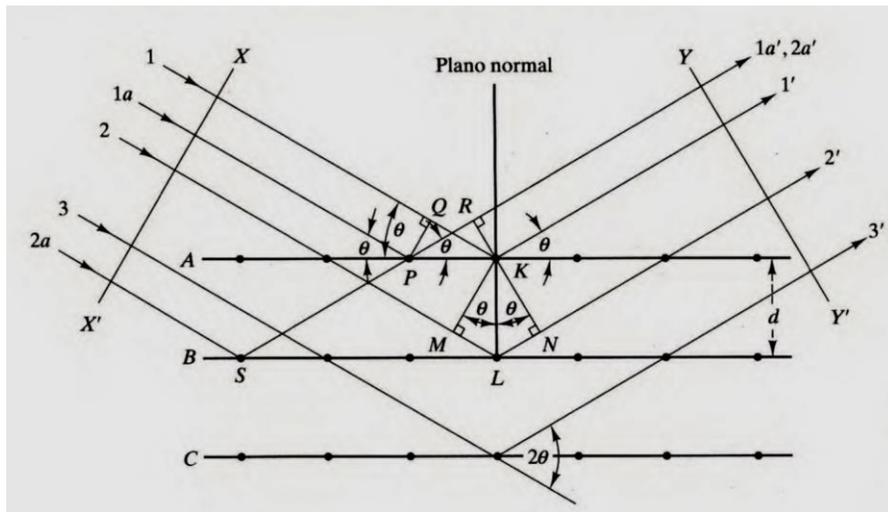


Figura 7 Representación de geometría de difracción de Rayos X, en planos hipotéticos cristalinos A, B y C.

La muestra es colocada en el centro del equipo (difractómetro) y en los extremos se encuentra el emisor de rayos X y el detector; cuando se emiten los rayos X, la muestra está girando con el fin de variar el ángulo de difracción y el detector de electrones al recibir el haz difractado manda la señal a diferentes intensidades, y de esta manera se conocen las estructuras cristalinas del material o muestra de interés, tal como se muestra en la Figura 8.

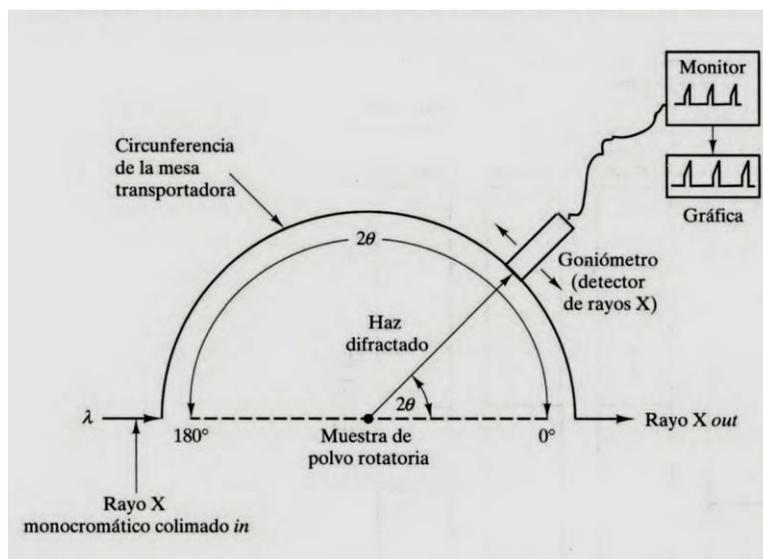


Figura 8 Representación de obtención de patrones de difracción.

La profundidad del análisis del haz de rayos X es del rango de milímetros hasta micrómetros. Los usos más comunes de esta técnica son la determinación de elementos cuantitativos y cualitativos de sólidos y materia inorgánica. [14, 36]

1.7.2.- Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Esta técnica es una de las más utilizadas para la caracterización de materiales metálicos en cuestión de microestructura y morfología superficial en un rango de resolución superior al de un microscopio óptico convencional. Se lleva a cabo mediante la generación de imágenes mediante un haz de electrones.

El MEB tiene la capacidad de obtener imágenes en 3 dimensiones, por lo tanto, es posible observar la morfología de la muestra en magnitudes de 10 hasta 100,000 aumentos, además que la versatilidad del equipo permite determinar de manera semi-cualitativa y cuantitativa composiciones químicas de la muestra mediante un análisis por EDS.

El funcionamiento característico del MEB se observa en la Figura 9 que consta de un cañón de tungsteno al cual se le aplica corriente generando un haz de electrones que es proyectado hacia la parte baja de la columna donde se encuentra un ánodo, la única condición para el funcionamiento adecuado es el uso de una cámara de vacío. [37]

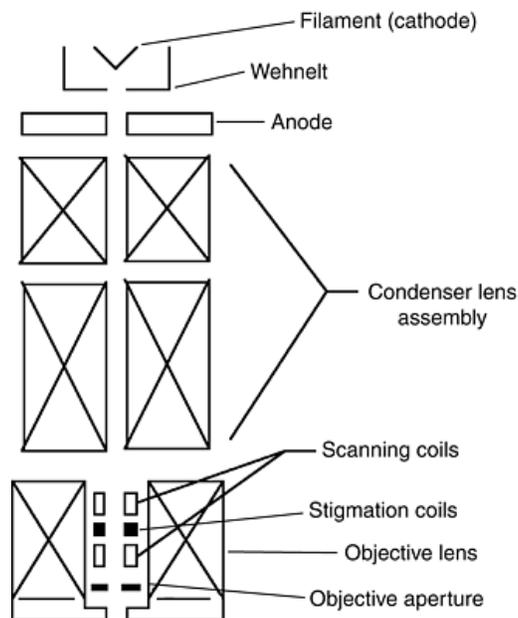


Figura 9 Representación de la columna de un microscopio electrónico de barrido convencional.

1.7.3.- Perfilómetro Óptico

El Perfilómetro óptico es un equipo que realiza un barrido de la muestra con una luz, evaluando la superficie como puntos entre todos los valles y picos que encuentre tomando como referencia una zona media vertical.

La figura 10 muestra una representación de un perfilómetro óptico, este equipo usa una luz que incide sobre la superficie de un material, la luz se refleja en un divisor donde parte de la luz se manda al prisma y la otra parte de la luz hacia la muestra, generalmente se usa el prisma como referencia de plano ya que la luz al ser mandada hacia el prisma, es cómo evalúa la superficie para establecer un plano de referencia; mientras que la luz que impacta sobre la muestra cuando se refleja se manda nuevamente al separador de luz y al prisma, posteriormente con la ayuda de las lentes de cámara logra formar una imagen igual de la superficie y con el software toma los datos de topografía de la superficie.

Sin embargo, para evitar los defectos de luz, se adaptan componentes ópticos para controlar las aberraciones.

El equipo con ayuda de un software puede reconstruir la imagen superficialmente para el estudio tribológico del material así con el mismo software puede mostrar la forma superficial de una muestra para evaluar parámetros superficiales en un material.

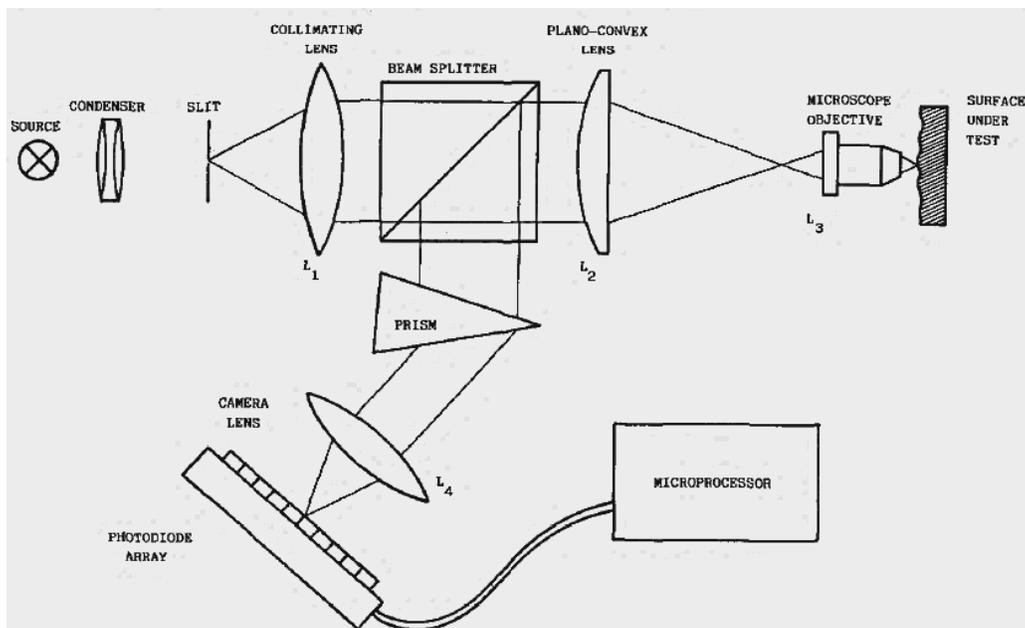


Figura 10 Representación del funcionamiento de un perfilómetro óptico.

En la industria, para llevar un mejor control de la superficie de ciertos componentes y de tolerancia dimensional superficial, se controla la rugosidad de superficie con un perfilometro o rugosímetros y dar una inspección topográfica de un material.

La versatilidad del equipo de proporcionar una imagen en 3D y 2D completan el estudio para conocer de manera cualitativa y cuantitativa la superficie de un material para evaluarlo con respecto a defectos de textura y parámetros de rugosidad. [38]

1.7.3.1.- La textura superficial

La superficie es una marca que presenta cualquier cuerpo existente y que se origina durante el método de fabricación, por ejemplo: un torneado, fresado, laminado u otro proceso de fabricación. Dichos procesos ocasionan que la superficie presente irregularidades superficiales o espaciamientos regulares que forman una textura en la superficie del material.

Una de las razones principales por la cual el estudio topográfico de superficie es importante, tiene que ver con el rendimiento que ofrecerá un material en su tiempo de uso, eso dependerá de la aplicación del componente, sin embargo, en la industria se controlan la superficie topográfica (Figura 11) durante su fabricación porque es un factor que detecta cambios ya sea al momento de un mecanizado o simplemente muestra el comportamiento de la herramienta de trabajo en su velocidad, o fluido de corte. [39]

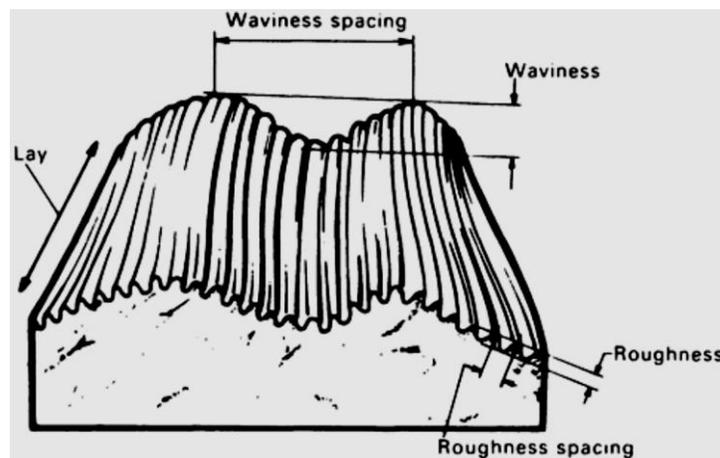


Figura 11 Representación hipotética de una superficie topográfica.

Los componentes que siempre se toman en cuenta en el estudio de superficies son: ^[40]

- Rugosidad de la superficie: Este factor causa irregularidades en la superficie, generando espacios frecuentes en toda la superficie, y principalmente se muestra cuando hay una interacción de herramienta- material.
- Ondulación de la superficie: Este factor muestra la irregularidad en la superficie y la rugosidad esta sobrepuesta sobre las ondulaciones.
- Forma superficial: Este factor representa la superficie general y muestra la deformación en el componente.

Las importancias del acabado superficial influyen en que cumplirá un buen servicio el componente, algunos ejemplos son:

- Precisión de tolerancia
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia al desgaste
- Pasaje de fluidos

1.7.3.2.- El perfil

El perfil es un patrón que detalla la altura y espacios de la superficie de un material para obtener de manera teórica la forma de la superficie en el plano.

El perfil está formado por surcos y marcas dejadas por un proceso de fabricación. Un ejemplo se muestra en la Figura 12. Por lo tanto, el perfil muestra la superficie real y puede ser obtenida por equipos que dependerán de su capacidad de medición del acabado superficial.

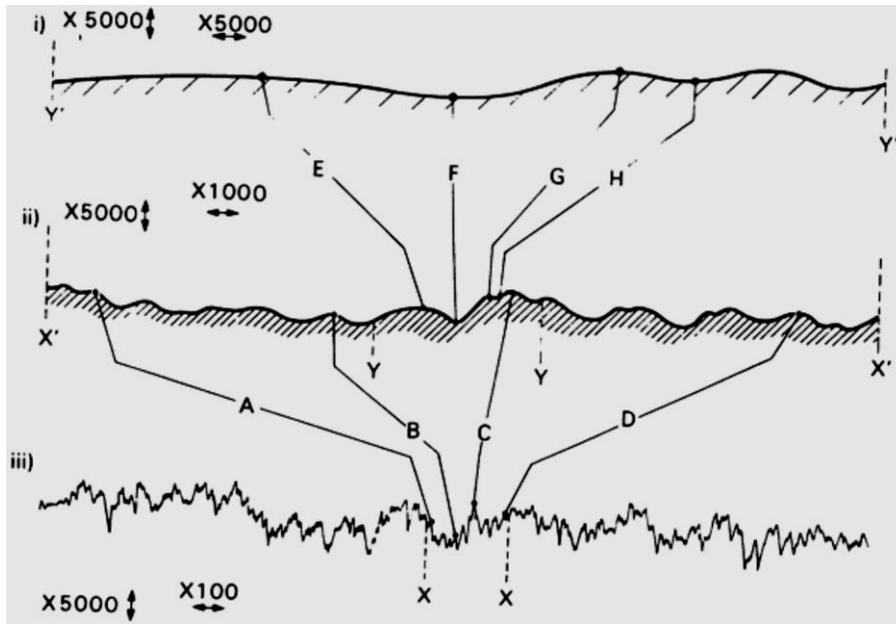


Figura 12 Rugosidad de una superficie, en i) en una distancia de $Y'-Y'$ a $5000X$ aumentos, pero en ii) la distancia de $X'-X'$ a $1000 X$ aumentos, ambas rugosidades se cuantifican en un perfil de alturas en iii) son exactamente el mismo material.

1.7.3.3.- Parámetros de rugosidad

Son llamados parámetros a las fórmulas matemáticas para la evaluación de superficies en cuestión de rugosidad en un perfil generado. ^[40]

Se dividen principalmente en 3 tipos:

- Parámetro de amplitud: Características verticales en la superficie.
- Parámetros de espaciado: Medidas de espaciamiento de irregularidades horizontal a la superficie.
- Parámetros híbridos: Una combinación de alturas y de espacios irregulares.

A continuación, en la Tabla 2 se muestra los parámetros de rugosidad para los parámetros de amplitud.

Tabla 2 Parámetros de amplitud.

R_a –Rugosidad media aritmética Este valor es la media aritmética de las alturas del perfil de rugosidad.
El valor obtenido se expresa en micrómetros o en micropulgadas.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

R_q –Rugosidad media cuadrática Este valor de rugosidad es la desviación estándar de la distribución de alturas superficiales, es decir es el promedio de diferencia entre los datos y la media.
Este parámetro es utilizado cuando el valor de picos es importante y se reduce el error del parámetro R_a .

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \{y(x)\}^2 dx}$$

R_p – Rugosidad del pico más alto El parámetro mide cual es el pico más alto presente en todo el perfil

R_v – Rugosidad del valle más profundo El parámetro igual que R_p mide cual es el valle más profundo a lo largo de todo el perfil.

R_t –Máxima medida del perfil pico-valle El parámetro es una suma del pico más alto y el valle más profundo que se encuentra en el perfil

$$Rt = R_{pmax} + R_{vmax}$$

En la Figura 13 se muestra un ejemplo hipotético de una medida de rugosidad R_a para su mejor entendimiento.

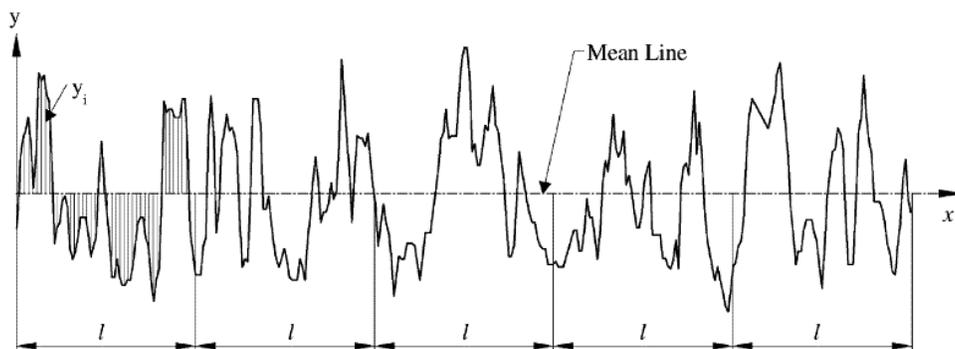


Figura 13 Representación de la rugosidad media R_a en un perfil hipotético.

La figura 14 muestra una representación de los parámetros de rugosidad R_p , R_v en un perfil hipotético.

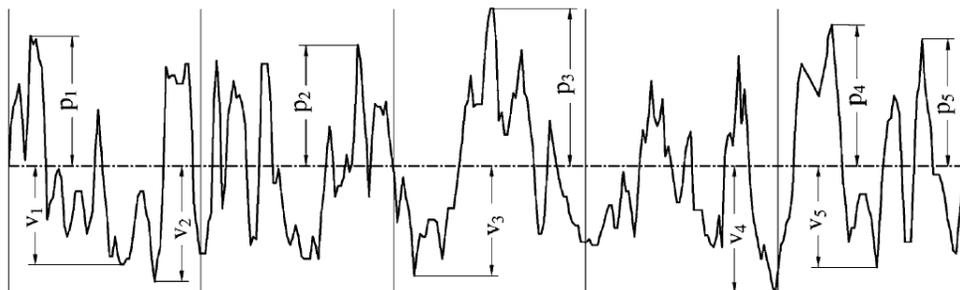


Figura 14 Representación de un perfil que muestra 5 valores de R_p y 5 valores de R_v , p_1 , p_2 , p_3 , p_4 y p_5 como los picos más altos y v_1 , v_2 , v_3 , v_4 y v_5 los valles más profundos en todo el perfil

La Figura 15 muestra una representación de un perfil hipotético donde se muestra los parámetros de R_p , R_v y R_t .

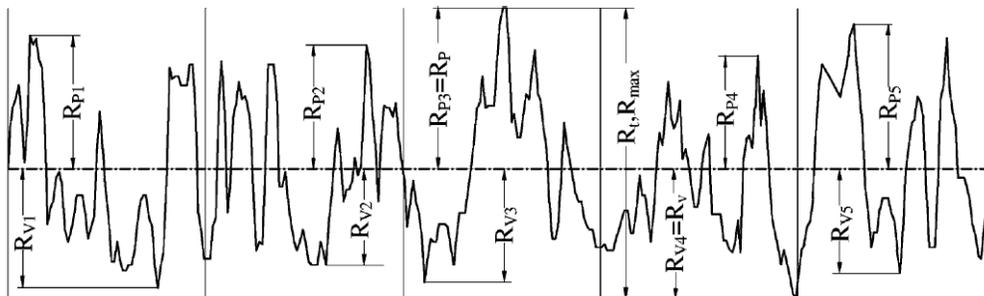


Figura 15 Representación de un perfil de los parámetros $R_p=R_{p3}$, el parámetro $R_v=R_{v4}$, R_{pm} el promedio de los valores de R_{pi} , R_{vm} el promedio de los valores R_{vi} y el parámetro $R_t=R_{p3}+R_{v4}$

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

Nor Asma et al. ^[8] estudiaron el efecto que tiene el acabado superficial y cómo influye en la velocidad de corrosión. Lo que propusieron fue realizar la prueba en un sistema con atmosfera de CO₂ para un material de acero al carbono (Acero bajo carbono). Para la prueba se expuso el material de acero previamente desbastado en una solución de 3% en peso de NaCl y mientras se burbujeaba gas saturado de CO₂ a un pH de 5.5 (medio ácido) en un flujo turbulento primeramente y posteriormente en un flujo estático utilizando una celda típica de 3 electrodos con cilindro rotatorio y midiendo las velocidades de corrosión por la prueba de resistencia a la polarización lineal, pérdida de peso y espectroscopia de impedancia electroquímica. Determinaron que la velocidad de corrosión puede variar a diferentes rugosidades, pero cuando la rugosidad se incrementa, la velocidad de corrosión igual aumenta por el incremento del área superficial que favorece a la corrosión, además la velocidad se puede incrementar si el flujo del fluido es turbulento a diferencia de un fluido en condiciones estáticas. Concluyeron que la velocidad de corrosión se incrementa porque al mantener una rugosidad, se intensifica el proceso de corrosión, tomando mayor área superficial en contacto con la superficie. Además, demostraron que, en un flujo estático al variar las rugosidades, no había una gran diferencia significativa en las velocidades de corrosión, pero cuando el flujo es turbulento, las velocidades de corrosión son muy altas.

Ukpai et al. ^[41] utilizaron una técnica de conteo de señales que se basa en ruidos característicos de la deformación y fractura implementándolo con la medición de velocidad de corrosión con la técnica de RPL. Evaluaron el comportamiento de un acero al carbono al estar bajo la exposición de una salmuera y el rocío de CO₂ al menos por 8 horas para reducir la concentración de oxígeno simulando un ambiente ácido a 50 °C. La prueba fue realizada con el fin de estudiar la velocidad de corrosión a diferentes velocidades del flujo con y sin un inhibidor. Por otro lado, también estudiaron la corrosión por erosión con y sin mezcla de arenas a diferentes velocidades del flujo. Lo que primeramente determinaron es que había relación de las emisiones acústicas de deformación y la velocidad de corrosión con y sin arenas y con el uso de los inhibidores de corrosión se observó una reducción de las velocidades de corrosión, probablemente debido a la formación de un producto de corrosión de FeCO₃.

Toloei et al. ^[9] estudiaron el comportamiento que presenta el níquel en relación con el acabado superficial y la velocidad de corrosión por abrasión en un electrolito de 0.5 M H₂SO₄. Para evaluar las velocidades de corrosión realizaron pruebas de Tafel y el estudio del comportamiento de la capa pasiva lo obtuvieron mediante espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), utilizando una celda clásica de 3 electrodos. Por otro lado, se llevaron a cabo pruebas de perfilometría para establecer la rugosidad antes y después de la corrosión por abrasión comparando el daño en los diferentes acabados superficiales. La velocidad de corrosión en el caso de las superficies con desbaste unidireccional se incrementaba debido a que los surcos ocasionan que el material no forme esa capa pasiva protectora estable. La velocidad de corrosión en presencia de níquel disminuye debido a la formación de una capa pasiva, cuando el material es desbastado previamente se origina una superficie menos rugosa y por ende no hay una penetración agresiva del electrolito sobre la muestra. Además, los semicírculos formados en los diagramas de Nyquist (impedancia), indican una relación con la rugosidad, porque entre más grande sea el semicírculo formado, el material tiene una menor rugosidad y por ende una velocidad de corrosión más baja. Pero en el caso de la muestra con ablación de láser donde hay agujeros superficiales, se tiene la menor velocidad de corrosión y además el semicírculo fue el más grande comparado con las muestras desbastadas. Lo que concluyeron fue que, al generar una alta rugosidad por desbaste mecánico, la velocidad de corrosión se incrementaba y que existe una relación directa con los diagramas de Nyquist demostrando que la capa pasiva es menos estable cuando el semicírculo es pequeño. Sin embargo, cuando la muestra tiene ablación laser en la superficie esperaban una mayor velocidad de corrosión, sin embargo, no fue así, debido a que los agujeros que se encontraban en la superficie favorecen la formación de burbujas de aire-vapor previniendo que la capa pasiva se proteja del electrolito.

Ferreira et al. ^[19] estudiaron la influencia que tiene un flujo estático y un flujo turbulento en un medio electrolítico de NaHCO₃ 0.5mol/L a 25°C enriquecido con CO₂ y un pH de 7.5 en un cilindro rotatorio utilizando técnica de RPL para medir la velocidad de corrosión en un material de acero al carbono AISI 1020, además manejaron 2 acabados superficiales donde una muestra tiene mayor rugosidad superficial que otra. Los resultados obtenidos fueron que durante la prueba electroquímica se formaron cristales de FeCO₃ que favorecen la resistencia a la corrosión, por otro lado, la rugosidad del material facilita la precipitación de la capa de FeCO₃. Los resultados mostraron que la velocidad de corrosión se incrementa con la velocidad del flujo y está influenciada por la rugosidad de la superficie, porque en la

capa limite existe mayor área de contacto al aumentar la rugosidad y el régimen del flujo tiende a volverse más turbulento y agresivo contra la capa protectora de FeCO_3 a diferencia de un flujo laminar.

Morfeo et al. ^[6] estudiaron los productos de corrosión formados en el acero API 5L 40 grado B y su velocidad de corrosión durante la prueba electroquímica en soluciones acuosas de agua desionizada con presencia de CO_2 y CaCl con y sin CaCO_3 . Las pruebas se realizaron bajo inmersiones durante 72, 336 y 672 horas. Para el estudio de los productos de corrosión utilizaron técnicas de SEM y DRX, lo que encontraron fue que los aceros sometidos a mayor tiempo de inmersión presentaron menor velocidad de corrosión por la formación de escamas de FeCO_3 (siderita) y teniendo un mayor tiempo de inmersión, la velocidad de corrosión es menor con y sin la presencia de CaCO_3 . Además, encontraron que por el efecto de CO_2 presente en la solución aún sin la adición de CaCO_3 , promueve la formación de siderita y que el pH de la solución disminuye considerablemente, lo cual estabiliza la solución. El espesor de las escamas formadas en la superficie del acero ligeramente se incrementa al aumentar el tiempo de inmersión sin CaCO_3 en la solución, pero en presencia de CaCO_3 el espesor de las escamas es más delgada. Los resultados indicaron que la porosidad de la capa protectora se incrementa cuando en la solución se tiene CaCO_3 y en ausencia de CaCO_3 las escamas se mostraron más compactas y densas. Con EDS se corrobora la presencia de FeCO_3 y una mezcla de Fe-Ca. Con la técnica de DRX, descubrieron que con la presencia de CaCO_3 , el acero formaba las escamas con una mezcla de siderita y calcita. Las escamas ofrecen mayor protección al acero con y sin CaCO_3 porque las escamas dificultan la transferencia y difusión de los iones, pero al agregar CaCO_3 la velocidad de corrosión es menor. Por lo tanto, concluyeron que la presencia de CaCO_3 en la solución afecta la morfología, densidad y grosor de los cristales de carbonato y presentando mayor resistencia a la corrosión, debido a la formación de la mezcla de un carbonato de hierro y calcio ($\text{Fe}_x\text{Ca}_{1-x}\text{CO}_3$). Sin embargo, descubrieron que al sobrepasar el rango de los 500 mV en una región de corriente crítica, la capa pasiva sufre picaduras por el hecho de la porosidad y la permeación de los iones cloro, de tal forma que cuando no hay CaCO_3 simplemente la capa pasiva es de FeCO_3 .

Liu et al. ^[42] investigaron las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión entre un material de aleación de cobalto considerado como un revestimiento y un material substrato de inconel617. Para las pruebas mecánicas realizaron pruebas de dureza y además realizaron pruebas de desgaste tribológico, para las pruebas de corrosión se utilizó una

celda clásica de 3 electrodos en una solución de HCl mediante curvas de polarización de ambos materiales por separado para medir la velocidad de corrosión de ambos metales. Primero encontraron que el revestimiento de cobalto al ser fabricado por un proceso de polvos de aleación de cobalto, existen dendritas y fases ricas en cromo y otras aleaciones de Mo, Si, Fe y C que favorecen a formar carburos, nitruros y otras mezclas (CoC_x , Cr_{23}C_2 , $\text{Cr}_{23}\text{Ni}_3$ y Co_3Mo_2) distribuidas en la capa del revestimiento favoreciendo la resistencia al desgaste de los mismos. En términos de dureza, el material base cobalto que funge como revestimiento mantiene la mayor dureza del material bimetálico y esta dureza se ve afectada por el efecto del calentamiento; por dicha razón la dureza disminuye en la zona de la matriz entre los 2 materiales del revestimiento-Inconel617.

Toor et al.^[43] investigaron la resistencia a la corrosión por erosión en el acero API 5L X65 a 3 diferentes velocidades de flujo y 5 ángulos de impacto con y sin partículas sólidas. La solución que utilizaron fue de NaCl 0.2 M a temperatura ambiente durante 24 horas. Para su experimentación utilizaron un equipo llamado "bucle de flujo" y por medio de pérdida de peso realizaron la evaluación de la velocidad de corrosión, y como estudio superficial, utilizaron la técnica de perfilometría. Observaron que la velocidad de corrosión se incrementaba con respecto a las velocidades de flujo más altas con y sin partículas sólidas en la solución, esto se debe al transporte masivo de oxígeno que aumenta con la velocidad de flujo. Para un ángulo de impacto de 45° , la velocidad de corrosión siempre es mayor sin importar si hay o no presencia de partículas sólidas, debido a que no hay un equilibrio entre el esfuerzo de corte y el ángulo de impacto. De igual manera la morfología en la superficie del material se vio más afectada para este mismo ángulo, y aún más con la presencia de partículas en la solución, pero las "cicatrices" del desgaste en la superficie estaban orientadas según el movimiento del flujo y estas cicatrices eran de forma más alargadas para los ángulos de 15° y 30° . En la superficie del material observaron microgrietas debido al endurecimiento de trabajo, la dureza se incrementó y mostro una ligera pérdida de peso para ángulos de impacto mayores a 60° . Con la técnica de perfilometría comprobaron que, cuando no hay partículas y existe un ángulo determinado, la superficie se corroe y se erosiona, siendo mayor para el ángulo de 45° . Con partículas sólidas, la superficie se encuentra aún más erosionada y tiene mayor presencia de cavidades de igual manera para un ángulo de 45° . Finalmente concluyeron que la mayor velocidad de corrosión se observó a 45° debido a un desequilibrio del esfuerzo de corte y al ángulo de impacto, y esta aumentaba con mayor razón si las partículas sólidas venían en la solución porque realizan un desgaste en la superficie activando los sitios localizados y acelerando con ello el daño

por corrosión. Con respecto a la velocidad de corrosión, esta se incrementa si el flujo tiene mayor velocidad de movimiento debido a la alta energía cinética con o sin presencia de partículas sólidas que causan la pérdida de masa. El producto de corrosión o capa de óxido formado no era tan estable a altas velocidades, por lo que resultó ser una mayor pérdida de este debido a la interacción con el flujo.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se explica de forma detallada la metodología experimental para el análisis de la velocidad de corrosión y los productos formados durante las pruebas electroquímicas de un material bimetálico constituido por el acero API 5L X65 y un revestimiento de iniconel825, el cual se muestra en la Figura 16.

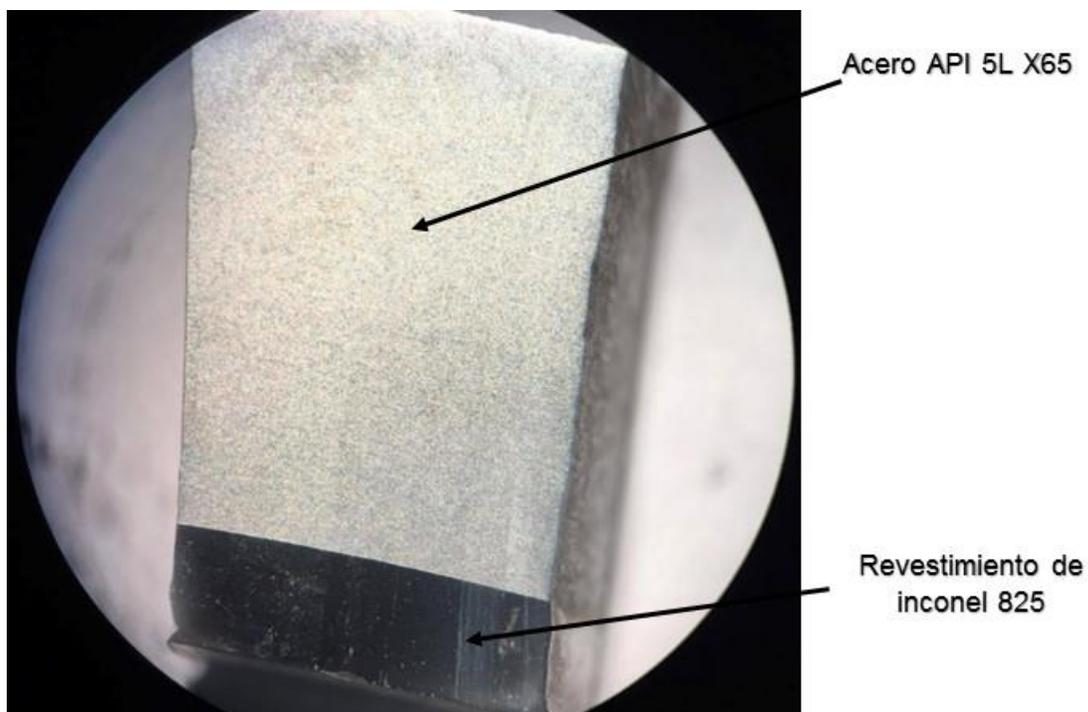


Figura 16 Material bimetálico

El propósito de evaluar este material es para determinar el efecto del cambio de dirección presente en las tuberías que presentan el fenómeno de Corrosión Asistida por Flujo (FAC) en el laboratorio de modelos físicos, así como la caracterización de los productos de corrosión mediante las técnicas de Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). En la Figura 17 se presenta el diagrama de bloques de la metodología experimental de este trabajo.

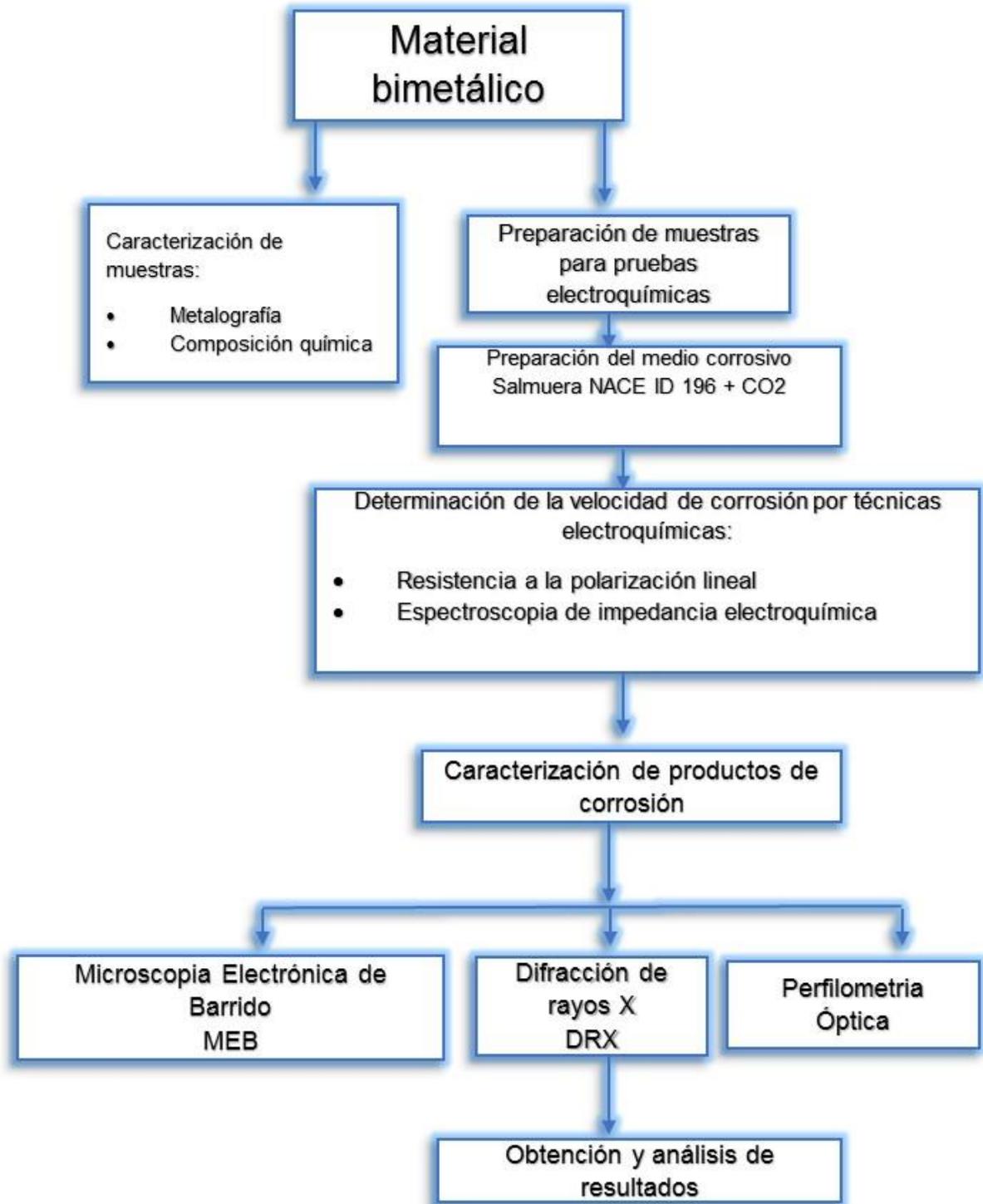


Figura 17 Metodología experimental.

3.1.- Equipo y materiales

3.1.1.- Equipo experimental

En la Figura 18 se muestra el equipo experimental utilizado durante la investigación, el cual consta de una cámara de impacto fabricada de acrílico de 5 mm de espesor. Se hace recircular un flujo constante mediante una bomba de succión controlando la velocidad de flujo con el uso de un rotámetro de una Salmuera NACE 1D-196 ^[44] + CO₂ con (1 bar de presión) y con un pH de 5-6 (medio ácido).

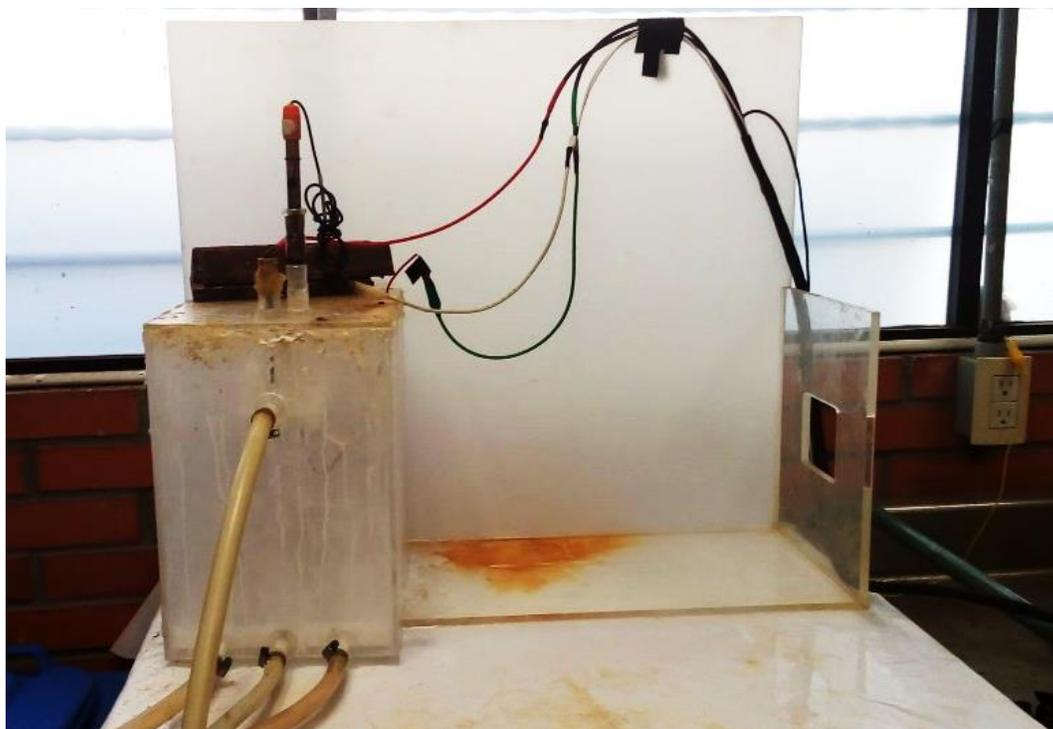


Figura 18 Arreglo del equipo experimental.

La bomba controla la recirculación de la solución desde un tanque con 12 litros de solución previamente preparado. Las muestras son colocadas en la cámara de impacto donde incide el flujo sobre los diferentes ángulos estudiados. Los ángulos se plantearon a partir de las evaluaciones realizadas por distintos autores como S. Uchida, S. Naitoh y M. Okada. ^[43, 45, 46]

Para el análisis de la velocidad de corrosión se utilizará un potencióstato con un software, donde se alimentaron las variables y condiciones experimentales.

Equipo utilizado:

- Cámara de impacto de acrílico transparente
- Potencióstato Versastat 3, Princetone Applied Research
- Tanque de almacenamiento de 100L
- Barra de grafito
- Capilar de luggin
- Electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) en KCl 3M
- Mangueras de conexión de entrada y salida a la celda de impacto
- Laptop con el software para la obtención de velocidad de corrosión
- Cupones del material bimetálico
- Porta muestra de teflón
- Bomba de succión de 0.5 Hp de potencia
- Rotámetro
- Interruptor

Los equipos utilizados para caracterización de los productos de corrosión fueron fundamentales para el estudio de la morfología, fases cristalinas y rugosidad los cuales fueron:

- Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM 6300
- Difractómetro D8 Focus Bruker (XRD).
- Perfilometro óptico marca Bruker modelo Contour GT-K 3D

3.1.2.- Celda de impacto

La celda de impacto como se muestra en la Figura 19, es un equipo que consta de una boquilla fija frontal para la distribución del fluido el cual impacta sobre la porta-muestra. En la parte inferior de la celda de impacto se tienen 3 boquillas conectado a 3 mangueras de salida del fluido el cual se hace recircular.



Figura 19 Geometría de la celda de impacto.

La porta-muestra con los cupones, está atornillado a la cámara de impacto tal como se muestra en la Figura 20; de acuerdo al ángulo utilizado.

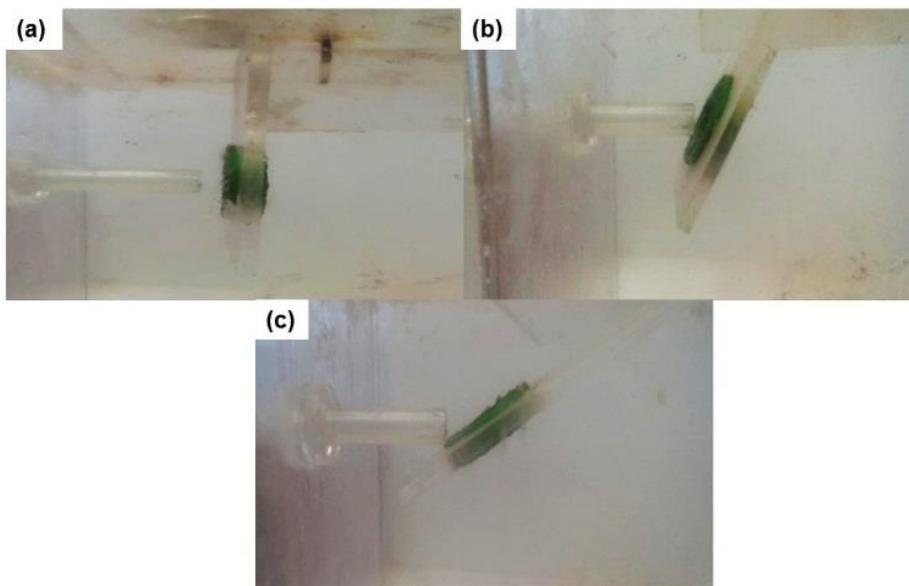


Figura 20 Diferentes ángulos de incidencia en la cámara de impacto, (a) 90°, (b) 60° y (c) 30°.

3.1.3.- Equipo para pruebas electroquímicas de resistencia a la polarización y espectroscopia de impedancia electroquímica

Para la determinación de las velocidades de corrosión por Resistencia a la polarización lineal y espectroscopia de impedancia se utilizó un Potenciostato Versastat 3, Princeton Applied Research tal como se muestra en la Figura 21.

El equipo cuenta con un software llamado VersaStudio que durante la prueba electroquímica muestra los resultados en tiempo real dependiendo del tipo de prueba electroquímica.

Finalmente, con los datos recopilados y con el software es posible determinar las gráficas preliminares para observar el comportamiento de la velocidad de corrosión



Figura 21 Potenciostato Versastat 3, Princeton Applied Research

3.2.-Material bimetálico

El material bimetálico fue obtenido de una tubería, del cual se maquinaron cupones de 1x0.5x1 cm. La composición química de dicho material (acero API 5L X65 e inonel 825), se realizó con la técnica de espectroscopia de emisión de chispa. De igual manera se realizó un estudio metalográfico para determinar la microestructura y tamaño de grano.

3.2.1.- Preparación de las probetas para las pruebas electroquímicas

Se utilizaron 18 cupones, los cuales fueron cortados y maquinados a las dimensiones de 1cm x 0.5cm x 1cm, con un área de exposición de 0.5 cm². La Figura 22 muestra el arreglo de la cuponera donde se indica el electrodo de trabajo (ET).

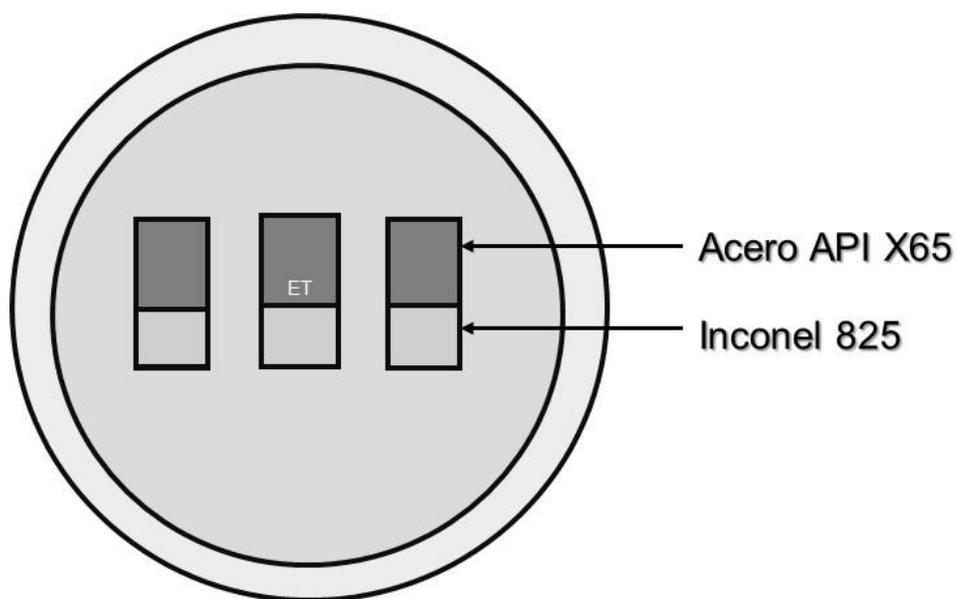


Figura 22 Forma de la cuponera con el material de estudio.

Para esta investigación se realizaron 2 acabados superficiales correspondiente a:

1. Acabado superficial a lija #2000
2. Pulido a espejo de 1 μm

3.2.2.-Preparación del medio electroquímico

La solución utilizada para este sistema fue una salmuera NACE 1D196 ^[44] adicionado con CaCO₃ y HCl para la obtención de 1 bar de CO₂. En la Tabla 3 las cantidades necesarias para la obtención del medio corrosivo.

Tabla 3 Salmuera elaborada NACE 1D-196 (12L)

Pesos para la composición de salmuera NACE 1D-196 (12L)

NaCl (s)	1278.9468 g
CaCl ₂ *2H ₂ O (s)	53.7276 g
MgCl ₂ *6H ₂ O (s)	24.732 g

Para generar un 1 bar de CO₂ se utilizaron los reactivos mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4 Cantidades de reactivos para la formación de CO₂

Pesos de reactivos para la adición de CO₂

CaCO ₃	615 g
HCl	36.6187 mm
pCO ₂	CO ₂ obtenidos
1 Bar=0.9871 atm	22.071556 g= 22071.556 ppm

Cada reactivo se pesó en una balanza analítica y fueron disueltos dentro de un garrafón con 12 litros de agua destilada, el cual se agito por 15 min aproximadamente.

3.3.- Condiciones experimentales

La Tabla 5 muestra las condiciones experimentales utilizadas durante las pruebas electroquímicas para la evaluación de la velocidad de corrosión. ^[44]

Tabla 5 Condiciones experimentales para las pruebas electroquímicas.

Medio	Salmuera NACE ID 196 + CaCO ₃
Tipo de flujo	Turbulento
Velocidad del medio	18 l/min (2.36 m/s)
Temperatura	25°C
pH	5-6
Tiempo de exposición	2 horas
Angulo de inclinación	30°, 60° y 90°
Acabado superficial	2000# y Pulido a espejo (1 µm)

3.4.- Técnica de resistencia a la polarización lineal e Impedancia electroquímica

Las velocidades de corrosión se determinaron mediante 2 técnicas electroquímicas y el uso del software VersaStudio. Antes de determinar las velocidades de corrosión, se determinó un OCP (Potencial a Circuito Abierto) durante 1 hora para estabilizar el potencial, posterior a esta técnica se determinó la Resistencia a la Polarización e impedancia electroquímica.

Para la técnica de Resistencia a la Polarización se trabajó en un rango de +/- 0.02V por encima y debajo del potencial de corrosión.

Para la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica, se trabajó en un intervalo de frecuencias de 100000 a 0.01 Hz y una amplitud de 15 mV RMS.

Las técnicas se realizaron para los 3 diferentes ángulos de 30°, 60° y 90° con los 2 diferentes acabados superficiales.

3.5.- Caracterización de los productos de corrosión

3.5.1.- Microscopio electrónico de barrido

Para la determinación de la morfología y micro análisis se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido marca JEOL JSM-6300 que trabaja a un voltaje de aceleración de 20 kV y una corriente de saturación de filamento de 20 mA y con una distancia de trabajo de 39 mm, tal como se muestra en la Figura 23.



Figura 23 Microscopio Electrónico de Barrido marca JEOL JSM-6300.

3.5.2.-Difracción de rayos X- haz rasante

La determinación de las fases cristalinas fue mediante un Difractómetro de la marca D8 Focus Bruker el cual se muestra en la Figura 24, utiliza una radiación $\text{Cu K}\alpha$, con condiciones de trabajo de 35 kV, 25 A en un intervalo de $2\theta = 20^\circ - 100^\circ$ y una velocidad de 2° min^{-1} con incrementos de 0.02° . Posteriormente con las cartas de la base de datos, es posible determinar las estructuras cristalinas presentes en los productos de corrosión.



Figura 24 Difractometro D8 Focus Bruker.

3.5.3.- Perfilómetro óptico

Para la determinación de la rugosidad se utilizó un Perfilómetro óptico marca Bruker modelo Contour GT-K 3D que opera con la interferencia de una luz aproximadamente en un rango de medición de 0.9 mm X 1.8 mm, a un aumento de 5x, el equipo se muestra en la Figura 25.

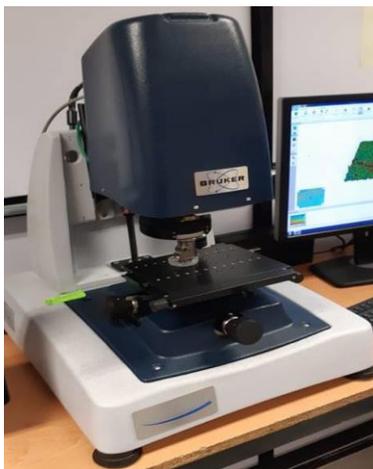


Figura 25 Perfilómetro óptico marca Bruker modelo Contour GT-K 3D

Se realizaron lecturas en 3 zonas cercanas a la interface como se muestra en la Figura 26. El área tomada para los análisis fue de 1 ± 0.1 mm \times 0.6 ± 0.1 mm y mediante el software Vision 64 para la digitalización de las figuras tridimensionales y los perfiles de profundidad transversales a la superficie plana obteniendo las rugosidades de cada superficie.

Las diferentes rugosidades se realizaron antes y después de llevar a cabo las pruebas electroquímicas, con el fin de obtener una diferencia entre las superficies sin ataque electroquímico y posterior a la prueba electroquímica provocando la corrosión.

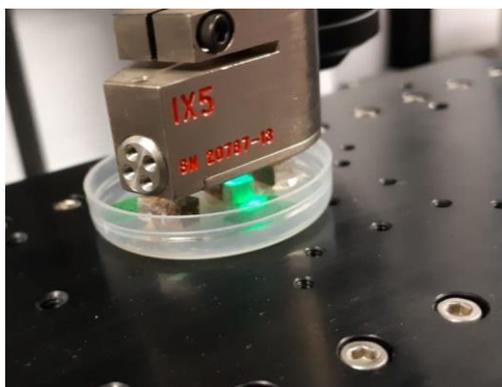


Figura 26 Zona de escaneo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.- Resultados de la caracterización inicial de los aceros API 5L X65 y el revestimiento del inconel 825

El material bimetálico se caracterizó mecanográficamente con el fin de determinar su microestructura y las fases presentes, para el acero al carbono, se utilizó nital 3. La aleación de inconel 825 fue atacada con un reactivo preparado con 10ml HNO₃, 15ml HCl, 10ml ácido acético y 5 gotas de glicerina por un periodo de 30 segundos a 1 minuto.

En la Figura 27 se observa la microestructura del material bimetálico, la Figura 27a corresponde a la zona longitudinal del acero API 5L X65 a 50 magnificaciones, observando granos semiequiaxiales e incluso algunos granos alargados en algunas zonas y una mayor cantidad de ferrita (fase clara) y menor presencia de perlita (fase oscura). La Figura 27b muestra la zona transversal donde se observan las mismas fases.

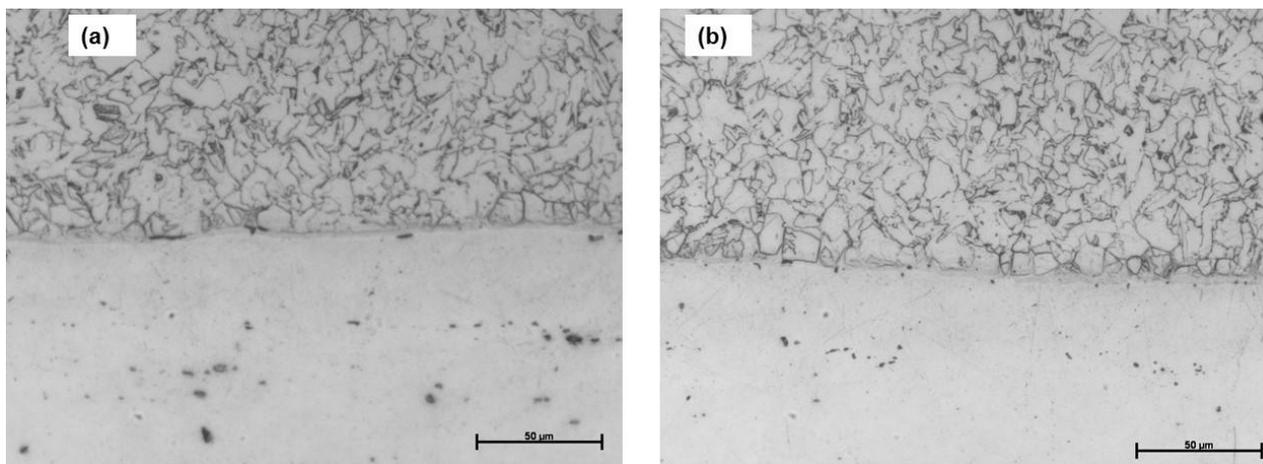


Figura 27 Metalografía del acero API 5L X65 (a) zona transversal X50 magnificaciones (b) zona longitudinal X50 magnificaciones.

La Figura 28 muestra la microestructura del inconel 825 donde se observa una distribución de granos para ambas zonas (a) transversal y (b) longitudinal. Los granos de la matriz se consideran que son de austenita (fase clara) donde se muestran una distribución no

uniforme y precipitados de Cr-Ni-Mo (fase oscura) ocupando grandes zonas con la fase de austenita en ciertos límites de grano. [47]

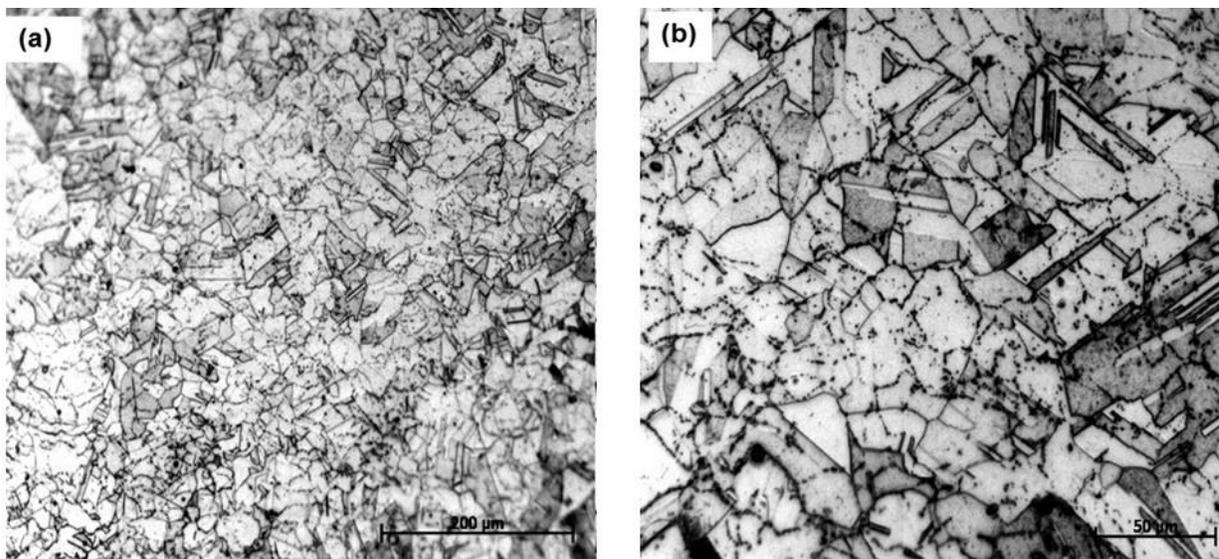


Figura 28 Metalografía del Inconel 825 (a) zona longitudinal X20 magnificación (b) zona transversal X50.

En las Tablas 6 y 7 se muestra la composición química del acero API 5L X65 y del Inconel 825, respectivamente. De manera general se observa que el Inconel 825 muestra mayores contenidos cromo, níquel y cobre, cromo y molibdeno y cobre. Mediante la técnica de espectroscopia de chispa se determinó la composición química en porcentaje peso.

Tabla 6 Composición química acero API 5L X65.

Aleación	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Ni	Fe
API 5L X65	0.154	1.357	0.231	0.023	0.014	0.061	0.001	0.022	98

Tabla 7 Composición química Inconel 825.

Aleación	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
Inconel 825	0.021	0.13	0.91	0.04	0.01	26.1	51.5	11	0.55	10

4.2.- Análisis de Potencial a Circuito Abierto (OCP, por sus siglas en inglés)

Se determinó el potencial de circuito abierto para alcanzar una estabilidad entre el material y el medio, llevándolo a cabo a los diferentes acabados superficiales y con los diferentes ángulos utilizados en la investigación con el medio electrolítico, el tiempo fue de 3600 segundos.

4.2.1.- Potencial a circuito abierto (OCP) para el ángulo de 30° para un acabado de lija #2000 y pulido a espejo

La Figura 29 muestra el potencial de corrosión (OCP) para las muestras con acabado superficial a lija #2000 (negro) y pulido a espejo (rojo). Se observa que el OCP para la lija #2000 comienza a estabilizarse después de los 1000 segundos debido a la formación inicial de los productos de corrosión. El OCP para el acabado de pulido a espejo (rojo), indica valores más negativos y un comportamiento con la presencia de ruido, pero con una tendencia a estabilizarse.

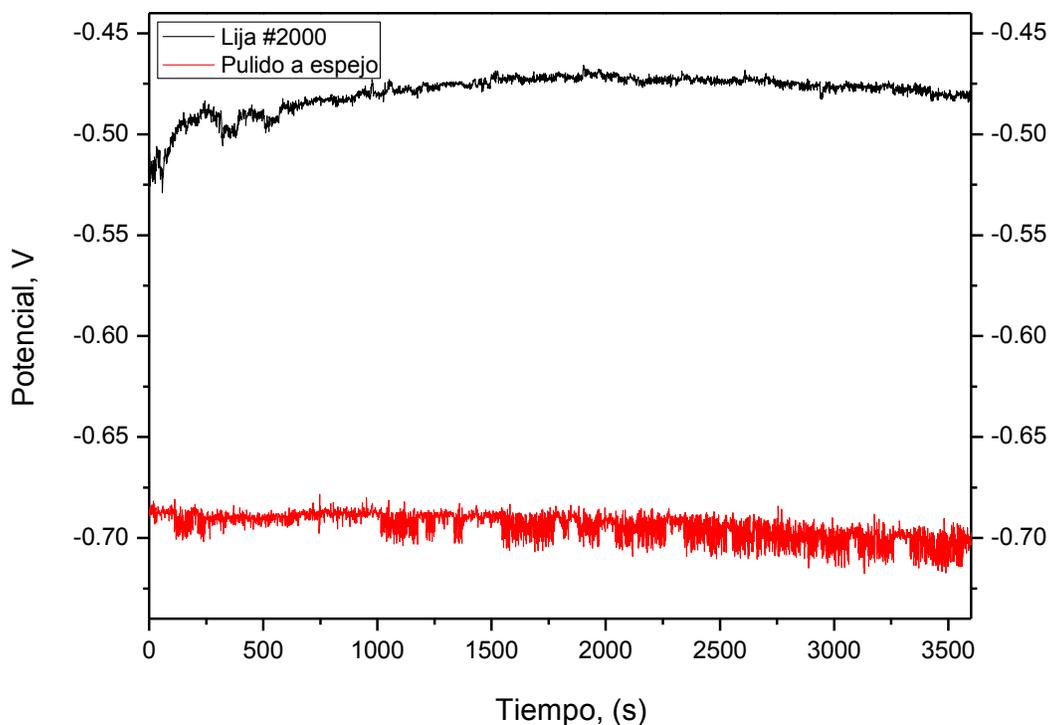


Figura 29 Potencial a circuito abierto que muestra la variación de potencial en función del tiempo del acabado superficial para un ángulo de 30°.

4.2.2.- Potencial a circuito abierto (OCP) para ángulo de 60° acabado lija #2000 y pulido a espejo

La Figura 30 muestra el potencial de corrosión para ambos acabados superficiales en función del tiempo para el ángulo de 60°. Se observa que para un acabado a lija #2000 tiene un mejor comportamiento que la muestra con pulido a espejo, debido a que el potencial para lija #2000 tiende a estabilizarse entre -0.60 y 0.65 mV, mientras que para la muestra con pulido a espejo tiene fluctuaciones más grandes y su potencial se estabiliza en -0.67 mV, observándose un incremento del potencial hacia valores más negativos para ambos acabados, posteriormente se alcanza un estado estable a 2500 s, para ambos casos cercano a -0.54 mV. Las pequeñas fluctuaciones de potencial se atribuyen a la formación y desprendimiento o disolución de los productos de corrosión.

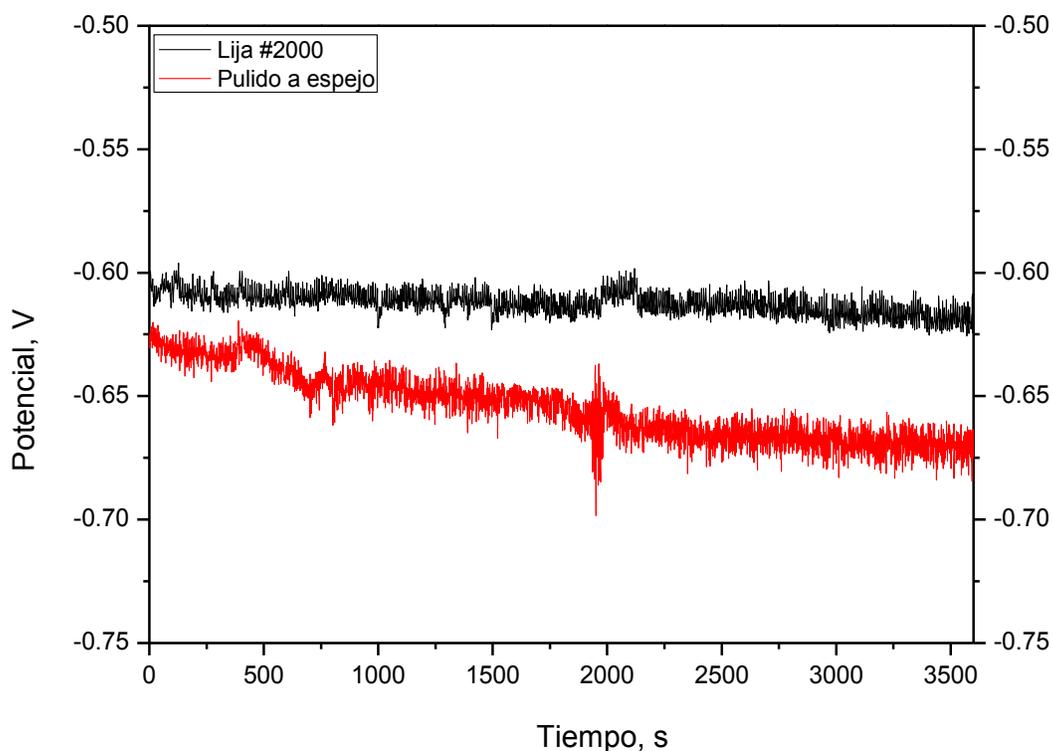


Figura 30 Potencial a circuito abierto que muestra la variación de potencial en función del tiempo del acabado superficial para un ángulo de 60°.

4.2.3.- Potencial a circuito abierto (OCP) para ángulo de 90° acabado lija #2000 y pulido a espejo

En la Figura 31 se muestra el OCP para la posición de 90° con ambos acabados superficiales. La muestra con acabado superficial a lija #2000 tiene un comportamiento hacia valores más negativos comenzando a estabilizarse en un potencial de -0.57 mV, sin embargo, la muestra con acabado a pulido a espejo muestra valores de potencial -0.50 mV más positivos. Se observa que en ambos casos el OCP no tiene una tendencia a estabilizarse de manera lineal, solamente para la lija #2000 en un rango de 3000 a 3600 segundos.

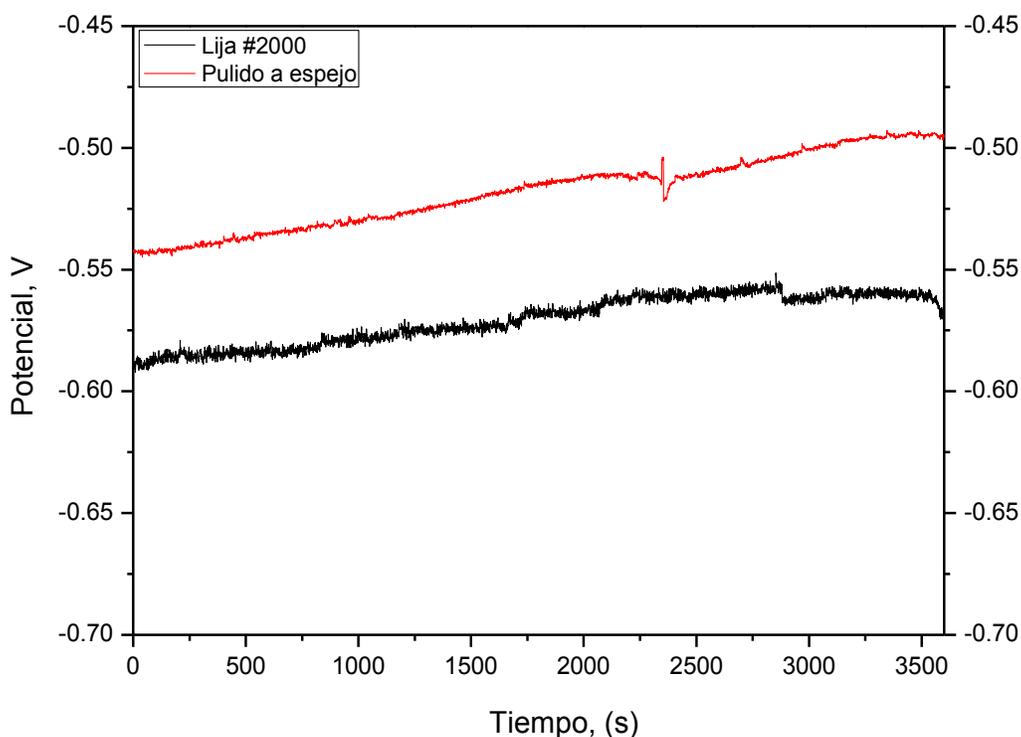


Figura 31 Potencial a circuito abierto que muestra la variación de potencial en función del tiempo del acabado superficial para un ángulo de 90°.

4.3.- Análisis de velocidad de corrosión mediante resistencia a la polarización (RPL)

La Figura 32 muestra las gráficas de la técnica de resistencia a la polarización lineal, llevadas a cabo de 3 a 5 veces para obtener reproducibilidad en los resultados. Únicamente

se muestran los resultados para el ángulo de 30° debido a que no se presentaron grandes diferencias entre sí. Se realizó un ajuste mediante una función polinomial, teniendo en ambos casos ajustes cercanos a 1. Mediante estas gráficas se determina la velocidad de corrosión para ambos acabados superficiales.

La densidad de corriente de corrosión, así como el potencial correspondiente mostraron una tendencia lineal con una pendiente aproximada a 0.99. Las velocidades de corrosión para los diferentes ángulos se calcularon por medio de la ecuación de Stern-Geary y se observa que a 30° las velocidades se encuentran en el rango de 39-113 para los acabados de lija #2000.

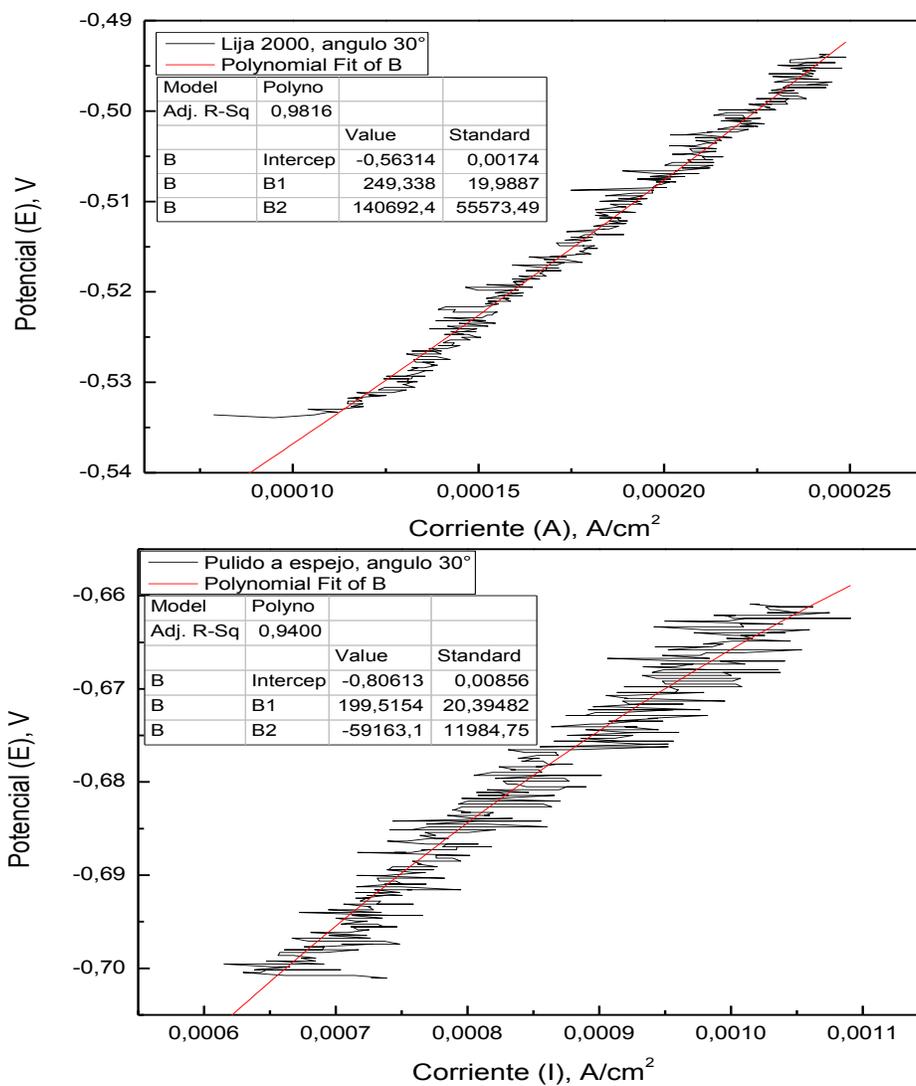


Figura 32 Graficas de resistencia a la polarización lineal correspondientes al ángulo de 30° (a) lija #2000 y (b) pulido a espejo.

En la Tabla 8 se muestran los valores promedio de velocidades de corrosión para los acabados a lija #2000 y pulido a espejo para los 3 diferentes ángulos (30°, 60° y 90°) determinadas por la técnica de RPL. Se observa que el valor con un ángulo de 30° con pulido a espejo presenta un alto valor de velocidad de corrosión a diferencia de los que tienen un acabado superficial con un acabado lija #2000 que presenta menores valores de velocidades de corrosión.

Tabla 8 Promedio de las velocidades de corrosión para acabados de lija 2000 y pulido a espejo para ángulos de 30°, 60° y 90°.

V corr (mpy)	30°		60°		90°	
	Lija #2000	Pulido a espejo	Lija #2000	Pulido a espejo	Lija #2000	Pulido a espejo
	39.2565	113.65	51.785	56.362	72.346	52.68

En la Figura 33 se muestra la velocidad de corrosión en función del ángulo de impacto para los dos acabados superficiales. De manera general se observar que cuando existe mayor rugosidad (lija #2000) la velocidad de corrosión se incrementa conforme se aumenta el ángulo de impacto. El comportamiento es contrario cuando se tiene un acabado superficial pulido a espejo.

Para ambos casos del acabado superficial en la posición de 60°, las velocidades de corrosión tienden a igualarse, pero es menor en el acabado lija #2000.

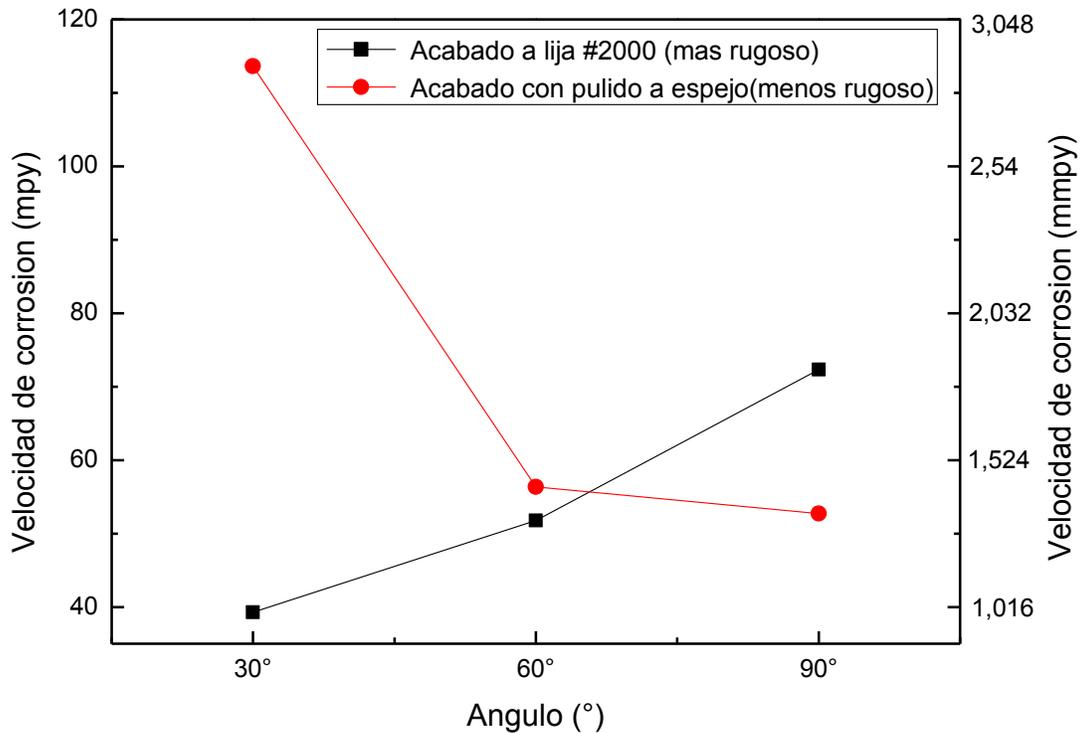


Figura 33 Velocidad de corrosión generada para los ángulos de 30°, 60° y 90° con acabado superficial lija #2000 y pulido a espejo.

4.4. Análisis de espectroscopia de impedancia electroquímica

Los espectros de impedancia se llevaron a cabo a una amplitud frecuencia de 0.01 a 100000 Hz y 15 mV RMS para la obtención de los espectros de Nyquist. Los espectros obtenidos para cada caso de estudio se muestran en el Apéndice A.

4.5. Resultados de caracterización superficial mediante microscopia electrónica de barrido (MEB)

Mediante la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido se lleva a cabo la caracterización de la morfología de los productos de corrosión y el análisis semicuantitativo de la composición química de los productos de corrosión formados.

4.5.1.- Caracterización superficial de los productos de corrosión mediante MEB para un ángulo de 30° con acabado superficial a lija #2000 y pulido a espejo

En la Figura 34 se muestra la morfología de los productos de corrosión para ambos acabados superficiales a 30°.

En el cupón con acabado a lija #2000 34a se puede apreciar que los productos formados en la interface tienen un mayor tamaño que las formadas en acabado pulido a espejo 34b. Debido a la morfología de los productos formados para la lija #2000 tienden a ser más protectores y densos debido a que el acabado superficial permite a la superficie anclar dichos productos y, por ende, se tiene una disminución de la velocidad de corrosión (Figura 33). Sin embargo, para el acabado superficial a pulido a espejo se presentan menos productos de corrosión debido a que la superficie es menos rugosa formándose solo productos en la zona interfacial como se muestra en la micrografía a pulido a espejo 34b.

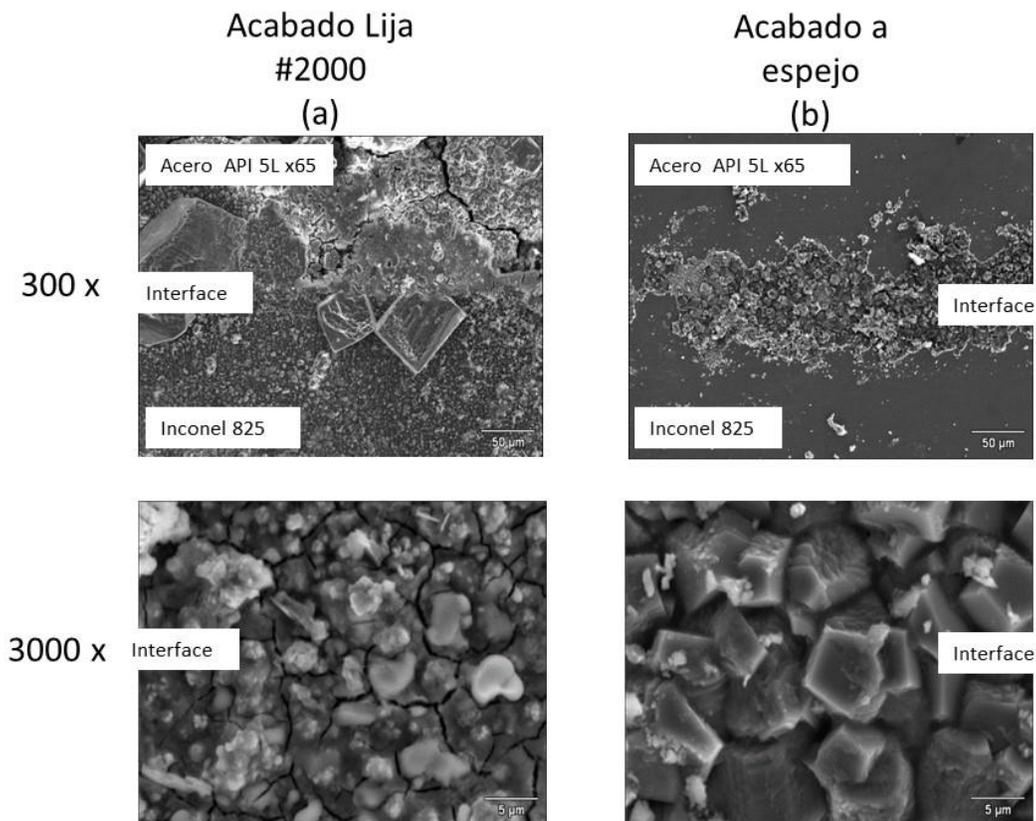


Figura 34 Micrografías de la superficie del material bimetalico en la interface a (a) lija #2000 y (b) pulido a espejo.

4.5.2.- Análisis de los productos de corrosión por EDS para un ángulo de 30° con acabado superficial a lija #2000 y pulido a espejo

En la Tabla 9 se muestra el análisis de EDS de ambos acabados superficiales para 30°, se aprecia que para la lija #2000 hay una alta presencia de cloro, sodio, calcio principalmente por la composición de la salmuera además de algunos productos base cobre, mientras que la alta presencia de carbono indica probablemente la formación de cementita y carbonatos en la superficie, finalmente la alta cantidad de oxígeno indica la formación de óxidos.

En la muestra a pulido a espejo la concentración de calcio, cobre y sodio es menor, indicando así menor proporción de productos de corrosión en la superficie del material que influyen en el incremento de la velocidad de corrosión.

Tabla 9 Composición de los productos de corrosión distribuidos sobre la superficie en ángulo de 30° acabado a lija #2000 y pulido a espejo.

Elemento	Lija #2000- 30°	Pulido a espejo- 30°
	%peso	%peso
C	23.14	15.93
O	24.07	4.31
Na	10.40	0.86
Si	0.86	0.19
Cl	9.95	-
Ca	12.09	7.31
Mn	0.23	1.18
Fe	11.69	66.80
Cu	7.57	3.43
Total	100.00	100.00

4.5.3.- Análisis puntual para un ángulo de 30° con acabado superficial a lija #2000

En la Figura 35 se muestra el análisis puntual para la lija #2000 en la posición de 30°, se tomaron 3 puntos dependiendo de la tonalidad de los productos de corrosión. En la Tabla 10 se muestran los análisis puntuales correspondientes, se puede apreciar que el Punto 1 la morfología del aglomerado es amorfa y tiene una mezcla de cloro y calcio que están

sobre la superficie de hierro además de productos con cobre en ese punto. En el Punto 2, la forma del producto es cubica y su composición es cloro y sodio, lo cual se atribuye que la salmuera forma productos de la sal propios de ella misma. En el Punto 3, la forma del producto muestra un aglomerado amorfo y su composición tiene elementos con una mezcla de calcio, cloro, sodio e incluso magnesio debido a nuevamente a la salmuera.

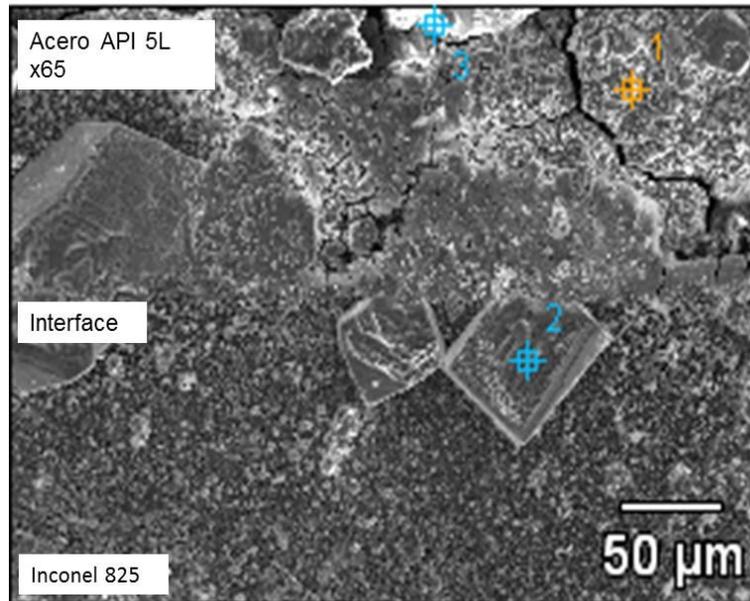


Figura 35 Análisis puntual del material bimetalico en la interface con acabado a lija #2000 en un ángulo de 30° a 300X magnificaciones.

Tabla 10 Composición del análisis puntual en ángulo de 30° a lija #2000 del material bimetalico en la interface.

%peso	C	O	Na	Mg	Si	Cl	Ca	Fe	Cu
Punto 1	13.93	39.39			0.98	5.49	4.35	33.11	2.76
Punto 2			40.50			59.50			
Punto 3	11.86	18.80	2.76	0.28	0.18	5.28	11.40	40.27	9.17

4.5.4.- Análisis puntual para un ángulo de 30° con acabado superficial pulido a espejo

En la Figura 36 se muestra el análisis puntual del acabado a espejo para 30° a 1000X debido a que a 300X era difícil hacer un correcto análisis puntual. En la Tabla 11 se muestran los análisis puntuales, en el Punto 1 se aprecia una mínima formación de productos debido al acabado liso de la muestra. El punto 2 es un aglomerado amorfo de un producto con mezcla de calcio y de cobre principalmente. En el Punto 3 tiene una morfología cúbica, cuya composición principalmente es de calcio, carbono y oxígeno donde se atribuye que la salmuera formo productos en la zona de la interface del acero además de la presencia de óxidos.

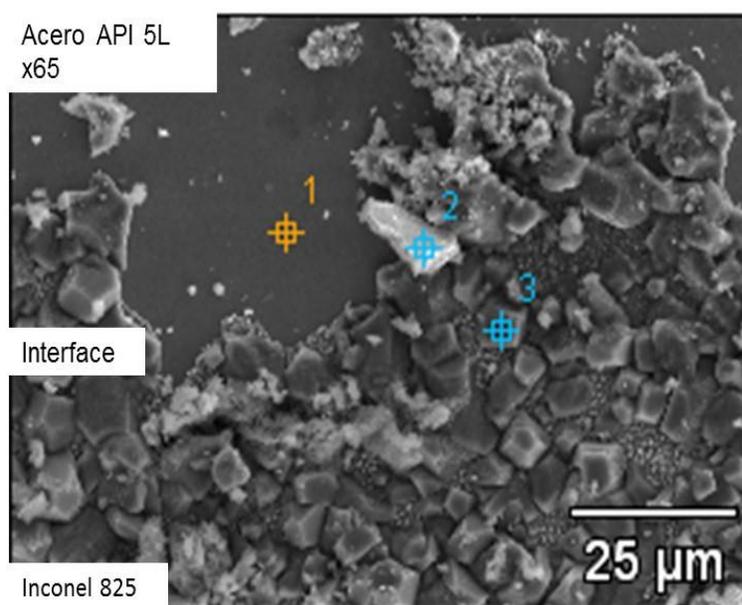


Figura 36 Análisis puntual del material bimetalico en la interface con acabado pulido a espejo en un ángulo de 30° a 1000X magnificaciones.

Tabla 11. Composición del análisis puntual en ángulo de 30° pulido a espejo del material bimetalico en la interface.

%peso	C	O	S	Ca	Mn	Fe	Cu
Punto 1	6.62	-	-	0.26	1.32	91.81	-
Punto 2	17.41	22.90	-	22.00	-	4.58	33.12
Punto 3	14.39	26.26	0.16	55.45	-	2.04	1.71

4.5.5.- Caracterización superficial de los productos de corrosión mediante MEB para un ángulo de 60° con acabado superficial a lija #2000 y pulido a espejo

En la Figura 37 se muestra la morfología de los productos de corrosión para ambos acabados superficiales a 60°. En la superficie a lija #2000 37a y pulido a espejo 37b se observan productos de corrosión distribuidos en la interface e incluso no se logra apreciar la interface debido al recubrimiento de los productos de corrosión, además es probable que dichos productos tienen un mayor tamaño para el caso del acabado a lija #2000 en comparación con el acabado a pulido a espejo, probablemente a esto se deba disminución drástica de la velocidad de corrosión para el acabado a espejo, también se tiene la presencia de productos más compactos y aglomerados.

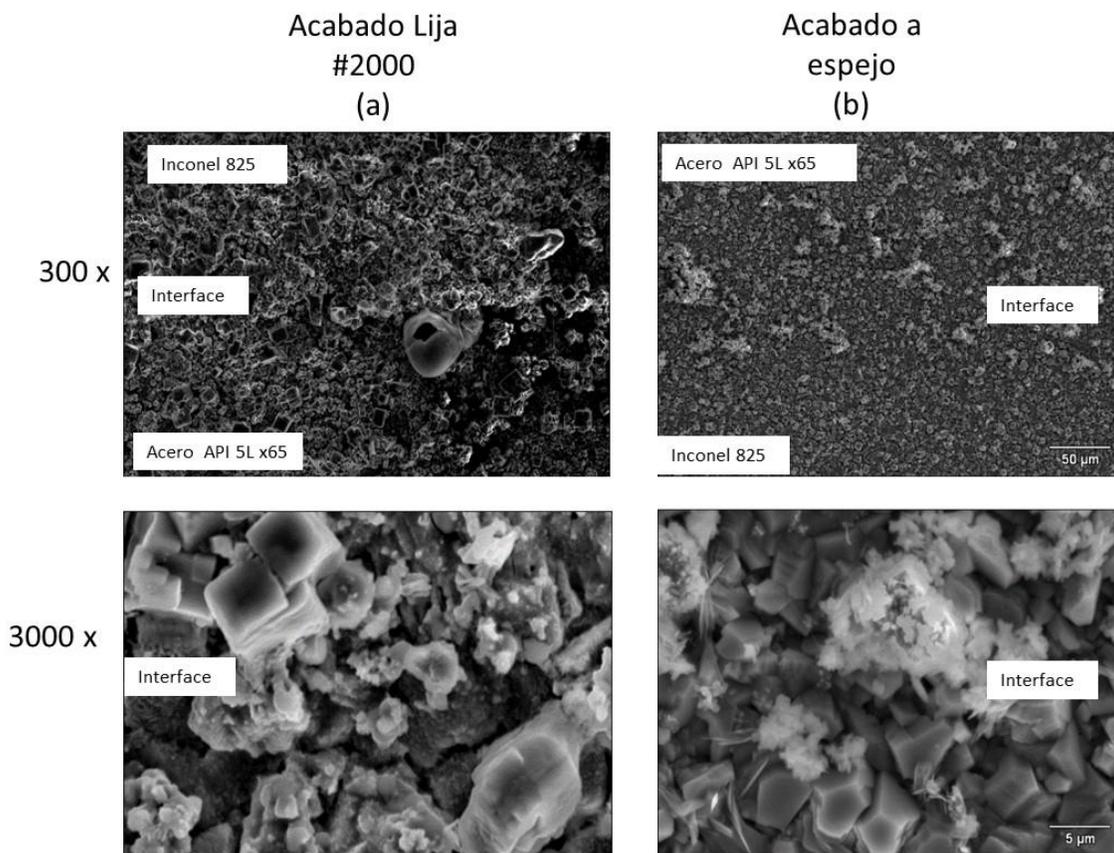


Figura 37 Micrografías de la superficie del material bimetalico en la interface a 300X y 3000X magnificaciones en ángulo de 60° a (a) lija #2000 y (b) pulido a espejo.

4.5.6.- Análisis de los productos de corrosión por EDS para un ángulo de 60° con acabado superficial a lija #2000 y pulido a espejo

En la Tabla 12 se muestra el análisis de EDS de ambos acabados superficiales para un ángulo de 60°, el análisis para la lija #2000 presenta una composición de cloro, calcio, sodio por efecto de la salmuera, además se tiene hierro y carbono con los cuales se forma la cementita y algunos óxidos. Para el caso de la muestra pulido a espejo, existe una composición de calcio, sodio además presenta una mayor concentración de oxígeno a diferencia de la lija #2000.

Tabla 12 Composición de los productos de corrosión distribuidos sobre la superficie en ángulo de 60° acabado a lija #2000 y pulido a espejo.

Elemento	Lija #2000- 60°	Pulido a espejo- 60°
	%peso	%peso
C	20.40	23.57
O	18.84	37.00
Na	10.52	2.32
Si	0.11	-
Cl	12.06	-
Ca	15.03	32.78
Fe	5.63	2.74
Cu	17.40	1.60
Total	100.00	100.00

4.5.7.- Análisis puntual para un ángulo de 60° con acabado superficial a lija #2000

En la Figura 38 muestra el análisis puntual del acabado a lija #2000 en la posición de 60°, analizando 3 puntos dependiendo de la tonalidad de los productos de corrosión. En la Tabla 13 se muestran los análisis puntuales, para el Punto 1 la morfología del aglomerado es amorfa y presenta una mezcla de calcio, carbono y oxígeno atribuido a la formación de cementita y carbonatos, además la presencia de calcio propio de la salmuera. En el Punto 2, la forma del producto no se aprecia con mayor claridad debido a su tamaño, pero se tiene cloro y sodio, propios de la salmuera, este producto siempre presenta una forma cúbica. En el Punto 3, la forma es de un aglomerado amorfo y presenta una mezcla de oxígeno, hierro y en menor concentración de cloro y calcio, los cuales dan origen a la formación de óxidos.

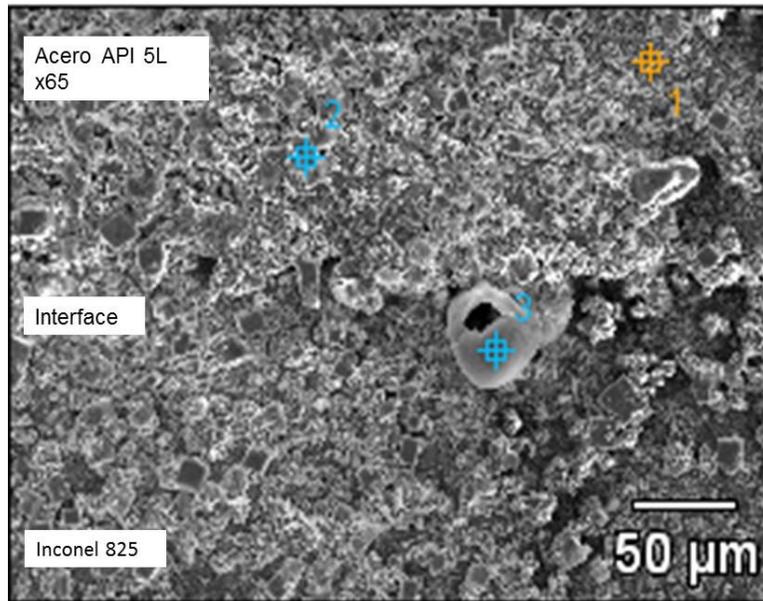


Figura 38 Análisis puntual del material bimetalico en la interface con acabado lija #2000 en un ángulo de 60° a 300X magnificaciones.

Tabla 13 Composición del análisis puntual en ángulo de 60° a lija #2000 del material bimetalico en la interface.

%peso	C	O	Na	Si	Cl	Ca	Fe	Cu
Punto 1	22.36	44.44	-	0.12	0.70	23.90	2.80	5.67
Punto 2	-	1.07	38.39	-	60.53			
Punto 3	8.49	32.87	-	-	6.02	1.02	50.62	0.98

4.5.8.- Análisis puntual para un ángulo de 60° con acabado superficial pulido a espejo

En la Figura 39 se muestra el análisis puntual del acabado a espejo para 60° a 1000X. En la Tabla 14 se muestran las composiciones de los análisis puntuales; se puede apreciar una similitud de los tres puntos porque para dichos puntos existe la presencia de calcio, oxígeno, carbono y hierro, aunque su única diferencia es la morfología que presentan. Por lo tanto, estos productos son propios de la salmuera mezclados con productos de cementita o carbonatos.

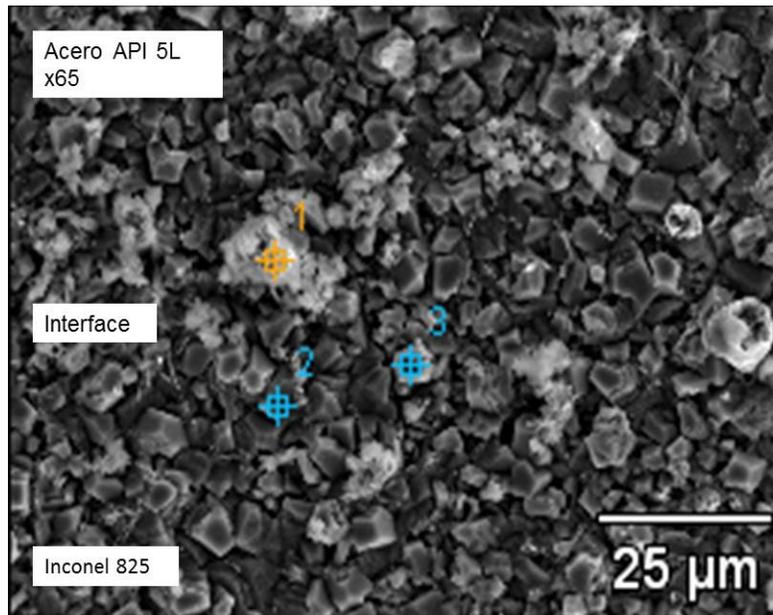


Figura 39 Análisis puntual del material bimetalico en la interface con acabado pulido a espejo en un ángulo de 60° a 1000X magnificaciones.

Tabla 14 Composición del análisis puntual en ángulo de 60° con pulido a espejo del material bimetalico en la interface.

%peso	C	O	Na	Mg	Si	S	Ca	Fe
Punto 1	25.25	36.25	1.01	0.14	0.18	-	35.70	1.48
Punto 2	24.06	33.81	0.41	-	-	0.14	39.80	1.78
Punto 3	19.50	28.69	-	-	-	0.20	50.12	1.48

4.5.9.- Caracterización superficial de los productos de corrosión mediante MEB para un ángulo de 90° con acabado superficial a lija #2000

En la Figura 40 se muestra la superficie para el acabado superficial a lija #2000 a 90°. Es posible observar que existe una diferencia de altura entre la superficie del inconel 825 y el acero API 5L X65. Se observan productos de corrosión en la superficie del inconel con una morfología cúbica con una distribución semiuniforme, mientras que para el acero API se presenta una disolución por lo que el desbaste afecto el comportamiento de la velocidad de corrosión haciendo que se tenga un incremento para estas condiciones de trabajo.

Acabado Lija #2000

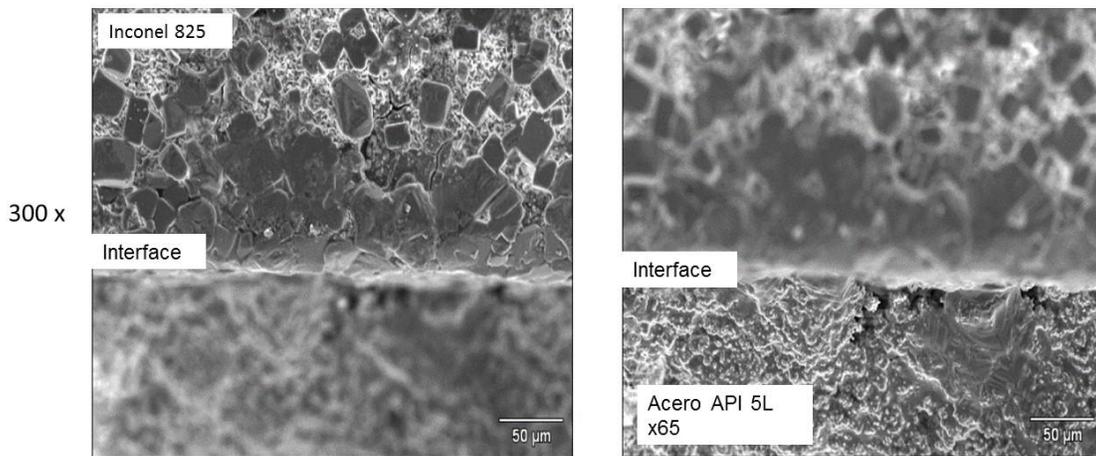


Figura 40 Micrografías de la superficie del material bimetalico en la interface a 300X magnificaciones en ángulo de 90° lija #2000 (a) Superficie del Inconel y (b) Superficie del Acero API.

4.5.10.- Análisis de los productos de corrosión por EDS para un ángulo de 90° con acabado superficial a lija #2000

En la Tabla 15 se muestra el análisis de EDS a lija #2000 para 90°, se observa que en la zona del Inconel 825 existe una alta concentración de cloro, sodio, calcio propio de la salmuera. Mientras que en la superficie de acero API, el EDS muestra que hay una alta concentración de oxígeno, hierro y carbono, por lo tanto, la presencia de oxígeno proporciona una baja resistencia a la corrosión debido a la formación de óxidos los cuales son menos adherentes y, por ende, menos protectores lo cual se aprecia en el incremento de la velocidad de corrosión, tal como se muestra en la Figura 33.

Tabla 15 Composición de los productos de corrosión distribuidos sobre la superficie en ángulo de 90° acabado lija #2000.

Elemento	Inconel 825	Acero API 5L X65
	%peso	%peso
C	-	10.76
O	16.88	37.89
Na	19.93	2.15
Si	2.70	4.56
Cl	34.39	6.80
Ca	16.66	3.24
Mn	2.92	-
Fe	6.51	34.59
Total	100.00	100.00

4.5.11.- Caracterización superficial de los productos de corrosión mediante MEB para un ángulo de 90° con acabado superficial pulido a espejo

En la Figura 41 se muestra la morfología de los productos de corrosión con acabado a pulido a espejo a 90°. Se muestra que los productos de corrosión formados se presentan principalmente en la interface del material bimetálico. Se aprecia que hay una mayor proporción de anclaje de partículas en la zona del acero, a diferencia del inconel, debido a que el acabado superficial no permitió una buena adherencia de los productos de corrosión.

Acabado a espejo

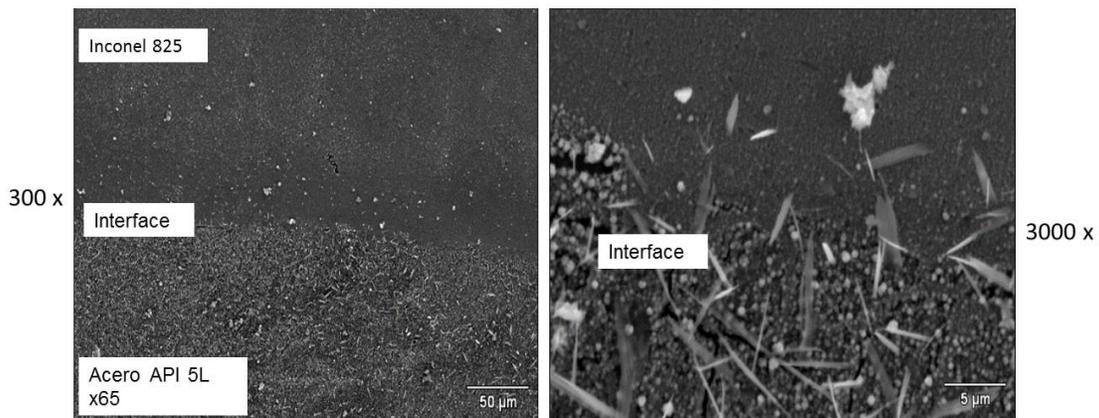


Figura 41 Micrografías de la superficie del material bimetálico en la interface a 300X y 3000X magnificaciones en ángulo de 90° pulido a espejo.

4.5.12.- Análisis de los productos de corrosión por EDS para un ángulo de 90° con acabado superficial pulido a espejo

En la Tabla 16 se muestra el análisis de EDS para el pulido a espejo en 90°, se aprecia que tiene una composición con una alta concentración de sodio y carbono principalmente anclado en la superficie del material, además es posible apreciar una baja concentración de oxígeno.

Tabla 16 Composición de los productos de corrosión distribuidos sobre la superficie en ángulo de 90° acabado pulido a espejo.

Elemento	%peso
C	12.61
O	8.53
Si	0.25
S	0.03
Cl	0.31
Ca	1.56
Cr	4.15
Mn	0.23
Fe	13.53
Ni	8.84
Na	49.95
Total	100.00

4.5.13. Análisis puntual para un ángulo de 90° con acabado superficial pulido a espejo

En la Figura 42 se muestra el análisis puntual a pulido a espejo en 90° a 1000X. En la Tabla 17 se muestra la composición química de tres puntos, donde se puede apreciar que el Punto 1 tiene una baja concentración de calcio, sin embargo, se tiene alta concentración de níquel y cobre correspondientes a la superficie del inconel. En el Punto 2 se tiene una concentración de cobre, hierro, oxígeno y carbono, además una alta concentración de cobre, finalmente el Punto 3 tiene una morfología de pluma delgada y su composición es muy similar al Punto 2 pero hay presencia de sodio debido al anclaje de los productos de la salmuera.

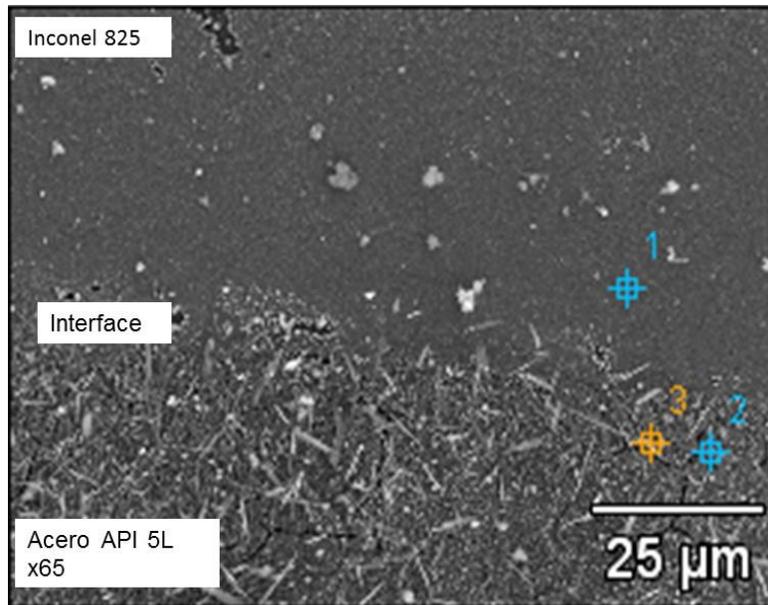


Figura 42 Análisis puntual del material bimetalico en la interface con acabado pulido a espejo en un ángulo de 90° a 1000X magnificaciones.

Tabla 17 Composición del análisis puntual en ángulo de 90° pulido a espejo del material bimetalico en la interface.

%peso	C	O	Na	Si	Cl	Ca	Fe	Ni	Cu
Punto 1	10.60	4.57	-	-	-	0.82	6.44	21.41	56.16
Punto 2	10.25	12.31		0.25		2.20	26.87		48.11
Punto 3	15.78	16.60	12.68		0.47	1.81	17.63		35.03

4.6. Resultados de caracterización superficial mediante difracción de rayos X haz rasante

Mediante la técnica de Difracción de Rayos X se realizó la caracterización de las diferentes gamas de estructuras cristalinas que componen los diferentes productos de corrosión formados en la superficie después de la experimentación.

4.6.1. Resultados de caracterización superficial mediante difracción de rayos X para un ángulo de 30° acabado superficial lija #2000 y pulido a espejo

La Figura 43 muestra el patrón de difracción para el ángulo de 30° para ambos acabados superficiales. Se observa que para el acabado a lija #2000 presenta una mayor gama de estructuras cristalinas, tales como; siderita (FeCO_3), cementita (Fe_3C) y algunos óxidos de hierro (FeO , Fe_2O_3 y Fe_3O_4) están presentes, por lo cual se obtiene la menor velocidad de corrosión tal como se muestra en la Figura 33. Este comportamiento se atribuye a que la siderita se encuentra en mayor proporción, siendo este un producto de corrosión más protector. [6, 19]

Para el difracto para acabado pulido a espejo, los productos de corrosión muestran que la formación de la Siderita (FeCO_3) no se lleva a cabo, porque predominan los óxidos superficiales (FeO y Fe_2O_3) con mayor intensidad y por ende se tiene el incremento de la velocidad de corrosión debido a que los óxidos son menos estables que los carbonatos.

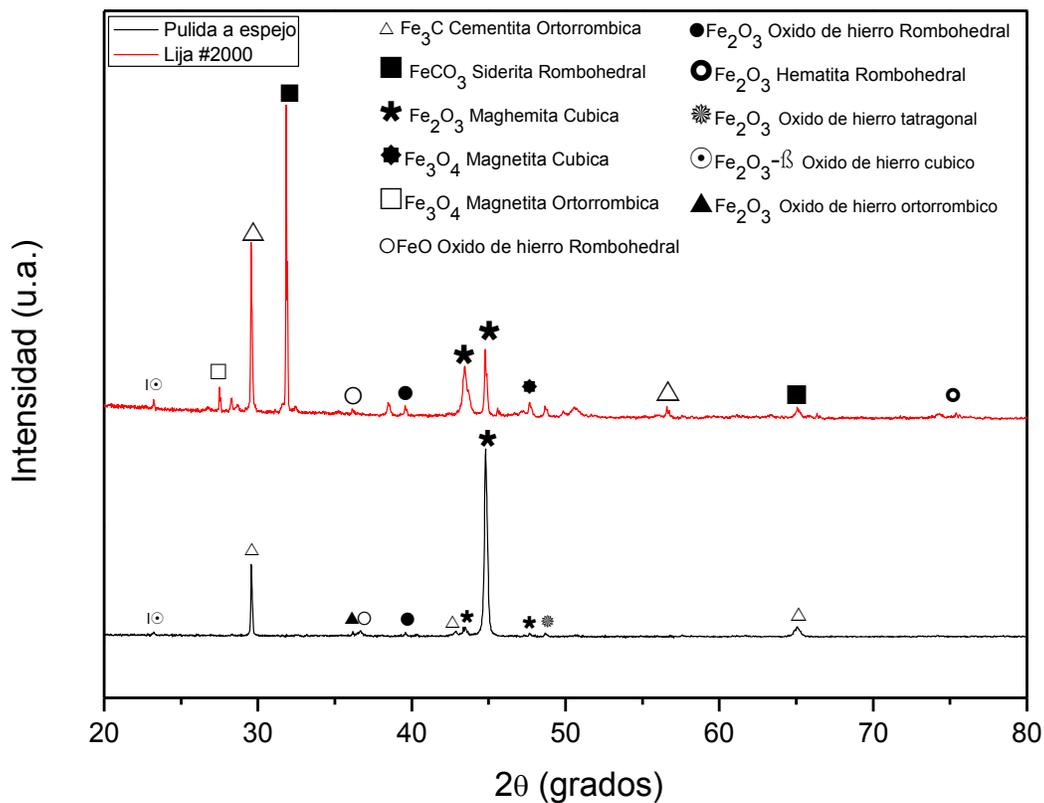


Figura 43 Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados en el material bimetalico para un ángulo de 30° con acabado de lija #2000 y pulido a espejo.

4.6.2. Resultados de caracterización superficial mediante difracción de rayos X para un ángulo de 60° acabado superficial lija #2000 y pulido a espejo

La Figura 44 muestra el patrón de difracción para el ángulo de 60° para ambos acabados superficiales. Se observa que para el acabado a lija #2000 (rojo) presenta una menor gama de estructuras cristalinas, de acuerdo a los resultados (Figura 33), los productos de corrosión no proporcionaron una velocidad de corrosión como en el ángulo de 30° porque existe menor proporción de siderita, de tal forma hay presencia de óxidos de hierro (FeO, Fe₂O₃ y Fe₃O₄) lo cual proporciona una velocidad de corrosión eficiente.

Para el difracto para acabado pulido a espejo (negro) se muestra una mayor gama de estructuras cristalinas, entre las cuales hay presencia de Cementita (Fe₃C) en mayor proporción que la Siderita (FeCO₃), por lo tanto, se atribuye que la cementita es un producto de corrosión principal para evitar una velocidad de corrosión mayor porque es precursor de la Siderita. A su vez la formación de una gran variedad de óxidos (Fe₂O₃, Fe₃O₄) por lo que producen valores de corrosión poco eficiente por la gran variedad de estos óxidos.

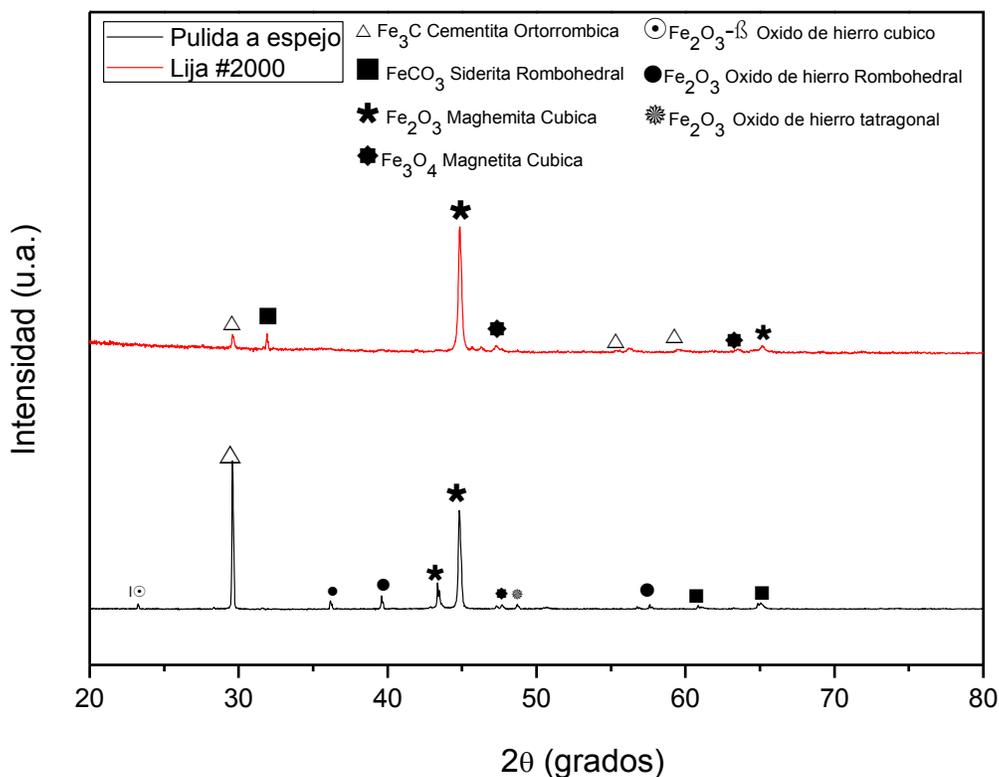


Figura 44 Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados en el material bimetalico para un ángulo de 60° con acabado de lija #2000 y pulido a espejo.

4.6.3. Resultados de caracterización superficial mediante difracción de rayos X para un ángulo de 90° acabado superficial lija #2000 y pulido a espejo

La Figura 45 muestra el difracto para el ángulo de 90° para ambos acabados superficiales.

Para el caso de lija #2000 (rojo) presenta una menor gama de estructuras cristalinas, a diferencia del difracto pulido a espejo (negro). Se observa que para el acabado lija #2000 existe una mínima formación de productos de Siderita, y en mayor proporción del óxido de Maghemita cubica (Fe_2O_3), para este caso a pesar de que existe formación de siderita este no influye para reducir la velocidad de corrosión a diferencia de los otros ángulos así que el impacto de la solución a la superficie de la muestra no permite anclar productos en la superficie.

Para el difracto acabado pulido a espejo (negro), las estructuras cristalinas indican que existe formación de cementita (Fe_3C) y en menor proporción Siderita (FeCO_3), sin embargo, se atribuye que la presencia de cementita es la que proporciona una velocidad de corrosión menor comparado con el ángulo de (30° y 60° pulido a espejo), la presencia de óxidos se atribuye a su baja estabilidad del Acero al contacto con la atmosfera.

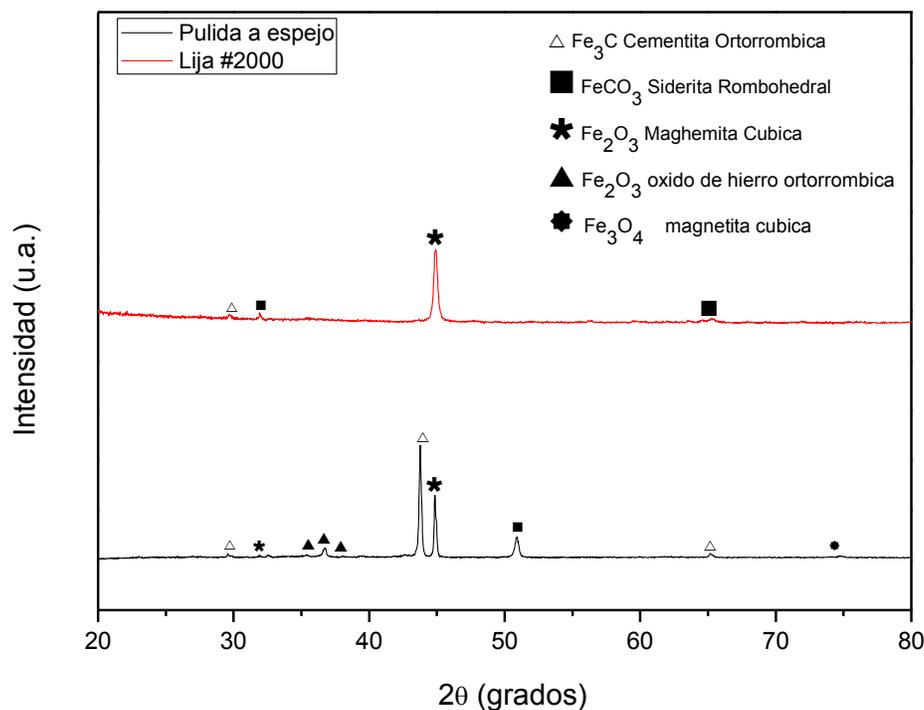


Figura 45 Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados en el material bimetalico para un ángulo de 90° con acabado de lija #2000 y pulido a espejo.

La formación de la variedad de los productos de corrosión entre ambos acabados superficiales se debe a la diferencia de rugosidades, además por el efecto del ángulo, del flujo y de la composición de los materiales. Por lo que se cree que la clave es la Siderita (FeCO_3) que se forma en la superficie del material bimetalico en forma de escamas [6] y la formación de la Cementita (Fe_3C) por enriquecimiento de carbono a la superficie del bimetalico. Los resultados de los 3 ángulos se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18 Análisis comparativo de los productos de corrosión formados en la superficie del material bimetalico en un ángulo de 30°, 60° y 90°.

Productos de corrosión	Formula	Estructura	Símbolo	Angulo					
				30°		60°		90°	
				Acabado					
2000#	Pulido a espejo	2000#	Pulido a espejo	2000#	Pulido a espejo				
Cementita	Fe_3C	Ortorrómbica		X	X	X	X	X	X
Siderita	FeCO_3	Rombohedral		X		X	X	X	X
Maghemita	Fe_2O_3	Cubica		X	X	X	X	X	X
Magnetita	Fe_3O_4	Cubica		X		X	X		X
Magnetita	Fe_3O_4	Ortorrómbica		X					
Óxido de hierro	FeO	Rombohedral		X	X				
Óxido de hierro	Fe_2O_3	Rombohedral		X	X		X		
Hematita	Fe_2O_3	Rombohedral		X					
Óxido de hierro	Fe_2O_3	Tetragonal			X		X		
Óxido de hierro-beta	$\text{Fe}_2\text{O}_3 - \beta$	Cubico			X		X		
Óxido de hierro	Fe_2O_3	Ortorrómbica			X				X

4.7. Resultados de caracterización superficial mediante perfilometría óptica

La finalidad de utilizar el perfilómetro óptico, es obtener imágenes topográficas y valores de rugosidad del material bimetálico antes y después de la experimentación. Para la obtención de los valores de rugosidad con el uso del perfilómetro óptico, a partir de los cupones completos ($1 \times 0.5 \text{ cm}^2$), el equipo digitalizo imágenes topográficas que correspondían a un área cercana a la interface en un área de $1 \times 0.8 \text{ mm}^2$ obteniendo imágenes en tres dimensiones de la superficie y perfiles horizontales de la misma área. Se determinaron valores de rugosidad de ambos acabados (lija #2000 y pulido a espejo) con uso del software Vision 64. Los colores observados en las imágenes topográficas indican que el color azul son los valles, y el color rojo indican donde se localizan las zonas más altas (picos), el resto de colores esta comprendidos entre estos límites.

4.7.1.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado a lija #2000 previo a la prueba electroquímica

En la Figura 46 se muestra la caracterización del material bimetálico con desbaste lija #2000 mediante perfilometría óptica, se puede apreciar en la Figura 46a la imagen óptica del cupón completo con un área de $1 \times 0.5 \text{ cm}^2$, en esta misma figura se observa la diferencia en coloración entre el acero API e Inconel, así mismo, no es posible apreciar la interface con facilidad, sin embargo en la imagen topográfica (3D) de $1 \times 0.8 \text{ mm}^2$ (Figura 46b) es posible comprobar que la interface entre los dos materiales no se detecta en esta imagen debido a que el proceso de lijado proporciona una superficie homogénea, en la imagen 2D de análisis (Figura 46c) se muestran el eje X para la obtención de los perfiles de rugosidad eje X (Figura 46d). En el perfil se aprecian picos y valles debido al rayado que genera el desbaste con la lija #2000. El valor de rugosidad obtenido fue de $R_q=0.15 \mu\text{m} \pm 0.01$.

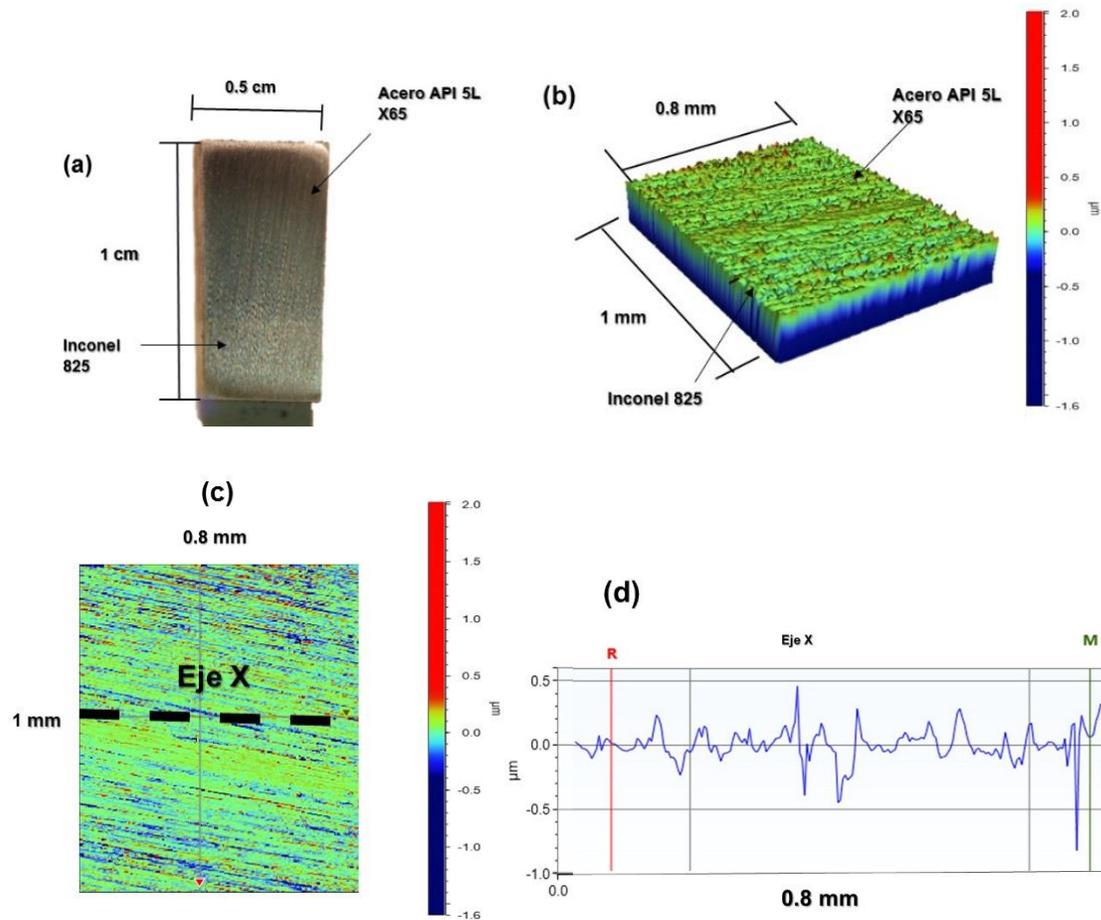


Figura 46 Caracterización por perfilometría óptica del material bimetalico con desbaste a lija #2000 sin corrosión (a) imagen óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d)perfil del eje x.

4.7.2.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado pulido a espejo previo a la prueba electroquímica

La Figura 47 muestra la caracterización del cupo bimetalico para un acabado superficial pulido a espejo sin el efecto de la corrosión, la Figura 47a correspondiente a la imagen óptica del cupón completo, se observa la diferencia de colores entre los dos materiales, además se aprecia la zona donde se localiza la interface sin embargo no se aprecia con facilidad, en la imagen topográfica Figura 47b se observa la superficie del revestimiento de inconel y la del acero, se observa que el inconel presenta un mínimo de partículas visibles de alúmina (Al_2O_3) incrustadas por el efecto del pulido de la superficie a diferencia de la zona del acero, además es posible apreciar la interface en la topografía. En la imagen 2D

(Figura 47c) se muestra la ubicación del eje X del perfil de rugosidad. El perfil de rugosidad del eje X (Figura 47d) muestra las alturas de picos y profundidad de valles de la superficie del material, en el acabado superficial por pulido se obtuvo una rugosidad menor que el acabado lija #2000 con un valor de $R_q=0.03 \mu\text{m} \pm 0.01$.

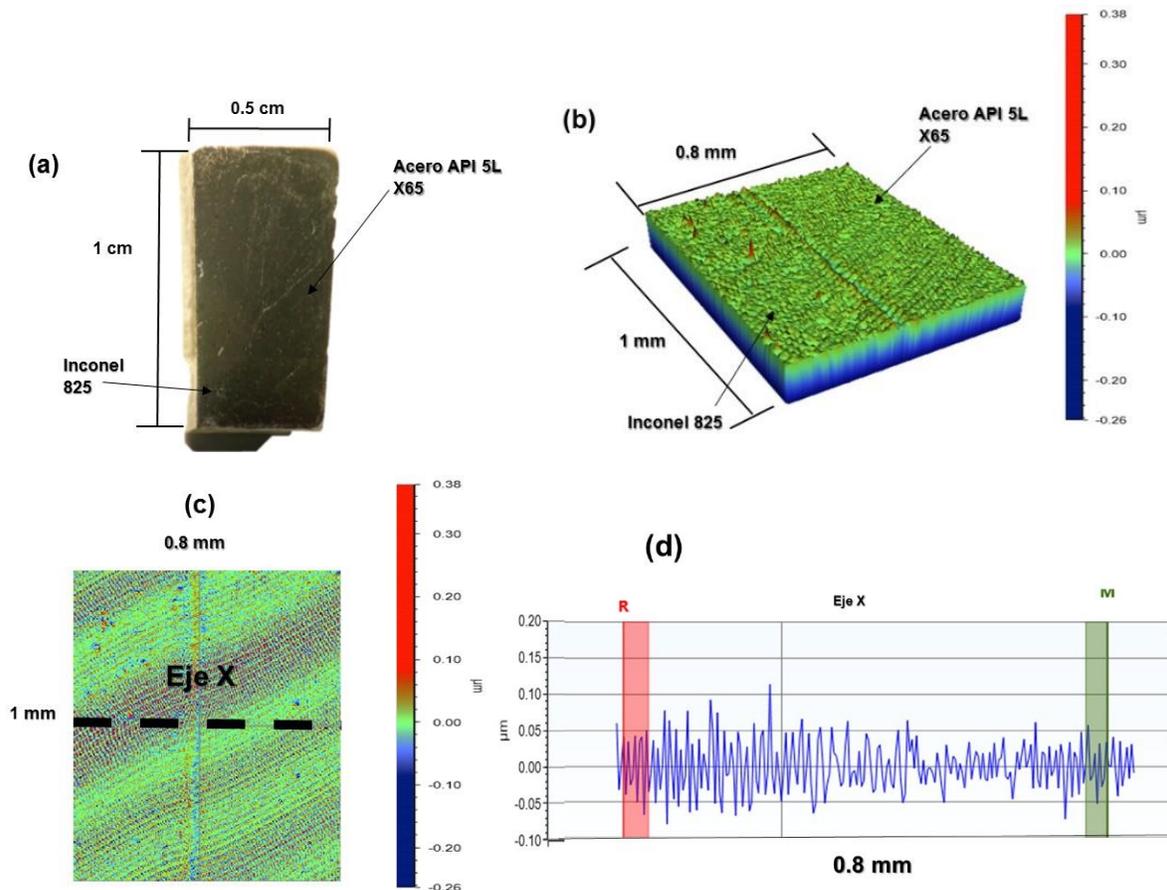


Figura 47 Caracterización por perfilometría óptica del material bimetalico con pulido sin corrosión (a) imagen óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) perfil del eje x.

4.7.3.- Parámetros de rugosidad con acabado superficial lija #2000 y pulido a espejo previos al ataque electroquímico

Los parámetros de rugosidad para ambos acabados superficiales se presentan en la Tabla 19, la diferencia de valores de rugosidad está relacionada con el tipo de acabado superficial. La superficie con lija #2000 presenta un valor de rugosidad media cuadrática (R_q) mayor a la superficie del cupón pulido a espejo debido a que la lija proporciona mayor desgaste superficial.

El valor de R_p indican que el pico más alto en lija #2000 es de $R_p=2.02 \mu\text{m}$ y del pulido a espejo $R_p=0.37 \mu\text{m}$, existiendo una gran diferencia de rugosidad. Para R_v (valor de valle más profundo) se encontró que el valor mayor de la superficie desbastada es $R_v=-1.59 \mu\text{m}$ y $R_v=-0.26 \mu\text{m}$ para la superficie pulida.

Confirmando que el acabado menos rugoso es la superficie con pulido a espejo porque su superficie es más lisa a diferencia del desbaste donde incluso las líneas de lija son visibles.

Tabla 19 Parámetros de amplitud de rugosidad previo a la prueba electroquímica con acabado a lija #2000 y pulido a espejo.

Cupones antes de ataque electroquímico

Parámetro de rugosidad (μm)	Acabado superficial	
	#2000	Pulido a espejo
R_q (Rugosidad media cuadrática)	0.15	0.03
R_a (Rugosidad media aritmética)	0.10	0.02
R_p (Pico más alto)	2.02	0.37
R_v (Valle más profundo)	-1.59	-0.26
R_t ($R_p + R_v$)	3.61	0.64

4.7.4.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado superficial a lija #2000 en un ángulo de 30°

En la Figura 48 se muestran las imágenes usadas en la caracterización superficial del cupón con acabado superficial a lija #2000 con un ángulo de impacto 30° , el cual corresponde a la más baja velocidad de corrosión de los tres ángulos con acabado a lija #2000. La Figura 48a muestra la imagen óptica del cupón después de la prueba experimental, en esta se observa una diferencia de colores entre los componentes del cupón bimetálico, la zona del inconel muestra una coloración gris con zonas rojizas mientras que en el acero API se aprecian los colores rojo y café los cuales probablemente corresponden a óxidos (Fe_2O_3) y a la siderita respectivamente, además el color negro se atribuye a la cementita (Fe_3C) (la correlación de colores y su composición se llevó a cabo por medio de DRX ver Capítulo 4.6). En la Figura 48b (imagen topográfica) se observa una capa de productos de corrosión depositados en ambas zonas y además no es visible la interface, (este fenómeno se

observa claramente en el estudio por medio de MEB Capítulo 4.5.1). Adicionalmente en la imagen 3D se puede apreciar por diferencia de alturas los productos de mayor tamaño. El anclaje de los productos de la corrosión se vio favorecida por los surcos generados por el lijado lo cual genera la pasivación de la superficie del material. La Figura 48c muestra la imagen 2D donde se observa un color azul las cuales se puede atribuir a que no se depositaron productos en dichas zonas y se vuelve porosa la capa de los depósitos, las zonas rojas (picos) están localizadas no uniforme, además se muestra la localización del perfil usado en la Figura 48d eje X atravesando sobre la interface, el cual no muestra una diferencia significativa de alturas en la interface por los productos de corrosión debido a que dichos cubren la interface.

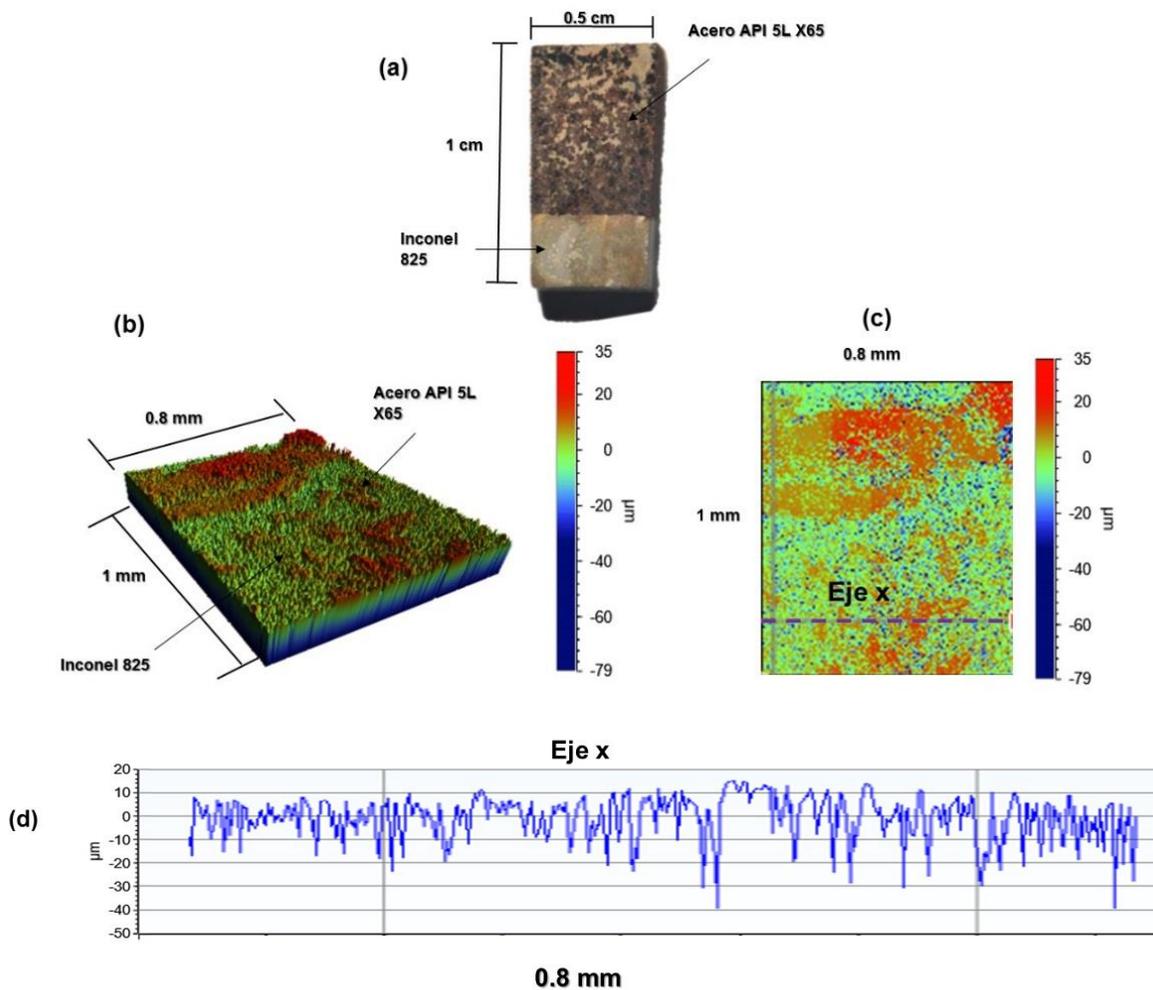


Figura 48 Caracterización por perfilometría óptica del material bimetalico desbaste a lija #2000 con corrosión ángulo de 30°(a) imagen óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) perfiles del eje x.

En la Tabla 20 se muestra la diferencia de rugosidades del Inconel y el acero API posterior al ataque electroquímico indicando que los valores de rugosidad R_q y R_a tienen una pequeña diferencia de rugosidades entre ambas superficies de los diferentes materiales, sin embargo, la rugosidad R_p (Inconel) es menor que la rugosidad R_p (acero API) indicando que el acero tiene zonas donde los productos de corrosión alcanzan mayores capas. La rugosidad de valle más profundo R_v (Inconel) es menor que R_v (acero API) lo que indica que ambos materiales presentan porosidad de la capa de productos siendo más porosa en el acero, además, se genera mayor desprendimiento de productos en el acero pero que se vuelven a depositar evitando un ataque superficial y protegiendo la superficie.

Tabla 20 Rugosidades cupón lija #2000 en posición de 30°.

Rugosidad del cupón lija 2000 posición de 30°

Parámetro de rugosidad (μm)	Zona del material	
	Inconel 825	Acero API 5L X65
R_q (Rugosidad media cuadrática)	8.85	9.56
R_a (Rugosidad media aritmética)	6.62	6.99
R_p (Pico más alto)	59.92	64.94
R_v (Valle más profundo)	-68.01	-87.55
R_t ($R_p + R_v$)	127.93	152.49

4.7.5.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado a lija #2000 en un ángulo de 90°

En la Figura 49 se muestran imágenes de ópticas del cupón además de imágenes topográficas de la zona de interface (muestra con acabado superficial a lija #2000 en la posición de 90° posterior a la prueba de corrosión), se observó que, entre las condiciones de ángulo estudiado, esta condición presentó la mayor velocidad de corrosión. En Figura 49a se muestra la imagen óptica del cupón completo después de la prueba electroquímica donde se puede apreciar claramente los dos materiales debido a la diferencia de coloración, en la zona del acero API la coloración es roja y negra indicando que hay mayor cantidad de óxidos de hierro, en la zona del Inconel se aprecia una coloración gris en la superficie lo cual indica que los productos de salmuera cubrieron esa zona del material principalmente.

En la Figura 49b la topografía en 3D muestra productos de corrosión anclados principalmente en la línea interfacial del cupón, esta formación no es uniforme y es a lo largo de dicha línea lo cual se puede atribuir a que no existe una unión uniforme entre los dos materiales. En la zona del acero API visualmente se aprecia óxidos debido a la exposición a la atmósfera, también, en el iniconel se aprecia una uniformidad en la superficie debido a su resistencia a la corrosión. La Figura 49c muestra la ubicación del perfil X, el perfil de rugosidad eje X de la Figura 49d atraviesa ambas superficies de los materiales, en este perfil es posible apreciar que los productos anclados en la interface y de óxidos formados, generan productos de corrosión no uniforme con diferencia de espesores.

La posición de 90° indica que no se beneficia debido a que se disuelve el acero API a una velocidad mayor que la del iniconel.

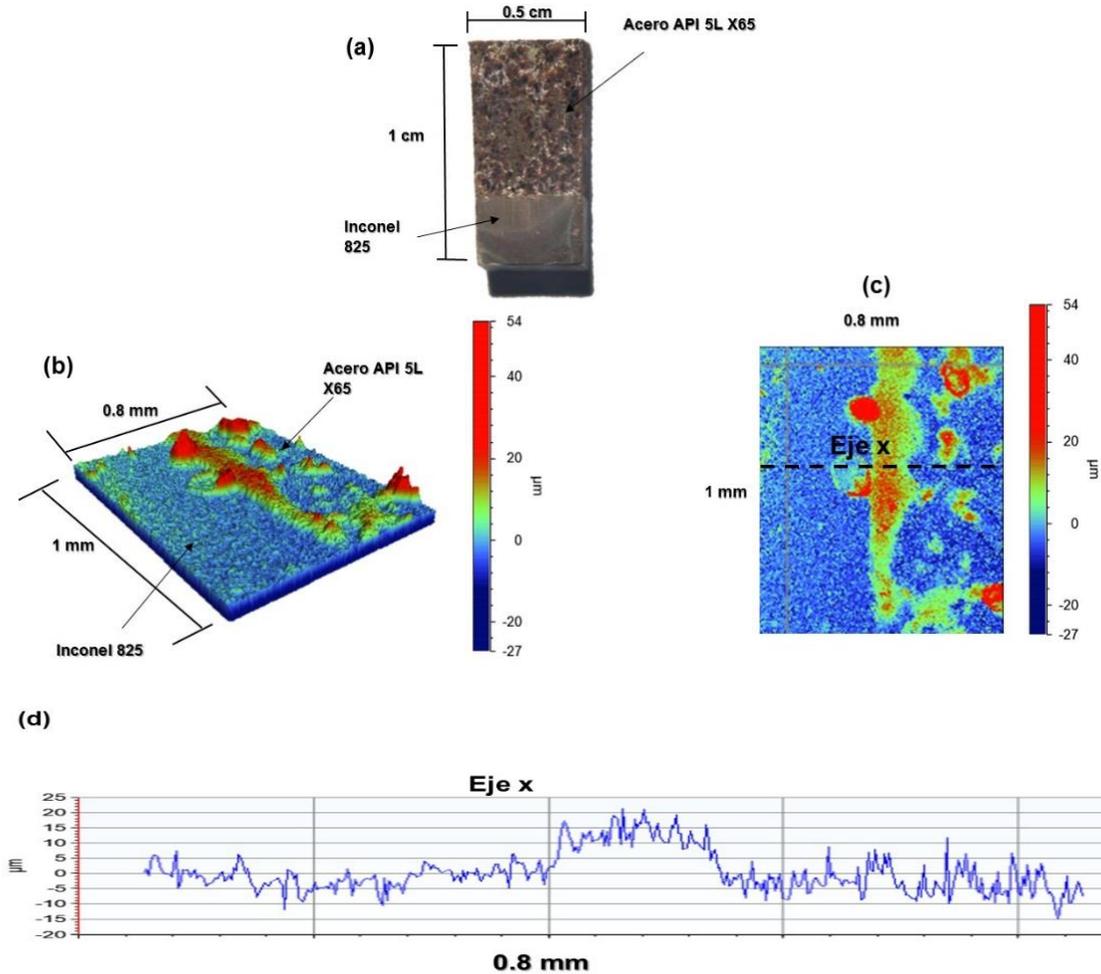


Figura 49 Caracterización por perfilometría óptica del material bimetalico desbaste a lija #2000 con corrosión ángulo de 90°(a) imagen óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) Perfiles del Eje X.

En la Tabla 21 se muestra las rugosidades entre los dos materiales, en la cual se aprecia que para el acero se tiene el mayor valor de rugosidad con un valor igual al 9.56 μm mientras que para el inconel se obtuvo un valor de 4.33 μm , esto se debe a que no hay un recubrimiento uniforme de los productos y por lo tanto hay zonas expuestas a la atmósfera que permiten una disolución del acero, además, el inconel presenta menor disolución debido a su resistencia a la corrosión, esto se puede apreciar con más detalle en las imágenes obtenidas por medio de MEB (ver capítulo 4.5.9).

Tabla 21 Rugosidades cupón lija #2000 en posición de 90°.

Rugosidad del cupón lija 2000 posición de 90°

Parámetro de rugosidad (μm)	Zona del material	
	Inconel 825	Acero API 5L X65
R _q (Rugosidad media cuadrática)	4.33	9.56
R _a (Rugosidad media aritmética)	3.21	6.11
R _p (Pico más alto)	26.45	33.89
R _v (Valle más profundo)	-29.40	-33.97
R _t (R _p + R _v)	55.85	67.86

4.7.6.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado pulido a espejo en un ángulo de 30°

En la Figura 50 se muestra la imagen óptica y de topografía del cupón con un acabado superficial pulido a espejo en la posición de exposición de 30°, los resultados muestran que en estas condiciones se obtuvo la mayor velocidad de corrosión para una superficie pulida. En la Figura 50a se aprecia una imagen óptica del cupón donde se observa claramente un contraste en la coloración de los materiales que componen el cupón, el color más oscuro en la zona del acero y la coloración clara en la zona del inconel, además es posible observar a simple vista que no existe una diferencia en la textura de los materiales que componen este material. En la imagen topográfica Figura 50b no se aprecia la interface sin embargo es posible observar en ambas zonas, partículas de productos de corrosión, algunas de estas podrían corresponder a sales remanentes de la salmuera que quedaron en la superficie. En esta imagen también se observa que la capa de acero presenta las partículas

con mayor tamaño, esto es debido a que el acero es menos resistente a la corrosión, además, la formación de las partículas con este patrón de distribución podría ser generado debido a que el pulido del cupón genera menos fricción con el flujo de la salmuera, y menor turbulencia. En la Figura 50c se indica el eje X que atraviesa la interface, el perfil del eje X (Figura 50d) muestra que la corrosión no produce una superficie con daño aparente, además las partículas de productos de corrosión remanentes son las que generan un aumento en la rugosidad del acero.

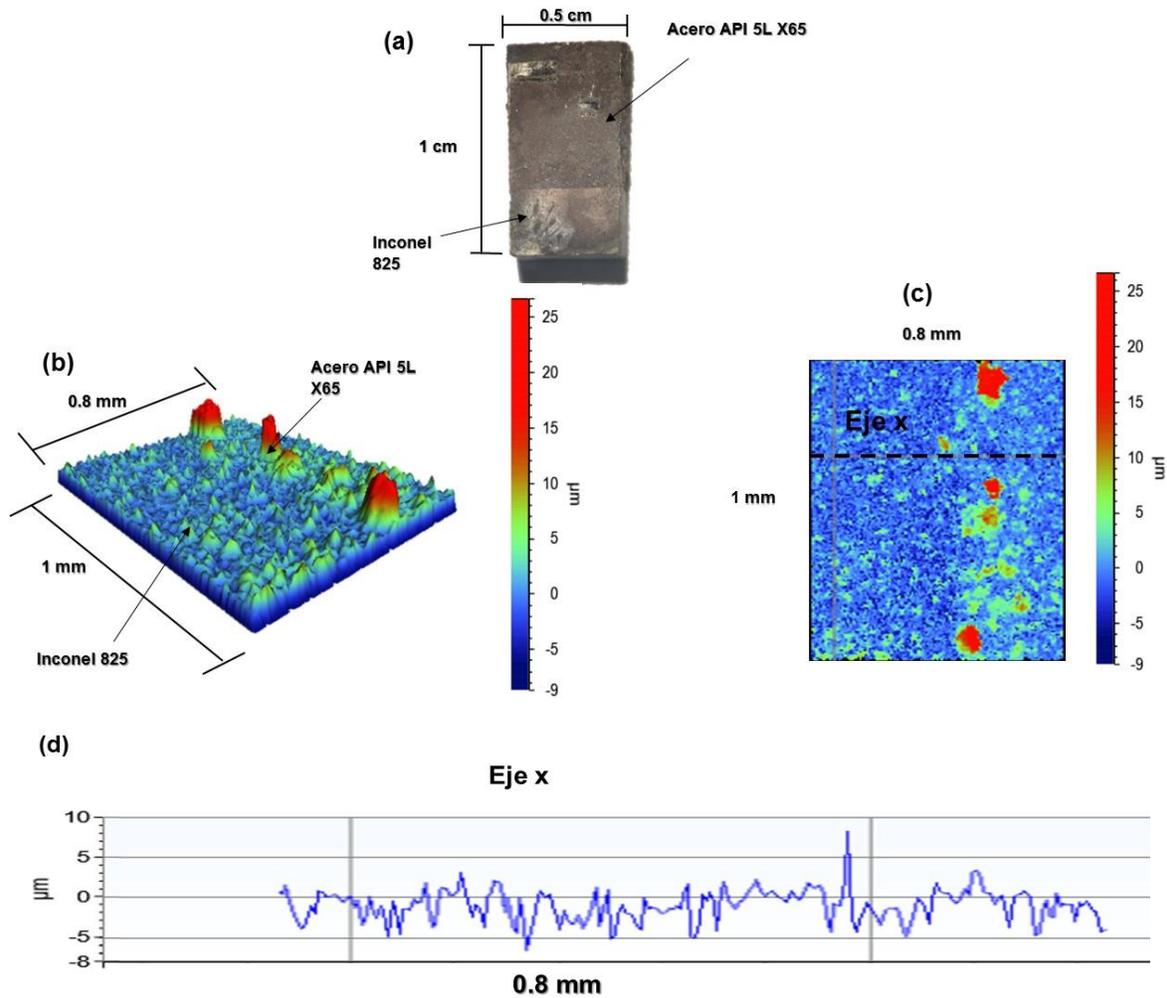


Figura 50 Caracterización por perfilometría óptica del material bimetalico superficie pulida con corrosión ángulo de 30°(a) imagen óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) Perfiles del eje X.

La Tabla 22 muestra la diferencia de rugosidades entre los dos materiales, dichos valores muestran que los valores de rugosidad son similares con una pequeña diferencia indicando más rugosidad en la superficie del acero y se aprecia en la rugosidad R_a y R_q . En la rugosidad R_p los productos anclados en el acero alcanzan hasta las 24.40 μm , pero los resultados en DRX indican que corresponden a óxidos de hierro, en el caso del inconel la máxima altura es de 23.49 μm . La rugosidad R_v indica que el inconel presenta posibles picaduras.

El bajo rendimiento de la resistencia a la corrosión se atribuye a que la salmuera no puede adherirse formando una capa densa de productos de corrosión como en el caso del acabado lija #2000, en otras palabras, la baja rugosidad no le permite anclar productos en la superficie, lo cual combinado con el ángulo del flujo de la salmuera que genera esfuerzos de corte promueven la remoción de la insipiente capa pasivadora.

Tabla 22 Rugosidades cupón pulido en posición de 30°.

Rugosidad del cupón pulido posición de 30°

Parámetro de rugosidad (μm)	Zona del material	
	Inconel 825	Acero API 5L X65
R_q (Rugosidad media cuadrática)	2.14	2.47
R_a (Rugosidad media aritmética)	1.56	1.78
R_p (Pico más alto)	23.49	24.40
R_v (Valle más profundo)	-18.25	-8.95
R_t ($R_p + R_v$)	41.75	33.35

4.7.7.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado pulido a espejo en un ángulo de 90°

En la Figura 51 se observan las imágenes usadas en el análisis de la condición de flujo de ataque 90° con superficie pulida a espejo, los valores de corrosión demostraron que en estas condiciones el material mantiene la menor velocidad de corrosión en superficies pulidas (ver Figura 33). La Figura 51a muestra la imagen óptica de la superficie del cupón, en esta no es posible observar la interface, sin embargo, se aprecian zonas con diferentes coloraciones que no se atribuyen a una capa en particular, las coloraciones de las capas observadas van de los colores gris claro a oscuro, zonas color café rojizo y zonas negras. Algunas de las zonas fueron analizadas por medio de DRX, este estudio mostro que la zona genero una proporción de cementita (Fe_3C), un producto de corrosión característico, pero su baja estabilidad frente a la atmosfera produce una oxidación de la misma lo cual genera un cambio en la coloración pasando de negro a rojo. En la imagen topográfica en la Figura 51b se observa una diferencia de alturas por la capa formada, la interface no se puede observar en esta imagen, además se aprecia que la formación de los productos es uniforme. En la Figura 51c se observa el perfil eje X (Figura 51d) del cual, la capa formada de cementita, recubre al material bimetálico con una capa sin porosidad y sin tener irregularidad superficial considerable. La formación de esta capa de cementita pasivan la superficie protegiéndola con lo que la velocidad de corrosión disminuye comparada con la condición (Pulido espejo y flujo de ataque de 30°), lo cual fue confirmado con la prueba electroquímica, atribuyendo al aumentando en porcentaje de carbono el cual se cree que la cementita resiste impactos directos de flujo y de ahí una baja velocidad de corrosión.

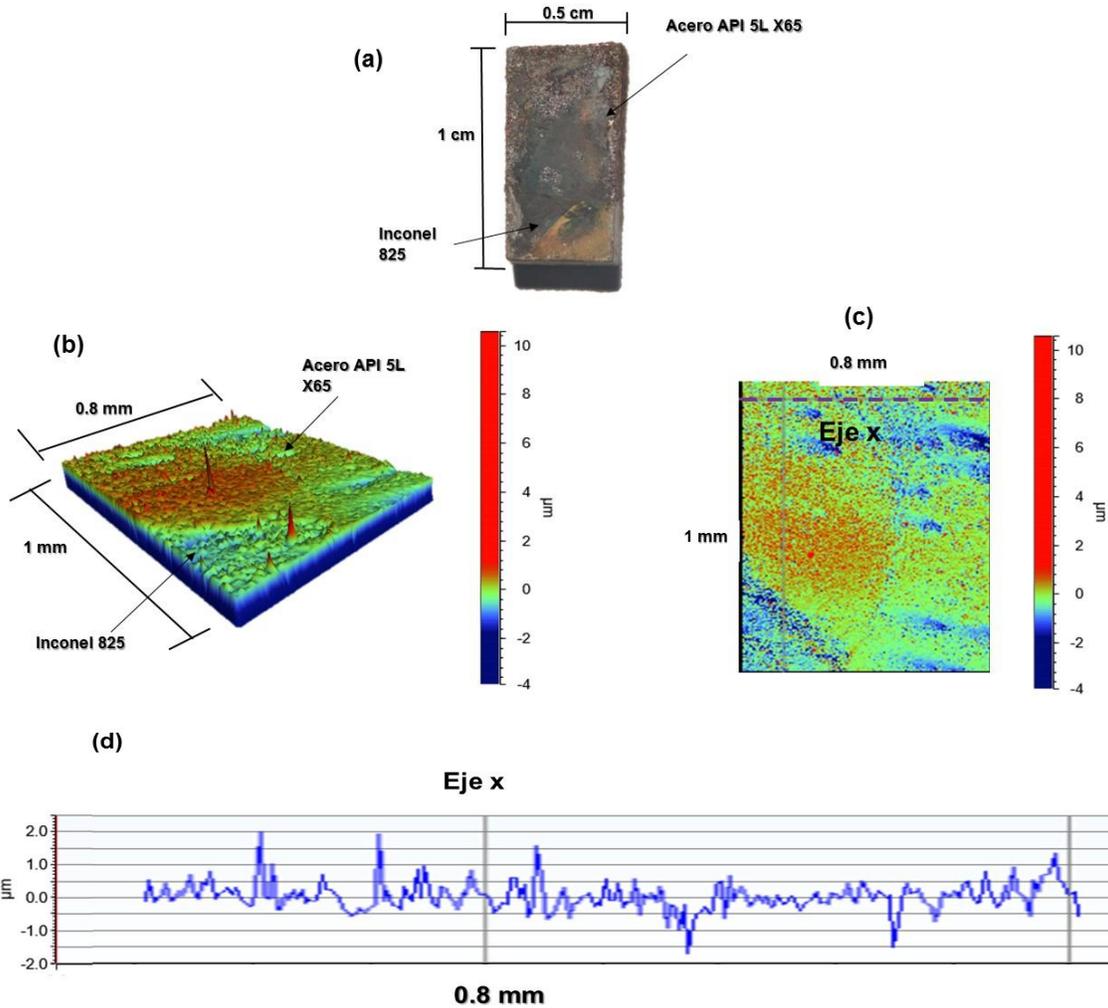


Figura 51 Caracterización por perfilometría óptica del material bimetalico pulida con corrosión ángulo de 90°(a) imagen óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) Perfiles del Eje X.

En la Tabla 23 se muestran los valores de rugosidad de ambos materiales, indicando que la rugosidad entre ambos materiales es en general pequeña comparada con otras superficies, debido a que el depósito de productos formados genera una rugosidad semiuniforme, en el caso del acero, la rugosidad es de $R_q=1.13$ y la rugosidad del inconel $R_q=0.65$ la cual resulta ser mayor en el material del acero API. Los valores de R_v indican que probablemente sobre el inconel la formación de la cementita superficial no tiene una formación similar a la generada en el acero.

Tabla 23 Rugosidades cupón pulido en posición de 90°.

Rugosidad del cupón pulido posición de 90°

Parámetro de rugosidad (μm)	Zona del material	
	Inconel 825	Acero API 5L X65
R _q (Rugosidad media cuadrática)	0.65	1.13
R _a (Rugosidad media aritmética)	0.48	0.46
R _p (Pico más alto)	10.77	33.42
R _v (Valle más profundo)	-3.52	-8.50
R _t (R _p + R _v)	14.29	41.92

4.7.8.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado a lija #2000 en un ángulo de 60°

En la Figura 52 se muestran las imágenes de la caracterización por perfilometría en acabado superficial a lija #2000 en la posición de 60°. La imagen óptica Figura 52a muestra el cupón completo donde se observa la interface de las capas, además, es posible observar que en la superficie del acero los productos de corrosión tienen una coloración oscura, adicionalmente se aprecian zonas negras que se atribuyen a la cementita y siderita las cuales fueron corroboradas en sección 4.6.2 por medio de DRX, en este material también se observan zonas blancas las cuales se atribuyen a productos de la salmuera anclados en la superficie. La Figura topográfica 52b no se observa la línea interfacial debido a que los productos de la corrosión cubren por completo ambas zonas. En la Figura 2D 52c se observa que la superficie del acero API presenta mayor porosidad (indicado con zonas de color azul) y productos con mayor altura (color rojo), el eje X del perfil de rugosidad (Figura 52d) indica que la diferencia de altura entre las dos zonas se atribuye a los productos formados en ambas superficies.

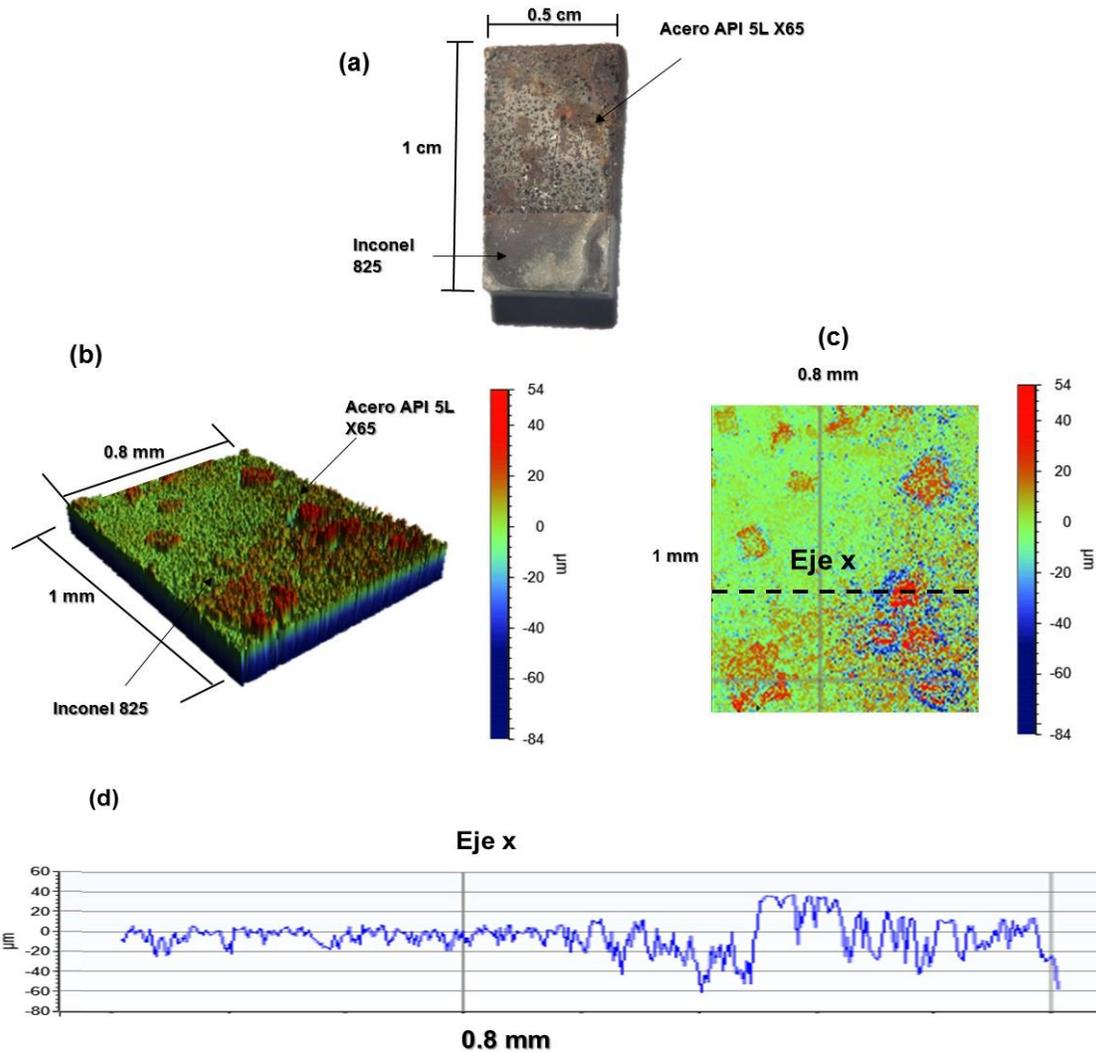


Figura 52 Caracterización por perfilometría óptica del material bimetalico a lija #2000 con corrosión ángulo de 60°(a) fotografía óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) Perfiles del Eje X.

En la Tabla 24 se muestra las rugosidades entre los dos materiales, en la cual para el acero presenta mayor rugosidad que en el inconel, esto se debe principalmente a que en acero API es menos estable frente a la atmosfera y su daño de debe a la formación de óxidos y productos de corrosión a diferencia del inconel, lo cual favorece a una mayor rugosidad, en el acero los productos de corrosión no son uniforme y por lo tanto hay zonas expuestas a la atmosfera, en el caso del inconel, este presenta menor disolución debido a su resistencia a la corrosión, sin embargo se atribuye que el bajo rendimiento del cupón se debe al acero

principalmente, el indicador es la rugosidad de valle (R_v) porque la rugosidad de R_v (Inconel) es menor que la rugosidad R_v (Acero).

Tabla 24 Rugosidades cupón lija #2000 en posición de 60°.

Rugosidad del cupón lija #2000 posición de 60°

Parámetro de rugosidad (μm)	Zona del material	
	Inconel 825	Acero API 5L X65
R_q (Rugosidad media cuadrática)	9.64	16.45
R_a (Rugosidad media aritmética)	7.27	12.44
R_p (Pico más alto)	45.86	32.78
R_v (Valle más profundo)	-61.49	-102.42
R_t ($R_p + R_v$)	107.35	135.21

4.7.9.- Caracterización superficial por perfilometría óptica para un acabado pulido a espejo en un ángulo de 60°

En la Figuras 53 se muestran los resultados del análisis del cupón con el acabado superficial pulido a espejo y ángulo de ataque 60°, la Figura 53a muestra la imagen óptica del cupón completo, de la cual se puede observar la interface entre los materiales y la coloración uniforme en cada una de las capas, en el acero un color gris fuerte y en la zona de Inconel una coloración más clara. Los resultados de DRX mostraron que el acero API se puede encontrar cementita. En el inconel se aprecian partículas blancas, las cuales probablemente sean salmuera ancladas a la superficie, a pesar de que se observa la interface, el equipo no detecta la línea entre los dos materiales. La Figura 53b 3D muestra la topografía y se aprecia que es muy similar en toda el área, y no es posible observar en esta imagen la interface, En la Figura 53c se observan la localización del eje X, del perfil de rugosidad X (Figura 53d), al observar dicho perfil, podemos observar que no existe una diferencia de alturas por productos, debido a que los productos de corrosión se formaron de manera uniforme en ambas zonas del material.

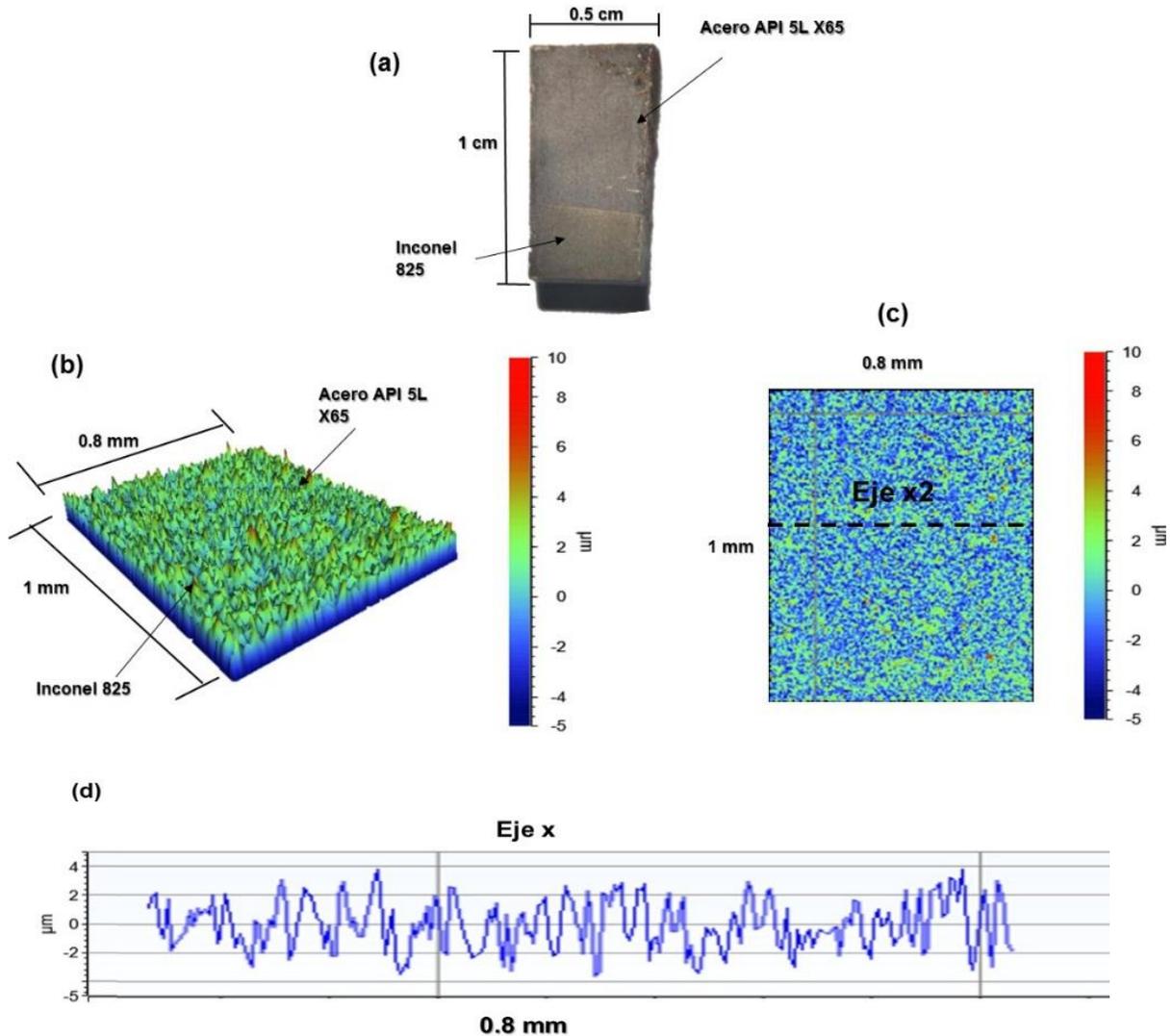


Figura 53 Caracterización por perfilometría óptica del material bimetalico pulido con corrosión ángulo de 60°(a) fotografía óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm (d) Perfiles del Eje X.

En la Tabla 25 se muestra las rugosidades entre los dos materiales, en la cual las rugosidades indican una pequeña diferencia de superficie entre materiales, esto se debe a que el recubrimiento es en general uniforme. En acero los productos pueden alcanzar mayor altura, pero se atribuye a su exposición a la atmosfera que permiten una disolución del acero, además, el inconel presenta menor disolución debido a su resistencia a la corrosión.

Tabla 25 Rugosidades cupón pulido a espejo en posición de 60°.

Rugosidad del cupón pulido posición de 60°

Parámetro de rugosidad (μm)	Zona del material	
	<i>Inconel 825</i>	<i>Acero API 5L X65</i>
R_q (Rugosidad media cuadrática)	1.86	2.88
R_a (Rugosidad media aritmética)	1.56	1.72
R_p (Pico más alto)	12.87	47.76
R_v (Valle más profundo)	-5.70	-6.40
R_t ($R_p + R_v$)	18.58	54.17

CONCLUSIONES

- De este trabajo de investigación se observa que los productos de corrosión más adherentes y protectores resultaron ser la cementita (Fe_3C) y la siderita (FeCO_3) debido a que la velocidad de corrosión disminuye de manera considerable en presencia de ambos.
- La velocidad de corrosión disminuye a medida que se incrementa la rugosidad de la superficie del material bimetálico (lija #2000), especialmente para los ángulos de 30° y 60° debido a que la película de los productos de corrosión resultaron ser más densos y uniformes. Caso contrario sucede para el ángulo de 90° , debido al impacto directo del flujo ocasionando un desprendimiento de los mismos.
- Para pulido a espejo el ángulo con una mayor velocidad de corrosión es el de 30° , debido a que presenta una baja rugosidad la cual no permite que se formen productos de corrosión densos y protectores, estos productos al no ser resistentes con los esfuerzos de corte son removidos del material bimetálico.
- La menor velocidad de corrosión para pulido a espejo fue para el ángulo de 90° , debido a que los productos de corrosión resultan ser muy adherentes y compactos sin que afecte el esfuerzo de corte.
- De los resultados obtenidos mediante perfilometría óptica se corrobora que a mayor rugosidad del material bimetálico la velocidad de corrosión disminuye especialmente para los ángulos de 30° y 60° debido a la formación de valles y crestas que se forman sobre la superficie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] T. Banweg, "Flow accelerated corrosion in industrial boiler feed water systems: A technological survey," *Canada: pulp and paper*, 2000.
- [2] N. Srdjan, "Using computational fluid dynamics in combating erosion-corrosion," *Chem Eng*, 2006.
- [3] V. Kain, «Flow Accelerated Corrosion: Forms, Mechanisms and Case Studies,» *Procedia Engineering*, vol. 86, pp. 576-588, 2014.
- [4] W. H. Ahmed, «Evaluation of the proximity effect on flow-accelerated corrosion,» *Annals of Nuclear Energy*, vol. 37, n° 4, pp. 598-605, 2010.
- [5] S. Hatami, A. Ghaderi-Ardakani, M. Niknejad-Khomami, . F. Karimi-Malekabadi, M. Rasaei and A. H. Mohammadi, "On the prediction of CO₂ corrosion in petroleum industry," *The Journal of Supercritical Fluids*, vol. 117, p. 4, 2016.
- [6] L. Morfeo, E. Maria da Costa, J. J. d. O. Andrade, R. Hubler and B. Huet, "Effect of calcium carbonate on low carbon steel corrosion behavior in saline CO₂ high pressure environments," *Applied Surface Science*, vol. 359, pp. 143-152, 2015.
- [7] M. H. Sk and A. M. Abdullah, "Corrosion of general oil-field grade steel in CO₂ environment- an update in the light of current understanding," *International Journal Electrochemical Science*, vol. 12, p. 14, 2017.
- [8] B. A. Nor Asma, P. A. Yuli and C. I. Mokhtar, "Study on the Effect of Surface Finish on Corrosion of Carbon Steel in CO₂ Environment," *Journal of Applied Sciences*, p. 11, 2011.
- [9] A. S. Toloei, V. Stoilov and D. Northwood, "The Relationship Between Surface Roughness and Corrosion," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, p. 10, 2013.
- [10] D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, Vols. Edition 2, illustrated, revised, The University of Michigan, 1996.
- [11] M. McGuire, ASM international, Stainless Steels for Design Engineers, Ohio, 2008.
- [12] Edited by Lietai Yang, Techniques for corrosion monitoring, Boca Raton Boston New York Washington, DC, 2008.
- [13] ASM Handbook 5 Surface Engineering, ASM International, 1994.

-
- [14] P. L. Mangonon, *Ciencia de materiales seleccion y diseño*, Melbourne, Florida: Pearson Education, 2001.
- [15] L. L. Shreir, R. A. Jarman and G. T. Burstein, "Corrosion," Butterworth-Heinemann, 1994, p. 3184.
- [16] R. Winston Revie, "Uhlrig's corrosion handbook, Third edition," New Jersey , WILEY, 2011, p. 1253.
- [17] B. Poulson, "Predicting and Preventing Flow Accelerated Corrosion in Nuclear Power Plant," *International Journal of Nuclear Energy*, p. 23, 2014.
- [18] J. M. Pietralik, "The Role of Flow in Flow-Accelerated Corrosion under Nuclear Power Plant," *E-Journal of Advanced Maintenance*, vol. 4, no. 2, pp. 63-78, 2012.
- [19] L. R. Moretto Ferreira, H. Araujo Ponte and L. Schmidlin Sanches, "CO2 Corrosion in the Region Between the Static and Turbulent Flow Regimes," *Materials Research*, vol. 18, no. 2, pp. 245-249, 2015.
- [20] T. Kuroki and T. Yoshida, "Method for producing a clad steel pipe," United States Patent, Japan, 1989.
- [21] M. Sakuraba, M. Taguchi and Y. Saitoh, "Clad Steel Pipe," United States Patent, Tokyo, May 29, 2001.
- [22] T. Yoshida, «Method of producing clad steel materials,» United States Patent, Japan, 1982.
- [23] Z. Dhib, N. Guerhazi, M. Gasperini and N. Haddar, "Cladding of low-carbon steel to austenitic stainless steel by hot-roll," in *Materials Science & Engineering*, France, Elsevier, 2015, pp. 130-141.
- [24] A. Miyasaka and H. Ogawa, "Method of producing clad metals," United States Patent, Tokyo, 1990.
- [25] Edited by J.R. Davis, *Stainless Steel ASM Specialty Handbook*, ASM international, 1994.
- [26] J. J. Meyer , "Method of joining clad material," United States Patent Office, Missouri, 1969.
- [27] O. W. Siebert, «Clad Metal Joint Closure,» United States Patent, Manchester, 1984.
- [28] W. A. Petersen and R. M. Jones, "Clad Metal Tubes," United States Patent, New York, 1977.
- [29] M. Mikarai, «Method For Producing Clad Steel,» United States Patent, Tokyo, 1979.
- [30] J. B. Ulam, "Manufacture Of Stainless Clad Steel," United States Patent Office, Pensilvania, 1968.

-
- [31] J. O. Bockris, A. K. Reddy and M. Gamboa-Aldeco, *Modern Electrochemistry 2A*, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2002.
- [32] O. Medina Custodio, A. Ortiz Prado, V. H. Jacobo Armendariz y R. Schouwenaars, «Corrosión microbiológica en aceros de bajo carbono,» vol. 10, nº 1, pp. 9-19, 2009.
- [33] J. A. Calderon, O. R. Mattos y O. Esteveres Barcia, «Análisis de la evolución del potencial,» *Revista Facultad de Ingeniería*, nº 38, pp. 20-30, 2006.
- [34] J. Uruchurtu y J. L. Ramirez Reyez, «Métodos Experimentales en la Ciencia de la Corrosión Impedancia,» 2015.
- [35] S. Báez P., J. L. Tristancho R., D. Y. Peña B., C. Vázquez Q. y H. A. Anaya P., «La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) aplicada al estudio del mecanismo de la corrosión caliente por sales fundidas,» de *Dyna*, Medellín Colombia, Noviembre 2004, pp. 39-47.
- [36] ASM Handbook 10 Materials Characterization, ASM International, 1992.
- [37] ASM Handbook 11 Failure analysis and prevention, ASM International, 1992.
- [38] G. Molesini, G. Pedrini, P. Poggi and F. Quercioli, "Focus-Wavelength Encoded Optical Profilometer," *Optics Communications*, vol. 49, no. 4, 1984.
- [39] Mitutoyo, «Rugosidad superficial,» Taylor Hobson, Manual del Rugosímetro Surtronic 3 Plus, Abril, 2010.
- [40] E. S. Gadelmawla, M. M. Koura, T. A. Maksoud, I. M. Elewa and H. H. Soliman, "Roughness parameters," in *Materials processing technology*, Egypt, Elsevier, 2002, pp. 133-145.
- [41] J. Upkai, R. Barker, X. Hu and A. Neville, "An in-situ investigation of CO₂ flow-induced corrosion and erosion-corrosion of UNS K03014 pipeline materials using combined acoustic emission and LPR methods," *NACE - International Corrosion Conference Series*, p. 18, 2013.
- [42] H. L. Liu, G. P. Zhang and Y. P. Huang, "Investigation on wear resistance and corrosion resistance of electron beam cladding co-alloy coating on Inconel 617," *Materials Research Express*, p. 10, 2018.
- [43] I. Toor, H. Irshad, H. Badr and M. Samad, "The Effect of Impingement Velocity and Angle Variation on the Erosion Corrosion Performance of API 5L-X65 Carbon Steel in a Flow Loop," *Metals*, p. 15, 2018.
- [44] NACE corrosion engineer's reference book, third edition, vol. Third Edition, Houston, TX: National Association of Corrosion Engineers., 1991.
- [45] S. Uchida, M. Naitoh, H. Okada and Y. Uehara, "Evaluation of flow accelerated corrosion by coupled analysis of corrosion and flow dynamics. Relationship of oxide film thickness,

hematite/magnetite ratio,ECP and wall thinning rate,” *Nuclear Engineering and Design*, p. 9, 2011.

- [46] H. Okada, S. Uchida, M. Naitoh, J. Xiong and S. Koshizuka, “Evaluation Methods for Corrosion Damage of Components in Cooling Systems of Nuclear Power Plants by Coupling Analysis of Corrosion and Flow Dynamics (V) Flow-Accelerated Corrosion under Single- and Two-phase Flow Conditions,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, pp. 37-41, 2014.
- [47] K. C. G. Candioto, F. R. Caliri, D. A. Pereira Reis and C. A. Augusto, “Characterization of the Superalloy Inconel 718 After Double Aging Heat Treatment,” pp. 293-300, 2015.

APÉNDICE A

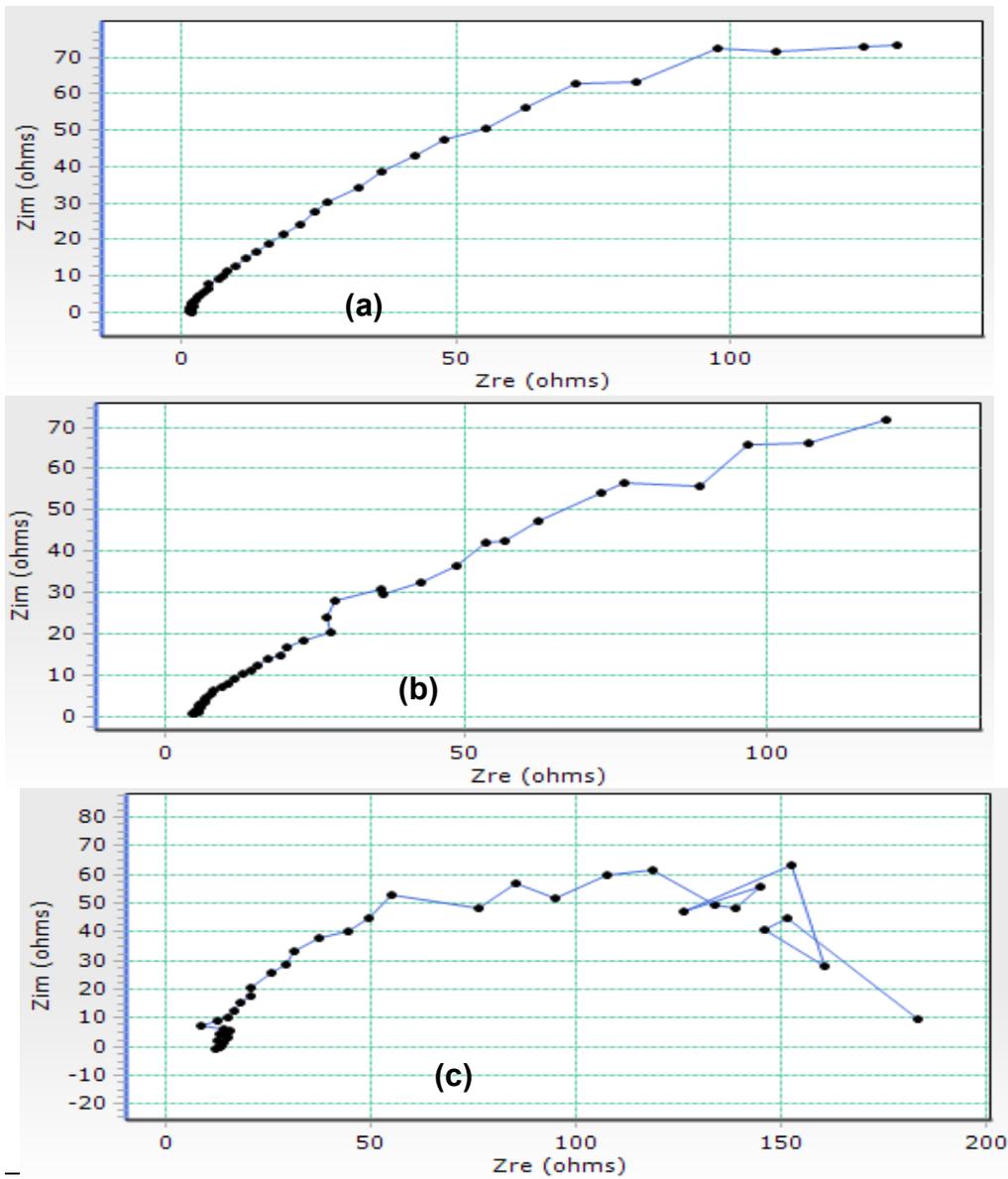


Figura 54 Espectros de Nyquist de espectroscopia de impedancia electroquímica correspondientes a lija #2000 (a) para ángulos de 30° (b) ángulo de 60° y (c) ángulo de 90° .

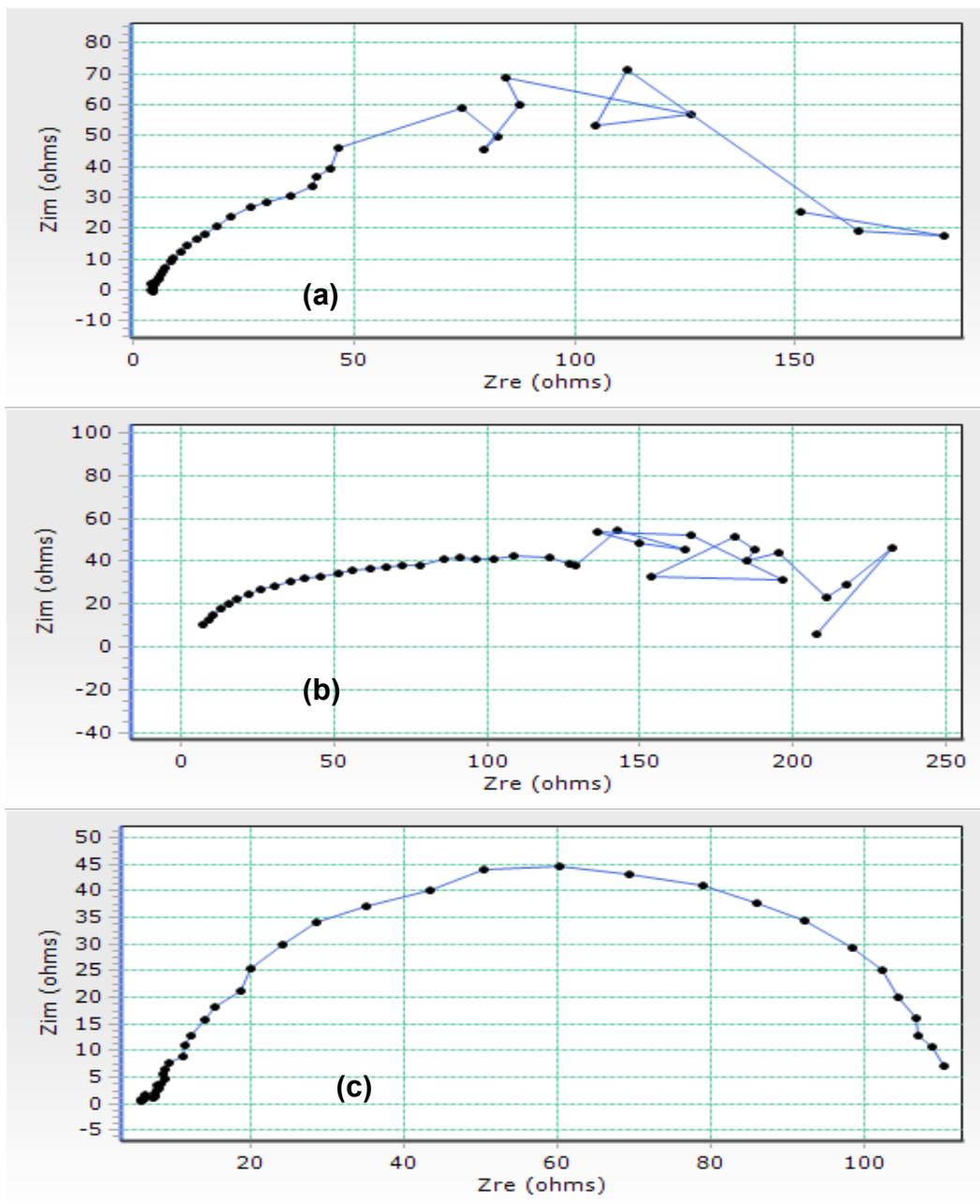


Figura 55 Espectros de Nyquist de espectroscopia de impedancia electroquímica correspondientes a pulido a espejo (a) para ángulos de 30° (b) ángulo de 60° y (c) ángulo de 90°.

Calculo de valor de Reynolds obtenido para el modelo:

$$Reynolds = \frac{DiV\rho}{\mu}$$

$$D = 0.8 \text{ cm} = 0.0088\text{m}$$

$$V = 18 \frac{L}{min} = 2.36 \frac{m}{s}$$

$$\rho = 1200 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu = 0.0016 \frac{kg}{m * s}$$

$$R = \frac{(0.0088m)(2.36 \frac{m}{s})(1200 \frac{kg}{m^3})}{0.0016 \frac{kg}{m * s}} = \mathbf{15576 - Flujo turbulento}$$