



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CENTRO UNIVERSITARIO UAEM VALLE DE MÉXICO

***“EXTRACTOS LÍQUIDOS NATURALES DE MORINDA
CITRIFOLIA
Y ALOE-VERA COMO POSIBLES INHIBIDORES DE LA
CORROSIÓN EN ACEROS INDUSTRIALES”***

TESIS

Que para obtener el Título de

INGENIERO INDUSTRIAL

Presenta

C. ERICK MONROY BARRETO

Asesor: Dr. Héctor Herrera Hernández
(Centro Universitario UAEM Valle de México)



Atizapán de Zaragoza, Edo. de México, Octubre 2016

RESUMEN

Es bien sabido, que los materiales metálicos puestos en servicio se degradan por el mecanismo de corrosión electroquímica debido a su entorno, esto es uno de los problemas fundamentales que en el sector industrial viene sufriendo en el último siglo. La corrosión puede causar desde pérdidas de vida hasta económicas, además de fallas en plantas de energía, desastres en puentes, el colapso de edificios, deterioro de embarcaciones, derrames en tuberías, daños mecánicos, alteración de las propiedades de la superficie, y otros daños severos en infraestructura, además de estos daños, la corrosión puede causar un impacto irreversible al medio ambiente como contaminación y calentamiento global.

Con el fin de minimizar los daños causados por corrosión, se han desarrollado diferentes métodos, normas, procedimientos y/o tratamientos, entre los que se encuentran el uso de inhibidores de corrosión (IC), donde existe una clasificación de inhibidores entre los que se destacan los inhibidores del tipo orgánico que constituyen un apilamiento de moléculas para formar multicapas entre el material metálico y el medio corrosivo.

Por lo tanto, en este trabajo de investigación se evalúa la eficiencia de inhibición (EI) de dos extractos líquidos naturales biodegradables en una solución acuosa de ácido clorhídrico (HCl) 1 Molar, además de considerarse como una nueva alternativa capaz de inhibir el deterioro químico de los materiales metálicos y de esta manera minimizar los problemas actuales de corrosión.

Los inhibidores líquidos estudiados son extractos provenientes de la hoja de *Morinda Citrifolia* (extracto etanólico) y del GEL (extracto acuoso) de las hojas de *Aloe-Vera* conocida como sábila. Estos extractos-líquidos naturales se añaden al medio ácido (HCl-1M) en diferentes proporciones en volumen, su desempeño como inhibidor de la corrosión es monitoreado y evaluados por técnicas electroquímicas como la polarización de TAFEL (E_{corr} vs. I) y espectroscópica de impedancia electroquímica (EIS por sus siglas en inglés, Z_{real} vs. Z_{imag}). A partir de los parámetros de impedancia, análisis de los datos EIS por correlación con un circuito eléctrico equivalente EEC, los parámetros de Tafel y empleando isothermas de adsorción (análisis termodinámico) se determinó la eficiencia de inhibición y se clasificó el tipo de inhibidor como mixto.

Adicionalmente, se obtuvieron imágenes por Microscopia Óptica antes y después de haber sometidos los aceros industriales al contacto con el medio corrosivo con y sin extractos de las hojas de *Morinda Citrifolia* y *Aloe-Vera*. Por otro lado, se obtuvieron datos como el ángulo de contacto, la viscosidad y la tensión superficial de las moléculas orgánicas naturales con la finalidad de determinar la mojabilidad y el mecanismo de adsorción de las moléculas orgánicas (extractos líquidos naturales) con la superficie de los aceros industriales expuestos al medio corrosivo.

De acuerdo a los resultados de impedancia los aceros industriales (AISI 1045, 4140 y 8620) estudiados presentaron picaduras en cuestión de horas después de su exposición en 1M HCl. En tanto, que el uso del GEL de *Aloe-Vera* (Sábila) resultó ser un inhibidor de la corrosión con eficiencias de inhibición, EI ~75% desde 10ml para el acero 1045, para el acero 4140 EI~70% a partir de 16 ml y para el acero 8620 EI~30% a partir de 2ml. Mientras tanto el extracto etanólico de *Morinda Citrifolia* resultó ser un excelente inhibidor capaz de minimizar el proceso de corrosión por picaduras desde los 4 o 6 ml de su concentración en volumen (acero 1045, EI~ 93.1%, acero EI~4140 y 8620 EI ~92.9%). Esta diferencia en la eficiencia de inhibición se relaciona al ángulo de contacto y a la tensión superficial de la gota de *Morinda Citrifolia* o *Aloe-Vera*, en el que se observó un ángulo de contacto mayor y mejor adsorción para el extracto de *Morinda Citrifolia*.

ABSTRACT

It is well known that metallic materials could be corroded during their service due to their exposed environment, which is considered as one of the main problems in the manufacture industry that has been occurred in the last century. Corrosion can cause from loss of human lives until spill of economic, in addition to failure in electrical power plants, serious disasters on bridges, collapsing concrete buildings, immediate deterioration of ships, leaking pipelines, mechanical damage failure, surface alteration properties, another sever damages in infrastructure, in addition to this damage, corrosion also causes irreversible impact on the environment as air or soil pollution and global warming.

In order to reduce the damage caused by corrosion mechanism, different kind of methods, procedures and/or treatments have been developed, among which the use of corrosion inhibitors (IC), where a classification as organic inhibitor has been existed, this creates a stack of molecules to form multi-layer between the metal material and the corrosive media.

Therefore, in this research the efficiency of inhibition (EI) of two biodegradable natural liquid-extracts is evaluated in an aqueous solution of hydrochloric acid (HCl) 1 Molar, also IC molecules are considered as a new alternative capable of inhibiting the chemical deterioration of any metallic material and consequently minimize the corrosion problems above describe.

The liquid inhibitors studied here were; extracts from *Morinda Citrifolia* leaves (ethanol extracted) and GEL (aqueous extracted) leaves of *Aloe-Vera*, commonly known as Sabila. These liquid-extracts were added at different volume ratios to acid (HCl-1M) media. Their performance as corrosion inhibitor is then monitored and evaluated by electrochemical techniques as polarization TAFEL (Ecorr vs. I) and spectroscopy Impedance electrochemical (EIS, Zreal vs. Zimag). From EIS parameters, the EIS data were analyzed by a correlation with an appropriate equivalent electric circuit (EEC) and the TAFEL data were used to determined EI%, whereas the thermodynamic analysis by using the adsorption isotherms the type of inhibitor was classified as mixed.

Additionally, Optical Microscopy images were obtained before and after undergoing industrial steels in contact with the corrosive solution without extracts from the leaves of *Morinda Citrifolia* and *Aloe-Vera* that serve as inhibitors. On the other hand, properties such as contact angle, viscosity and surface tension of the natural organic molecules were obtained in order to determine the wettability and the mechanism of adsorption of organic molecules (natural liquid extracts) with the surface of the steels exposed to corrosive environment.

According to the EIS results of industrial steels (AISI 1045, 4140 and 8620) studied here, they had pitting corrosion after hours exposure in HCl-1M. Meanwhile, the use of GEL extracted from *Aloe-Vera* (Aloe) demonstrated to be corrosion inhibitor efficiencies, EI~ 75% at 10 ml to 1045 steel, 4140 steel EI~ 70% at 16 ml and 8620 for steel EI~ 30% from 2ml. Meanwhile the ethanol extract of *Morinda Citrifolia* proved to be an excellent inhibitor capable to minimize the pitting corrosion process from 4 or 6 mL of its volume concentration (steel 1045, EI> 93.1%, steel 4140 and 8620 EI> 92.9%). This difference in inhibition efficiency relates to the contact angle and the surface tension of the drop of *Morinda Citrifolia* or *Aloe-Vera*, in which the contact angle results greater and better adsorption to extracted of *Morinda Citrifolia*.

Contenido

I. INTRODUCCIÓN.....	I
II. JUSTIFICACIÓN.....	IV
III. OBJETIVO GENERAL.....	V
IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	V
V. HIPÓTESIS.....	VI
Capítulo I. Marco Teórico	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Definición de Corrosión.....	4
1.3 Clasificación de los mecanismos de corrosión.....	5
1.3.1 Naturaleza del agente corrosivo	5
1.3.2 Mecanismo de corrosión	5
1.3.3 Apariencia del metal corroído	6
1.4 Termodinámica de la corrosión.....	10
1.4.1 Análisis termodinámico, proceso de adsorción.....	11
1.4.2 Potencial electroquímico y potencial de electrodo.....	13
1.4.3 Ecuación de Nernst.....	13
1.5 Cinética de la Corrosión.....	14
1.5.1 Leyes de Faraday	14
1.6 Técnicas Electroquímicas.....	15
1.6.1 Polarización Potenciodinámica	15
1.6.2 Curvas de Polarización Potenciodinámica	16
1.6.3 Resistencia a la Polarización Lineal.....	17
1.6.4 Ley de TAFEL	18
1.6.5 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica	19
1.7 Celdas Electroquímicas	21
1.8 Constituyentes de los aceros.....	22
1.8.1 Nomenclatura de los aceros	25
1.9 Determinación de la Mojabilidad, Tensión Superficial y Viscosidad	27
1.10 Métodos para el control de la corrosión.....	30
1.11 Inhibidores de Corrosión.....	31
1.11.1 Clasificación de los Inhibidores de Corrosión	32
1.11.2 <i>Aloe-Vera</i> y <i>Morinda Citrifolia</i> como Inhibidores de Corrosión	33

1.11.3	Métodos de estudio de los Inhibidores.....	35
Capítulo II.	Metodología	37
2.1	Equipos y Materiales	38
2.2	Medios Acuosos para pruebas de Corrosión.....	38
2.3	Metalografía	39
2.3.1	Preparación de las probetas de acero (Desbaste y Pulido)	39
2.3.2	Revelado microestructural de los aceros (ataque químico).....	40
2.4	Proceso de manufactura de celdas electroquímicas.....	41
2.5	Extracción de los agentes líquidos naturales (inhibidores).....	44
2.5.1	Aloe-Vera (Sábila)	44
2.5.2	Morinda Citrifolia (NONI)	45
2.6	Evaluación de la eficiencia de Inhibición (EI) de los extractos-líquidos por Espectroscopia de Impedancia Electroquímica y Polarización Potenciodinámica. .	47
2.6.1	Evaluación Electroquímica.....	48
2.7	Tensión Superficial	52
Capítulo III.	Análisis y Discusión de Resultados	52
3.1	Análisis metalográfico de los aceros industriales.....	54
3.1.1	Acero AISI-1045	54
3.1.2	Acero AISI-4140	55
3.1.3	Acero AISI-8620	56
3.2	Evaluación Electroquímica	57
3.2.1	Corrosión de aceros industriales inmersos en HCl 1M.....	57
3.2.2	Extracto líquido de Aloe-Vera (Sábila) como inhibidor biodegradable de la corrosión en aceros industriales.....	63
3.2.3	Morinda Citrifolia como inhibidor de la corrosión en Aceros industriales.....	69
3.3	Termodinámica de los inhibidores.	76
3.4	Tensión superficial.....	78
3.4.1	Tensión Superficial del extracto líquido o GEL de Aloe-Vera.....	78
3.4.2	Tensión Superficial del extracto líquido de <i>Morinda Citrifolia</i>	79
3.5	Pruebas de Angulo de contacto.....	80
3.5.1	Aloe-Vera.....	80
3.5.2	Aloe-Vera + HCl 1M	80
3.5.3	Morinda Citrifolia	81
3.5.4	Morinda Citrifolia + HCl 1M	82

4	Conclusiones	85
5	Glosario	88
6	Anexos	90
7.	Bibliografía	99

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. COSTOS ANUALES POR CORROSIÓN Y PREVENCIÓN EN U.S.A. EN EL AÑO DE 1998 (REVIE & UHLIG, 2008)	2
FIGURA 2. COSTOS ANUALES POR CORROSIÓN Y PREVENCIÓN CON RESPECTO AL 3.5% DEL PIB PARA EL AÑO 2011 EN PAÍSES INDUSTRIALIZADOS Y EN VÍAS DE DESARROLLO. (G.H. KOCH ET AL, 2002)	3
FIGURA 3. CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE CORROSIÓN	6
FIGURA 4. CORROSIÓN LOCALIZADA O POR PICADURAS	7
FIGURA 5. CORROSIÓN POR AGRIETAMIENTO BAJO ESFUERZOS	7
FIGURA 6. CORROSIÓN POR PICADURAS	8
FIGURA 7. CORROSIÓN POR EXFOLIACIÓN	9
FIGURA 8. CORROSIÓN GALVÁNICA	9
FIGURA 9. CORROSIÓN INTERGRANULAR	10
FIGURA 10. CLASIFICACIÓN DE LA ADSORCIÓN	12
FIGURA 11. ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE LANGMUIR	12
FIGURA 12. CURVA DE POLARIZACIÓN POTENCIO DINÁMICA	17
FIGURA 13. RECTAS DE TAFEL	19
FIGURA 14. DIAGRAMA DE NYQUIST COMPONENTES REAL Z' E IMAGINARIO Z'' DE LA IMPEDANCIA TOTAL PARA UN CIRCUITO EN PARALELO RESISTENCIA (R) CAPACITANCIA (C) QUE CONSIDERA A LA SOLUCIÓN (RS) A DIFERENTES FRECUENCIAS	20
FIGURA 15. CELDA ELECTROQUÍMICA DONDE SE APRECIA UN CÁTODO, UN ÁNODO Y EL PUENTE SALIDO, ESTE ÚLTIMO SE INCORPORA A LA CELDA PARA ASEGURAR EL EQUILIBRIO IÓNICO EN EL SISTEMA	21
FIGURA 16. MICROESTRUCTURA FERRÍTICA	22
FIGURA 17. MICROESTRUCTURA DONDE LA FASE OSCURA ES CEMENTITA Y LA FASE BLANCA LA PERLITA	23
FIGURA 18. MICROESTRUCTURA DE PERLITA GRUESA	23
FIGURA 19. MORFOLOGÍA DE AUSTENITA EN UN ACERO	24
FIGURA 20. MORFOLOGÍA MARTENSÍTICA DE UN ACERO	24
FIGURA 21. DIAGRAMA DE HIERRO-CARBONO	25
FIGURA 22. ESQUEMA GENERAL CLASIFICACIÓN DE ACEROS	26
FIGURA 23. (A) PERFILES ADIMENSIONALES DE GOTAS CON FORMA ESFÉRICA: LOS CASOS SON $\theta=170^\circ$, 140° , 90° Y 45° QUE CORRESPONDEN A A), B), C) Y D)	29

FIGURA 24. TENSÍOMETRO DE BALANZA DCAT	30
FIGURA 25. CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS PARA EL CONTROL Y PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN (FRANCO, 2014)	31
FIGURA 26. ADSORCIÓN DE IC ORGÁNICO SOBRE UNA SUPERFICIE METÁLICA.....	33
FIGURA 27. (A) PLANTA DE ALOE-VERA, (B) GEL DE ALOE-VERA, (SÁBILA)	34
FIGURA 28. (A) PLANTA DE MORINDA CITRIFOLIA Y (B) FRUTO NONI.....	35
FIGURA 29. PULIDORA DE MANO LE CUBE MARCA PRESI Y PROBETAS DE ACERO ANTES Y DESPUÉS DE PREPARAR LA SUPERFICIE.....	39
FIGURA 30. REACTIVOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE ATAQUE QUÍMICO DE LOS ACEROS INDUSTRIALES A) REACTIVO NITAL AL 2%, B) ALCOHOL ETÍLICO Y C) AGUA DESTILADA	40
FIGURA 31. PROCESO DE EXPOSICIÓN A LA SUSTANCIA NÍTAL 2% DE LOS ACEROS INDUSTRIALES	40
FIGURA 32. ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA DE LOS ACEROS INDUSTRIALES.....	41
FIGURA 33. PROTOTIPO DE CELDAS ELECTROQUÍMICAS ESTÁNDARES PARA TRES ELECTRODOS REALIZADO EN AUTOCAD	42
FIGURA 34. (A) BARRENADO DE ACRÍLICOS (B) CORTADO DE TUBO DE ACRÍLICO PARA CUERPOS DE CELDA ELECTROQUÍMICA.....	43
FIGURA 35 PROCESO DE ENSAMBLE DE UNA CELDA ELECTROQUÍMICA	43
FIGURA 36. LAVADO DE LAS HOJAS DE ALOE-VERA	44
FIGURA 37. (A) GEL DE ALOE-VERA (B) CORTES LATERALES DE LAS HOJAS DE ALOE-VERA	44
FIGURA 38. (A) CORTE LATERAL DE LA HOJA. (B) SEPARACIÓN DE LOS LADOS SUPERIOR E INFERIOR DE LA HOJA. (C) OBTENCIÓN DEL EXTRACTO DE ALOE-VERA	45
FIGURA 39. HOJA DE MORINDA CITRIFOLIA.....	46
FIGURA 40. MOLIENDA DE LAS HOJAS DE MORINDA CITRIFOLIA.....	46
FIGURA 41. MEZCLA HOMOGÉNEA DE MORINDA CITRIFOLIA Y ETANOL CONCENTRADO AL 98%	46
FIGURA 42. EQUIPO DE MEDICIÓN ELECTROQUÍMICA (POTENCIOSTATO) VERSASTAT-4	47
FIGURA 43(A) ARREGLO ESTÁNDAR DE LA CELDA ELECTROQUÍMICA; RE ELECTRODO DE REFERENCIA (CONECTOR BLANCO) CE ELECTRODO AUXILIAR (CONECTOR ROJO) Y ELECTRODO DE TRABAJO MUESTRA METÁLICA WE (CONECTOR AZUL). (B) CELDA ELECTROQUÍMICA CONECTADA AL POTENCIOSTATO VERSASTAT-4	49
FIGURA 44. CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE UTILIZADO PARA LOS AJUSTES DE DATOS DE IMPEDANCIA EN EL EQUIPO VERSASTAT-4.....	50
FIGURA 45. PRUEBA DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO VERSASTAT-4.....	50
FIGURA 46. CIRCUITOS ELÉCTRICOS EQUIVALENTES UTILIZADOS PARA EL AJUSTE DE DATOS DE IMPEDANCIA .	51

FIGURA 47(A) TENSÍOMETRO DE BALANZA DCAT CON PRUEBA EN PROCESO. (B) CÁMARA DIGITAL MICROSCOPE 800X.....	52
FIGURA 48. MICROESTRUCTURA DEL ACERO GRADO ESTRUCTURAL AISI-1045 (PERLITA Y CEMENTITA PROEUTECTOIDE), A) SIN ATAQUE QUÍMICO, (B) ATAQUE A 3 SEGUNDOS Y (C) ATAQUE A 3 SEGUNDOS.....	54
FIGURA 49. MICROESTRUCTURA DEL ACERO GRADO HERRAMIENTA AISI-4140 (PERLITA + FERRITA PROEUTECTOIDE), A) SIN ATAQUE QUÍMICO, (B) ATAQUE A 1 SEGUNDO Y (C) ATAQUE A 2 SEGUNDOS	55
FIGURA 50. MICROESTRUCTURA DEL ACERO GRADO MAQUINARIA AISI-8620, A) SIN ATAQUE QUÍMICO, B) ATAQUE A 3 SEGUNDOS ((PERLITA Y CEMENTITA PROEUTECTOIDE) Y (C) ATAQUE A 4 SEGUNDOS (MARTENSITA Y AUSTENITA RETENIDA).....	56
FIGURA 51. DIAGRAMAS DE NYQUIST DEL ACERO AISI-1045 INMERSO EN HCL 1M A DIFERENTE CONCENTRACIÓN, SIN INHIBIDOR.	57
FIGURA 52. DIAGRAMAS DE NYQUIST DEL ACERO AISI-4140 INMERSO EN HCL 1M DIFERENTE CONCENTRACIÓN, SIN INHIBIDOR.	57
FIGURA 53. DIAGRAMAS DE NYQUIST DEL ACERO AISI-8620 INMERSO EN HCL 1M A DIFERENTE CONCENTRACIÓN, SIN INHIBIDOR	58
FIGURA 54. CORROSIÓN POR PICADURAS EN LOS ACEROS AISI-1045(A), AISI-4140(B), AISI-8620(C) A 50X DESPUÉS DE LAS PRUEBAS DE CORROSIÓN EN HCL-1M.....	58
FIGURA 55. DIAGRAMA DE TAFEL DEL ACERO 1045 INMERSO EN HCL-1M A DIFERENTE CONCENTRACIÓN, SIN INHIBIDOR.	60
FIGURA 56. DIAGRAMA DE TAFEL DEL ACERO 4140 INMERSO EN HCL-1M A DIFERENTE CONCENTRACIÓN, SIN INHIBIDOR	60
FIGURA 57. DIAGRAMA DE TAFEL DEL ACERO 8620 INMERSO EN HCL-1M A DIFERENTE CONCENTRACIÓN, SIN INHIBIDOR	61
FIGURA 58. COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIA TOTAL DE CORROSIÓN EN ACEROS AISI, INMERSOS EN HCL-1M.	62
FIGURA 59. DIAGRAMA DE NYQUIST PARA ACERO AISI-1045 INMERSO EN 1M DE HCL, EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO ALOE-VERA.	63
FIGURA 60. DIAGRAMA DE NYQUIST DE UN ACERO AISI-4140 INMERSO EN 1M DE, EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO ALOE-VERA.....	64
FIGURA 61. DIAGRAMA DE NYQUIST DE UN ACERO AISI-8620 INMERSO EN 1M DE HCL, EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO ALOE-VERA.	64
FIGURA 62. MICROGRAFÍAS DE LOS ACEROS AISI-1045(A), AISI-4140(B), AISI-8620(C) DESPUÉS DE LAS PRUEBAS DE CORROSIÓN EN 1M DE HCL, EN FUNCIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO ALOE-VERA.....	65

FIGURA 63. DIAGRAMAS DE TAFEL DE UN ACERO AISI-1045 INMERSO EN 1M DE HCL EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO ALOE-VERA	66
FIGURA 64. DIAGRAMAS DE TAFEL DE UN ACERO AISI-4140 INMERSO EN 1M DE HCL EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO ALOE-VERA.	67
FIGURA 65 DIAGRAMAS DE TAFEL DE UN ACERO AISI-8620 INMERSO EN 1M DE HCL EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO ALOE-VERA.	67
FIGURA 66. COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIA TOTAL DE CORROSIÓN EN ACEROS AISI, INMERSO EN 1M DE HCL EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO DE ALOE-VERA	69
FIGURA 67. DIAGRAMA DE NYQUIST DE UN ACERO AISI-1045 INMERSO EN 1M DE HCL, EN FUNCIÓN DE EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO MORINDA CITRIFOLIA	70
FIGURA 68. DIAGRAMA DE NYQUIST DE UN ACERO AISI-4140 INMERSO EN 1M DE HCL, EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO MORINDA CITRIFOLIA	70
FIGURA 69. DIAGRAMA DE NYQUIST DE UN ACERO AISI-8620 INMERSO EN 1M DE HCL, EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO MORINDA CITRIFOLIA	71
FIGURA 70. MICROGRAFÍAS DE LOS ACEROS AISI-1045(A), AISI-4140(B), AISI-8620(C) DESPUÉS DE LAS PRUEBAS DE CORROSIÓN EN 1M DE HCL EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO MORINDA CITRIFOLIA.	71
FIGURA 71 DIAGRAMA DE TAFEL DE UN ACERO AISI-1045 INMERSO EN 1M DE HCL, EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO MORINDA CITRIFOLIA.	73
FIGURA 72. DIAGRAMA DE TAFEL DE UN ACERO AISI-4140 INMERSO EN 1M DE HCL, EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO MORINDA CITRIFOLIA.	73
FIGURA 73 DIAGRAMA DE TAFEL DE UN ACERO AISI-8620 INMERSO EN 1M DE HCL, EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO MORINDA CITRIFOLIA	74
FIGURA 74. COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIA TOTAL DE CORROSIÓN EN ACEROS AISI, INMERSO EN 1M DE HCL EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL INHIBIDOR ORGÁNICO MORINDA CITRIFOLIA.	76
FIGURA 75 COMPORTAMIENTO ISOTÉRMICO DE LANGMUIR DE ALOE-VERA QUE DESCRIBE LA INTERACCIÓN DE ADSORCIÓN DEL INHIBIDOR	77
FIGURA 76. COMPORTAMIENTO ISOTÉRMICO DE LANGMUIR DE MORINDA CITRIFOLIA QUE DESCRIBE LA INTERACCIÓN DE ADSORCIÓN DEL INHIBIDOR.....	77
FIGURA 77. COMPORTAMIENTO DEL EXTRACTO LÍQUIDO DE ALOE-VERA EN PRUEBAS DE TENSIÓN SUPERFICIAL	79
FIGURA 78. COMPORTAMIENTO DEL EXTRACTO DE MORINDA CITRIFOLIA EN PRUEBAS DE TENSIÓN SUPERFICIAL	79
FIGURA 79. EXPERIMENTACIÓN DE ÁNGULO DE CONTACTO DEL GEL DE ALOE-VERA	80

FIGURA 80. EXPERIMENTACIÓN DE ÁNGULO DE CONTACTO DEL GEL DE ALOE-VERA INMERSO EN HCL 1M..... 81

FIGURA 81. EXPERIMENTACIÓN DE ÁNGULO DE CONTACTO MORINDA CITRIFOLIA 81

FIGURA 82. EXPERIMENTACIÓN DE ÁNGULO DE CONTACTO MORINDA CITRIFOLIA EN PRESENCIA DE HCL-1M. 82

Índice de Tablas

TABLA 1. COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE ACEROS AISI DE ACUERDO A LA NORMA NACIONAL NMX-300	27
TABLA 2. ESPECIFICACIONES DE CELDA ELECTROQUÍMICA	42
TABLA 3. METODOLOGÍA DE PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS	48
TABLA 4. PARÁMETROS EXPERIMENTALES EN EL POTENCIOSTATO-GALVANOSTATO VERSASTAT-4 PARA LAS PRUEBAS EIS Y TAFEL	50
TABLA 5. PARÁMETROS DE IMPEDANCIA PARA LOS ACEROS AISI INMERSOS EN HCL 1M.	59
TABLA 6. PARÁMETROS DE TAFEL PARA LOS ACEROS AISI INMERSOS EN HCL 1M SIN INHIBIDOR.....	61
TABLA 7. PARÁMETROS DE IMPEDANCIA PARA LOS ACEROS INDUSTRIALES INMERSOS EN HCL 1M EN PRESENCIA DEL INHIBIDOR ORGÁNICO DE ALOE-VERA.	65
TABLA 8. PARÁMETROS DE TAFEL PARA ACEROS INDUSTRIALES INMERSOS EN HCL 1M EN PRESENCIA DEL INHIBIDOR ORGÁNICO DE ALOE-VERA.	68
TABLA 9. PARÁMETROS DE IMPEDANCIA DE LOS ACEROS INDUSTRIALES INMERSOS EN HCL 1M EN PRESENCIA DEL INHIBIDOR ORGÁNICO DE MORINDA CITRIFOLIA.	72
TABLA 10. PARÁMETROS DE TAFEL PARA EL ACERO AISI-4140 INMERSO EN HCL-1M EN PRESENCIA DEL INHIBIDOR ORGÁNICO DE MORINDA CITRIFOLIA.	74
TABLA 11. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL EXTRACTO DE ALOE-VERA EMPLEANDO EL MODELO DE LANGMUIR.	78
TABLA 12. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL EXTRACTO MORINDA CITRIFOLIA EMPLEANDO EL MODELO DE LANGMUIR.	78
TABLA 13. PROMEDIOS DE LOS AGENTES LÍQUIDOS EN CONTACTO CON LA SUPERFICIE METÁLICA DE LOS ACEROS INDUSTRIALES.	83

INTRODUCCIÓN



I. INTRODUCCIÓN

El deterioro por corrosión es uno de los principales problemas que aquejan a la mayoría de las industrias minera, energética, petrolera, química, metal mecánica, de tratamiento de aguas residuales, de la industria de pasta y papel, entre otras, generando desastres mortales como lo son las fallas de energía, fallas en puentes y edificios, embarcaciones, tuberías, entre otros, además de la pérdida humana y económicas, la corrosión puede causar daños al medio ambiente, daños mecánicos, desgaste de herramientas, maquinarias y un alto costo por mantenimiento; debido, a que los métodos para su prevención resultan poco eficaces para conseguir un control de la degradación de los materiales por corrosión (*Herrera-Hernández, 2015*).

Estos problemas primarios, impactan a su vez en sus costos indirectos de producción, como lo son los paros intermitentes en la producción, la disminución de la productividad de los equipos, además, debido a que son continuamente sometidos a largos periodos de tiempo y condiciones de trabajo cada vez más severos, por la demanda actual de los mercados, las industrias se olvidan de implementar un mantenimiento preventivo para la degradación de los materiales por corrosión y en muchos casos no prestan la atención adecuada, es por esto que se requiere de aceros con un mejor desempeño y con un tiempo de vida útil más prolongado, es decir aceros que resistan los ambientes corrosivos de las instalaciones industriales.

De esta manera, la corrosión es la causa de la alteración tanto física y química de la mayor parte de los materiales metálicos expuestos a un ambiente agresivo. Se entiende como ambiente agresivo, al entorno que rodea a los materiales metálicos y que contienen iones químicos agresivos suspendidos en el ambiente Cl^- , SO_4^- , SO_2 , CO_2 , entre otros. Constituye, por lo tanto, el derroche más grande en que incurren las grandes ciudades. Si bien este fenómeno destructivo ha existido por mucho tiempo, no se le ha prestado atención hasta los tiempos modernos (*Genesca J. y Ávila.; 1996*).

Con el fin de minimizar el ataque por corrosión se han desarrollado diferentes métodos o procedimientos para el control de la corrosión, entre los que destacan el uso de capas protectoras epóxicas (*Amir, et al. 2014*), polímeros (*T. Coan, et al. 2015*), metales y

aleaciones más resistentes (*Spies, 2015*), inhibidores de corrosión (*Qin Hu, et al, 2015*), pinturas (*Sanhotene, et al. 2009*), entre otros.

En cuanto a los inhibidores orgánicos, se ha encontrado que pueden contrarrestar el efecto de la corrosión por el proceso de quimisorción o fisorción de moléculas en la superficie del metal o reaccionando con los iones metálicos formando una película protectora en la superficie (*Herrera-Hernández, 2015*).

Actualmente el uso de moléculas orgánicas como inhibidores de corrosión ha proporcionado una solución a los daños ocasionados por este fenómeno, existen inhibidores derivados del imidazol, mercaptoimidazol, mercaptobezimidazol, (*R. Álvarez-Bustamante et al., 2009*) triazol, thidiazol (*M. Palomar-Pardavé, et al., 2014*) entre otros. Estudios relacionados con estos inhibidores de la corrosión indican que han resultado tener una buena interacción y actúan eficientemente en diferentes medios acuosos, sin embargo, la naturaleza de estos inhibidores es tóxica y algunos de estos productos son excesivamente costosos, otro factor importante a considerar son los problemas relacionados a la salud, impacto social y la directa afectación a todo el ecosistema.

La gran mayoría de estos inhibidores orgánicos no cumple con los requisitos a las nuevas normas de toxicidad y de protección del medio ambiente de los organismos internacionales como lo son la procuraduría federal de protección al ambiente (*Procuraduría Federal de Protección al ambiente, 2015*), Programa de las Naciones Unidas para la Protección del Medio Ambiente (*UNEP, 2015*), Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (*OSHA-18001, 2015*), las normas ASTM-G01 de lucha contra la corrosión (*Basset, 2014*) entre otras, por esta razón es necesario desarrollar inhibidores ecológicos denominados sustancias verdes, estas sustancias son extractos-líquidos derivados de plantas y presentan un bajo impacto ambiental, ya que contienen aminoácidos, alcaloides, propiedades antioxidantes y son productos biodegradables por lo que se consideran como una alternativa factible para la acción inhibitoria de la corrosión.

II. JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas, la globalización ha llevado a un gran crecimiento en la demanda del consumo del acero para la industria de la construcción, minera, energética, petrolera, química, metal mecánica, de tratamiento de aguas residuales, entre otras, dicha demanda, exige al sector industrial que día a día tenga un mejor desempeño de los materiales empleados, sin embargo, han tenido grandes pérdidas con los problemas generados por la corrosión de acuerdo a (*Genesca J. y Ávila.; 1996*); debido a que no se tiene un programa de prevención adecuado para evitar o disminuir la velocidad de la corrosión de los materiales metálicos.

Ante este problema, se han desarrollado distintos métodos para la prevención de la corrosión entre los que destacan el uso de capas protectoras epóxicas polímeros metales y aleaciones más resistentes inhibidores de corrosión, pinturas entre otros. Aunque la mayoría de estos inhibidores resultan bastante eficaces, también resultan ser tóxicos para el manejo humano y alteran el ecosistema, infringiendo así la preservación de todo el medio ambiente, ante este problema el presente trabajo de investigación, se pretende utilizar extractos líquidos derivados de las plantas, *ALOE-VERA* y la *MORINDA CITRIFOLIA* como potenciales inhibidores de la corrosión que puedan ser una gran alternativa para resolver la problemática que está dañando a todo un ecosistema desarrollando inhibidores como nuevas tecnologías verdes, reduciendo costos y la prevención de la corrosión de aceros en la industria.

Por lo tanto, en el presente trabajo de investigación se busca establecer nuevas alternativas de protección contra la corrosión con el desarrollo de inhibidores líquidos naturales *BIODEGRADABLES* para responder a las necesidades industriales con menor impacto ambiental. En este estudio se propone el uso de extractos líquidos derivados del *ALOE-VERA* (conocida como *Sábila* en México) y la *MORINDA CITRIFOLIA* (conocida como *Noni*) como posibles inhibidores de corrosión para aceros industriales (AISI 1045, 4140 y 8620) en medio ácido.

Utilizando las técnicas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (“EIS” por sus siglas en inglés) y polarización potenciodinámica (curvas de Tafel) se evalúa la efectividad de inhibición (EI) de dos extractos líquidos naturales en medio ácido (HCl 1M) de alto índice de corrosividad.

Este estudio se realiza en aceros al carbono del tipo AISI-SAE 1045 (acero grado estructural), 4140 (acero grado herramienta) y 8620 (acero grado maquinaria); estos aceros son los más empleados en la industria.

III. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de los extractos del Gel de *ALOE-VERA* y de la hoja de *MORINDA CITRIFOLIA* como inhibidores de la corrosión de aceros industriales expuestos a un medio ácido, por medio de las técnicas de Espectroscópica de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés) y la Técnica de Polarización Potenciodinámica (TAFEL).

IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Manufacturar celdas electroquímicas estándares de tres electrodos.
- ❖ Preparar las superficies de los substratos de acero 1045, 4140 y 8620 por técnicas metalográficas.
- ❖ Extraer la sustancia inhibidora a partir de las plantas naturales del *Aloe-Vera* y de hoja de *Morinda Citrifolia*.
- ❖ Medir la eficiencia de inhibición EI, mediante la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica y polarización potenciodinámica en los aceros 1045, 8620 y 4140 con diagramas Nyquist (Z_{real} vs. Z_{imag}) y TAFEL ($\log I$ vs. E_{corr})
- ❖ Analizar termodinámicamente el mecanismo de adsorción de la molécula.
- ❖ Determinar la Mojabilidad, Tensión Superficial de los extractos *Aloe-Vera* y la hoja de *Morinda Citrifolia*.
- ❖ Examinar mediante Microscopia Óptica las características microestructurales de los aceros 1045, 4140 y 8620.

V. HIPÓTESIS

Mediante la aplicación de los extractos de las plantas de *Aloe-Vera* y *Morinda Citrifolia*, como posibles inhibidores naturales de la corrosión, se pretende la generación de una protección superficial que promueva el incremento de la resistencia al deterioro por corrosión de los aceros industriales en medios corrosivos.



CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

En el afán de lograr mejores condiciones de vida, la civilización a lo largo de su historia ha empleado el uso óptimo de metales y sus aleaciones. Gracias al uso que se les ha dado a estos materiales, se ha logrado un gran avance a la civilización moderna, por lo que, sin la existencia de los metales y las aleaciones, el desarrollo de la civilización no hubiera sido posible, por lo que actualmente el desarrollo de una sociedad se ha medido por el uso de los materiales metálicos. La producción de acero y la mejora de sus propiedades mecánicas a través de tratamientos térmicos han hecho posible su empleo en los dominios más variados en la sociedad. Aunque, la utilización de los productos siderúrgicos y en los medios con que interactúan, generan un desgaste a nivel superficial y microestructural, el cual lo denominamos como deterioro por corrosión (*Genesca J. y Ávila J. 1996*).

Los costos del deterioro por corrosión en la economía de los países se dividen en cinco sectores claves, los cuales representan mayores pérdidas económicas. Estos sectores son: Infraestructura, gobierno, producción-fabricación, transporte y utilidades (Reevie & Uhlig, 2008). En la Figura 1 se muestran las industrias que en la mayoría de los países son consideradas para estimar las pérdidas económicas por corrosión.

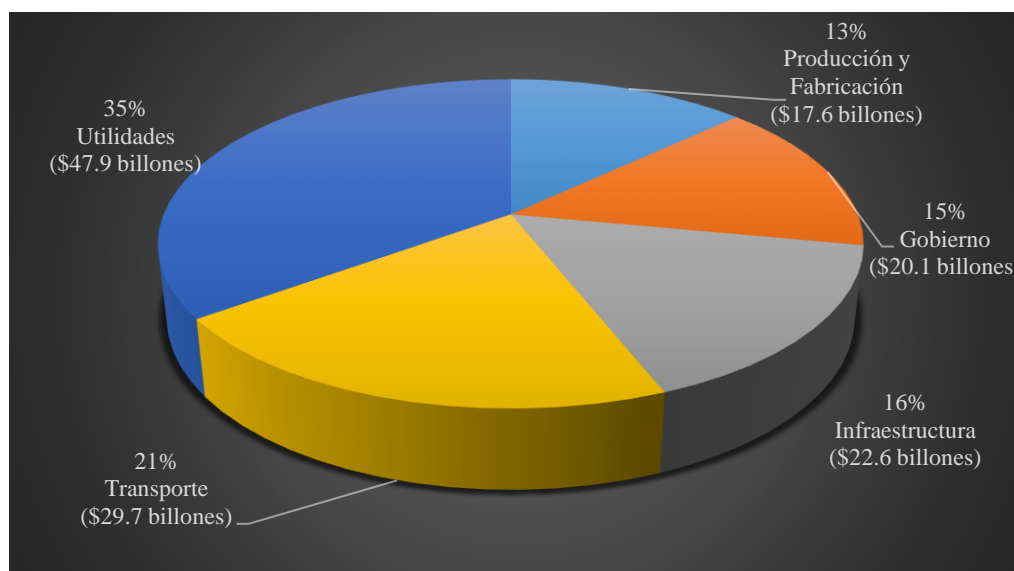


Figura 1. Costos anuales por corrosión y prevención en Estados Unidos de América en el año de 1998.

Tomando en cuenta estos sectores, en Estados Unidos de América la estimación anual de los costos totales por corrosión fue de 276 billones de dólares en el año de 1998, de los cuales 137.9 billones de dólares correspondieron a la industria de producción y fabricación de materiales, tal como lo menciona (Revie & Uhlig, 2008). Distintas evaluaciones son llevadas a cabo por expertos en corrosión, que determinan las pérdidas anuales causadas por la corrosión en países industrializados y en vías de desarrollo en torno al 3.5 % del producto interno bruto (PIB) de un país. En la Figura 2 se muestra los costos invertidos por la corrosión en el 2011 comparados con el PBI para diferentes países, es muy notorio que Estados Unidos, La Republica China y Japón tengan una mayor inversión por el deterioro por corrosión.

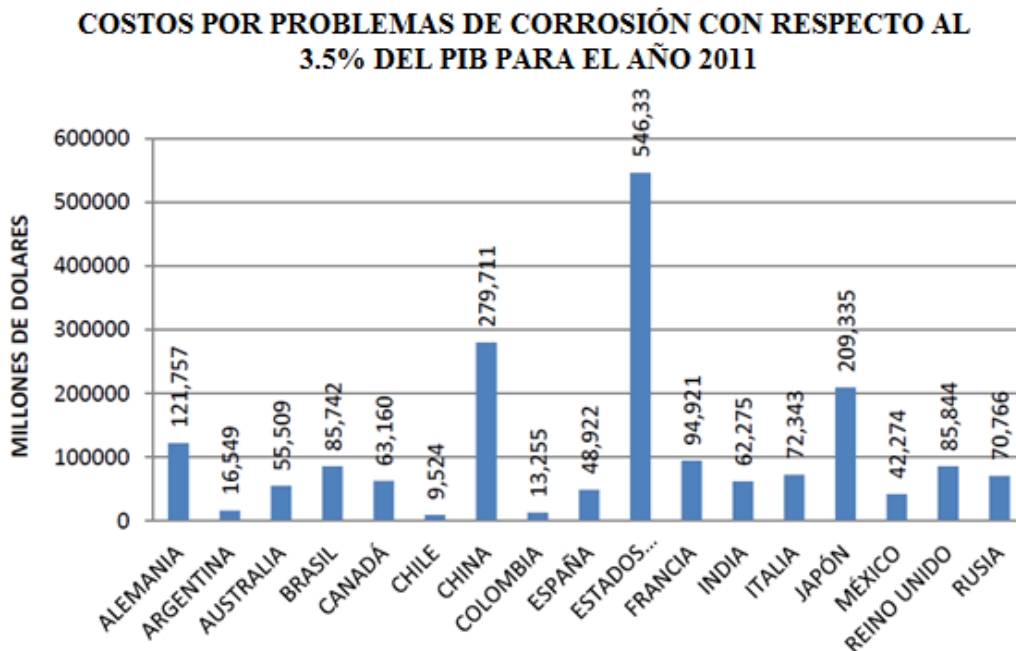


Figura 2. Costos anuales por corrosión y prevención con respecto al 3.5% del PIB para el año 2011 en países industrializados y en vías de desarrollo. (G.H. Koch et al, 2002).

Debido a que los materiales metálicos se encuentran expuestos a diferentes condiciones ambientales (ácidos o alcalinos), es recomendable aplicarles un tratamiento superficial adecuado como protección contra la corrosión, por el contrario, al no realizar este tratamiento los materiales tienden a degradarse de una forma más drástica y en un intervalo de tiempo demasiado corto. Es por ello que se han creado diferentes recubrimientos e inhibidores para prevenir los problemas asociados a la corrosión.

Los inhibidores de corrosión son sustancias químicas orgánicas e inorgánicas que, al adicionarse al medio corrosivo en pequeñas cantidades, actúan sobre la superficie metálica proporcionando un recubrimiento o película protectora, ocasionando que el deterioro por corrosión disminuya notablemente (*G.H. Koch et al, 2002*). Sin embargo, debido a su alta toxicidad de los grupos funcionales de estos inhibidores orgánicos derivados del imidazol, mercaptoimidazol, mercaptobezimidazol, (*R. Álvarez-Bustamante et al., 2009*) triazol, thidiazol (*M. Palomar-Pardavé, et al., 2014*) entre otros; y a las normas de regulación ambiental del Programa de las Naciones Unidas para la Protección del Medio Ambiente (*UNEP, 2015*), la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (*OSHA-18001, 2015*), y las normas ASTM-G01 de lucha contra la corrosión (*Basset, 2014*) han dejado de considerarse para su empleo como inhibidor, además de que se obtienen a un alto costo de procesamiento. Ante la necesidad de evitar o controlar el fenómeno de corrosión en aceros y aleaciones no ferrosas, se han venido estudiando nuevos métodos alternativos de protección, denominados inhibidores orgánicos naturales, con el fin de generar nuevas tecnologías verdes que no dañen el medio ambiente y que representen un costo demasiado bajo a comparación de los que se tienen en el mercado. Para esto, se han estudiado y analizado diferentes extractos líquidos naturales de mango, (*Conforti & González, 2012*) hojas de neem, (*Loaiza & Vidal, 2013*) extracto de sábila, (*Pech & González 2007, H. Herrera Hernández, 2015*) entre otros; donde se han utilizado muestras de acero al carbono para determinar la velocidad de corrosión bajo condiciones controladas de acidez y temperatura.

1.2 Definición de Corrosión

El proceso de corrosión lo podemos definir de manera más analítica y descriptiva como el ataque químico o electroquímico que sufren los metales y sus aleaciones como resultado de agentes que se encuentran en el entorno que los rodea y genera un deterioro de sus propiedades por el intercambio de electrones. (*Revie & Uhlig, 2008*).

La definición de corrosión también puede definirse por distintas maneras, algunas de las cuales son las siguientes:

- ❖ Destrucción o deterioración de un material a causa de su reacción con el medio ambiente.
- ❖ Destrucción de los materiales por medios cualesquiera, excepto mecánicos.
- ❖ Proceso inverso de la metalurgia extractiva, en virtud del cual los materiales metálicos tienden a su estado combinado de oxidación, en el que se encuentran en la naturaleza.

1.3 Clasificación de los mecanismos de corrosión

La corrosión puede clasificarse de diversas maneras, según por la morfología de su ataque o según el medio en que se desarrolla (ver Figura 3), en general la forma de clasificarla es la siguiente de acuerdo a (*García I. R., 2014*):

1.3.1 Naturaleza del agente corrosivo

a) Húmeda

Cuando un líquido o la humedad está presente y hay presencia de una corriente eléctrica dentro del medio corrosivo.

b) Seca

Cuando se lleva a cabo sin corriente eléctrica, tal es el caso de la corrosión de gases a altas temperaturas, Algunos metales expuestos a gases oxidantes en condiciones de muy altas temperaturas, pueden reaccionar directamente con ellos sin la necesaria presencia de un electrolito. Generalmente esta clase de corrosión depende directamente de la temperatura.

1.3.2 Mecanismo de corrosión

a) Corrosión química

Bajo esta denominación se estudian aquellos casos en que el metal reacciona con un medio no-iónico (por ejemplo, oxidación en aire a altas temperaturas). La corrosión química ocurrirá en ausencia de soluciones electrolíticas.

b) Corrosión electroquímica

Se define como una reacción química donde hay transferencia de electrones, es decir es una reacción química que comprende el fenómeno de oxidación y reducción. La corrosión electroquímica se da cuando los materiales metálicos se encuentran en contacto con medios de conductividad electrolítica, en particular en medios acuosos, soluciones salinas, o la humedad atmosférica y de los suelos. De acuerdo con esto, la presencia de moléculas de agua sobre la superficie metálica o la difusión de oxígeno es la condición necesaria para que ocurra corrosión electroquímica.

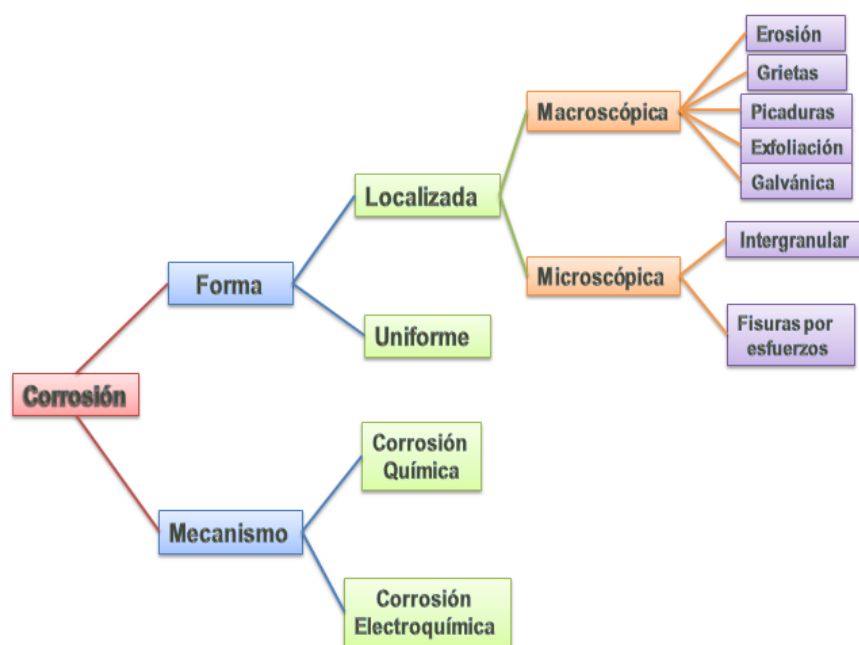


Figura 3. Clasificación de los mecanismos de corrosión.

1.3.3 Apariencia del metal corroído

a) Corrosión localizada

Cuando son afectadas pequeñas áreas del metal, estas se dividen en picaduras macroscópicas y microscópicas. El fenómeno de picadura ocurre en la superficie del metal o aleación cuando se expone libremente y en donde la superficie no es homogénea químicamente, esto se muestra en la Figura 4, (García I. R., 2014).

Esto quiere decir que presenta celdas locales durante los procesos metalúrgicos de manufactura como composición química, estructura del metal, inclusiones no metálicas e imperfecciones en el recubrimiento de la superficie.



Figura 4. Corrosión Localizada o por picaduras.

b) Corrosión por grietas

Es el resultado del efecto combinado entre corrosión y esfuerzos de tensión. Este tipo de corrosión produce fracturas por agrietamiento. En la Figura 5 se presenta el patrón de grietas generado por este fenómeno (*García I. R., 2014*),



Figura 5. Corrosión por agrietamiento bajo esfuerzos.

c) Corrosión por picaduras

La corrosión por picadura se presenta por la formación de orificios en una superficie relativamente no atacada, las picaduras pueden tener variadas formas. Se describe también como corrosión por concentración de pilas galvánicas, pues resulta de la existencia de potenciales electroquímicos diferentes dentro y fuera de las picaduras, debido a una diferencia de concentración de oxígeno.

Las picaduras en ausencia de oxígeno, actúan como ánodo y el material no atacado, actúa como cátodo, la corrosión por picaduras es un proceso lento donde puede ser efectuado durante meses y años antes de ser visible, pero que naturalmente causará fallas inesperadas y catastróficas, por lo que se le considera a este tipo de daño muy peligroso. El pequeño tamaño de la picadura, hace que la detección de ésta sea muy difícil en las etapas iniciales. En la Figura 6, se muestra un componente que ha desarrollado corrosión por picaduras (*García I. R., 2014*),



Figura 6. Corrosión por picaduras.

d) Corrosión por Exfoliación

La corrosión por exfoliación es otro tipo de daño superficial que comienza sobre una interface limpia, pero que se esparce por debajo de ella mediante un proceso de difusión de iones, lo que difiere de la corrosión por picadura en que el ataque tiene una apariencia laminar, las capas completas de material son corroídas y el ataque es generalmente reconocido por el aspecto escamoso y ampollado de la superficie. Este mecanismo es conocido en las aleaciones de aluminio, recubrimientos, pinturas y se controla utilizando elementos de aleación o tratamientos térmicos.

La Figura 7 muestra este tipo de corrosión, presentando un componente que ha desarrollado exfoliación, donde se observa que este tipo de corrosión promueve la falla drástica del material (*García I. R., 2014*),



Figura 7. Corrosión por exfoliación.

e) Corrosión Galvánica

Este tipo de corrosión también llamado par galvánico ocurre cuando dos metales de distinta naturaleza química se encuentran en contacto y sumergidos en un electrolito, también pueden estar unidos por un conductor eléctrico, o acoplados. En la Figura 8 se muestra un componente que ha desarrollado este tipo de corrosión (*García I. R., 2014*),

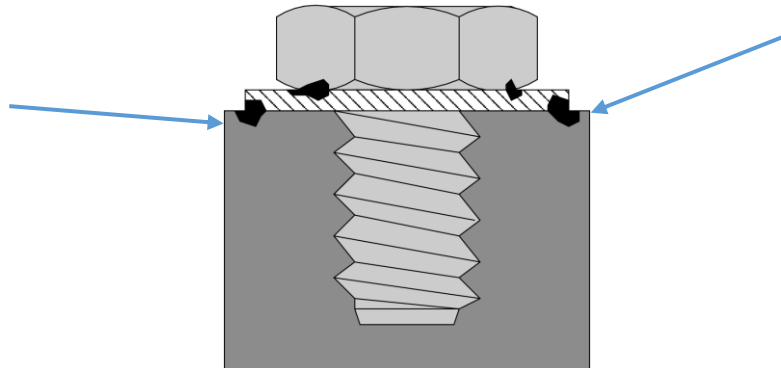


Figura 8. Corrosión Galvánica. Esquema de actividad de la corrosión galvánica entre el tornillo de acero inoxidable y la rondana de chapa de acero galvanizado.

f) Corrosión Intergranular

Cuando un metal fundido es vaciado en un molde, su solidificación comienza con la formación de núcleos de forma aleatoria, cada uno de los cuales crece en un arreglo atómico regular para formar lo que se conoce con el nombre de granos o cristales (dendritas). Los límites de grano son atacados por un agente corrosivo, por ser los sitios más reactivos del

material, el ataque se relaciona con la segregación de elementos específicos o por la formación de un compuesto en el límite.

El límite de grano es atacado por corrosión intercrystalina, es un subproducto de un tratamiento térmico como la soldadura o el relevado de esfuerzos, puede ser corregido mediante otro tipo de tratamiento térmico o por el uso de una aleación modificada. En la Figura 9 se hace una representación esquemática de la precipitación del carburo de cromo (CrC) en el límite de grano de un acero inoxidable AISI-304 sensibilizado [REF]. Se le conoce como sensibilizado o sensitizado a la alteración que sufre un material metálico al ser expuesto a una temperatura extrema como parte de un tratamiento térmico, o durante el proceso de soldadura, o simplemente por su trabajo que desempeña, el cruce de una temperatura crítica de alrededor de 600°C y al enfriarse en condiciones normales los aceros inoxidables pierden la habilidad de protección por la difusión y precipitación del Cromo como Carburo de Cromo sobre el límite de grano (*Herrera-Hernández, 2015*) Esta nucleación de esta fase en condiciones severas del ambiente que los rodea es capaz de desarrollar corrosión intergranular y llevar hasta la falla mecánica del material.

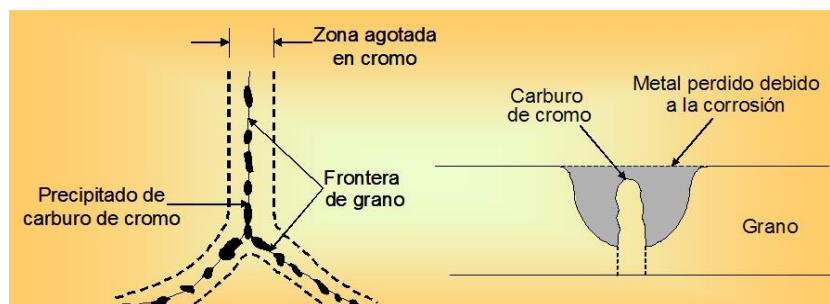


Figura 9. Corrosión Intergranular

1.4 Termodinámica de la corrosión

Si se desea conocer la posibilidad de que una reacción de corrosión ocurra espontáneamente bajo ciertas condiciones reales dadas, se tendrá que estudiar primordialmente cuales serían los cambios energéticos asociados con la reacción, TERMODINÁMICA. Esto es determinar la magnitud de la energía que el metal posee inicialmente antes de la corrosión y después

determinar la energía que posee en los productos finales de la corrosión (*Räuchle & Díaz, 1990*).

La energía de un determinado sistema puede medirse en términos de lo que se conoce como energía libre de Gibbs (ΔG), y es posible asociarlo al potencial de corrosión, E_{corr} medido entre el metal y el electrólito, el cual se puede presentar en tres casos:

- ❖ El cambio de la energía libre (ΔG) es negativa. El metal es activo y puede existir corrosión. Es el caso más frecuente entre los metales de uso común.
- ❖ Puede ocurrir aun cuando (ΔG) sea mayor que cero, el metal en lugar de presentar corrosión permanece aparentemente sin ser atacado. Se dice que el metal esta pasivo.
- ❖ Si el cambio de la energía libre (ΔG) es cero o muy positiva, el metal es indiferente a los agentes agresivos habituales, no siendo posible ninguna reacción de corrosión.

La termodinámica es capaz de indicar una posibilidad de reacción, pero jamás podrá decir acerca de la velocidad de reacción con que se llevará a cabo, sí es que la reacción es posible. Esto se decide por otros factores ajenos a la termodinámica, factores propios de lo que conocemos como cinética de la corrosión (*García I. R., 2014*).

1.4.1 Análisis termodinámico, proceso de adsorción

Para entender el mecanismo de inhibición de la corrosión de las moléculas orgánicas en la superficie del metal, se puede predecir empleando modelos de adsorción.

La adsorción física (Figura 10a) requiere de la presencia de eventos de carga en la superficie y cargas opuestas en el seno de la solución para lograr una interacción química por el mecanismo de transferencia de electrones y la formación de multicapas (*Abdelkader K. et al, 2016*).



Figura 10. Clasificación de la adsorción.

Por otro lado, la adsorción química (quimisorción) la cual precede de la transferencia de carga y cargas compartidas entre el inhibidor y la superficie metálica (ver Figura 10b). Donde se encuentran la formación de monocapas. La adsorción del extracto en la superficie metálica se determina gráficamente, como se muestra en la Figura 11, con la curva del grado de recubrimiento (θ), la constante de Langmuir (K_{ads}) y la concentración del ión adsorbato (C) con el mejor ajuste con la isoterma de adsorción de Langmuir, (ecuación 1).

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C \quad (1)$$

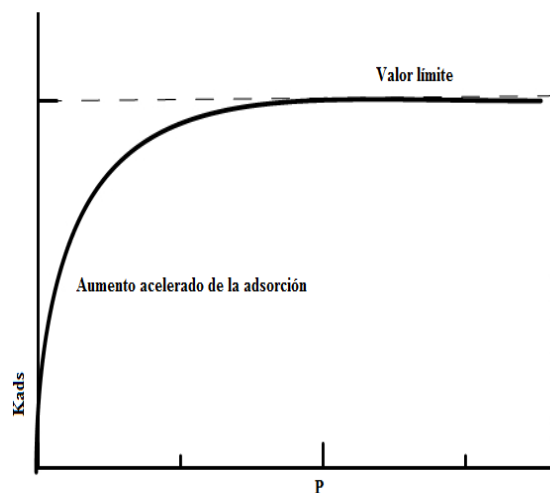


Figura 11. Isotherma de adsorción de Langmuir.

1.4.2 Potencial electroquímico y potencial de electrodo

Se denomina potencial electroquímico del metal a la derivada parcial de la energía libre total electroquímica (ΔG) de una especie, con respecto al número de moles con los que participa, cuando otros factores como Temperatura (T) y Presión (P) son constantes, se denomina potencial electroquímico del metal. Este potencial es análogo del potencial químico de una especie, pero en este caso están incluidas las contribuciones químicas y eléctricas en la energía libre de Gibbs.

Cuando un metal se sumerge en un electrólito, como resultado del intercambio de cargas eléctricas en la interface metal-solución electrolítica, como lo puede ser, transporte de cationes desde el metal hacia el electrolito y viceversa, o la adsorción de iones o moléculas polares de la solución sobre la superficie metálica, surge el salto de potencial de electrodo. (Raichev *et al*, 2009).

1.4.3 Ecuación de Nernst

La ecuación de Nernst expresa la relación cuantitativa entre el potencial de reducción en los electrodos en condiciones diferentes a los estándares, lo cual identifica el sentido en el cual se desplazará la reacción entre la carga de la interface y el valor en voltios, esto se expresa en la ecuación 2, (Cummings, 2006).

$$E_M = E_M^\circ - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a^{(Mz^*)}}{a^{(M^*)}} \quad (2)$$

Donde:

- ❖ a^{M^*} = Actividad del metal.
- ❖ a^{Mz} = Actividad del ión metálico.
- ❖ E_M° = Potencial eléctrico en la interface en condiciones estándar.
- ❖ E_M = Potencial eléctrico en la interface (voltios).
- ❖ F = Constante de Faraday.

- ❖ R = Constante universal de los gases ideales.
- ❖ T = Temperatura (°K).
- ❖ n = número de electrones transferidos en los procesos de óxido/reducción.

1.5 Cinética de la Corrosión

La cinética de la corrosión predice la velocidad a la cual el metal se corroerá en un ambiente agresivo. Indica la cantidad de metal que se degrada por unidad de tiempo en un medio determinado, aun cuando un sistema este desplazado de una situación de equilibrio, (*Vera, E., 2010*).

1.5.1 Leyes de Faraday

Las leyes de Faraday del electrólisis expresan relaciones cuantitativas basadas en las investigaciones electroquímicas publicadas por Michael Faraday en 1834, acerca de la interacción entre la cantidad de electricidad que pasa a través de una solución acuosa y la cantidad de material que se libera en los electrodos (*Kugo I. G., 2010*), las cuales pueden enunciarse de la siguiente manera:

- ❖ La masa de un elemento depositada en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad (**Q**) que pasa a través de la disolución del electrolito.
- ❖ La cantidad de masa de los elementos que se depositan en los electrodos son proporcionales a los equivalentes químicos.

El flujo del electrón es medido convencionalmente como (**I**), en amperes, donde 1 ampere es igual a 1 coulomb **C** de carga (6.2×10^{18} electrones/segundo). La proporcionalidad entre (**I**) y la masa reaccionante (**m**), es una reacción dada por la ley de Faraday (ecuación 3) (*Ramírez, 2007*).

$$P = Q \times Peq \div F \quad (3)$$

Donde F es igual a 96500 C/mol (Constante de Faraday) P (masa Transformada) Peq es el peso Equivalente.

$$m = \frac{ItPA}{nF} \quad (4)$$

Donde (m) es igual a la masa reaccionante (nF) nanoFaradios, (A) área, (t) tiempo, dividiendo la anterior ecuación entre el tiempo (t) y el área (A), entonces:

$$V_{\text{corr}} = \frac{PA i_{\text{corr}}}{nF} \quad (5)$$

Donde:

- ❖ V_{corr} = velocidad de corrosión
- ❖ i_{corr} = intensidad de corriente
- ❖ A = área de exposición
- ❖ P = masa transformada
- ❖ nF = masa reaccionante en nano Faradios.

1.6 Técnicas Electroquímicas

Existen distintas técnicas para la evaluación de los procesos de velocidad de corrosión que ocurren en los metales expuestos a medios corrosivos. En el presente trabajo de investigación se utilizaron dos técnicas de medición, una técnica de corriente directa (DC) como lo es TAFEL y una técnica de corriente alterna (AC), la cual lleva por nombre Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés, Electrochemical Impedance Spectroscopy).

1.6.1 Polarización Potenciodinámica

La técnica de polarización potenciodinámica fueron introducidas por Evans en 1929 para predecir el comportamiento corrosivo, aunque actualmente son fundamentales para evaluar

los fenómenos básicos como corrosión localizada y pasividad, y los efectos sobre aleantes y el uso de inhibidores sobre la cinética de las reacciones electroquímicas que determinan el comportamiento electroquímico.

En el caso de la corrosión por picaduras las curvas de polarización potenciodinámica deben ser corridas dentro de un rango de potencial para localizar dos parámetros críticos E_{prot} (potencial de protección) y E_{pit} (potencial de picaduras).

Una desventaja de esta técnica es que es destructiva, debido a la utilización de corriente directa (DC) y ofrece poca información acerca de los procesos electroquímicos (*Herrera-Hernández et al, 2002*).

1.6.2 Curvas de Polarización Potenciodinámica

Las curvas de polarización potenciodinámicas (E_{corr} vs $\log I$), son diagramas que representan de manera gráfica las reacciones anódicas y catódicas durante el proceso de corrosión, estableciendo un determinado intervalo en la señal de amplitud, mediante estos diagramas se puede estimar cuando el material es más susceptible a presentar el proceso de corrosión uniforme y en otro caso al proceso de corrosión por ataque localizado. En este proceso la desviación del equilibrio provoca una diferencia de potencial eléctrica entre el polarizado y el electrodo (no polarizado) conocida como sobre potencial. El diagrama de polarización de la Figura 12 nos permite estudiar la cinética y los mecanismos de reacción del proceso de corrosión.

Del diagrama de polarización de la Figura 12 se define que “ E_o, H ” y “ E_o, M ”, M son el potencial de circuito abierto para hidrógeno y metal “ M ”, respectivamente, “ i_o, H ” y “ i_o, M ” son las densidades de corriente de intercambio, y “ i_L ” Es la densidad de corriente límite.

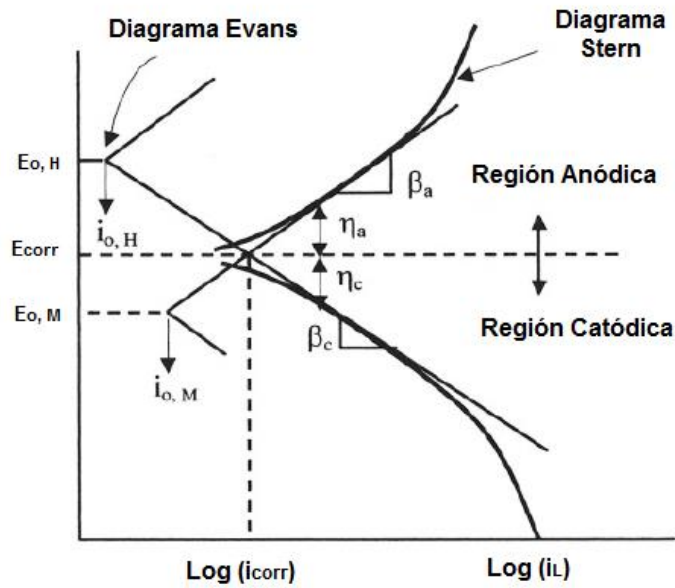


Figura 12. Curva de Polarización Potenciodinámica.

1.6.3 Resistencia a la Polarización Lineal

Es una técnica electroquímica para medir la resistencia que opone el metal a ser polarizado la cual fue desarrollada en el año de 1957 por Stern & Geary (*Mendoza, Duran & Genescá, 2014*). Este procedimiento consiste en desplazar ligeramente el sistema (proceso de corrosión) de su potencial de equilibrio E_{corr} a otro valor de potencial en un intervalo que incluye las direcciones anódicas y catódicas de una reacción, mediante la aplicación de un barrido potencial. A través de esta polarización y de las pendientes de TAFEL es posible calcular la velocidad de corrosión, que se expresa de acuerdo a la ecuación 6 de Stern & Geary:

$$\frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{((ba)(bc))}{((2.3)(ba + bc)(i_{corr}))} \quad (6)$$

Definiendo:

ΔE = Variación Potencial.

ΔI = Variación de la Corriente.

ba = Pendiente de Tafel Anódica.

b_c = Pendiente de Tafel Catódica.

i_{corr} = Corriente de Corrosión.

2.3 = Factor de Tafel, el cual surge de la conversión del Logaritmo natural a Logaritmo base Diez.

Si se divide la i_{corr} por unidad de área se obtiene la densidad de corriente de corrosión, la cual es igual a la velocidad de corrosión descrita en la ecuación 7:

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

Otro método para el cálculo de la resistencia a la polarización, es a partir de la Ley de Ohm despejando la resistencia (R_p), tal como se describe en la ecuación 8:

$$E = I R_p \quad (8)$$

Despejando R_p se obtiene la siguiente ecuación:

$$R_p = \frac{E}{I} \quad (9)$$

Dónde:

- ❖ E = Potencial en Volts
- ❖ I = Corriente en Amperes
- ❖ R_p = Resistencia a la polarización ($\Omega - cm^2$)

1.6.4 Ley de TAFEL

La observación y el establecimiento de la relación existente entre la corriente y el potencial del electrodo datan de ya un siglo desde que Tafel, en 1905 dedujo de manera teórica, que, para las reacciones de reducción del protón, la ecuación (10) de polarización de un electrodo

es reversiblemente polarizable, (Figura 13) en donde se desarrolla un sistema casi reversible (Meas, Y.2012).

$$n = a + b[\log i] \quad (10)$$

Estas leyes de Tafel tienen un papel importante en electroquímica y es en la búsqueda de su justificación teórica que se han podido encontrar las hipótesis correctas para el mecanismo de una reacción electroquímica.

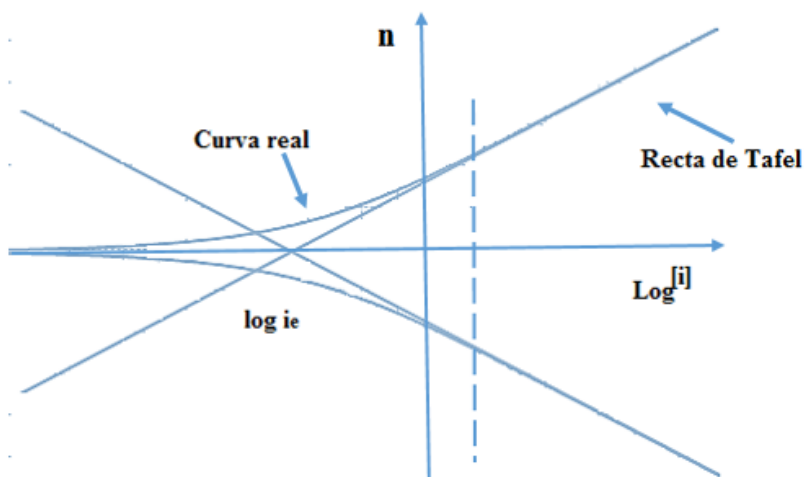


Figura 13. Rectas de Tafel.

1.6.5 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

La técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS por sus siglas en inglés) se basa en la aplicación de una señal de corriente alterna (CA), la cual la hace una técnica no destructiva y novedosa, es aplicada a un electrodo de trabajo (metal sujeto a estudio de corrosión) determinando la respuesta correspondiente.

El procedimiento experimental comúnmente más utilizado, es la aplicación de una señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica (R), utilizando circuitos de corriente alterna se describe en la ecuación (11) (Olivares, 2005 y Herrera, Hernández, 2015).

$$E = IZ \tag{11}$$

Donde (Z) representa la impedancia del circuito, con unidades de ohm. Las representaciones más usuales de frecuencia de un sistema lineal son los diagramas de Nyquist.

a) Diagrama de Nyquist

El diagrama de Nyquist (Z_{real} vs. Z_{imag}) se basa en el análisis de las funciones variable compleja (componente real e imaginario) de la impedancia total, de una combinación en paralelo de una resistencia y un capacitor (Figura 14). A bajas frecuencias, la impedancia es puramente resistiva, debido a que la reactancia del capacitor es muy grande.

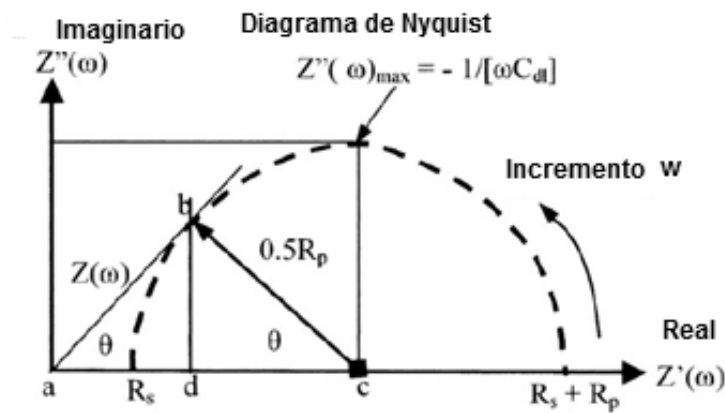


Figura 14. Diagrama de Nyquist Componentes real Z' e imaginario Z'' de la impedancia total para un circuito en paralelo resistencia (R) Capacitancia (c) que considera a la solución (R_s) a diferentes frecuencias.

La capacitancia real de la doble capa electroquímica (C_{dl}) se calcula a partir de la ecuación 12 de acuerdo a *Hsu y Mansfeld, 2001*.

$$C_{dl} = Q^o (W_{max})^{n-1} \tag{12}$$

Donde:

- ❖ Q^o = elemento de fase constante
- ❖ W_{max} = frecuencia en donde Z_{imag} alcanza su valor máximo en el Diagrama de Nyquist.

- ❖ n = Exponente que tiene que ver con las propiedades interfaciales de los materiales, adquiere valores mayores a cero pero menor a la unidad.

1.7 Celdas Electroquímicas

Las celdas electroquímicas son aquellas en las que se aplica una diferencia de potencial procedente de una fuente externa para evaluar la cinética de reacciones químicas que ocurren in situ (Figura 15), estas celdas están constituidas por tres elementos primordiales, Electrodo de Referencia (**ER**), Electrodo de Trabajo (**ET**) y Contra Electrodo (**CE**). Al (**ER**), lo podemos definir como el electrodo que valida o estima el potencial de la energía entre la muestra de trabajo y el medio acuoso.

Uno de los electrodos que se utilizan para este análisis electroquímico son los de plata cloruro de plata (Ag/AgCl), un segundo electrodo es de grafito que actúa como (**CE**) y su funcionamiento es el de un **cátodo**, en el que se produce la reducción, este electrodo posee carga negativa y hacia él migran iones o cargas positivas, el tercer elemento es el electrodo de trabajo (**ET**) y su función es desempeñarse como **ánodo**.

Este funciona inversamente al cátodo, en este electrodo de trabajo se produce la oxidación, debido a que pierde electrones, este electrodo posee cargas positivas y a él migran los iones o cargas negativas. Las probetas metálicas funcionarían como este elemento de acuerdo a (Pérez, N., 2004).

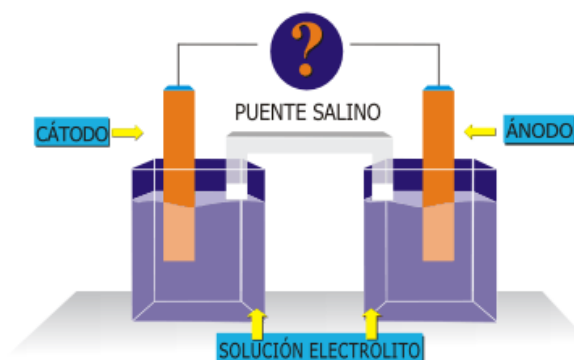


Figura 15. Celda electroquímica donde se aprecia un cátodo, un ánodo y el puente salino este último se incorpora a la celda para asegurar el equilibrio iónico en el sistema

1.8 Constituyentes de los aceros

Existen distintas maneras de clasificar los aceros, las principales se basan de acuerdo a su composición, aplicación y calidad.

Un acero puede tener las siguientes fases en equilibrio, de acuerdo al diagrama de hierro carbono se presenta en la Figura 21 (*Callister, 2007*).

a) Ferrita

Es una fase compuesta de hierro puro, con átomos de hierro ($\text{Fe-}\alpha$) con estructura cristalina BCC y átomos de carbono ubicados en los sitios intersticiales (Figura 16, (*Callister, 2007*)). La cantidad de átomos de carbono presentes en la ferrita es pequeña.

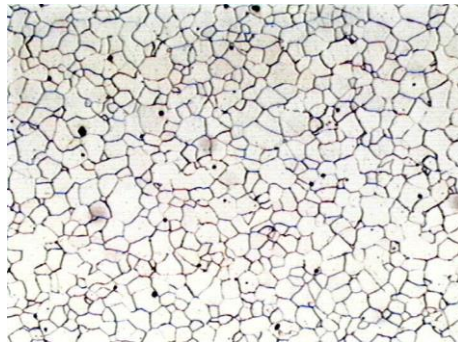


Figura 16. Microestructura Ferrítica.

b) Cementita

Es la fase de carburo de hierro o compuesto intermetálico (Fe_3C) tal como se observa en la Figura 17 (*Callister, 2007*), la cementita es una fase estable, porque permanece como compuesto a temperatura ambiente de manera indefinidamente, su presencia aumenta considerablemente la resistencia mecánica de algunos aceros debido a su microestructura laminar muy fina alternadas una de otra.

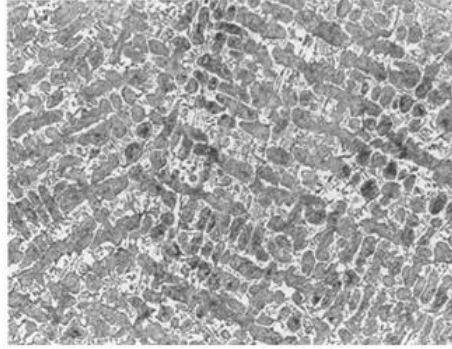


Figura 17. Microestructura de un acero donde se observa que la fase oscura es Cementita y la fase blanca la Perlita.

c) Perlita

Esta fase está compuesta de un 86.5% de ferrita ($\text{Fe-}\alpha$) y un 13.5% de cementita (Fe_3C). Se obtiene una estructura pura si se enfría lentamente un acero con el 0.8% de Carbono, y es resultado de la reacción eutectoide del acero. La reacción eutectoide permite a la austenita en estado sólido que se transforme en ferrita y cementita (laminas alternadas de $\text{Fe-}\alpha$ y Fe_3C), ambas también en estado sólido, esta estructura se observa en la Figura 18, (Callister, 2007). Esta transformación es similar a la reacción eutéctica, por lo que la fase resultante tiene una apariencia similar al sólido eutéctico.

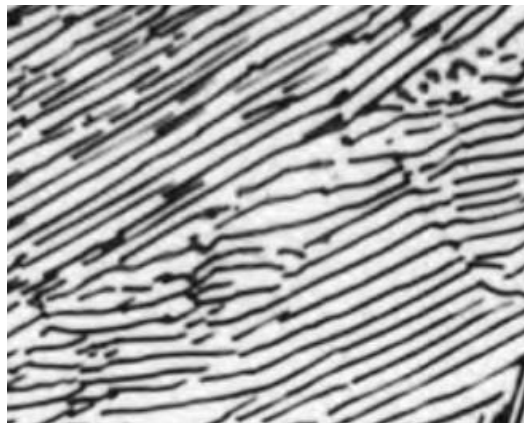


Figura 18. Morfología de la perlita gruesa.

d) Austenita.

Fase que consiste en átomos de hierro con estructura FCC y átomos de carbono en los sitios intersticiales. Presenta menor suavidad y ductilidad que la ferrita, es una fase no magnética. Se obtiene cuando se calienta un acero hasta que el Fe_{α} se transforma en Fe_{γ} (Figura 19 (Callister, 2007)). Es una solución sólida intersticial de carbono en Fe_{γ} , donde puede tener hasta un 2.11% de carbono disuelto en la red a 1130°C. Entre sus propiedades destaca su gran plasticidad, característica que se aprovecha en la transformación por medio de forja en los aceros, y responde fácilmente a un tratamiento térmico.



Figura 19. Morfología de la Austenita en un acero.

e) Martensita.

Es una estructura desordenada en forma de agujas finas, como se ve en la Figura 20 (Callister, 2007), que se obtiene de la transformación de la austenita por un enfriamiento rápido (T.T temple).



Figura 20. Morfología Martensítica de un acero.

Los aceros también pueden clasificarse de la siguiente forma en base a su contenido de carbono:

- 1. Aceros Hipoeutectoides:** Son aquellos que poseen menos de 0.8% C. La microestructura presente en estos aceros, consiste de ferrita y perlita.
- 2. Aceros Eutectoides:** Los que poseen la composición eutectoide, 0.8% C, su estructura es 100% perlita.
- 3. Aceros Hipereutectoides:** Son aquellos que contienen más de 0.8-2.11% C, su estructura es perlita – cementita (ferrita – cementita).

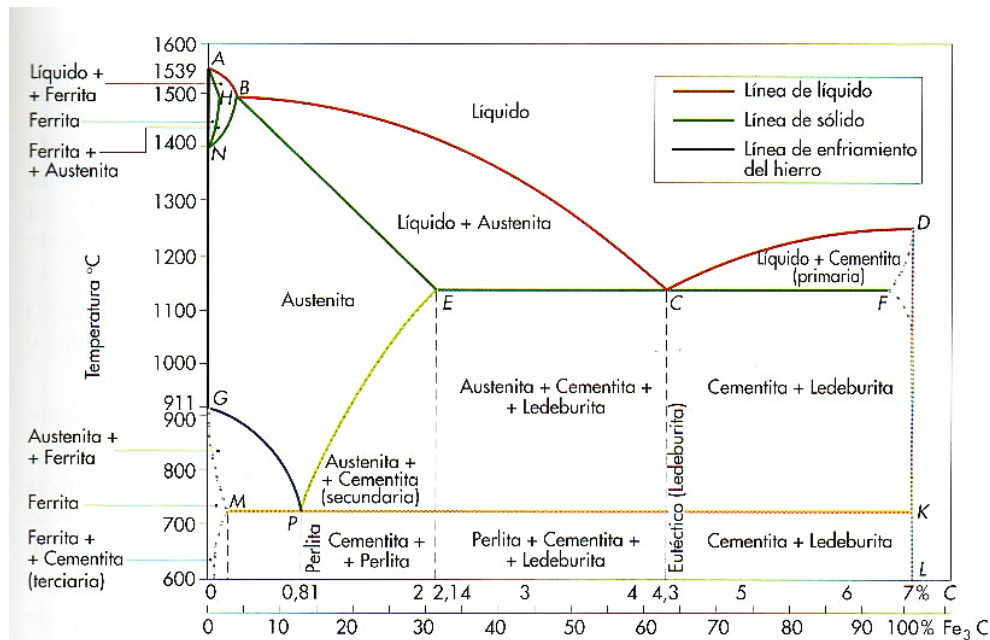


Figura 21. Diagrama de Hierro-Carbono.

1.8.1 Nomenclatura de los aceros

La mayoría de los aceros utilizados industrialmente presentan una designación normalizada expresada por medio de cifras, letras y signos, todos los países y muchas instituciones tienen sistemas para clasificar los aceros. Los más utilizados son la normatividad de la American Society for Testing and Materials (ASTM), American Iron and Steel Institute (AISI) y Society Engineers Automotive (SAE).

En el sistema AISI-SAE (Figura 22) son esencialmente iguales, emplean los mismos números de identificación para composiciones químicas similares; los aceros se clasifican con cuatro dígitos:

- ❖ Los dos primeros dígitos indican el tipo de acero.
- ❖ Los dos últimos dígitos en la serie son indicativos de la cantidad media entre los límites de contenido de carbono.
- ❖ Hay una serie de cinco dígitos para designar ciertos tipos de aceros aleados.

A causa del desarrollo de aceros multicomponentes, hay muchos aceros que han sido alterados de su sistema original, permitiendo diseñar nuevas aleaciones, las designaciones para el primer dígito son:

- 1.- Manganeso.
- 2.- Níquel.
- 3.- Níquel – Cromo, principal aleación el Níquel.
- 4.- Molibdeno.
- 5.- Cromo.
- 6.- Cromo – Vanadio, principal aleación el Cromo.
- 8.- Níquel – Cromo – Molibdeno, principal aleación el Molibdeno.

El segundo dígito para aceros aleados, indica el elemento predominante de aleación, y los últimos dos dígitos nos indican el porcentaje contenido de carbono multiplicado por 100.

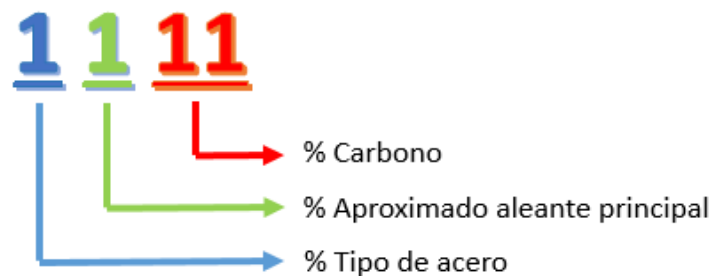


Figura 22. Esquema general de la clasificación de aceros

En base a esta referencia, a continuación, se describe las características de los aceros estudiados para esta investigación. La composición química elemental de los aceros utilizados como sustratos se muestra en la Tabla 1 de acuerdo al organismo nacional de normalización (*CANACERO, 2015*).

AISI-1045 el cual es un acero de grado estructural de contenido medio de carbono 0.45%C, adecuado para tipo de aplicaciones donde se requiera soportar esfuerzos además de tenacidad, comúnmente utilizado en la industrial de la construcción. Mientras que, el acero AISI-4140 el cual es un acero de grado herramienta. Es un acero de medio carbono aleado con cromo-molibdeno de alta templabilidad y buena resistencia a la fatiga, abrasión e impacto, las aplicaciones típicas de este acero son en el uso de piñones, ejes reductores y cinceles. El acero AISI-8620 es un acero de grado maquinaria aleado al Níquel-Cromo-Molibdeno, el cual ofrece muy buena dureza superficial y gran tenacidad en el núcleo, las aplicaciones típicas de este acero son en el forjado de cigüeñales, engranes, pernos pistones, flechas.

Tabla 1. Composición elemental de aceros AISI de acuerdo a la Norma Nacional NMX-300

AISI	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
1045	0.43–0.50	0.15–0.35	0.60–0.90	—	—	—
4140	0.38–0.43	0.15–0.35	0.75–1.00	—	0.80–1.10	0.15–0.25
8620	0.18–0.23	0.15–0–35	0.75–0–90	0.40–0.60	0.40–0.60	0.15–0.25

1.9 Determinación de la Mojabilidad, Tensión Superficial y Viscosidad

La determinación de la Mojabilidad de los líquidos consiste en calcular las formas de equilibrio de gotas que emergen lentamente hacia el exterior de tubos verticales de pared gruesa justo antes de su ruptura. A bajos flujos es posible calcular la forma de las gotas a partir del balance entre la presión hidrostática y la presión capilar.

Se encuentran varias soluciones analíticas en la determinación de la forma de la gota de un líquido correspondientes a diversos límites asintóticos de la ecuación de balance de acuerdo a la ecuación 13. Donde se muestra que la formación de gotas depende finalmente del número de Bond (*A. López et al., 2011*).

$$Bo = pga^2 \tag{13}$$

Donde;

p= densidad del extracto o medio acuoso

g= es la aceleración de la gravedad

a= es el radio interior del tubo, del ángulo de contacto estático μ y de la presión de inyección en un tubo capilar.

Por otro lado, aquí se discuten diversas peculiaridades de la forma de las gotas en función del número de Bond, el número de Bond es el cociente de la presión hidrostática y la presión capilar. Si <1 dominan los efectos gravitacionales sobre los capilares, mientras que si >1 , ocurre lo inverso.

❖ **Ecuaciones adimensionales**

La adimensionalización de las ecuaciones se hace usando el radio exterior del tubo, R , y la altura máxima de la gota, H , de manera que $\xi = r/R$ y $\zeta = z/H$, esto lleva a la ecuación 14 de diferencial adimensional.

$$-\frac{\frac{d^2\xi}{d\zeta^2}}{Bo\left[\left(\frac{H}{R}\right)^2 + \left(\frac{d\xi}{d\zeta}\right)^2\right]^{3/2}} + \frac{1}{Bo\xi\left[\left(\frac{H}{R}\right)^2 + \left(\frac{d\xi}{d\zeta}\right)^2\right]^{1/2}} \tag{14}$$

Donde $p = P = \frac{1}{2}gH$. Las condiciones de frontera adimensionales son ahora:

$$\begin{aligned} \text{en } \zeta = 1 : \xi = 0 \text{ y } \frac{d\xi}{d\zeta} &\rightarrow \infty \\ \text{en } \zeta = 0 : \xi = 1 \text{ y } \frac{d\xi}{d\zeta} &\tan\theta \end{aligned} \tag{15}$$

Se debe notar que los valores del ángulo de contacto pueden variar en el intervalo $[\mu; \frac{1}{4} = 2 + \mu]$ (Oliver et al, 1977), el ángulo máximo es originado por la presión de inyección y adquiere este valor justo antes del derrame de la gota.

❖ **Solución asintótica para $Bo < 1$**

Un caso importante de la formación de gotas, y posible de analizar de forma analítica a través de la ecuación 13, ocurre cuando $Bo < 1$, *i.e.*, los efectos capilares dominan sobre los gravitatorios. En este caso la ecuación diferencial resultante, obtenida a partir de la ecuación 14, es:

$$\frac{d^2\xi}{d\zeta^2} = \frac{1}{\xi} \left[\left(\frac{H}{R} \right)^2 + \left(\frac{d\xi}{d\zeta} \right)^2 \right] \tag{16}$$

Las soluciones de esta última ecuación, que obedece las condiciones de frontera (ecuación 15), donde se considere una geometría esférica donde $(r) = \phi = \pi/2$.

$$\xi = \sqrt{\left(\frac{H}{R} - \tan \alpha \right)^2 - \left(\zeta - \tan \alpha \right)^2} \tag{17}$$

En la Figura 26 se muestra los perfiles de estas gotas para casos de un mal y buen mojado (contacto de la gota en la interface del solido), respectivamente, y la condición de que emerjan desde arriba o desde abajo no juega un papel importante ya que el número de Bond no aparece explícitamente en la solución. Esto físicamente es correcto ya que cuando la gota es muy pequeña o la gravedad es muy débil, las gotas siempre son secciones de esferas, en lado superior izquierdo de la Figura 23 aparece la altura máxima H que alcanza la gota, aquí $R=1$ aunque las ecuaciones son para cualquier valor de R . Dada una condición de mojado de la gota sobre el tubo, es decir, dado el ángulo de contacto, se obtiene la ecuación del perfil de la gota y, consecuentemente, su volumen.

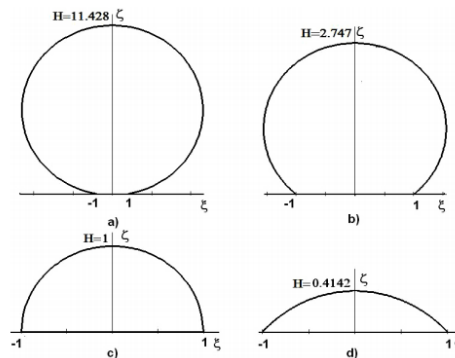


Figura 23. (a) Perfiles adimensionales de gotas con forma esférica: los casos son $\theta=170^\circ$, 140° , 90° y 45° que corresponden a a), b), c) y d).

El parámetro más importante a controlar para lograr una correcta unión de un inhibidor líquido para cualquier superficie metálica, es la combinación de la tensión superficial del líquido y la energía libre superficial del sólido a recubrir. Para una correcta comprensión del fenómeno de Mojabilidad se debe obtener el número de bond donde se utiliza un Tensiómetro, el cual se muestra en la Figura 24.

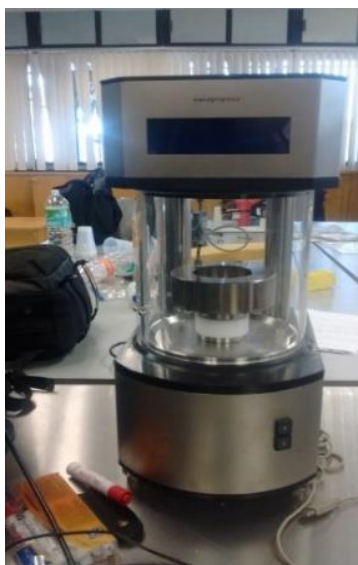


Figura 24. Tensiómetro de balanza DCAT, ubicación.

1.10 Métodos para el control de la corrosión

Actualmente existen métodos para controlar, disminuir y prevenir la corrosión; aunque no todas resultan efectivas, suelen controlar por algún determinado tiempo el proceso de corrosión, es por esto que la investigación en este campo se continua desarrollando, obteniendo una amplia gama de combinaciones y diversidad de métodos. Algunos de estos métodos han resultado eficaces, sin embargo tienen un impacto irreversible al ambiente, que ya han sido prohibidos por estrictas regulaciones ambientales (*Procuraduría Federal de Protección al ambiente, 2015*), (*UNEP, 2015*), (*OSHA-18001, 2015*). Dentro de los métodos más comunes para el control de la corrosión son la protección anódica, protección catódica, los recubrimientos y los inhibidores orgánicos e inorgánicos, los tratamientos mas comunes son mostrados en la Figura 25.

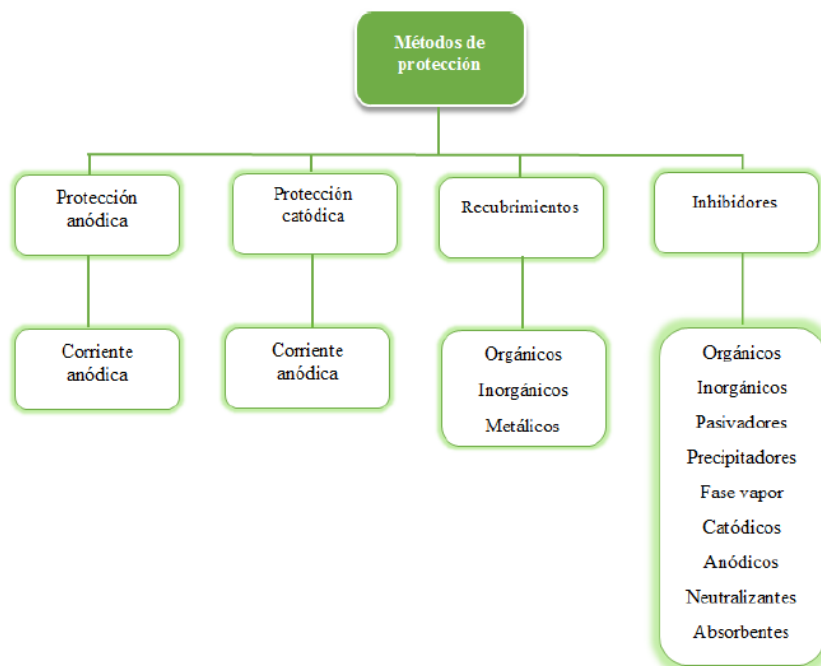


Figura 25. Clasificación de métodos para el control y prevención de la corrosión (Franco, 2014).

Dado que el objetivo principal de esta investigación se centra en el uso de extractos líquidos provenientes de plantas como posibles inhibidores orgánicos de la corrosión, es a este método de control al que se le brinda importancia en su descripción, por ser un método alternativo, novedoso y que no causa daños a la ecología.

1.11 Inhibidores de Corrosión

Por definición, un inhibidor de corrosión es cualquier constituyente de una fase cuya presencia no es esencial para que suceda un proceso electroquímico, pero que produce un retardo del mismo, al modificar el estado superficial del metal, (que cuando se añade en pequeñas concentraciones a un medio, disminuye eficazmente la velocidad de corrosión (Buralla, 2012). El uso de inhibidores de corrosión es una práctica muy común en las industrias, en sus instalaciones, equipos, maquinarias y estructuras, ya que es fundamental el ahorro de tiempos de mantenimiento y los paros en las líneas de producción, debido al desgaste por corrosión.

El uso de inhibidores resulta una gran solución contra este fenómeno, ya que al ser incorporados en pequeñas cantidades en un medio determinado (líquido o gaseoso) reduce la

acción nociva que ejerce el medio sobre el metal (Reyes, 2011). A continuación se describe la clasificación de los distintos tipos de inhibidores.

1.11.1 Clasificación de los Inhibidores de Corrosión

a) Inhibidores de interface

Son aquellos que controlan el proceso de corrosión mediante la formación de películas, las cuales se adsorben o absorben directamente sobre la superficie metálica, estos inhibidores se clasifican en líquidos y fase vapor (Räuchle & Díaz, 1990).

b) Fase líquida

Estos tipos de inhibidores se clasifican en anódicos, catódicos y mixtos, su funcionalidad dependerá del comportamiento que mantengan en el medio en donde se encuentren.

c) Inhibidores Pasivantes

Causan un cambio en el potencial de corrosión, forzando la superficie metálica a presentar una conducta pasiva ante la corrosión, estos inhibidores son aniones oxidantes, tales como iones: de cromato de nitrito, de nitrato y los no-oxidantes tales como el fosfato y molibdato. (Applegate, 1960)

d) Inhibidores Anódicos

Actúan formando un compuesto insoluble, el cual precipita en los lugares anódicos, evitando la reacción anódica y por lo tanto incrementando más el porcentaje de inhibición de la corrosión. Algunos inhibidores anódicos son: el carbonato, silicato, benzonato de sodio (Applegate, 1960).

e) Inhibidores Catódicos

Estos actúan sobre toda la superficie, aunque son menos eficaces. Disminuyen la corrosión mediante la formación de una capa o película de alta resistencia eléctrica sobre la superficie, la cual funciona como una barrera para la corriente de corrosión (*Applegate, 1960*). Inhiben la evolución de hidrógeno en soluciones ácidas o la reducción de oxígeno en soluciones alcalinas o neutras.

f) Inhibidores Orgánicos

En general la mayoría de estos inhibidores orgánicos están constituidos de dos partes esenciales, una parte nucleofílica que se encuentra localizada sobre el grupo funcional y que facilita la adsorción del inhibidor por medio de la formación de enlaces de coordinación (quimisorción), y otra parte hidrofóbica que actúa como repelente para los agentes corrosivos (*Olivares, 2005*). Los inhibidores orgánicos actúan formando películas protectoras que bloquean las reacciones anódicas y catódicas que se originan por la existencia de micro celdas electroquímicas sobre el metal debidas al medio, como se muestra en la Figura 26.

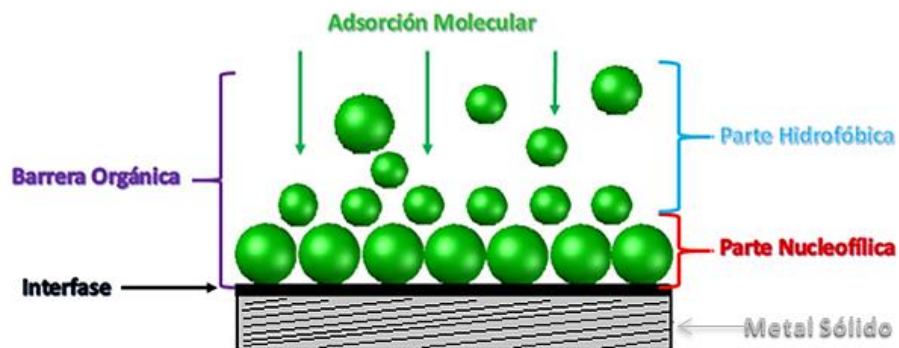


Figura 26. Adsorción de IC orgánico sobre una superficie metálica.

1.11.2 Aloe-Vera y Morinda Citrifolia como Inhibidores de Corrosión

En México, la sábila o Aloe-Vera puede ser encontrada en casi todo el país, comúnmente en los jardines domésticos, en zonas áridas y en algunos lugares como plantas silvestres, que se obtienen en plantaciones. La planta de Aloe-Vera tiene una alta capacidad de expansión periférica para ocupar espacios en las regiones centro, sur y sureste del país, (*M. Zavala y O.*

Velázquez, 2006) esto la hace ser una alternativa accesible con facilidades monetarias y geográficas para llegar a obtener este recurso. En la Figura 27 se muestra la forma y características de la planta de *Aloe-Vera*.

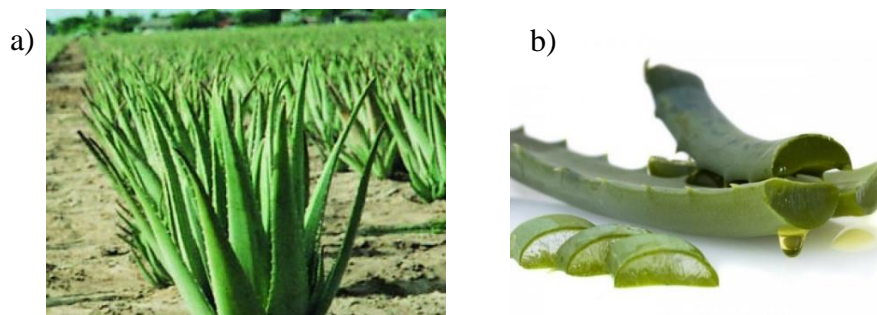


Figura 27. (a) Planta de Aloe-Vera, (b) Gel de Aloe-Vera, (sábila)

La sábila ha sido sujeta a distintas investigaciones, debido a sus grandes propiedades curativas y a la de su composición química, primordialmente el contenido del *Aloe-Vera* son Antraquinonas, el cual posee compuestos de aloína, diversos estudios reconocen que las antraquinonas son los principales compuestos químicos que actúan directamente sobre los virus impidiendo la absorción (Domínguez-Fernández, et al., 2012).

El gel del aloe vera está constituido principalmente de agua, mucilagos y otros carbohidratos, ácidos y sales orgánicas, enzimas, vitaminas y diversos minerales, la aplicación de este gel estimula la actividad de fibroblastos y la proliferación de colágeno, favoreciendo la cicatrización (Chithra, 1998).

Por otro lado, la *Morinda Citrifolia* es una planta arbórea o arbustiva de la familia de las rubiáceas originaria de Asia Sudoriental, la *Morinda Citrifolia* es un árbol pequeño de hojas perennes que crece en regiones costeras abiertas al nivel del mar, en áreas boscosas, rocosas y terrenos volcánicos hasta aproximadamente unos 400 metros sobre el nivel el mar, se identifica por su tronco recto, grandes hojas elípticas de color verde brillantes y sus flores tubulares blancas, su distintivo fruto amarillo de forma ovoide semejante a la granada (Nelson SC, 2003) Las características y forma de la *Morinda Citrifolia* se muestran en la Figura 28.

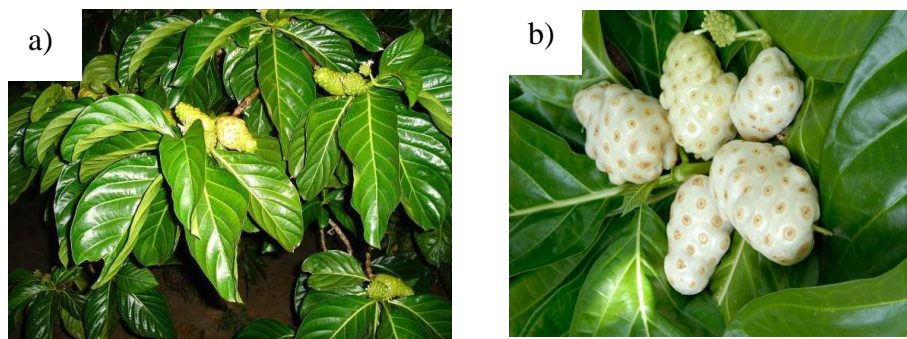


Figura 28. (a) Planta de *Morinda Citrifolia* y (b) Fruto Noni.

La *Morinda Citrifolia* ha sido de interés de estudio por muchos investigadores por sus propiedades, de los cuales se han identificado varios componentes principales en el Noni entre los que se encuentran el ácido octoanoico, potasio, vitamina C, terpenoides, alcaloides, antraquinonas tales como la rubiadina, la rubiadina- 1-metil éter y el glucósido de antraquinona (Ulloa *et al.*, 2012) actualmente investigaciones relacionadas con las posibles propiedades medicinales de la *Morinda Citrifolia*, han encontrado su acción antioxidante, analgésica, anti-inflamatoria y antibacteriana (Torres y Toranzo, 2009).

1.11.3 Métodos de estudio de los Inhibidores

Los métodos utilizados para comprobar la eficacia de los estudios de los mecanismos en los inhibidores son todos los usuales para la evaluación de los fenómenos de corrosión:

- ❖ Determinación gravimétrica de pérdida de peso.
- ❖ Determinación de i_{corr} : método de intersección, R_p , etc.
- ❖ Cuantificación de Picaduras
- ❖ Curvas de pasivación, etc.

Existen distintos mecanismos para determinar la efectividad del uso de estas sustancias como inhibidores de la corrosión, en este caso puede indicarse la eficacia del inhibidor a partir de la ecuación 18 (*Buralla, 2012*) u muy otras similares:

$$IE \% = \frac{V^{\circ}_{corr} - V_{corr}}{V^{\circ}_{corr}} \times 100 \quad (18)$$

Dónde:

IE= Porcentaje de Protección

V°_{corr} y V_{corr} = Velocidades de corrosión en ausencia y presencia del inhibidor

The background features a complex, abstract pattern of thin, dark green lines that swirl and flow across the page. Interspersed among these lines are small, solid green dots of varying sizes. The overall effect is organic and dynamic, reminiscent of a microscopic view of a biological structure or a stylized representation of a network.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

En este capítulo, se describen los procedimientos experimentales utilizados para el estudio de la evaluación de los extractos-líquidos del *ALOE-VERA* y *MORINDA CITRIFOLIA* como posibles inhibidores de la corrosión de aceros industriales en medio ácido.

2.1 Equipos y Materiales

- ❖ Electrodo de trabajo (probetas de acero AISI-1045, AISI-4140, AISI-8620).
- ❖ Cortadora de metales “Dewalt d28720”.
- ❖ Pulidora planar de metales “Presi; *le cube*”.
- ❖ Microscopio óptico “Olympus x-51”
- ❖ Taladro estacionario de banco “Surtek tb512”
- ❖ Celdas electroquímicas de diseño propio (acrílico, tornillos, rondana, empaque).
- ❖ Hojas de *Morinda Citrifolia* y *Aloe-Vera*.
- ❖ Potenciostato “Versastat-4 “PAR”.
- ❖ Electrodo de referencia (Ag/AgCl) “PAR”.
- ❖ Contra electrodo de grafito.
- ❖ Tensiómetro de balanza “Neurtek dcat-d21”
- ❖ Cámara rápida digital “Microscope 800x”

2.2 Medios Acuosa para pruebas de Corrosión

- ❖ Solución Nital 2% (Ácido nítrico 2ml + Alcohol etílico 110ml).
- ❖ Solución de HCl 1M.
- ❖ Solución de HCl 1M con adición de *ALOE-VERA* a diferentes concentraciones.
- ❖ Solución de HCl 1M con adición de *MORINDA CITRIFOLIA* a diferentes concentraciones.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**2.3 Metalografía**

El análisis metalográfico de un metal se hace sobre una probeta pulida del material que se ataca con un reactivo. Se realizaron los análisis en muestras de acero con especificación AISI 1045 (grado estructural), AISI 8620 (aplicación en maquinaria) y AISI 4140 (grado herramienta), para la obtención de estas muestras representativas, se adquirieron barras cilíndricas de los aceros mencionados con un diámetro de 12.7 milímetros y una longitud de 100 milímetros, se cortaron a un espesor de 5 mm aproximadamente con ayuda de una cortadora de metales de marca “Dewalt”.

2.3.1 Preparación de las probetas de acero (Desbaste y Pulido)

El proceso metalográfico comenzó al retirar los excesos derivados del corte y se procedió al desbaste de la superficie utilizando una serie de papel abrasivo de carburo de silicio con granulometrías del número, 80#, 200#, 400#, 600#, 800#, 1200#, en el que a mayor número es mayor la fineza del papel abrasivo. Finalmente, la superficie de los aceros se pule con un paño hasta llegar a un acabado espejo, esto se realizó en una pulidora manual, como la de la Figura 29.

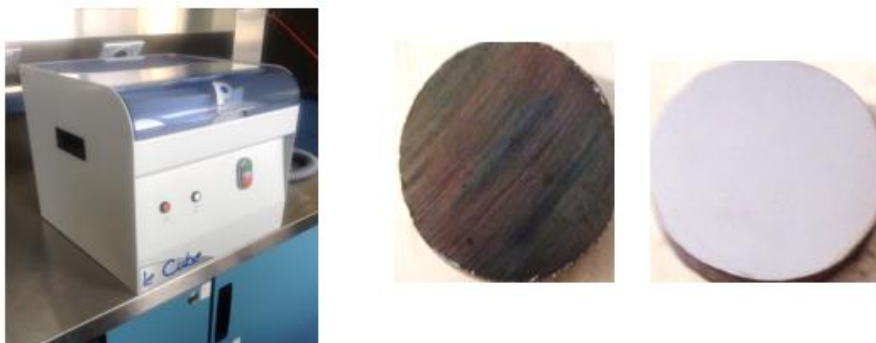


Figura 29. Pulidora manual LE CUBE marca PRESI. Probetas de acero antes y después de preparar la superficie.

2.3.2 Revelado microestructural de los aceros (ataque químico)

Después de obtener un acabado de la superficie casi a espejo en los aceros industriales, se continúa con un ataque químico superficial de los aceros mediante el reactivo NITAL al 2% para revelar los micro-constituyentes de la estructura. La Figura 30 muestra los contenedores utilizados para realizar el proceso del ataque químico.



Figura 30. Reactivos utilizados en el proceso de ataque químico de los aceros industriales; a) reactivo Nital al 2%, b) alcohol etílico y c) agua destilada.

El ataque químico consiste en exponer la superficie pulida de los aceros al menos 1 segundo en contacto con el reactivo Nital al 2%, seguido de un enjuague inmediato en alcohol etílico y finalmente con agua destilada, este proceso se repitió hasta obtener el revelado deseado de las microestructuras de los aceros, todos los aceros se revelaron a distintos tiempos debido a la composición química que estos tienen. Enseguida, el substrato metálico es secado con aire caliente. El proceso de ataque química se muestra en la Figura 31.



Figura 31. Proceso de exposición a la sustancia Nital al 2% de los aceros industriales.

Los detalles microestructurales revelados en los aceros bajo estudio se observan utilizando un microscopio óptico como el de la Figura 32, las imágenes se tomaron a diferentes aumentos.

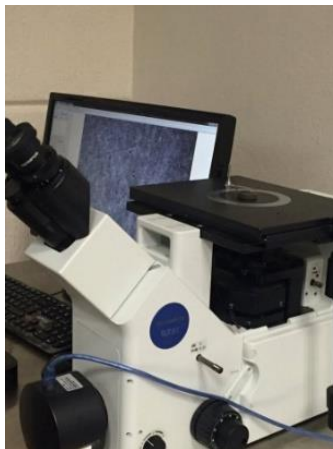


Figura 32. Análisis de la microestructura de los aceros industriales.

2.4 Proceso de manufactura de celdas electroquímicas.

La manufactura de las celdas electroquímicas estándar para tres electrodos se realizó en AUTOCAD un diseño con las medidas de las partes que componen la celda electroquímica, como la que se muestra en la Figura 33 (*Diseño propio del Dr. Héctor Herrera Hernández, Profesor investigador SNI-1*). Esta celda consiste de una tapa superior de acrílico que tiene unos orificios (diámetro de 5 milímetros) para insertar un micro electrodo de referencia de Ag/AgCl y un contra electrodo CE de grafito, mientras que el electrodo de trabajo WE (aceros de estudio) se coloca en la parte inferior entre dos placas de acrílico resistente. La solución corrosiva de prueba se coloca en un tubo de acrílico (diámetro de 16 milímetros) con volumen hasta 35 mililitros y mediante unos tornillos de precisión que sujetan las tapas y el tubo, para mantener siempre el contacto íntimo entre el metal y la solución de prueba durante todo el momento que requiera la experimentación.

En la Tabla 2 se presentan las piezas diseñadas por computadora para la manufactura y el ensamble de las celdas electroquímicas.

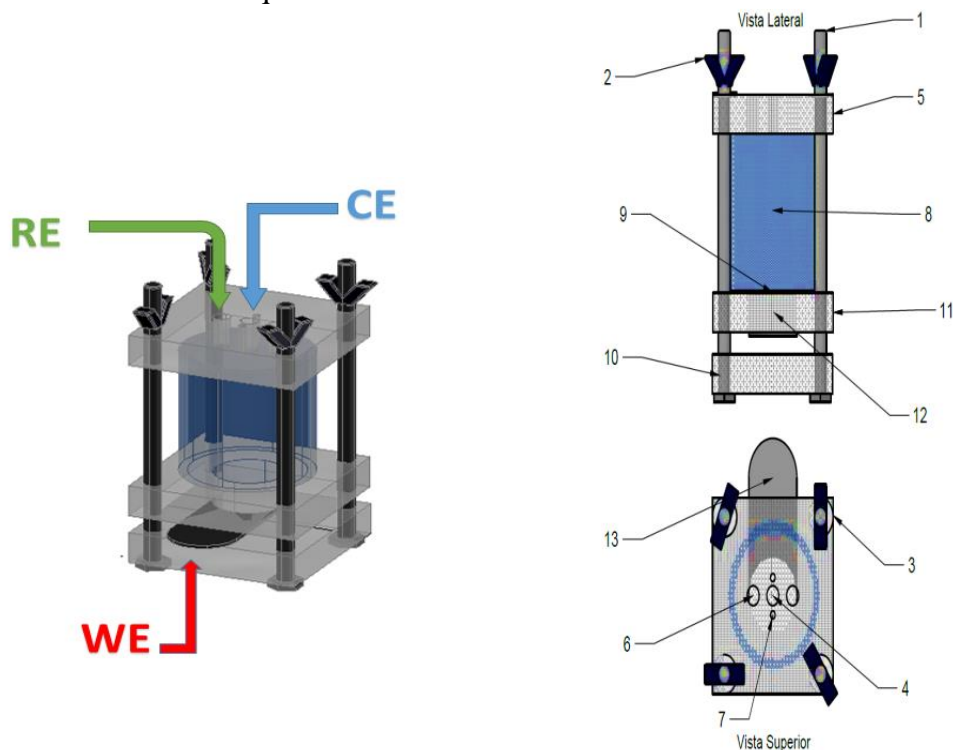


Figura 33. Diagrama del prototipo de celdas electroquímicas estándares para tres electrodos realizado asistido por computadora en AUTOCAD.

Tabla 2. Especificaciones de celda electroquímica

Tabla 2					
#PIEZA	Cantidad	DESCRIPCIÓN	#PIEZA	Cantidad	DESCRIPCIÓN
1	4	tornillo roscado 105x5mm	7	2	cavidad contra-electrodo 3mm
2	4	tuerca de mariposa 5mm	8	1	cuerpo de celda 38x40mm
3	8	rondana 5mm	9	1	aislador (o-ring)38mm
4	1	cavidad electrodo de referencia 5mm	10	1	parte inferior de celda 10x55cm
5	1	parte superior de celda 10x55mm	11	1	parte intermedia celda 10x55cm
6	2	cavidad contra-electrodo 5mm	12	1	cavidad expuesta a solución 25.4mm
			13	1	placa conductora de electricidad

A las tres placas de acrílico de acuerdo a las especificaciones de la Tabla número 2 se realizan barrenos utilizando un taladro de banco marca SURTEK, como se muestra en la Figura 34a.

Así mismo se cortaron los cilindros que conforman el cuerpo de la celda con una cortadora marca DEWALT (ver Figura 34b), después se remueven los excesos con una lijadora para seguir con el ensamble bien ajustado.

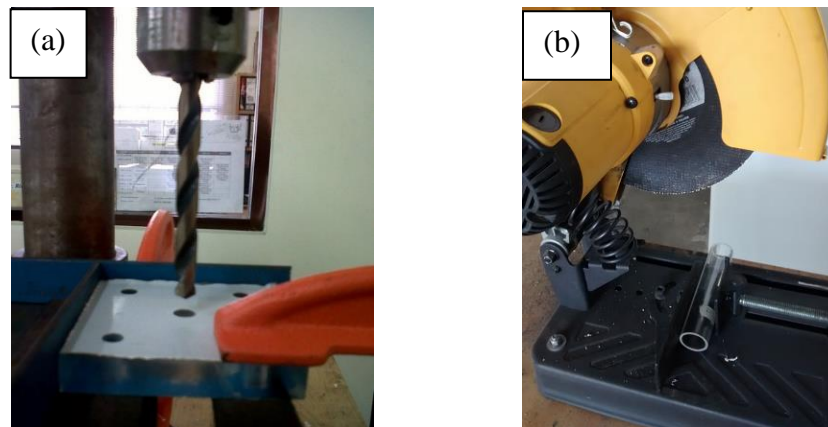


Figura 34. (a) Barrenado de acrílicos (b) Cortado de tubo de acrílico para cuerpos de celda electroquímica.

El ensamble de las celdas electroquímicas con todos sus componentes mencionados en la Tabla 2, se realizó tal y como se muestra en la Figura 35. El proceso de ensamble fundamental inicia de izquierda a derecha, considerando un total de 13 piezas para obtener una celda electroquímica de tres electrodos de diseño propio (Herrera, 2007).

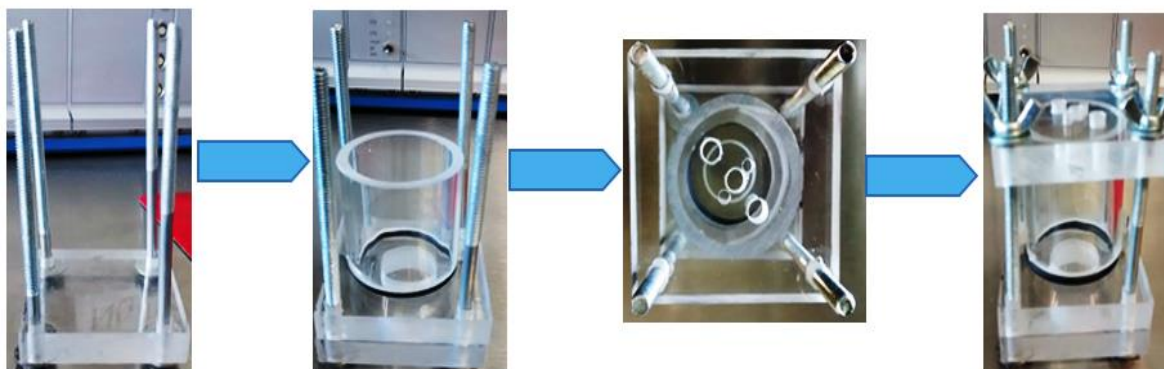


Figura 35. Proceso de ensamble de una celda electroquímica.

2.5 Extracción de los agentes líquidos naturales (inhibidores)

2.5.1 Aloe-Vera (Sábila)

La recolección de las hojas de la planta de Aloe-Barbadensis, (mejor conocida como Aloe-Vera o sábila en México) para extraer el gel cristalino involucra una selección cuidadosa en la zona conurbada del Centro Universitario UAEM Valle de México. El proceso de extracción inicia con el lavado de las hojas frescas con agua para quitar residuos y agentes ajenos a la hoja, tal como se observa en la Figura 36. Realizando cortes manuales a la hoja y, seccionando con un cuchillo las capas exteriores a partir de aproximadamente 25 milímetros desde la base de la hoja abarcando su extremo superior y las partes laterales para tener un mayor acceso al GEL, Figura 37.



Figura 36. Lavado de las hojas de Aloe-Vera.



Figura 37. (a) Gel de Aloe-vera (b) Cortes laterales de las hojas de Aloe-Vera.

El GEL cristalino se extrajo completamente con ayuda de una cuchara, la cual rasgará con un movimiento constante, el GEL se dirigirá hacia el vaso de precipitados para su próxima utilización como inhibidor (Figura 38). Para evitar una posible contaminación y oxidación del gel, el contenedor se aisló del medio ambiente con una tapa de plástico para evitar su pronta descomposición.

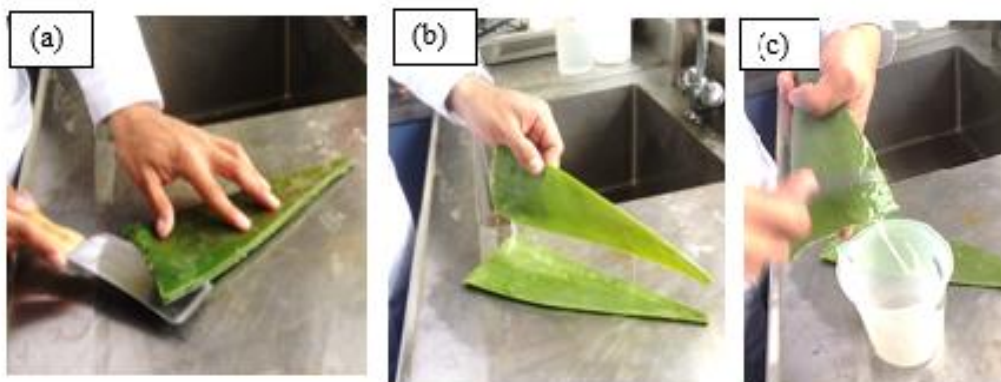


Figura 38. (a) Corte lateral de la hoja (b) Separación de los lados superior e inferior de la hoja (c) Obtención del extracto de Aloe-Vera.

2.5.2 Morinda Citrifolia (NONI)

La recolección de la planta de *Morinda Citrifolia* se realizó en el estado de Veracruz, región Boca del Río y seleccionada en grandes hojas elípticas de color verde brillantes, como la que se observa en la Figura 39. Para obtener el extracto de las hojas de MORINDA CITRIFOLIA fue necesario realizar un lavado para posteriormente secarlas a temperatura ambiente. Este proceso tardó 3 meses, cumpliendo este tiempo las hojas secas fueron trituradas manualmente en un mortero de porcelana (Figura 40a y 40b), hasta obtener 100g de polvo fino de Morinda Citrifolia (Figura 40c).



Figura 39. Hoja de Morinda Citrifolia seca.



Figura 40. Molienda de las hojas de Morinda Citrifolia

Al obtener el polvo de Morinda, se mezcló 10 grs en etanol concentrado al 98%. La mezcla Morinda + Etanol se calentó a una temperatura de 60°C para lograr una mejor homogenización, este procedimiento se muestra en la Figura 41.



Figura 41. Mezcla homogénea de Morinda Citrifolia y etanol concentrado al 98%.

2.6 Evaluación de la eficiencia de Inhibición (EI) de los extractos-líquidos por Espectroscopia de Impedancia Electroquímica y Polarización Potenciodinámica.

Las pruebas electroquímicas se realizaron utilizando un potenciostato VERSASTAT-4 de la marca Princeton Applied Research (PARSTAT), este aparato es como el que se muestra en la Figura 42. El potenciostato es operado por medio de una computadora utilizando el software otorgado por el fabricante (VERSASTUDIO) en el que se ofrece una gran variedad de experimentos para el estudio de los procesos electroquímicos y mecanismos de corrosión.



Figura 42. Equipo de medición electroquímica VERSASTAT-4 (potenciostato-galvanostato).

La eficiencia de inhibición (EI%) se calcula a través de pruebas de polarización potenciodinámica (curvas de TAFEL) y espectros de impedancia electroquímica EIS, en el que se obtiene la resistencia a la transferencia de carga R_{tc} (ohms.cm²) indicador de la velocidad de corrosión, este valor se compara con los obtenidos mediante pruebas experimentales en presencia de inhibidor $R_{tc-inhb}$ y sin inhibidor $R_{tc-blanco}$. Este cálculo se obtiene analizando los diagramas EIS y aplicando la ecuación siguiente;

$$IE \% = \frac{V_{corr}^{\circ} - V_{corr}}{V_{corr}^{\circ}} \times 100 \tag{18}$$

Dónde: *IE* es el porcentaje de protección, (V_{corr}°) y (V_{corr}) son las Velocidades de corrosión en ausencia y presencia de inhibidor.

2.6.1 Evaluación Electroquímica

Pruebas de polarización potenciodinámica (TAFEL) y curvas de impedancia electroquímica EIS fueron realizadas utilizando una celda electroquímica para tres electrodos, en la Figura 43 se muestra el prototipo de celda fabricado, usando un electrodo de cloruro de plata (Ag/AgCl) como electrodo de referencia RE, una barra de grafico que actúa como contra electrodo CE, o conocido como electrodo auxiliar y como electrodo de trabajo WE las probetas de acero 1045, 8620 y 4140.

Pruebas a diferente concentración del inhibidor liquido-natural se llevaron a cabo; las pruebas se iniciaron con una base de 15ml de HCl-1M en ausencia y en presencia de los inhibidores (Extracto de Sábila **ES**) y extracto etanólico de Morinda Citrifolia **EMC**), la dosis utilizada de inhibidor fueron 2, 4, 6, 8, 10 12 14 16 ml de esta manera incrementando en 2 ml la solución hasta llegar a 30 ml en la celda electroquímica; teniendo un seguimiento de los rangos de potencial para localizar dos parámetros críticos; E_{prot} (potencial de corrosión) y I_{corr} (corriente de corrosión) seguido de la evaluación de Espectroscopia de impedancia Electroquímica (EIS), en el que se obtiene la resistencia a la trasferencia de carga R_{tc} , y su capacitancia de carga en la doble capa electroquímica. Para esto, se emplearon las técnicas potenciodinámicas y la de EIS en la representación de Nyquist, dichas evaluaciones fueron realizadas a presión atmosférica y temperatura ambiente de la zona metropolitana del estado de México, es decir a condiciones normales de laboratorio. Se siguió la metodología de acuerdo a la Tabla 3. Donde se hicieron las pruebas por cuadruplicado para observar la reproducibilidad de los resultados y obtener una media del comportamiento de los inhibidores-líquidos.

Tabla 3. Metodología de pruebas electroquímicas

ELECTRODO DE TRABAJO	AMBIENTE	No. de PRUEBAS
AISI-1045	1M de HCl	4
AISI-1045	1M de HCl + Aloe-Vera	4
AISI-1045	1M de HCl + Morinda C.	4
AISI-8620	1M de HCl	4
AISI-8620	1M de HCl + Aloe-Vera	4
AISI-8620	1M de HCl + Morinda C.	4
AISI-4140	1M de HCl	4

AISI-4140	1M de HCl + Aloe-Vera	4
AISI-4140	1M de HCl + Morinda C.	4

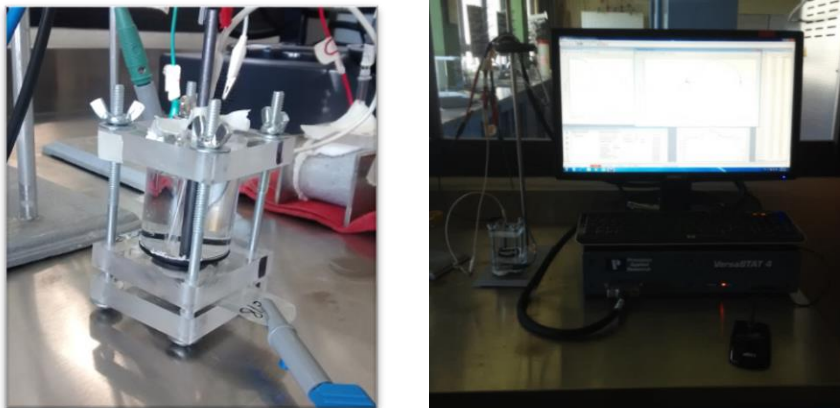


Figura 43. (a) Arreglo estándar de la celda electroquímica; RE electrodo de referencia (conector blanco), CE electrodo auxiliar (conector rojo) y electrodo de trabajo muestra metálica WE (conector azul). (b) Celda electroquímica conectada al Potenciostato VERSASTAT-4

La validación de los resultados, las pruebas electroquímicas se inician con una calibración del equipo VERSASTAT-4 mediante un circuito eléctrico equivalente compuesto por elementos RCA. El circuito que se muestra en la Figura 44 está diseñado propiamente por este mismo grupo de investigación, en el que se tiene un resistor de 3.3 kΩ conectado en paralelo a un capacitor de 1 μF, estos a su vez se conectan en serie con dos resistores uno de 220 Ω y otro de 56Ω, estos elementos montados en una placa CIRCUITO 1, se utiliza para la calibración del potenciostato y para el ajuste o validación de los datos de impedancia. En la Figura 45 se muestra el espectro EIS del CIRCUITO 1 obtenida con el Potenciostato & galvanostato VERSASTAT-4, los resultados obtenidos muestran un semicírculo muy bien definido con un diámetro ~3.4 KΩ y 1.2 μF parámetros similares a los elementos del circuito, esto sugiere que el equipo se encuentra en condiciones y una confiabilidad óptima para realizar pruebas electroquímicas.

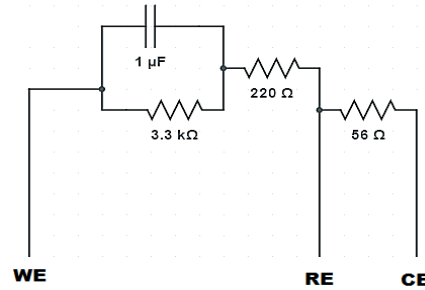


Figura 44. Circuito eléctrico equivalente utilizado para los ajustes de datos de impedancia en el equipo VERSASTAT-4.

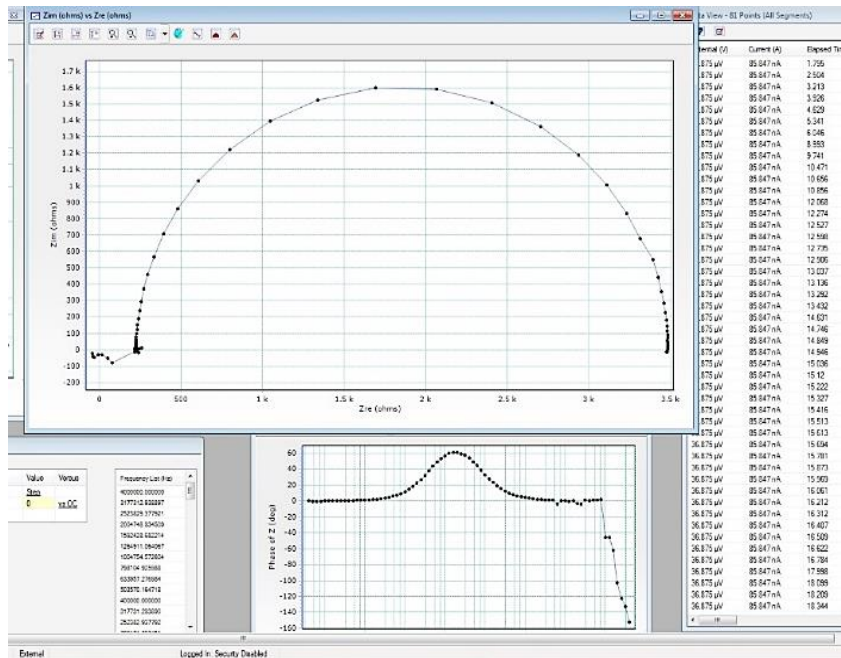


Figura 45. Prueba de calibración del equipo VERSASTAT-4.

También se determinaron las propiedades con las que trabajaría el potencióstato-galvanostato VERSASTAT-4 para las pruebas EIS y TAFEL como se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros experimentales en el potencióstato-galvanostato VERSASTAT-4 para las pruebas EIS y TAFEL.

Propiedades TAFEL	Valor	Propiedades EIS	Valor
Potencial Inicial	-0.25 V	Frecuencia Inicial	4,000,000 Hz
Potencial Final	0.25 V	Frecuencia final	0.001 Hz
Altura de los datos	0.5 (mV)	Amplitud	10
Tiempo de medición	0.3 s	Escala	Logarítmico
Velocidad de barrido	1.66 (mV/s)	Número de puntos	30
Total de puntos	1001	Puntos por década	10
		Calidad de los datos	1

A partir de un ajuste de los datos experimentales con un circuito eléctrico equivalente apropiado como los de la Figura 46, para el circuito “R(QR)” (Figura 46a) se utilizó para caracterizar los datos experimentales sin inhibidor (blanco) y para el circuito “R (Q(R(QR)))” (Figura 46b) se utilizó para caracterizar los datos experimentales de impedancia en presencia de un inhibidor como el extracto del *Aloe-Vera* o de *Morinda Citrifolia*, donde se calculan los parámetros del circuito para entender y determinar los mecanismos de corrosión e de inhibición, y la cinetica de reacción de las moléculas orgánicas.

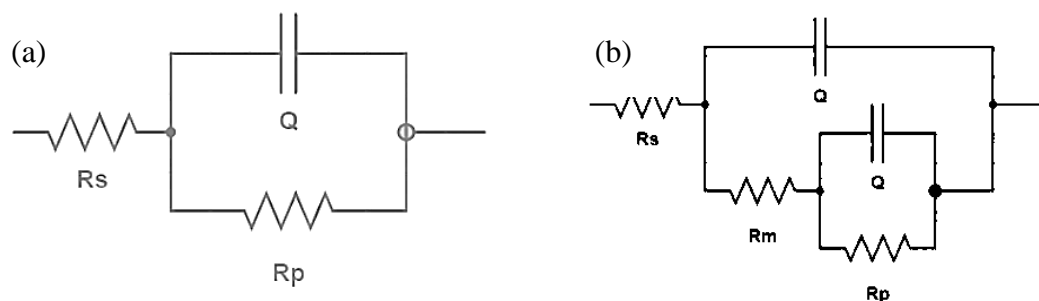


Figura 46. Circuitos eléctricos equivalentes utilizados para el ajuste de datos de impedancia donde RS: resistencia a la solución Q: elemento de fase constante, RTC: resistencia a la transferencia de carga y R_{mol}: resistencia de las moléculas.

2.7 Tensión Superficial

Las pruebas de tensión superficial y viscosidad para los extractos de *Aloe-Vera* y *Morinda Citrifolia* se realizaron en la sección de estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Azcapotzalco del Instituto Politécnico Nacional como parte de mi residencia profesional, donde empleando un tensiómetro de balanza DCAT (Figura 47a) y captando mediante una cámara rápida (Figura 47b) las forma adimensional asíntota que se forma al dejar caer gotas de los extractos orgánicos sobre los sustratos metálicos, además e posible determinar la mojabilidad del extracto-líquido que existe en las superficies de los sustratos metálicos, así como las fuerzas de cohesión y atracción.

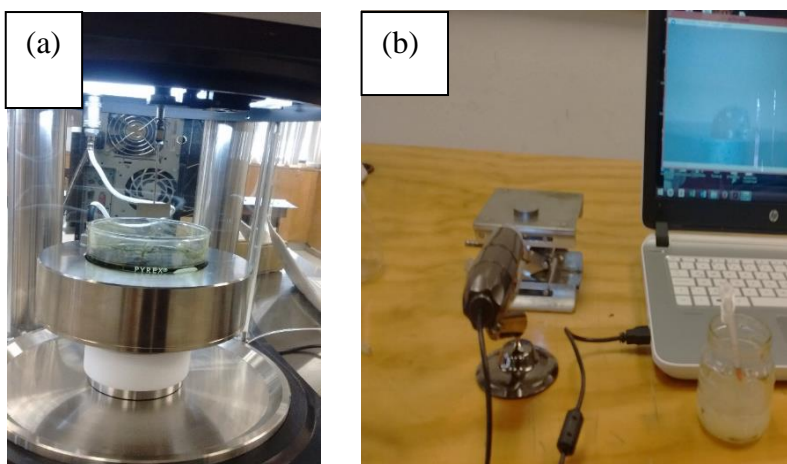


Figura 47. (a) Tensiómetro de balanza DCAT con prueba en proceso (b) Cámara Rápida Digital Microscope 800x

The background features a light blue grid pattern that fades towards the right. Overlaid on this are several flowing, wavy lines in shades of blue and purple, creating a sense of movement and depth. Three bright, multi-pointed starburst effects are scattered across the design, adding a futuristic or high-tech aesthetic.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Análisis metalográfico de los aceros industriales

El revelado de los detalles microestructurales de los aceros se logró mediante un ataque químico con el reactivo Nital al 2%, después de obtener un correcto desbastado y pulido de los aceros industriales.

3.1.1 Acero AISI-1045

La microestructura del acero grado estructural AISI-1045 se muestra en la Figura 48c, se puede apreciar la aparición de la cementita-Fe₃C (fase de color blanco) como una red que delimita el borde de los granos de la austenita, mientras que la fase oscura que se observa en la microestructura está asociada a la precipitación de la estructura perlítica (Ferrita, Fe-α + Cementita, Fe₃C), por lo que podemos identificar a este acero como cementita proeutectoide, debido a que sus fases se han formado antes de que se dé la reacción eutéctica.

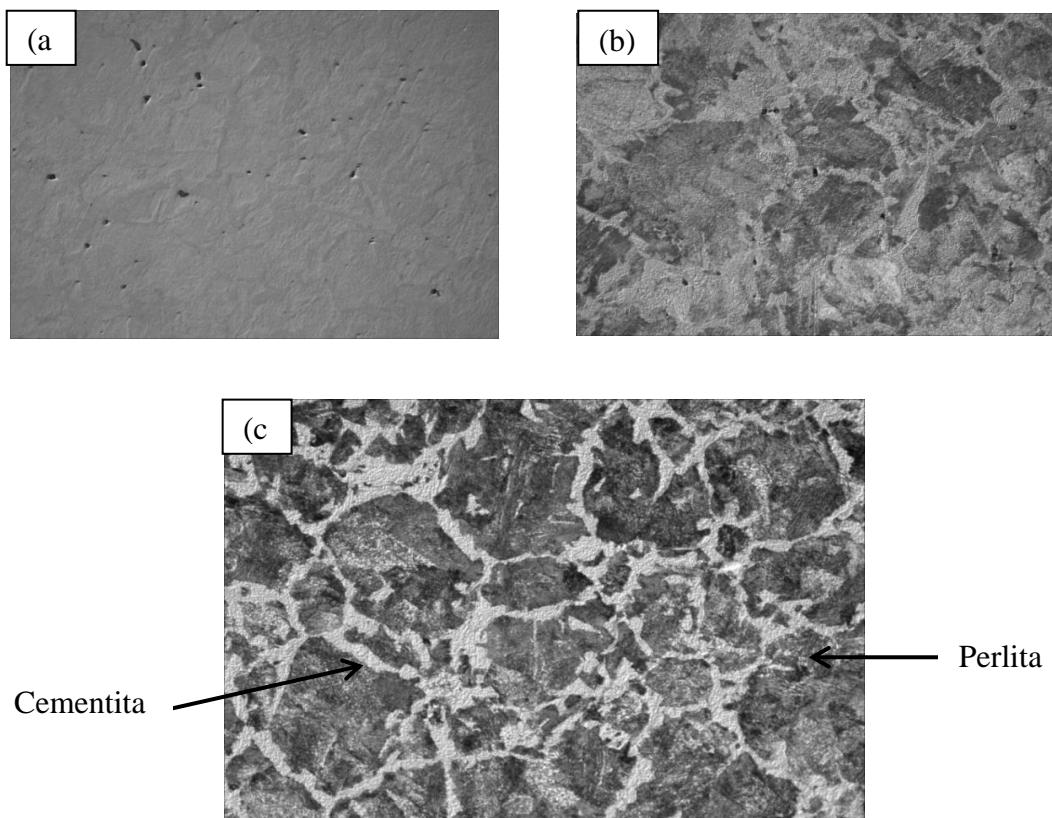


Figura 48. Microestructura del acero grado estructural AISI-1045 (perlita y cementita proeutectoide), a) sin ataque químico, (b) ataque a 2 segundos y (c) ataque a 3 segundos.

3.1.2 Acero AISI-4140

Las imágenes de la Figura 49 muestran los detalles microestructurales revelados y obtenidas por microscopía óptica a 50x. El acero AISI-4140 (grado herramienta) a 2 segundos de ataque con el reactivo Nital al 2%, muestra una microestructura compuesta principalmente por dos fases, la fase en color blanco se relaciona a la formación de la ferrita, Fe- α , debido a la descomposición de la austenita, Fe- γ , en condiciones de equilibrio, y la fase oscura que aparece en pequeñas laminas, es la fase eutéctica conocida como perlita (Ferrita, Fe- α + Cementita, Fe₃C), es muy común encontrar este tipo de microestructuras en aleaciones que contiene menor de 0.77%C.

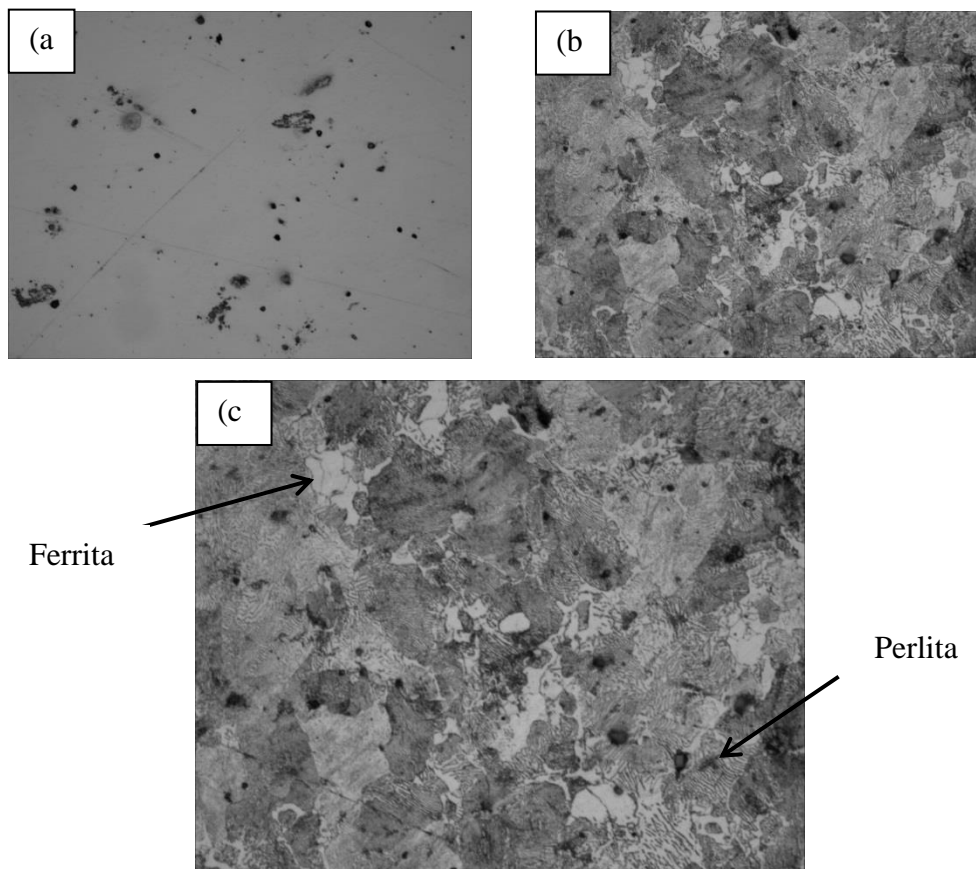


Figura 49. Microestructura del acero grado herramienta AISI-4140 (perlita + ferrita proeutectoide), a) sin ataque químico, (b) ataque a 1 segundo y (c) ataque a 2 segundos.

3.1.3 Acero AISI-8620

El acero AISI-8620 es ampliamente utilizado para componentes de maquinaria por lo que se requiere tener muy buena dureza superficial y gran tenacidad, este acero muestra una microestructura compuesta por agujas de Ferrita Widmanstatten (Figura 50c) que crecen en los límites de grano de la matriz de austenita retenida (fase de color blanco), estas agujas aparecen desde a los 3 segundos de ataque de la superficie del acero, pero se definieron mejor a los 4 segundos de exposición.

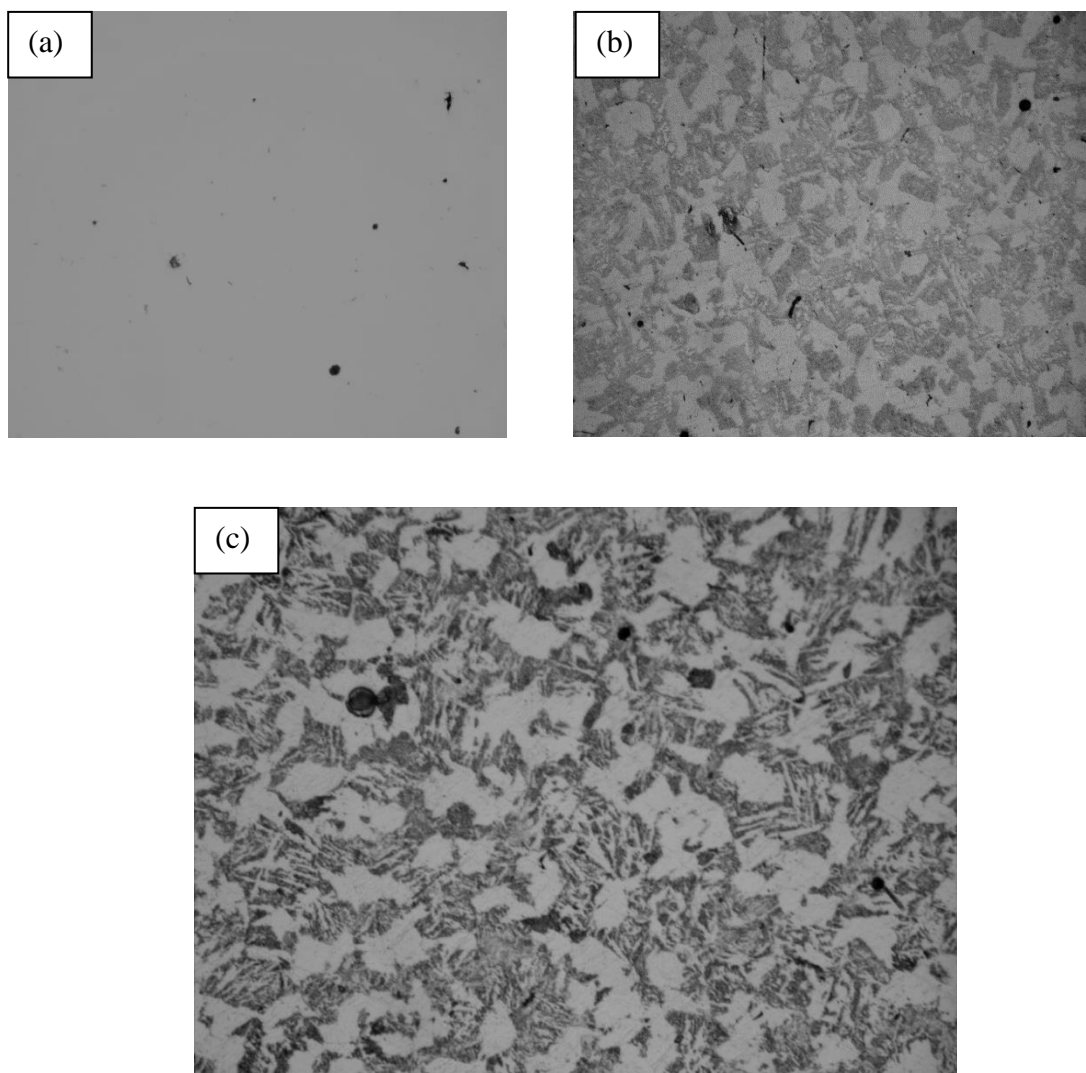


Figura 50. Microestructura del acero grado maquinaria AISI-8620, a) sin ataque químico, (b) ataque a 3 segundos ((perlita y cementita proeutectoide) y (c) ataque a 4 segundos (ferrita Widmanstatten y austenita retenida).

3.2 Evaluación Electroquímica

3.2.1 Corrosión de aceros industriales inmersos en HCl 1M

En las Figuras 51, 52, y 53 se muestran los diagramas de impedancia electroquímica (representación de Nyquist Z_{real} vs Z_{imag}) para los tres aceros inmersos en HCl 1M en ausencia de inhibidor. Se puede apreciar que la degradación de los aceros por corrosión puede asociarse al acoplamiento de fases diferentes (par galvánico), esto se determina por una distorsión y disminución de la magnitud del semicírculo (Z_{real}) a medida que se incrementa la concentración del agente corrosivo HCl. Debido a esto, la resistencia a la transferencia de carga (e^-) R_{tc} disminuye desde 90 a hasta $55 \Omega\text{-cm}^2$ durante los primeros 60 minutos de inmersión, esto se observa para el acero 1045, Figura 51. Mientras que para el acero 4140 (Figura 52) y 8620 (Figura 53) la transferencia de carga disminuye a partir de los 300, 200, 160, 120, 100 y continuando con el proceso de corrosión por picaduras hasta $30 \Omega\text{-cm}^2$.

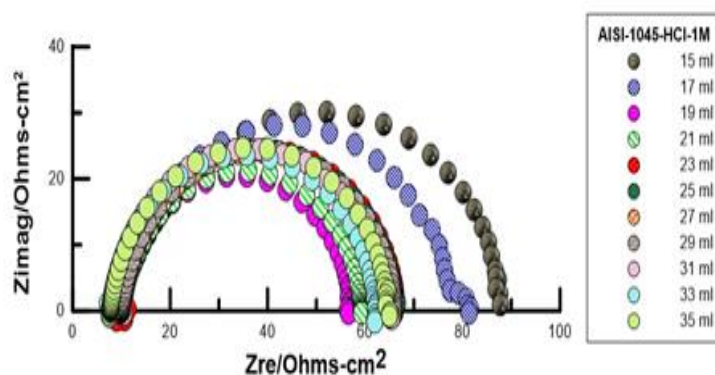


Figura 51. Diagramas de Nyquist del acero 1045 inmerso en HCl 1M a diferente concentración, sin inhibidor

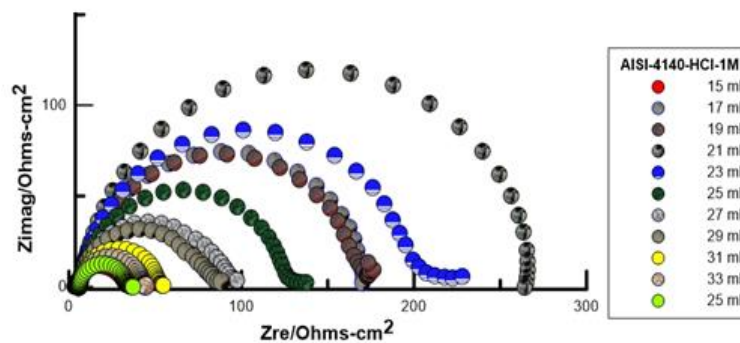


Figura 52. Diagramas de Nyquist del acero 4140 inmerso en HCl 1M a diferente concentración, sin inhibidor.

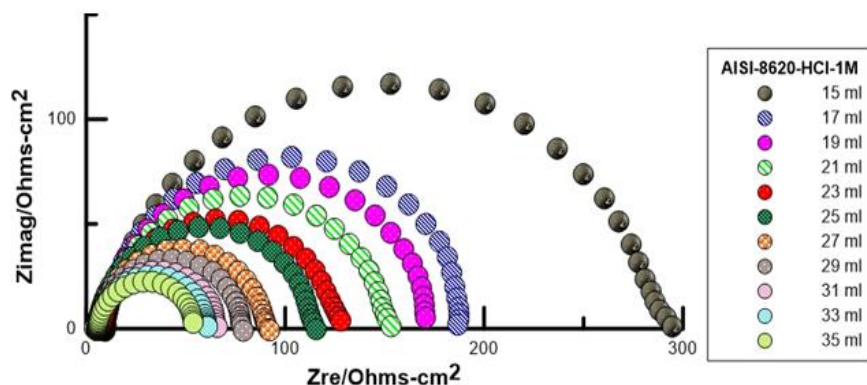


Figura 53. Diagramas de Nyquist del acero 8620 inmerso en HCl 1M a diferente concentración, sin inhibidor.

De acuerdo a un análisis de la superficie por microscopia óptica después de las pruebas de corrosión (Figura 54), se aprecia que el mecanismo de corrosión se manifiesta por un proceso de iniciación y propagación de picaduras, estas se observan en forma esférica y se distribuyen en forma aleatoria en toda la matriz de acero. La combinación de las fases ferrita-cementita o ferrita-perlita, o cementita-perlita establecen un gran diferencial de potencial muy marcado en presencia del electrolito HCl, obedeciendo a un mecanismo de disolución galvánica local que permite el intercambio de iones en la superficie. En estas condiciones, las reacciones de transferencia de carga (anódica y catódica) se desarrollan entre las fases locales dando como resultado una corrosión localizada del acero, es decir corrosión por picaduras. Por lo que las fases y las condiciones interfaciales tienen un rol muy importante sobre la velocidad de la corrosión.

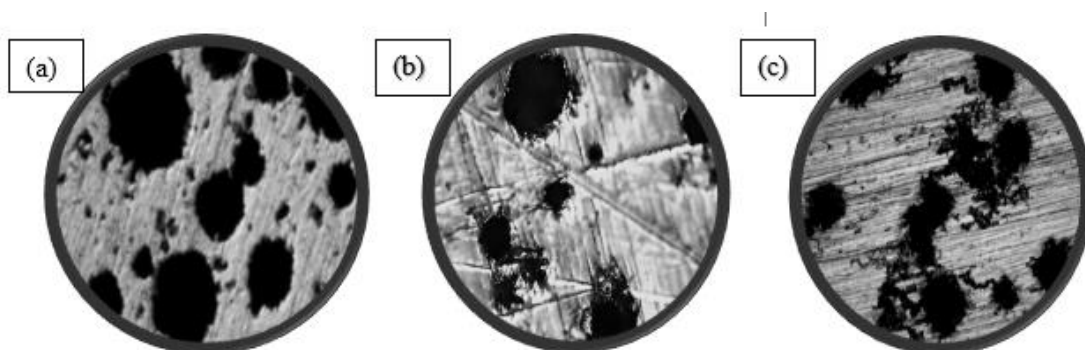


Figura 54. Corrosión por picaduras en los aceros AISI-1045 (a), AISI-4140(b), AISI-8620(c) a 50x después de exposición en HCl-1M.

A partir de un ajuste de los datos experimentales EIS con un circuito eléctrico equivalente (ECC) como el mostrado en la Figura 14a, este circuito está compuesto por resistores y capacitores conectados en serie o serie-paralelo, dependiendo del arreglo experimental. Los resultados de los ajustes de los diagramas de impedancia para los aceros industriales evaluados en HCl 1M se obtienen utilizando un software (Zsim modelación) basándose en el método numérico de mínimos cuadrados, los resultados se enlistan en la Tabla 5. Los resultados muestran que el valor de R_{tc} disminuye gradualmente para los tres aceros a medida que se agrega el agente corrosivo indicando que la carga de iones en la doble capa electroquímica es abundante, esto indica la susceptibilidad de un daño continuo por corrosión localizada o por picaduras.

Tabla 5. Parámetros de impedancia para los aceros AISI inmersos en HCl 1M.

Acero 1045 en HCl 1M									
Parámetro	15 ml-HCl	+2ml	+4ml	+6ml	+8ml	+10ml	+12ml	+14ml	+16ml
E_{corr}/mV	-321.42	-297.19	-271.12	-276.95	-280.02	-279.86	-280.02	-285.52	-283.08
$R_{tc}/\Omega\text{-cm}^2$	81.89	69.24	47.6	49.24	56.84	56.61	55.90	56.43	56.73
$C_{dl}/\mu F\text{cm}^{-2}$	162	198	230	384	305	347	391	420	452
Acero 4140 en HCl 1M									
E_{corr}/mV	-394.4	-386.14	-387.6	-385.52	-382.5	-382.8	-386.1	-381.2	-383.07
$R_{tc}/\Omega\text{-cm}^2$	90.00	90.00	75.99	81.01	77.28	68.73	52.78	46.23	45.17
$C_{dl}/\mu F\text{cm}^{-2}$	99.1	124	143	179	208	255	286	330	396
Acero 8620 en HCl 1M									
E_{corr}/mV	-422.02	-376.32	-376.51	-365.28	-365.59	-365.59	-365.9	-373.56	-366.2
$R_{tc}/\Omega\text{-cm}^2$	281.2	183.9	166	143.8	119	109.5	85.59	74.16	61.44
$C_{dl}/\mu F\text{cm}^{-2}$	250	378.7	546	656	799.7	889.4	1004.3	1178.4	1307.4

Por otro lado, los gráficos de TAFEL (curvas de $\log I$ vs E) para los aceros AISI 1045, 4140 y 8620 en HCl 1M a diferentes concentraciones (desde 15 hasta 35 ml de HCl) en ausencia de inhibidor se muestran en las Figuras 55, 56 y 57. En estos gráficos se muestra el comportamiento de los aceros, donde la densidad de la corriente de corrosión (I_{corr}) (Tabla 6) aumenta para cada acero, a medida que pasa el tiempo de inmersión e incrementa la cantidad del agente corrosivo, también se aprecia un desplazamiento con dirección a la región

anódica o de oxidación para los aceros 1045 y 4140, mientras que para el acero 8620, tiene un desplazamiento para la región catódica o de reducción.

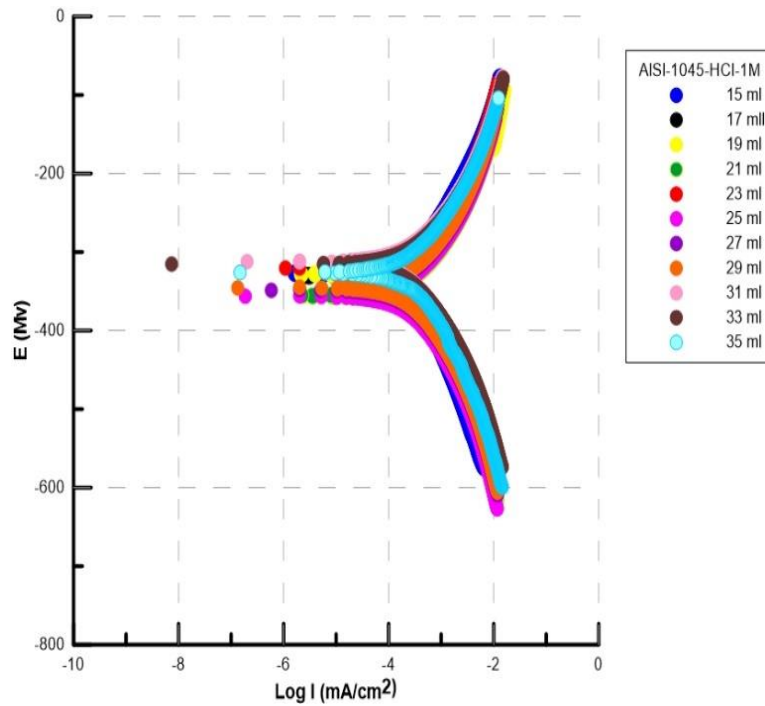


Figura 55. Diagramas de TAFEL del acero 1045 inmerso en HCl 1M a diferente concentración, sin inhibidor.

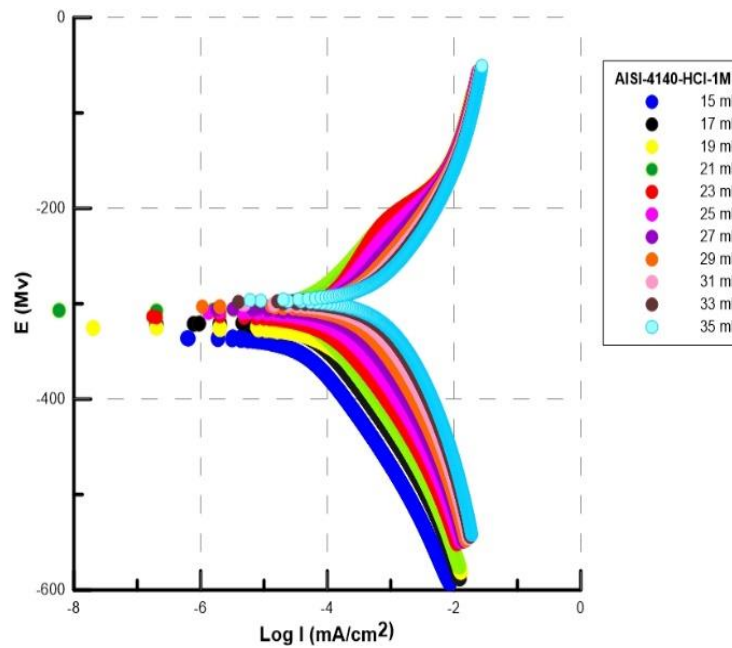


Figura 56. Diagramas de TAFEL del acero 4140 inmerso en HCl 1M a diferente concentración, sin inhibidor.

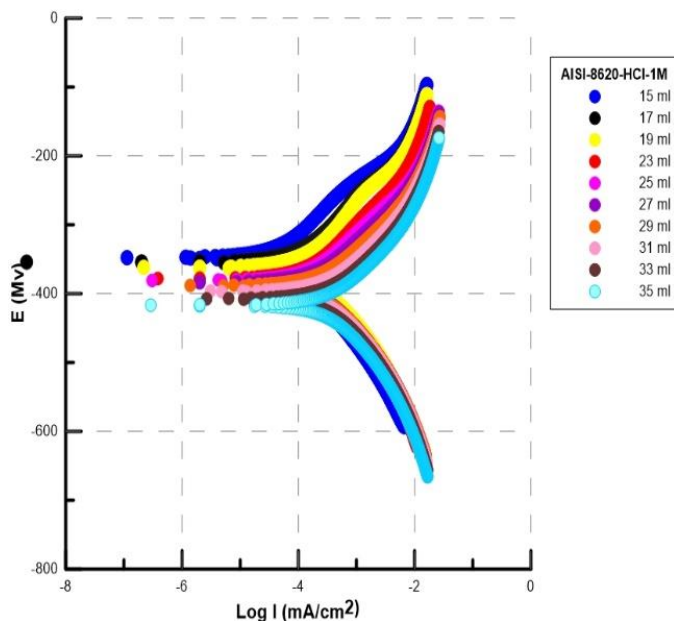


Figura 57. Diagramas de TAFEL del acero 8620 inmerso en HCl 1M a diferente concentración, sin inhibidor.

Tabla 6. Parámetros de TAFEL para los aceros AISI inmersos en HCl 1M sin inhibidor.

AISI-1045 HCl-1M					
HCl-1M	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	Bc	Ba	Chi-Square
inicial: 15ml	-356.4	434.87	177.6	149.8	62.943
+2ml	-328.25	387.23	160.41	116.42	30.24
+4ml	-328.25	387.23	160.41	116.42	30.24
+6ml	-320.49	442.7	174.11	151.96	51.32
+8ml	-320.49	440.18	173.72	151.02	50.31
+10ml	-348.69	427.56	169.83	149.97	106.44
+12ml	-345.66	419.99	168.34	149.53	103.61
+14ml	-312.23	416.13	160.21	139.81	80.8
+16ml	-315.29	461.98	162.87	143.63	57.34
AISI-4140 HCl-1M					
HCl- 1M	E_{corr} (mV)	I_{corr} μ A	Bc (mV)	Ba (mV)	Chi-Square
Inicial: 15 ml	-325.39	110.25 nA	113.99	101.49	212.34
+2ml	-321.56	78.27	113.48	90.515	136.69
+4ml	-309.21	184.15	121.99	110.39	142.35
+6ml	-305.65	326.94	139.94	121.97	98.02
+8ml	-309.22	181.24	119.98	109.92	138.46
+10ml	-309.21	184.15	121.99	110.39	142.35
+12ml	-300.71	784.88	173.23	148.98	54.164
+14ml	-303.03	472.67	152.07	131.05	114.65
+16ml	-296.47	1.4mA	203.66	175.06	34.82

AISI-8620 HCl-1M					
HCl-1M	E_{corr} (mV)	I_{corr} μ A	B_c (mV)	B_a (mV)	Chi-Square
Inicial: 15ml	-354.24	123.7	123	105.7	274.68
+2ml	-361.95	201.72	132.28	123.84	105.72
+4ml	-370.74	208.21	132.42	120.73	120.34
+6ml	-378.2	257.58	139.3	124.83	98.95
+8ml	-380.89	287.31	134.92	115.41	97.79
+10ml	-383.41	337.53	138.95	118.54	165.43
+12ml	-388.36	473.34	152.61	127.08	82.52
+14ml	-407.47	714.47	171.96	141.94	63.27
+16ml	-396.81	611.94mA	164.45	135.18	66.53

Los resultados en general indican que los aceros 1045, 4140 y 8620 son dispuestos a corroerse en condiciones normales en HCl-1M por el mecanismo de picaduras, sin embargo, debido a diferencias notables en su composición química, estos aceros presentan diferente velocidad de corrosión. Es decir, el acero 8620 por tener en su composición química < 1% de Ni, Cr y Mo es ligeramente más pasivo que el acero 4140 (aleado con < 1% Cr y Mo), seguido del acero convencional 1045 (sin aleantes), este comportamiento se observa en la Figura 58.

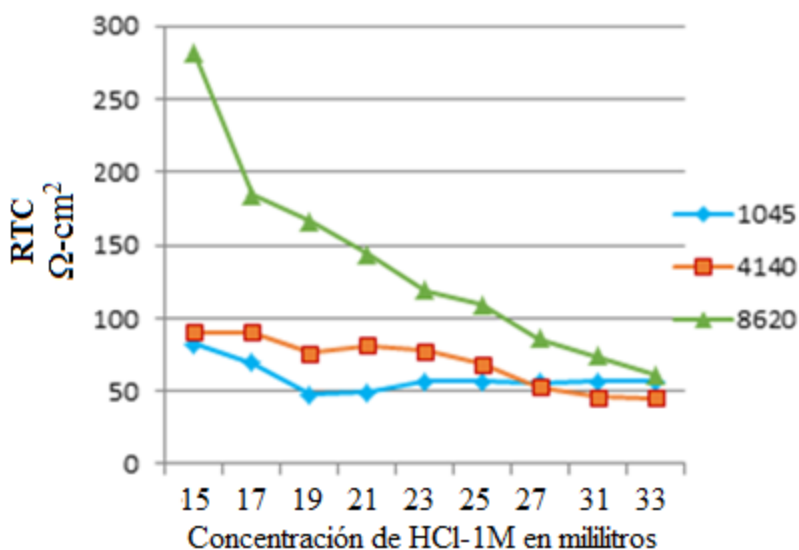


Figura 58. Comportamiento de la resistencia a la corrosión de los aceros AISI 1045, 4140 y 8620 inmersos en HCl-1M.

3.2.2 Extracto líquido de Aloe-Vera (Sábila) como inhibidor biodegradable de la corrosión en aceros industriales.

Las Figuras 59, 60 y 61 muestran los diagramas típicos de impedancia (representación de Nyquist Z_{real} vs. Z_{imag}) de los aceros 1045, 4140 y 8620 inmerso en 15 ml de HCl 1M con adiciones del inhibidor orgánico de Aloe-Vera a varias concentraciones, así mismo se incluye una prueba en blanco en inmersión en 1M de HCl como comparación. Los diagramas EIS muestran la presencia de un semicírculo muy bien definido con una magnitud en su diámetro de $\sim 50 \Omega\text{-cm}^2$ para el acero AISI-1045, $\sim 150 \Omega\text{-cm}^2$ para el acero 4140 y/o 8620 expuestos al medio ácido sin inhibidor.

Una respuesta inmediata se observa al agregar el extracto líquido de Aloe-Vera como inhibidor al medio ácido, los diagramas EIS muestran un incremento en la resistividad al intercambio de iones, es decir el metal se resiste al proceso de corrosión por la acción de una capa protectora. Los diagramas de impedancia manifiestan un incremento en el diámetro del semicírculo (Z_{real}) a medida de que se agrega el inhibidor, la transferencia de carga (R_{tc}) aumenta de 100, 125, 150, hasta $200 \Omega\text{-cm}^2$ para el caso del acero 1045 (Figura 59), mientras que para el acero 4140 (Figura 60) la transferencia de carga aumenta de 200, 300, 400, hasta mantenerse su magnitud en $600 \Omega\text{-cm}^2$, finalmente para el acero 8620 (Figura 61) la transferencia de carga se mantiene constante de 220, 225, hasta $260 \Omega\text{-cm}^2$.

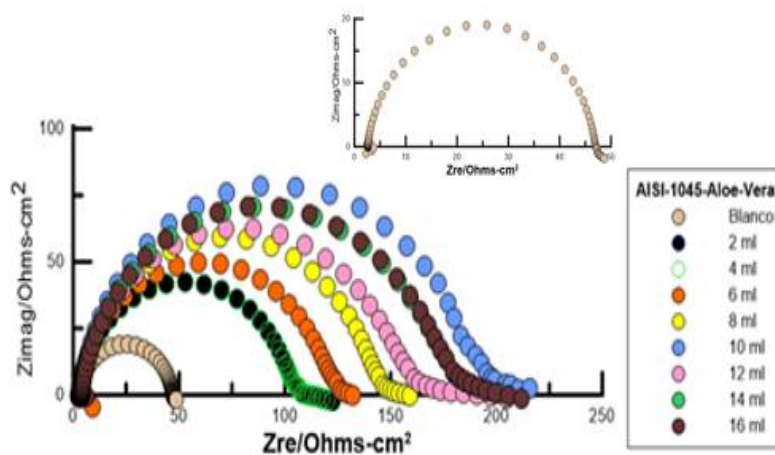


Figura 59. Diagrama de Nyquist para un acero AISI-1045 inmerso en 1M de HCl en función del inhibidor orgánico de Aloe-Vera.

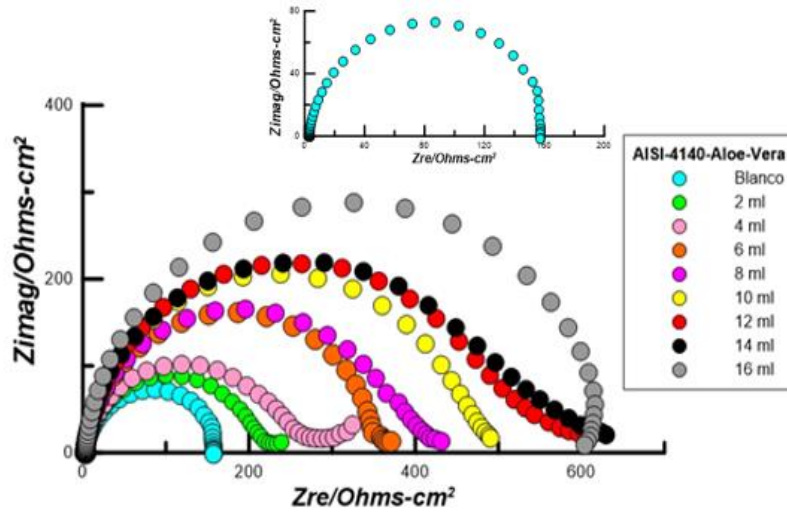


Figura 60. Diagrama de Nyquist para un acero AISI-4140 inmerso en 1M de HCl en función del inhibidor orgánico de Aloe-Vera.

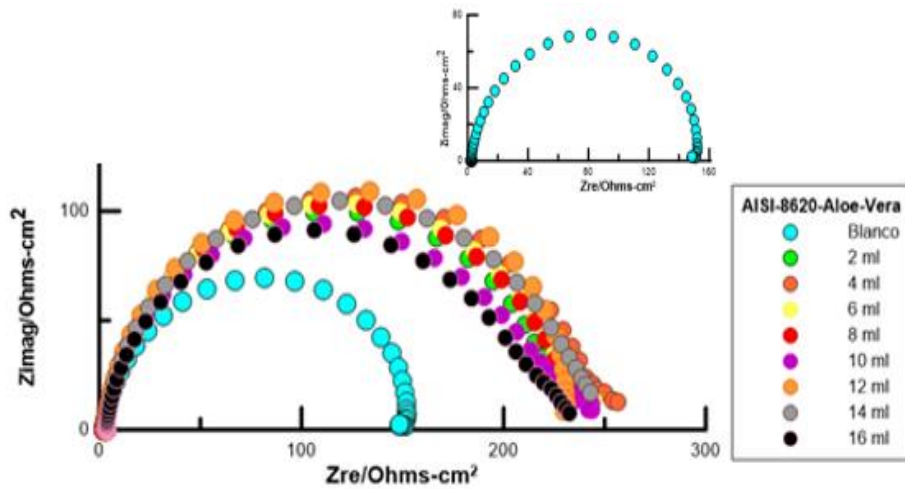


Figura 61. Diagrama de Nyquist para un acero AISI-8620 inmerso en 1M de HCl en función del inhibidor orgánico de Aloe-Vera.

De acuerdo a un análisis de microscopía óptica como el que se muestra en la Figura 62, se aprecia que el GEL de *Aloe-Vera* inhibe el proceso de corrosión por picaduras en las muestras metálicas inmersas en 1M de HCl, ya que las moléculas obedecen a un mecanismo de fisiorción formado así una barrera orgánica en la interface del acero. En la Tabla 7 se muestran los resultados de los parámetros de impedancia para los tres aceros industriales inmersos en 1M de HCl en presencia del inhibidor orgánico de *Aloe-Vera*, los resultados se

obtuvieron ajustando los datos EIS experimentales con la correlación de un circuito eléctrico equivalente, Figura 14b.

Donde se aprecia que el valor de R_{tc} aumenta para los tres aceros a medida que se agrega el agente inhibidor (Aloe-Vera), indicando que la carga de iones en la doble capa electroquímica desciende, esto indica la posible formación de una película protectora orgánica que impide el continuo deterioro por corrosión. También se observa que la capacitancia de carga iónica disminuye considerablemente. Además, en la Tabla 7 se presenta el porcentaje de eficiencia de inhibición (% EI) perteneciente a la ecuación 12.

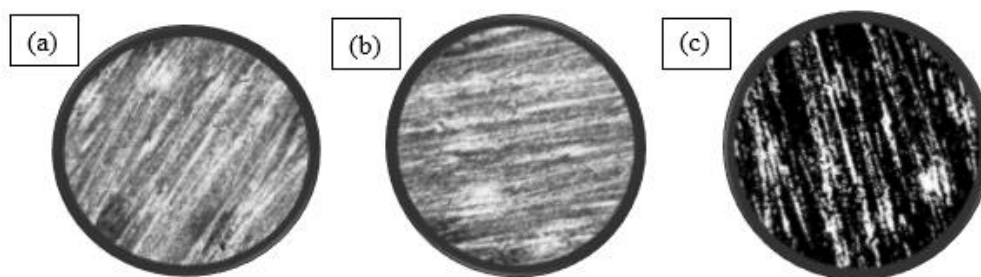


Figura 62. Micrografías de los aceros AISI-1045(a), AISI-4140(b), AISI-8620(c) después de las pruebas de corrosión en 1M de HCl en función del inhibidor orgánico de Aloe-Vera.

Tabla 7. Parámetros de impedancia para los aceros industriales inmersos en HCl 1M en presencia del inhibidor orgánico de Aloe-Vera.

Acero 1045 (15 ml HCl + 2-16 ml de Aloe-Vera)									
Parámetro	15 ml-HCl	+2ml	+4ml	+6ml	+8ml	+10ml	+12ml	+14ml	+16ml
E_{corr}/mV	-441.35	-424.48	-423.56	-420.80	-418.34	-412.21	-420.49	-422.02	-420.49
$R_{mol}/\Omega\text{-cm}^2$	-	45.32	46.32	47.32	48.32	49.32	50.32	51.32	52.32
$C_{mol}/\mu F\text{cm}^{-2}$	-	876	876	769	728	405	280	253	248
$R_{tc}/\Omega\text{-cm}^2$	46.86	146.59	147.59	166.84	189.62	239.22	164.48	225.21	225.42
EI/%	-	68.03	68.25	71.91	75.29	80.41	71.51	79.19	79.21
Acero 4140 (15 ml HCl + 2-16 ml de Aloe-Vera)									
Parámetro	15 ml-HCl	+2ml	+4ml	+6ml	+8ml	+10ml	+12ml	+14ml	+16ml
E_{corr}/mV	-360.1	-342.2	-340.6	-355.1	-353.3	-357.6	-358.5	-360.9	-366.24
$R_{mol}/\Omega\text{-cm}^2$	-	2.21	10.47	31.03	8.48	42.32	9.89	26.21	118.3
$C_{mol}/\mu F\text{cm}^{-2}$	-	1530	978	750	394	306	270	243	143
$R_{tc}/\Omega\text{-cm}^2$	162.39	210.09	246.72	356.48	391.77	472.75	512.48	524.29	624.98
EI/%	-	22.70	34.18	54.45	58.55	65.65	68.31	69.03	74.02

Acero 8620 (15 ml HCl + 2-16 ml de Aloe-Vera)									
Parámetro	15 ml-HCl	+2ml	+4ml	+6ml	+8ml	+10ml	+12ml	+14ml	+16ml
E_{corr}/mV	-246.28	-224.20	-224.50	-215.92	-212.54	-207.33	-207.64	-208.42	-207.94
$R_{mol}/\Omega\text{-cm}^2$	-	1.44	6.67	10.83	8.64	5.75	13.76	67.99	10.98
$C_{mol}/\mu F\text{cm}^2$	-	1190	922	955	880	467	346	376	256
$R_{\eta}/\Omega\text{-cm}^2$	158.07	228.82	244.23	235.53	235.89	224.43	239.14	242.67	224.7
El/%	-	30.92	35.28	32.89	32.99	29.57	33.90	34.86	29.65

Por otro lado, en las Figuras 63, 64 y 65 se muestran los resultados obtenidos mediante curvas de TAFEL ($\log I$ vs. E) para el acero AISI-1045, 4140 y 8620 en inmersión en HCl-1M en presencia del inhibidor orgánico de *Aloe-Vera*. Así mismo se incluye el comportamiento del acero sin inhibidor en inmersión en HCl-1M para su análisis comparativo. Estos diagramas en general muestran un desplazamiento de las curvas hacia la izquierda ($< I$) y a $< E_{corr}$ a medida que se le agrega el inhibidor orgánico, lo que indica que este tipo de moléculas funcionan como un inhibidor del tipo anódico, es decir es capaz de recubrir y pasivar los sitios más activos del acero. En la Tabla 8 se muestran los parámetros de TAFEL para los tres aceros inmersos en 1M de HCl en presencia del inhibidor orgánico de *Aloe-Vera*.

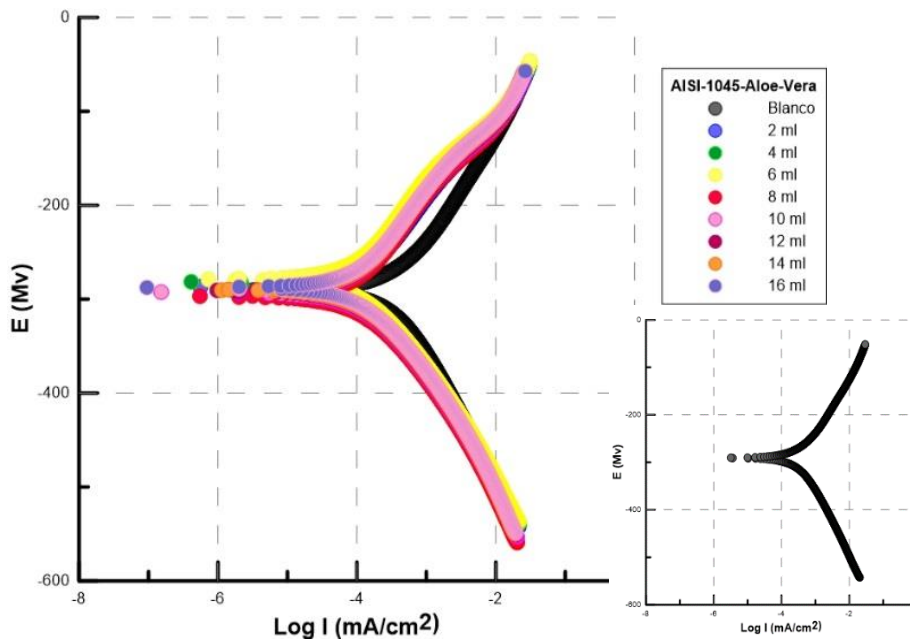


Figura 63. Diagramas de TAFEL del acero 1045 inmerso en HCl 1M a diferente concentración, en función del inhibidor orgánico Aloe-Vera.

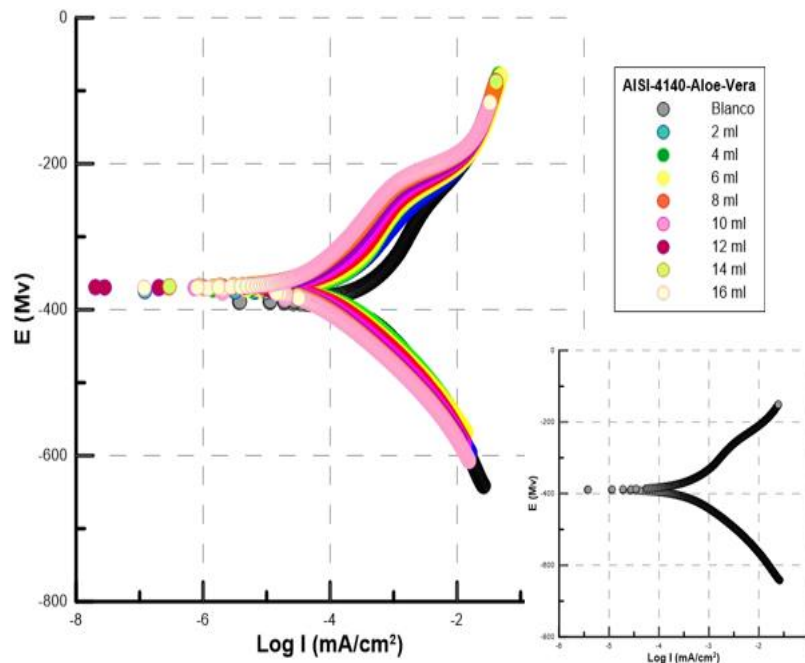


Figura 64. Diagramas de TAFEL del acero 4140 inmerso en HCl 1M a diferente concentración, en función del inhibidor orgánico Aloe-Vera.

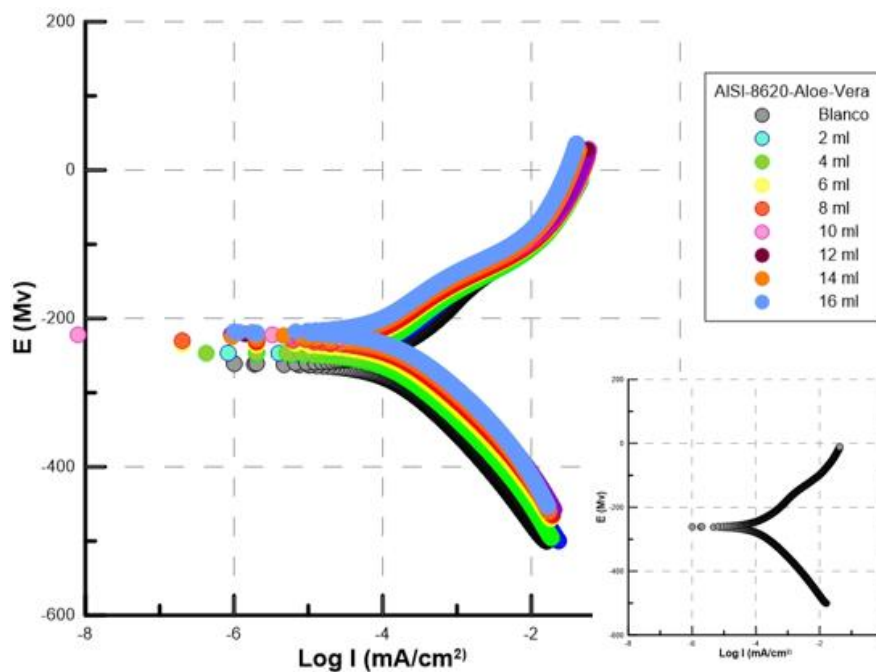


Figura 65. Diagramas de TAFEL del acero 8620 inmerso en HCl 1M a diferente concentración, en función del inhibidor orgánico Aloe-Vera.

Tabla 8. Parámetros de TAFEL para aceros industriales inmersos en HCl 1M en presencia del inhibidor orgánico de Aloe-Vera.

AISI-1045 Aloe-Vera					
Inhibidor	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	Bc (mV)	Ba (mV)	Chi-Square
Blanco	-287.17	135.81	111.73	98.32	50.69
+2ml	-281.63	105.65	106.03	95.3	104.58
+4ml	-291.02	116.05	109.56	100.54	119.06
+6ml	-279.18	101.41	104.74	95.59	127.69
+8ml	-292.56	114	108.95	100.54	119.08
+10ml	-292.56	114	108.95	100.54	119.08
+12ml	-286	115.29	109.83	99.14	148.96
+14ml	-290.04	118.32	110.45	101.69	118.73
+16ml	-283.91	120.63	111.78	100.65	120.85
AISI-4140 Aloe-Vera					
Inhibidor	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	Bc (mV)	Ba (mV)	Chi-Square
Blanco	-370.35	64.34	86.83	92.4	228.19
+2ml	-371.37	129.67	92.36	105.21	156.86
+4ml	-369.28	97.73	93.29	98.88	180.08
+6ml	-371.37	129.67	92.36	105.21	156.86
+8ml	-369.28	97.73	93.29	98.88	180.08
+10ml	-370.53	38.37	72.77	100.28	7.42
+12ml	-368.32	44.32	76.78	97.8	7.62
+14ml	-368.32	44.32	76.78	97.8	7.62
+16ml	-370.34	38.37	73.36	99.96	7.53
AISI-8620 Aloe-Vera					
Inhibidor	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	Bc (mV)	Ba (mV)	Chi-Square
Blanco	-246.41	137.95	107.21	87.77	91.601
+2ml	-234.68	122.59	102.06	86.74	228.42
+4ml	-246.84	122.43	107.15	86.16	142.66
+6ml	-224.37	122.43	107.15	88.46	314.21
+8ml	-230.07	126.38	100.92	86.85	278.43
+10ml	-221.76	89.78	92.78	69.9	268.36
+12ml	-218.7	151.03	106.1	95.44	261
+14ml	-224.46	84.78	86.95	70.6	222.74
+16ml	-213.08	5.89mA	387.3	3.52 Kv	249.1

La Figura 66, presenta el comportamiento de los tres aceros (1043, 4140, 8620) durante las pruebas electroquímicas en presencia del inhibidor orgánico de *Aloe-Vera*. Donde el comportamiento indica gráficamente que el incremento de la resistividad en los aceros siendo significativamente el acero 4140 como el que mejor comportamiento representa, y un progreso continuo en la formación de una barrera orgánica con respecto a los aceros 1045 y 8620, estos aceros también presentaron un incremento a la resistividad al proceso de corrosión.

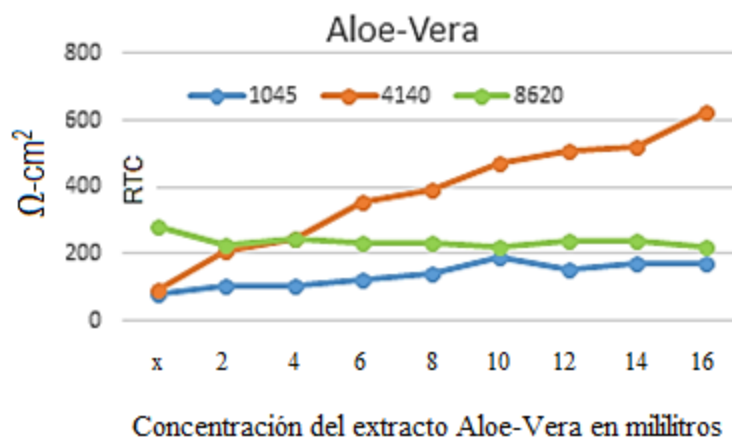


Figura 66. Comportamiento de Resistencia total de corrosión aceros AISI en función de la concentración del inhibidor orgánico de Aloe-Vera.

3.2.3 *Morinda Citrifolia* como inhibidor de la corrosión en Aceros industriales

Las Figuras 67, 68 y 69 muestran los diagramas de típicos de impedancia (Nyquist) en presencia del inhibidor orgánico de *Morinda Citrifolia*, así mismo se compara con una prueba en inmersión en 1M de HCl sin inhibidor, donde se aprecia un semicírculo con una magnitud de 55 Ω-cm² para el acero AISI-1045, mientras que para los aceros 4140 y 8620 esta magnitud no es más de 150 Ω-cm².

Durante el proceso de inhibición con *Morinda Citrifolia* se aprecia un incremento en la resistividad a la corrosión de los aceros, esto se observa al incrementar la magnitud del semicírculo (Z_{real}) a medida que se agrega el inhibidor. Sin embargo, la transferencia de carga R_{tc} aumenta de 400, 800, 1200 hasta 1600 Ω-cm² para el caso del acero 1045 (Figura 67), mientras que para el acero 4140 (Figura 68) la transferencia de carga aumenta de 200, 300,

400, hasta mantenerse en $600 \Omega\text{-cm}^2$ su magnitud, finalmente para el acero 8620 (Figura 69) la transferencia de carga se mantiene en el orden de 220, 225, hasta $260 \Omega\text{-cm}^2$.

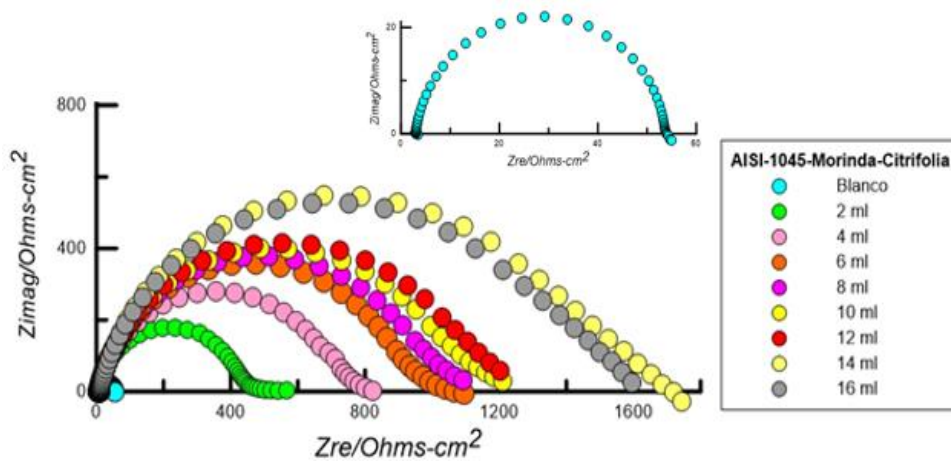


Figura 67. Diagrama de Nyquist para un acero AISI-1045 inmerso en 1M de HCl en función de la concentración del inhibidor orgánico Morinda Citrifolia.

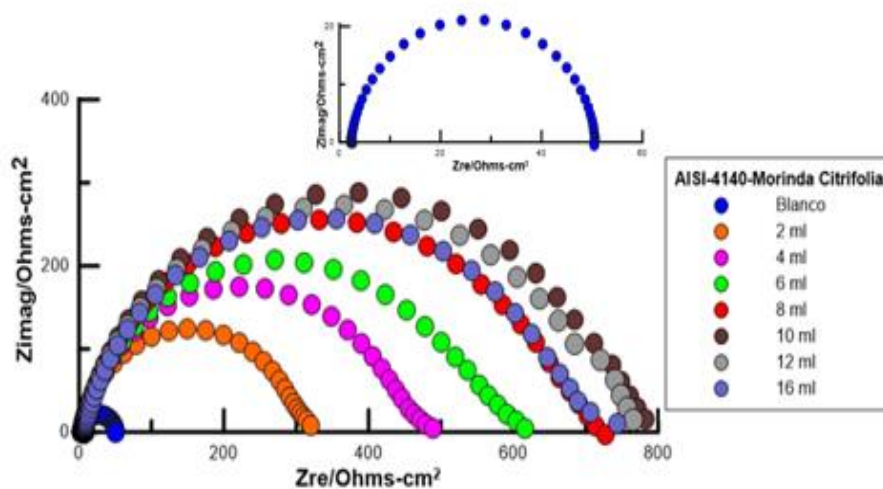


Figura 68. Diagrama de Nyquist para un acero AISI-4140 inmerso en 1M de HCl en función de la concentración del inhibidor orgánico Morinda Citrifolia.

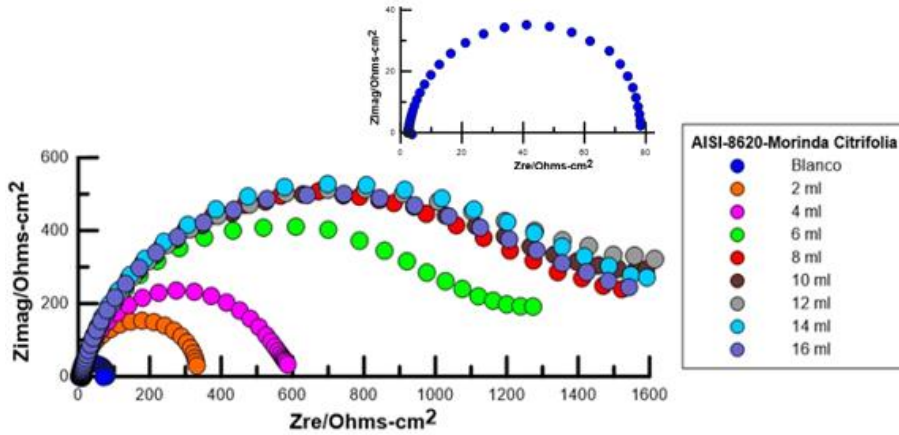


Figura 69. Diagrama de Nyquist para un acero AISI-8620 inmerso en 1M de HCl en función de la concentración del inhibidor orgánico Morinda Citrifolia.

De acuerdo al análisis de microscopia óptica de la Figura 70, se aprecia que extracto líquido de *Morinda Citrifolia* inhibe el proceso de corrosión eficientemente en las muestras metálicas expuestas a 1M de HCl.

La Tabla 9 muestra los resultados de los parámetros de impedancia para los tres aceros industriales inmersos en 1M de HCl en presencia del inhibidor orgánico de *Morinda Citrifolia*. Estos resultados se calcularon mediante un ajuste de los datos EIS con el circuito equivalente que se muestra en la Figura 14b. Los resultados indican que el valor de R_{tc} aumenta para los tres aceros a medida que se agrega el extracto líquido, indicando que la carga de iones en la doble capa electroquímica descende, esto indica que la formación de una película se forma espontáneamente para evitar el continuo deterioro por corrosión. Además, en la Tabla 9 se presenta el porcentaje de la eficiencia de inhibición (%EI) derivado de la ecuación 12.

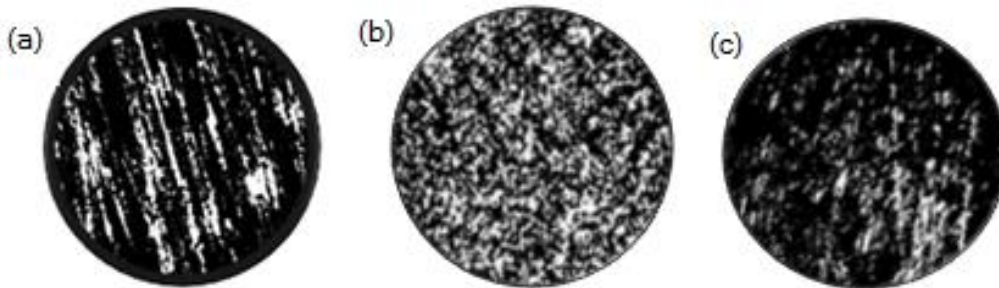


Figura 70. Micrografías de los aceros AISI-1045(a), AISI-4140(b), AISI-8620(c) después de las pruebas de corrosión en 1M de HCl en función del inhibidor orgánico Morinda Citrifolia.

Tabla 9. Parámetros de impedancia de los aceros industriales inmersos en HCl 1M en presencia del inhibidor orgánico de *Morinda Citrifolia*.

Acero 1045 (15 ml HCl + 2-16 ml de Morinda Citrifolia)									
Parámetro	15 ml-HCl	+2ml	+4ml	+6ml	+8ml	+10ml	+12ml	+14ml	+16ml
E_{corr}/mV	-482.75	-456.99	-439.20	-432.14	-422.33	-422.64	-421.3	-428.77	-423.63
$R_{mol}/\Omega\text{-cm}^2$	-	8.79	8.36	23.72	37.08	51.19	65.43	65.63	67.08
$C_{mol}/\mu F\text{cm}^{-2}$	-	1.82	1.91	3.38	6.63	4.52	4.72	4.95	5.43
$R_{tc}/\Omega\text{-cm}^2$	51.03	436.99	732.36	912.32	972.81	1058.08	1135.43	1449.63	1422.08
El/%		88.55	93.11	94.55	94.95	95.4	95.75	96.63	96.57
Acero 4140 (15 ml HCl + 2-16 ml de Morinda Citrifolia)									
Parámetro	15 ml-HCl	+2ml	+4ml	+6ml	+8ml	+10ml	+12ml	+14ml	+16ml
E_{corr}/mV	-497.47	-459.44	-447.17	-433.68	-422.02	-413.79	-414.22	-421.41	-420.8
$R_{mol}/\Omega\text{-cm}^2$	-	4.84	9.4	11.02	12.54	12.58	60.19	67.64	79.32
$C_{mol}/\mu F\text{cm}^{-2}$	-	1.85	3.63	4.51	4.46	4.61	4.94	3.79	5.27
$R_{tc}/\Omega\text{-cm}^2$	90	306.98	444.49	543.44	658.12	735.30	704.80	382.80	663.45
El/%	-	83.63	88.76	90.8	92.39	93.18	93.33	88.67	93.13
Acero 8620 (15 ml HCl + 2-16 ml de Morinda Citrifolia)									
Parámetro	15 ml-HCl	+2ml	+4ml	+6ml	+8ml	+10ml	+12ml	+14ml	+16ml
E_{corr}/mV	-443.8	-408.8	-403.2	-382.7	-370.8	-374.1	-367.7	-372.9	-371.4
$R_{mol}/\Omega\text{-cm}^2$	-	7.3	8.24	12.37	12.85	15.05	26.1	68.5	108.8
$C_{mol}/\mu F\text{cm}^{-2}$	-	5.12	5.34	7.43	5.30	7.32	5.55	14.0	7.91
$R_{tc}/\Omega\text{-cm}^2$	80.71	343	570.3	1132.97	1323.65	1370.24	1359.2	1396.45	1408.4
El/%	-	78.12	87.36	92.82	93.97	94.00	94.50	94.27	94.21

Por otro lado, las Figuras 71, 72 y 73 muestran los resultados correspondientes a las pruebas de polarización curvas de TAFEL (E_{corr} vs. Log I) para el acero AISI-1045, 4140 y 8620 inmerso en 1M de HCl a diferente concentración del inhibidor orgánico de *Morinda Citrifolia*. Una comparación con el acero sin inhibición también se presenta en las mismas Figuras. Donde se observa un desplazamiento hacia la izquierda (< I) y a la zona anódica (< E_{corr}) a medida que se le agrega el extracto etanólico de Morinda Citrifolia. Los parámetros de las pruebas de TAFEL se muestran en la Tabla 10 para el acero AISI-1045, 4140 y 8620 inmerso en 1M de HCl en presencia del inhibidor orgánico de *Morinda Citrifolia*.

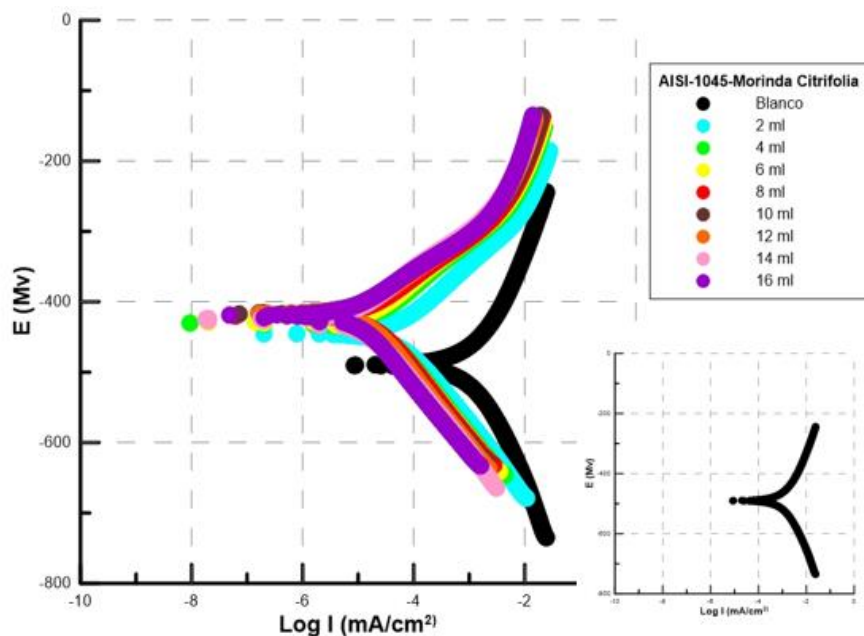


Figura 71. Diagramas de TAFEL para un acero AISI-1045 inmerso en 1M de HCl, en función de la concentración del inhibidor orgánico Morinda Citrifolia.

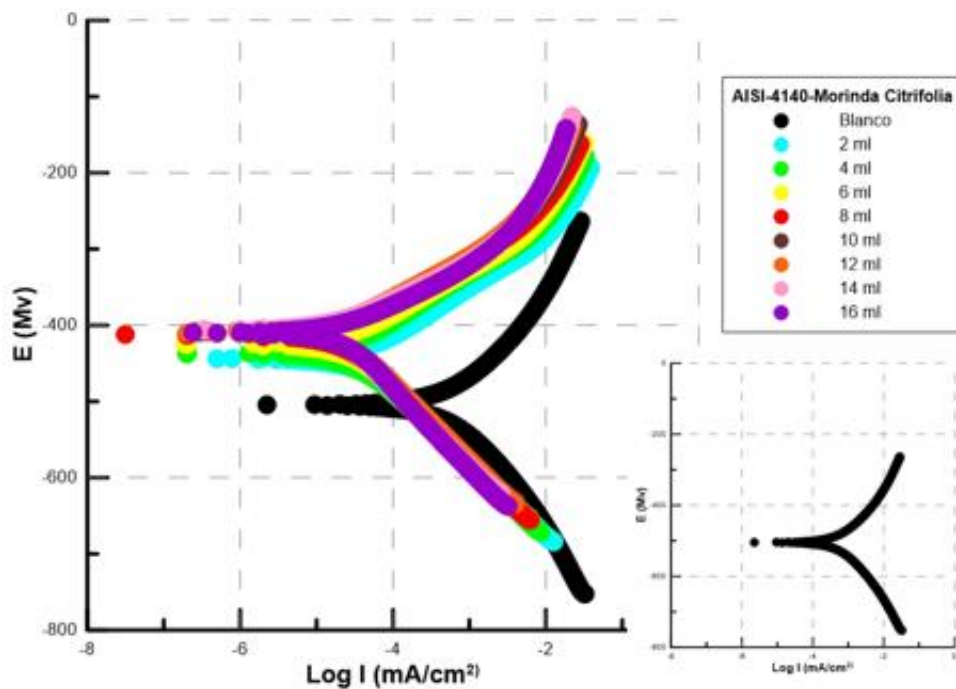


Figura 72. Diagramas de TAFEL para un acero AISI-4140 inmerso en 1M de HCl, en función de la concentración del inhibidor orgánico Morinda Citrifolia.

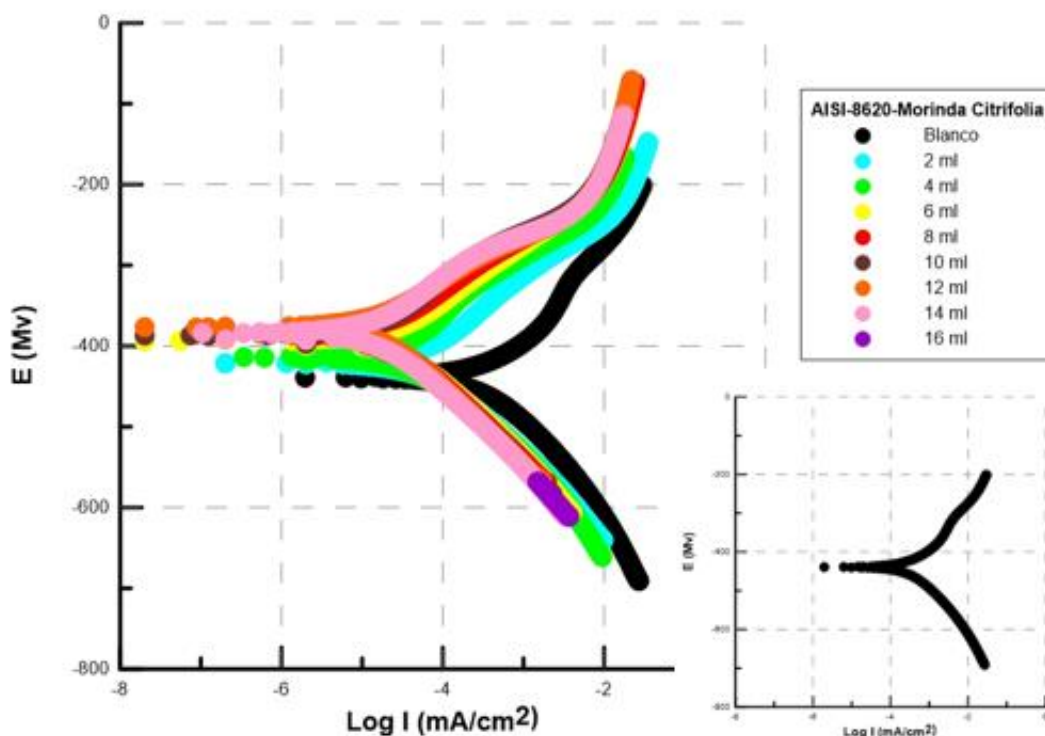


Figura 73. Diagramas de TAFEL para un acero AISI-8620 inmerso en 1M de HCl, en función de la concentración del inhibidor orgánico Morinda Citrifolia.

Tabla 10. Parámetros de TAFEL para el acero AISI-4140 inmerso en HCl-1M en presencia del inhibidor orgánico de Morinda Citrifolia.

AISI-1045 Morinda Citrifolia					
[Inhibidor]	E_{corr} (mV)	I_{corr} (Ma)	B_c (mV)	B_a (mV)	Chi-Square
Blanco	-445.64	67.02	107.08	91.33	130.99
2	-430.75	19.88	92.35	69.8	76.03
4	-428.92	17.69	93.21	69.01	21.25
6	-420.27	15.69	96.14	62.83	14.14
8	-416.62	11.7	95.06	61.65	23.11
10	-416.97	12.01	97.54	61.52	23.47
12	-419.35	8.52	94.94	59.56	30.6
14	-424.93	9.04	89.96	65.96	48.2
16	-419.28	8.07	93.38	56.76	36.28

AISI-4140 Morinda Citrifolia					
[Inhibidor]	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	Bc (mV)	Ba (mV)	Chi-Square
Blanco	-444.01	42.79	97.5	67.21	2.57
2	-436.88	28.23	93.93	67.55	8.1
4	-412.28	20.21	98.59	59.28	9.76
6	-424.71	26.96	98.71	62.01	6.24
8	-409.43	20.19	98.43	59.12	13.22
10	-408.37	20.55	100.37	59.83	13.53
12	-406.48	20.32	109.25	54.1	5.2
14	-410.31	22.82	110.83	53.7	11.9
16	-410.18	23.04	111.75	53.81	13.39

AISI-8620 Morinda Citrifolia					
[Inhibidor]	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	Bc (mV)	Ba (mV)	Chi-Square
Blanco	-421.56	59.9	90-26	88.32	14.38
2	-413.73	35.15	80.32	97.39	29.31
4	-394.87	24.61	86.82	76.81	75.81
6	-385.26	21.4	93.83	74.96	14.8
8	-386.23	17.7	88.72	86.52	5.2
10	-375.62	15.78	94.51	67.71	12.55
12	-383.01	15.37	89.04	79.1	12.19
14	-380.28	14.72	90.59	70.38	26.85
16	-380.25	14.91	91.08	71.08	21.7

La Figura 74 (R_{ic} vs concentración en volumen) presenta el resultado del comportamiento de los tres aceros durante las pruebas electroquímicas en presencia del inhibidor orgánico de *Morinda Citrifolia*. Donde el comportamiento indica gráficamente el incremento de la resistividad en los aceros siendo significativamente el acero 1045 y 8620 como los de mejor comportamiento con el extracto etanólico de Morinda Citrifolia, estos presentan un progreso continuo en la formación de una barrera orgánica. Sin embargo, el acero 4140 también presentó un incremento en la resistividad al proceso de inhibición de la corrosión.

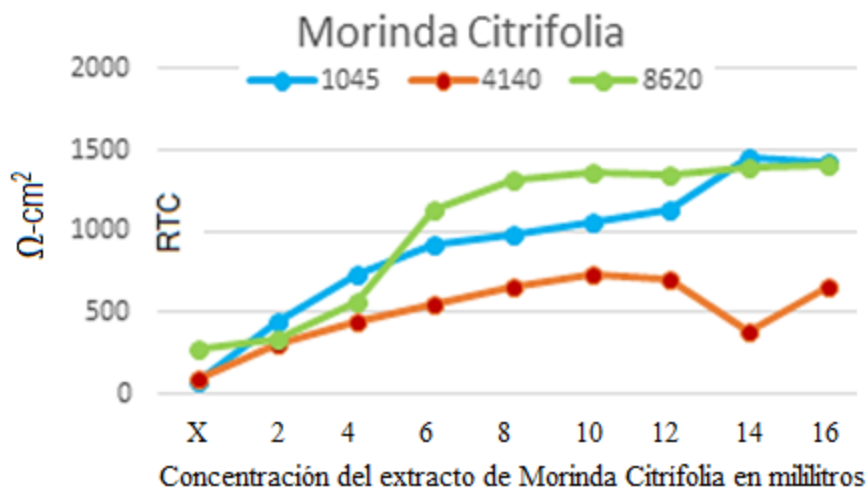


Figura 74. Comportamiento de resistencia total de corrosión en aceros AISI, inmerso en 1M de HCl en función de la concentración del inhibidor orgánico Morinda Citrifolia.

3.3 Termodinámica de los inhibidores.

El mecanismo de adsorción de los extractos-líquidos de *Aloe-Vera* y *Morinda Citrifolia* sobre la superficie metálica (acero) fue determinado gráficamente con la curva del grado de recubrimiento/cobertura (Θ) y la concentración del inhibidor (C) utilizando la mejor correlación con la isoterma de adsorción de LANGMUIR, en acuerdo a la ecuación 1.

El grafico lineal de C / Θ vs C correspondiente a la isoterma de Langmuir para el extracto-líquido de Aloe-Vera se muestra en la Figura 75 y para la Morinda Citrifolia en la Figura 76, ambos presentan un buen ajuste, sin embargo, un coeficiente de correlación cercano a 1 y muy constante se observó para el extracto-etanólico de Morinda Citrifolia.

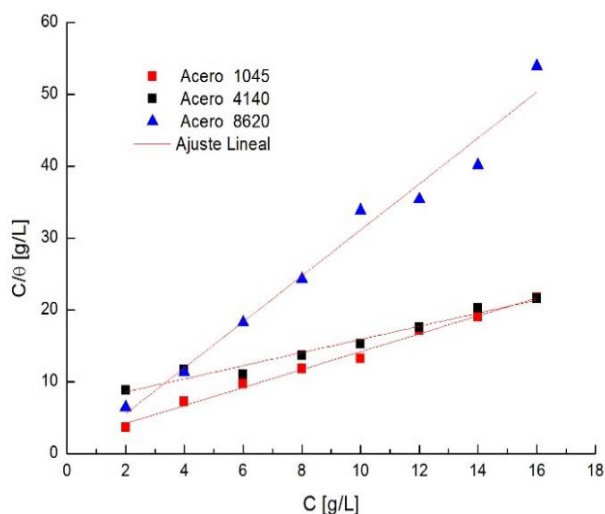


Figura 75. Comportamiento isotérmico de LANGMUIR del extracto líquido de Aloe-Vera que describe la interacción de adsorción del inhibidor.

Sin embargo, la interacción del inhibidor con la superficie metálica es obtenida por la energía estándar de adsorción de Gibbs, ecuación 19. En la Tabla 11 y 12 se demuestra que el proceso que sigue en los tres metales es un mecanismo de fisisorción, ya que el $\Delta G^\circ < -20$ KJ mol.

$$\Delta G_{ads} = - RT \ln K_{ads} \tag{19}$$

Donde R = 8.31416 J/mol K, T = temperatura, K_{ads} = constante de adsorción

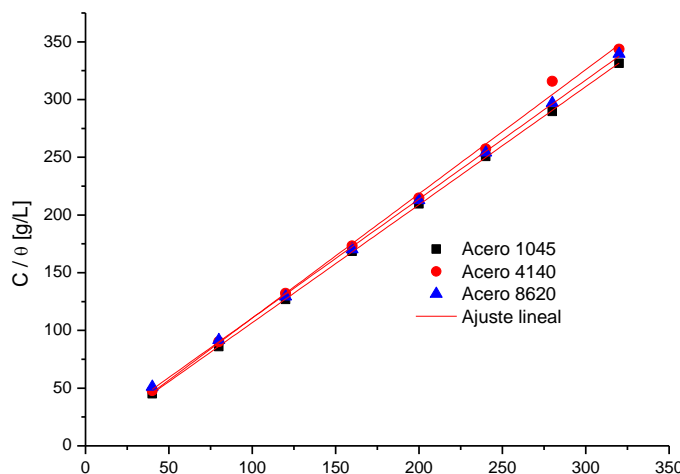


Figura 76. Comportamiento isotérmico de Langmuir del extracto-líquido de Morinda Citrifolia que describe la interacción de adsorción del inhibidor.

Tabla 11. Análisis termodinámico del extracto de Aloe-Vera empleando el modelo de Langmuir.

acero	ln K _{ads}	ΔG° _{ads} / KJ.mol ⁻¹	Ecuación de la regresión lineal	R ²
1045	0.53	-1.21	C/θ=1.2488C + 1.7087	0.9921
4140	1.90	-4.33	C/θ=0.9152C + 6.7494	0.9695
8620	0.17	-0.38	C/θ=3.1997C + 0.8433	0.9769

Tabla 12. Análisis termodinámico del extracto Morinda Citrifolia empleando el modelo de Langmuir.

acero	ln K _{ads}	ΔG° _{ads} / KJ.mol ⁻¹	Ecuación de la regresión lineal	R ²
1045	1.50	-3.40	C/θ=1.0223C + 4.4841	1
4140	1.14	-3.60	C/θ=1.0759C + 3.1442	0.9976
8620	2.04	-4.63	C/θ=1.0307C + 7.6995	0.9997

3.4 Tensión superficial

3.4.1 Tensión Superficial del extracto líquido o GEL de Aloe-Vera.

Se entiende por tensión superficial, (γ), como la energía por unidad de superficie presente en una interfaz sólida y un fluido, es decir están presentes fuerzas intermoleculares (fuerzas de Van Der Waals y enlaces atómicos) que se resisten para que el líquido tienda aumentar su superficie y pueda adsorberse con estado mínimo de energía. Sin embargo, como resultado de la tensión superficial es la capilaridad, el cual se da en los líquidos debido a las fuerzas de adherencia entre el líquido y la interfaz de un sólido, las fuerzas de cohesión. Se forman tubos capilares cuando las fuerzas de adherencia son mayores que las de cohesión. Cuando el ángulo de contacto (θ) entre la tangente a la superficie libre del líquido y a la tangente de la superficie del sólido adyacente, es $>90^\circ$ coexisten fuerza de repulsión (el líquido no moja, no se adsorbe), pero a menor ángulo de $<90^\circ$ hay mojabilidad del líquido, es decir la gota del líquido penetra sobre la interfaz del sólido (Fuerzas de atracción).

Los resultados experimentales de tensión superficial del GEL de Aloe-Vera se presentan en la Figura 77, los resultados indican que las fuerzas de repulsión que se imponen a los sustratos son altas, debido a la viscosidad del GEL de Aloe-Vera, dejando ver que se puede encontrar dificultad en la unión del inhibidor y la energía libre superficial del sólido a recubrir no es

homogéneo, los resultados obtenidos por el software SCAT (Figura 77) para el extracto líquido de Aloe-Vera, indican una media de 48.7413 mN/m.

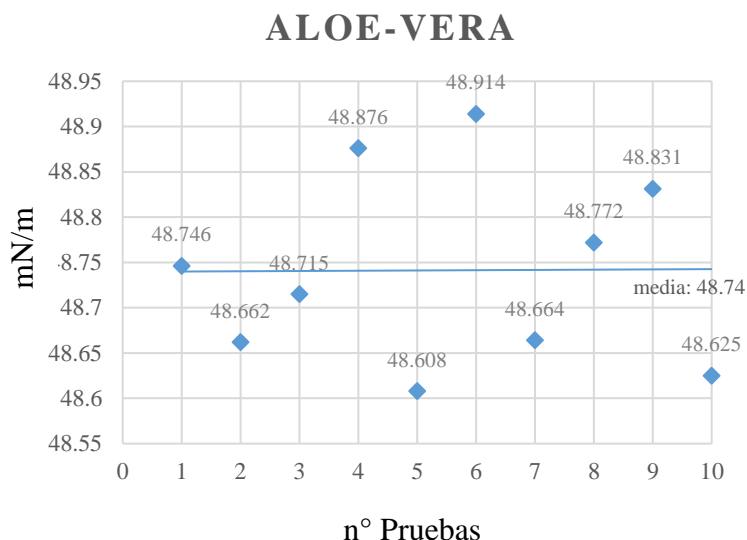


Figura 77. Comportamiento del extracto líquido de Aloe-Vera en pruebas de tensión superficial.

3.4.2 Tensión Superficial del extracto líquido de *Morinda Citrifolia*.

Los resultados experimentales de la tensión superficial de la *Morinda Citrifolia* demuestran que las fuerzas de atracción que se imponen a los sustratos son más altas, dejando ver que existe una correcta unión del inhibidor y la energía libre superficial del acero a recubrir, obteniendo una media de 22.923 mN/m. En la Figura 78 se muestran los resultados obtenidos por el software SCAT para el extracto de *Morinda Citrifolia*.

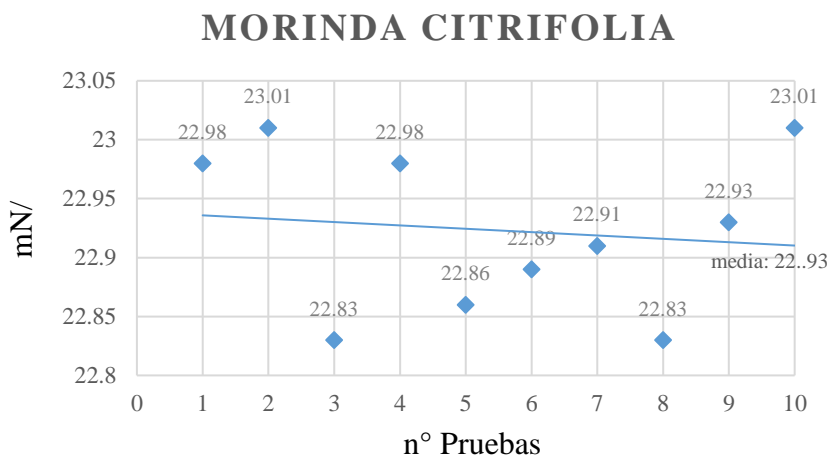


Figura 78. Comportamiento del extracto líquido de Morinda Citrifolia en pruebas de tensión superficial.

3.5 Pruebas de Angulo de contacto

3.5.1 Aloe-Vera

En la Figura 79a se aprecian los perfiles adimensionales de gotas con forma casi esférica perteneciente al extracto líquido o GEL de *Aloe-Vera*. En la Figura 79b se muestra los resultados para la determinación de los datos por software CoolingTech, La Figura 79c es la representación adimensional de la gota del extracto líquido como referencia. Mientras que la Figura 79d representa la determinación del ángulo de contacto por medio del software Scientific WorkPlace. Los resultados obtenidos del perfil de la gota indican un ángulo de contacto no deseado y mayor a los 90°, la tensión capilar existente y la composición química del extracto muestran una gota completamente no mojable, dificultando de esta manera el proceso de adsorción sobre la interfaz del acero.

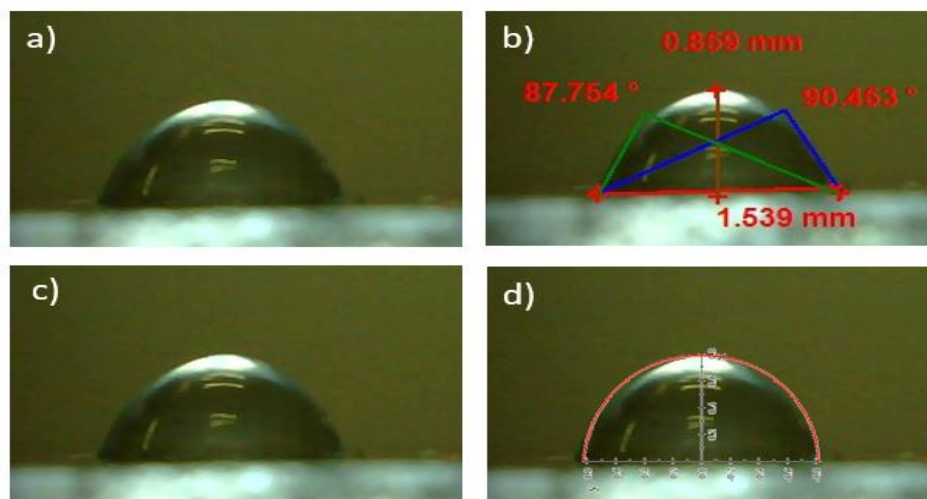


Figura 79. Experimentación de ángulo de contacto del GEL de Aloe-Vera.

3.5.2 Aloe-Vera + HCl 1M

La Figura 80 muestra una gota semejante a la Figura 79, donde al mezclar GEL de Aloe-Vera con HCl presenta dificultad para adsorberse a la superficie metálica, aunque su viscosidad disminuye considerablemente, no es suficiente para obtener una gota que sea mojable y no existe realmente un equilibrio, esto se muestra en la Figura 80. Perfiles adimensionales de gotas con forma esférica perteneciente al extracto líquido de *Aloe-Vera* y *HCl 1M*.

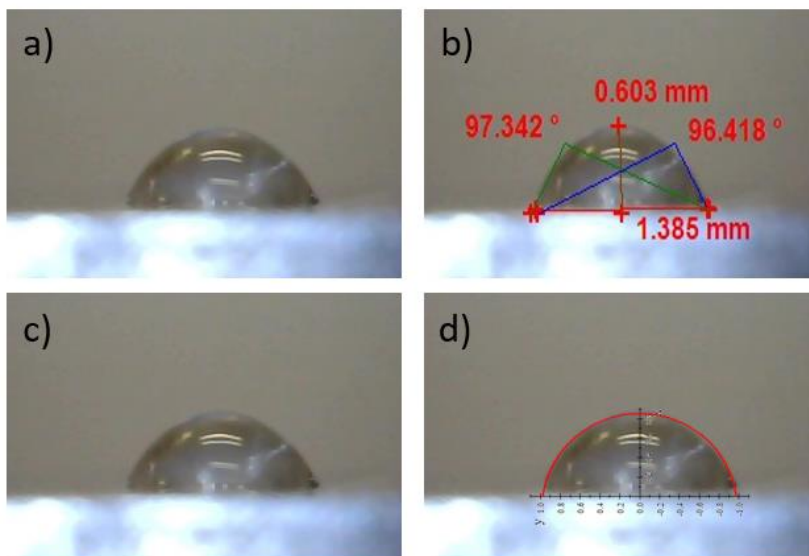


Figura 80. Experimentación de ángulo de contacto del GEL de Aloe-Vera inmerso en HCl-1M.

3.5.3 Morinda Citrifolia

La Figura 81 muestra imágenes de una gota del extracto etanólico de *Morinda Citrifolia*, donde se presenta una gran habilidad de la gota para adsorberse sobre la superficie metálica y llegando a su forma de equilibrio instantáneamente, esto se presenta en la Figura 81a. Los perfiles adimensionales de las gotas con forma esférica del extracto líquido de *Morinda Citrifolia* se muestra en la Figura 81b. La determinación de los datos por software CoolingTech, y la determinación del ángulo de contacto por medio del software Scientific WorkPlace se muestra en las Figuras 81c y 81d, respectivamente.

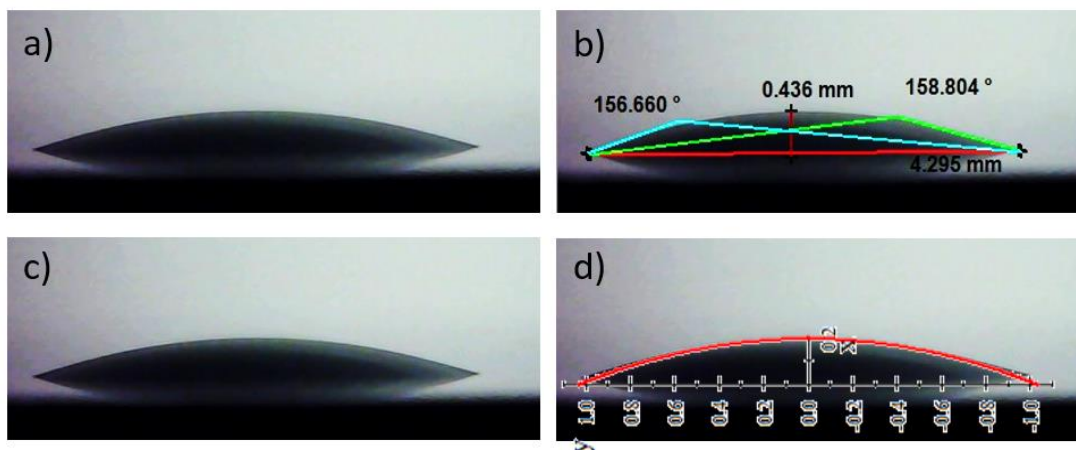


Figura 81. Experimentación de ángulo de contacto del extracto etanólico de *Morinda Citrifolia*.

3.5.4 *Morinda Citrifolia* + HCl 1M

La Figura 82. Muestra una gota del extracto etanólico de *Morinda Citrifolia* mezclado con 1M de HCl (sustancia corrosiva) donde al igual presenta una gran habilidad para adsorberse sobre la superficie metálica y llegando a su forma de equilibrio instantáneamente a pesar de tener la presencia del agente corrosivo, además en la Figura 82a se presentan los perfiles adimensionales de gotas con forma esférica perteneciente al extracto líquido de *Morinda Citrifolia*. En la Figura 82b se muestra la determinación de los datos por software CoolingTech, la Figura 82c la representación adimensional de la gota del extracto líquido como referencia. La Figura 82d la determinación del ángulo de contacto por medio del software Scientific WorkPlace. Por lo tanto, las gotas del extracto de *Morinda Citrifolia* presento un excelente desempeño en las pruebas de ángulo de contacto, siendo la mejor opción como inhibidor biodegradable en comparación con el extracto de Aloe-Vera.

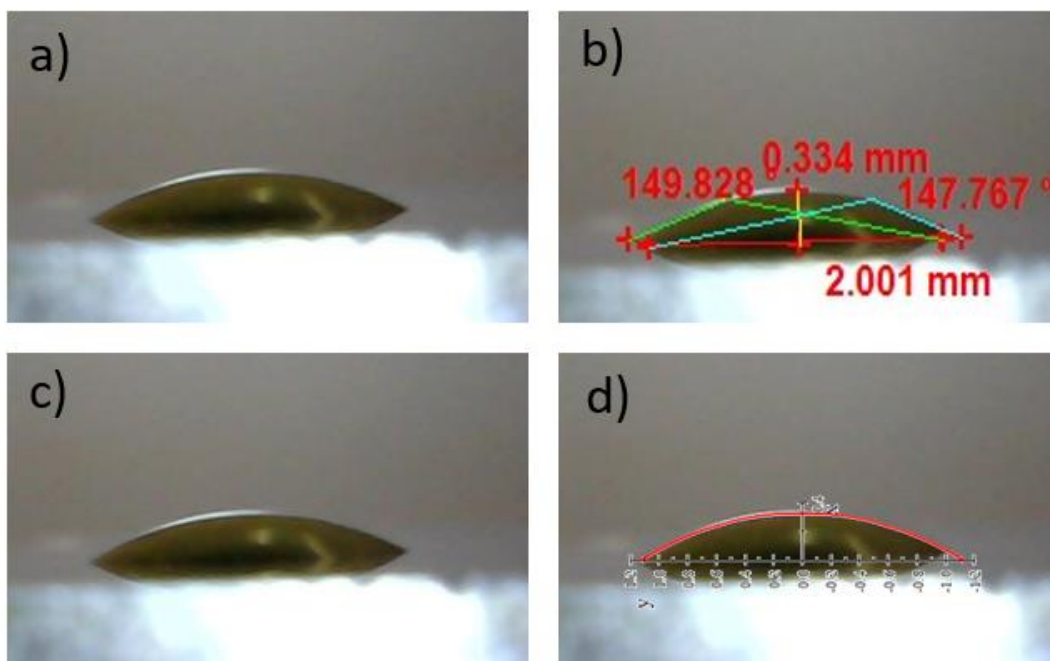


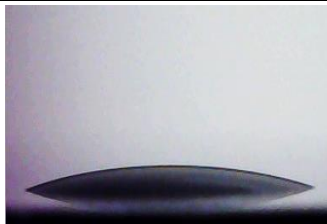

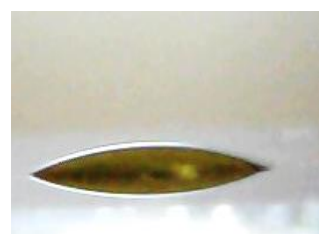


Figura 82. Experimentación de ángulo de contacto *Morinda Citrifolia* en presencia de HCl-1M.

Al concluir con las pruebas, se obtuvo una media del comportamiento de los inhibidores biodegradables con respecto al agente corrosivo de HCl-1M, obteniendo resultados presentados en la Tabla 13, resaltando el inhibidor de Morinda Citrifolia como el que mejor ángulo de contacto obtuvo, y también el que mejor comportamiento obtuvo en presencia del agente corrosivo, la tensión superficial que tuvo con los superficie metalicas y llegando más rápido a su estado de equilibrio.

Tabla 13. Promedios de los agentes líquidos en contacto con la superficie metálica de los aceros industriales.

Solución	< ANGULO	Longitud (mm)	Altura (mm)	Forma
HCl	35.5862	1.54615	0.5159	
Aloe-Vera	17.5214	0.7264	0.5577	
Morinda Citrifolia.	71.295375	2.2244375	0.348	
HCl/Aloe-Vera	50.840375	1.1534375	0.561375	
HCl/Morinda Citrifolia	70.43475	1.22575	0.216625	

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES



4 CONCLUSIONES

Los esfuerzos en investigación científica están dirigidos en la búsqueda de nuevos tratamientos que puedan minimizar el deterioro por corrosión de los materiales metálicos, ya que es un problema que en el sector industrial viene presentándose en los últimos años, la corrosión tiene un impacto en altos costos en mantenimiento y reparación industrial en el que involucra el uso de aceros como el AISI-1045 grado estructural, el acero 4140 grado herramienta y el acero AISI-8620 grado maquinaria, estos aceros se desempeñan en ambientes agresivos durante su servicio. Ante estos problemas y la necesidad de proteger los aceros en la industria para un mejor aprovechamiento de su vida útil, se utilizaron 2 inhibidores ecológicos biodegradables capaces de inhibir el deterioro químico de los materiales metálicos los cuales fueron el **GEL de Aloe-Vera** y el extracto etanólico de **Morinda Citrifolia**. Como resultado de la investigación presentada se llegaron a las siguientes conclusiones.

1. Se logró obtener extractos líquidos biodegradables provenientes de las hojas de Aloe-Vera y Morinda Citrifolia, capaces de funcionar como inhibidores eficientes de la corrosión.
2. Se encontró que por pruebas electroquímicas (impedancia electroquímica EIS y polarización de TAFEL) los 3 tipos de acero inmersos en 1M de HCl en ausencia de inhibidores presentaron fallas de corrosión por picaduras en tan solo 2 días de exposición, debido a un proceso galvánico (micrografías de la Figura 54). Los gráficos EIS (Nyquist) muestran que los aceros se corroen a diferente velocidad por tener diferencias en su composición química y microestructurales, este comportamiento se observa en la Figura 58. En el que se determina que el acero 1045 (Figura 51) muestra una resistencia al medio corrosivo de $55 \Omega\text{-cm}^2$, para el acero 4140 (Figura 52) de $45.17 \Omega\text{-cm}^2$ y para el acero 8620 (Figura 53) se obtuvo una mejor respuesta al tener una mejor resistencia a los anteriores aceros, con un valor de $61.44 \Omega\text{-cm}^2$ debido a la presencia de Níquel, Cromo y Molibdeno en su composición química.

3. El **GEL de *Aloe-Vera*** (Sábila) resultó ser un inhibidor aceptable con capacidad de inhibir el proceso de corrosión en los tres aceros industriales en el siguiente orden de eficiencia de inhibición EI (Tabla 7). Se observó una EI~ 80% desde 10ml para el acero 1045, siendo este acero en el que mejor comportamiento presenta este inhibidor, para el acero 4140 EI~70% a partir de 16ml y para el acero 8620 EI~ 35% a partir de 2ml presenta un comportamiento constante hasta los 16ml, sin ningún incremento en su porcentaje de inhibición.
4. La ***Morinda Citrifolia*** resultó ser un excelente inhibidor capaz de inhibir el proceso de corrosión por picaduras desde los 4 o 6 ml de su concentración en volumen para el acero 1045 con EI > 93.1%, para el acero 4140 y 8620 EI >92.9%. a partir de 6 ml en volumen de este extracto líquido.
5. Del análisis termodinámico, se determinó que el mecanismo de adsorción es por interacciones físicas y fue atribuido a que el GEL de ***Aloe-Vera*** y la ***Morinda Citrifolia*** se adhieren sobre las diferentes superficies metálicas formando multicapas de moléculas orgánicas naturales. Los procesos presentaron un buen ajuste con la isoterma de LANGMUIR con valores de energía estándar de adsorción de Gibbs menores a -20 KJ/mol. Lo que indica que el mecanismo está controlado por un proceso de fisorción. Esto está en acuerdo con los resultados encontrados por pruebas de EIS y pruebas de tensión superficial.
6. Por último, mediante pruebas de tensión superficial se confirmó que las fuerzas de interacción del tipo Van der Waals y adsorción, en conjunto con el análisis del ángulo de contacto para el extracto-líquido de ***Morinda Citrifolia*** fue mejor en la superficie metálica de los tres aceros industriales estudiados; mientras que en el ***Aloe-Vera*** resulto tener un ángulo de contacto no deseado > 90°, ya que la densidad del GEL de ***Aloe-Vera*** hace que no sea mojable la superficie y más difícil su adsorción en la superficie metálica.
7. La técnica de impedancia electroquímica (EIS) resultó ser una herramienta muy eficaz para el estudio y en la determinación del desempeño como inhibidor de la corrosión de algunos líquidos extractos de plantas naturales.

GLOSARIO

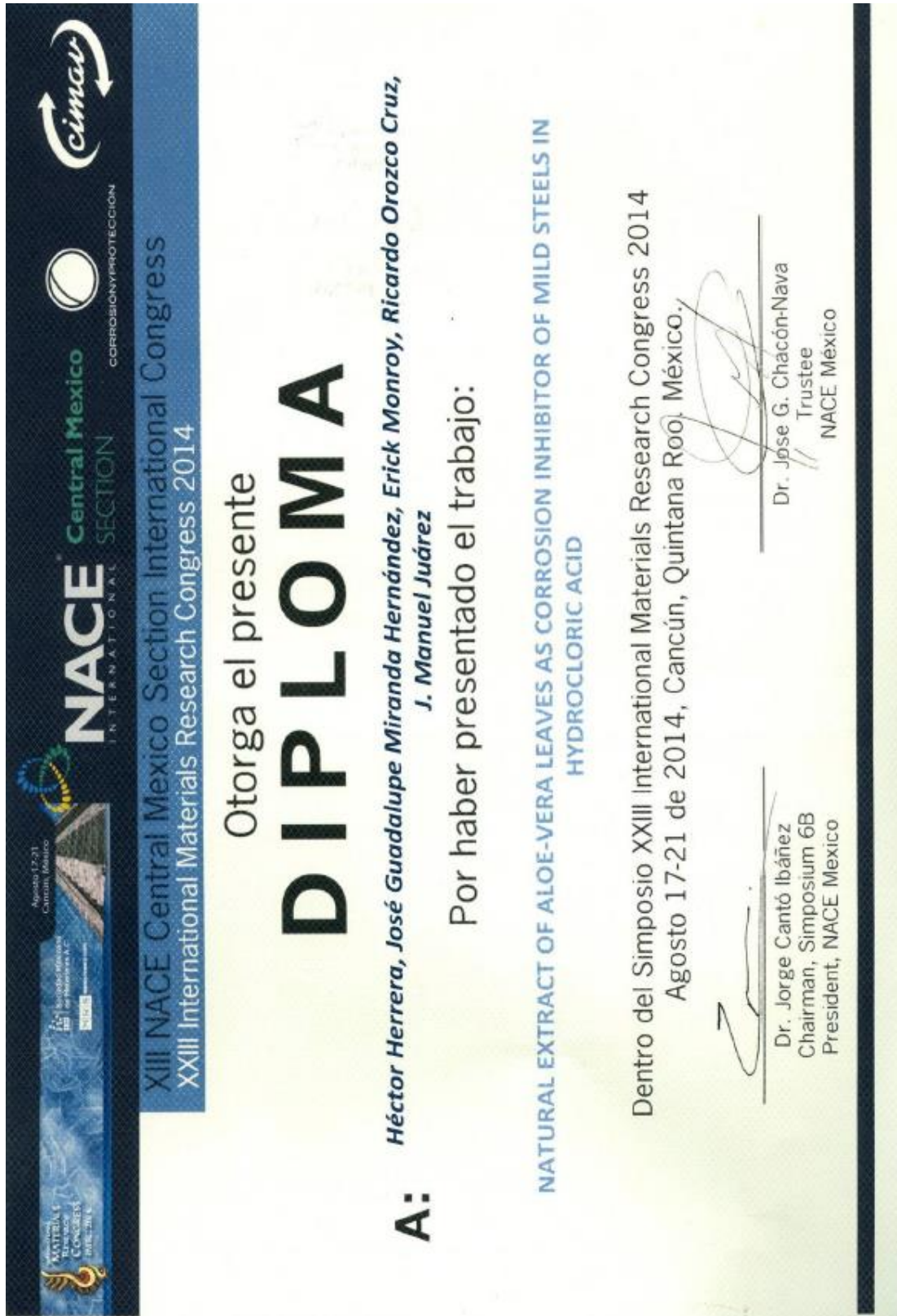
5 Glosario

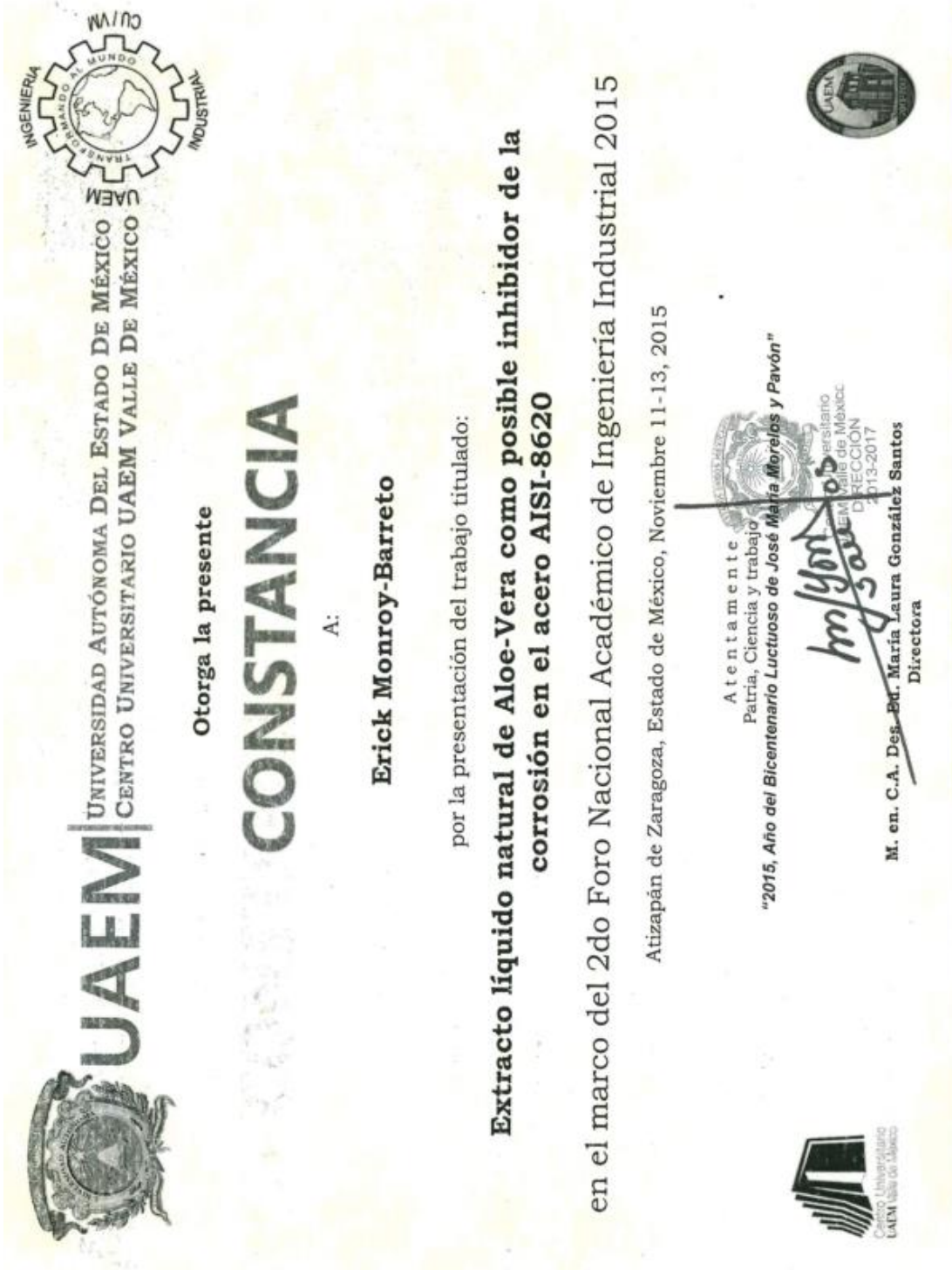
❖ AISI	Instituto Americano del Hierro y el acero
❖ AISI-1045	Acero Grado Estructural
❖ AISI-4140	Acero Grado Herramienta
❖ AISI-8620	Acero Grado Herramienta para Maquinaria
❖ ASTM	American Society for Testing and Materials
❖ Ba	Pendiente de Tafel Anódica
❖ Bc	Pendiente de Tafel Catódica
❖ Bo	Número de Bond
❖ C _{d1}	Capacitancia de la doble capa electroquímica
❖ CE	Contra Electrodo
❖ Cl	Cloruro
❖ CO ₂	Dióxido de Carbono
❖ DC	Corriente Directa
❖ DRX	Difracción de Rayos X
❖ ΔG	Energía Libre de Gibbs
❖ E	Potencial en Volts
❖ E _{corr}	Potencial de corrosión
❖ E _{pit}	Potencial de picaduras
❖ EIS	Espectroscopia de Impedancia Electroquímica
❖ H	Altura máxima
❖ HCl	Ácido Clorhídrico
❖ I	Corriente en Amperes
❖ MEB	Microscopio Electrónico de Barrido
❖ nF	masa reaccionante en nano Faradios.

❖ P	Densidad del Inhibidor
❖ PPT	Polarización Potencio dinámica
❖ PIB	Producto Interno Bruto
❖ Q°	Elemento de fase constante
❖ R	Resistencia Eléctrica
❖ RE	Electrodo de Referencia
❖ R _{mol}	Resistencia de las moléculas
❖ R _p	Resistencia a la polarización lineal
❖ R _s	Resistencia a la solución
❖ R _{tc}	Resistencia a la transferencia de carga
❖ SAE	Sociedad Americana de Ingenieros Automores
❖ SO ₂	Dióxido de Azufre
❖ V _{corr}	Velocidad de Corrosión
❖ WE	Electrodo de Trabajo
❖ Z	Impedancia
❖ Z _{real}	Parte real de la función de transferencia
❖ Z _{imag}	Parte imaginaria de la función de transferencia



ANEXOS







La Sociedad Mexicana de Electroquímica A. C.
otorga la presente:



CONSTANCIA

a
E. Monroy-Barreto, M. I. Franco-Tronco, J. G. Miranda-Hernández, H. Herrera-Hernández


Por su participación en el XXX Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y el 8th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society con el trabajo titulado:

Gel de Aloe-Vera como posible inhibidor de la corrosión de aceros industriales en 1M HCl

XXX Congreso Nacional
de la Sociedad Mexicana de Electroquímica


Dr. Facundo Almeraya Calderón

Presidente
Sociedad Mexicana de Electroquímica


Dr. Ricardo Orozco Cruz

Presidente
Comité Organizador



Boca del Río, Ver., 12 de junio de 2013









**La Sociedad Mexicana
de Electroquímica**

Otorga el presente

Reconocimiento

a

E. Monroy Barreto, A. Espinoza Vázquez, H. Herrera Hernández

Por su participación en el XXXI Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y el 9th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society con el trabajo titulado:

Extracto de Morinda Citrifolia como inhibidor natural de corrosión



Dr. Francisco Javier Rodríguez Gómez
Presidente
Sociedad Mexicana de Electroquímica
2015 - 2017



Dra. Citlalli Gaona Tiburcio
Presidente
Comité Organizador
UANL

Monterrey, Nuevo León
Mayo 30 a Junio 03 de 2016



FIME
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



EGS



CIITA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN AERONÁUTICA | FIME
UANL



August 2016

TO WHOM IT MAY CONCERN
P r e s e n t

This is to certify that *Hector Herrera-Hernández, Erick Monroy-Barreto, Enrique Corona-Almazán, José Guadalupe Miranda Hernández, Jorge Morales-Hernandez, Araceli Espinoza-Vazquez* presented the contribution: **LIQUID NATURAL EXTRACTS AS GREEN CORROSION INHIBITORS FOR INDUSTRIAL STEELS EXPOSED TO CORROSIVE ENVIRONMENTS**, in the Materials and the Environment Symposium at the XXV International Materials Research Congress held in Cancun, Mexico from August 14th to 19th, 2016.

Sincerely,



José Gerardo Cabañas Moreno
President



BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Abdelkader K., Abdellah K., Kamel H., Razika M., *Journal of Molecular Liquids*, 214, 293-297 (2016).
2. Amir H., Navarchian, Mehrnaz Joulazadeh, Fariba Karimi (2014). Investigation of corrosion protection performance of epoxic coatings modified by polyaniline/clay nanocomposites on steel surfaces. *Progress in Organic Coatings*, Vol. 77, issue 2, pp.347-353.
3. Adele Basset, (2014) La Lucha contra la Corrosión: Normas del Comité G01 de Lucha Contra Tendencias Destructivas de la Naturaleza. *Rev. ASTM Standardization News*. Noviembre/Diciembre.
4. Applegate L. M., (1960). *Cathodic Protection*, University of Central Florida, McGraw Hill, New York.
5. Benjamín Cummings (2006) Pearson Education Inc. Ecuación de Nerst. Tema 5 Termodinámica de Procesos Electroquímicos. (07 de Julio de 2015) Obtenido de http://www.uv.es/tunon/Master_Ing_Bio/tema_5.pdf/
6. Buralla Montal Ernest, (2012) Estudio del Efecto de los Inhibidores de la Corrosión en Armaduras del Hormigón, Escuela Técnica superior de Ingeniería de Edificación Universidad Politécnica de Valencia, Master en Edificación- Especialidad Tecnología 11/12 PP. 54-60. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/17809/ESTUDIO%20DEL%20EFECTO%20DE%20LOS%20INHIBIDORES%20DE%20LA%20CORROSI%C3%93N%20EN%20ARMADURAS%20DEL%20HORMIG%C3%93N.pdf?sequence=1>
7. Callister, W.D., (2007). *Materials science and engineering: an introduction*. 7^a ed. USA: Jhon Wiley & Sons, Inc. pp 252-357
8. CANACERO, Organismo Nacional de Normalización Catálogo de Normas. pag. 21, (2015).
9. Chithra, P. S. (1998). Influence of Aloe Vera on collagen turnover in healing of dermal wounds in rats. *Indian Journal of Experimental Biology* 36, 896.

10. Conforti & González, 2012, p.3. Evaluar la eficiencia del extracto de mango como inhibidor de corrosión en cupones de acero al carbono mediante pruebas estáticas y dinámicas de laboratorio. (Tesis de Licenciatura). Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 89pp.
11. Domínguez-Fernández, R., Arzate-Vázquez, I., Chanona-Pérez, J., Welti-Chanes, J. S., Alvarado-González, J. S., Calderón-Domínguez, Gutiérrez-López, G. (2012). EL GEL DE Aloe vera: ESTRUCTURA COMPOSICIÓN QUÍMICA, PROCESAMIENTO, ACTIVIDAD BIOLÓGICA E IMPORTANCIA EN LA INDUSTRIA FARMACÉUTICA Y ALIMENTARIA. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 23-43.
12. Franco Tronco Mara I. (2014). "Evaluación electroquímica de extractos naturales a partir de hojas de *Morinda Citrifolia* como posibles inhibidores de corrosión". (Tesis de Licenciatura) Universidad Veracruzana p. 22.
13. G. H. Koch, M. P. H. Brongers, N. G. Thompson; "Cost of Corrosion study unveiled", Supplement to Materials Performance, July (2002) 2.
14. García Inzunza Ramsés. (2014). "Inhibidores de corrosión de acero en medios ácidos a partir de extractos naturales". Tesis Doctoral, pp. 24-27.
15. Genesca J. y Ávila J. (1996). "*Más Allá de la Herrumbre*". México: Fondo de Cultura Económica 2a Reimpresión.
16. Herrera-Hernández Héctor (2007) "Protección a la Corrosión de Materiales Compuestos de Aluminio (Al/SiC-MMCs)" Tesis Doctoral, pp 44-45.
17. Hernández, L., Miranda, J., & Domínguez, O. (2002). Efecto protector de las capas de productos de corrosión de exposición atmosférica. *Revista de Metalurgia*, 38(2): 108-116 doi: 10.3989/revmetalm. 2002.v38.i2.391.
18. Herrera-Hernández H., Mara I. Franco-Tronco, José G. Miranda-Hernández, Enrique Hernández-Sánchez, Araceli Espinoza-Vázquez, Gerardo Fajardo (2015). Gel de aloe-vera como potencial inhibidor de la corrosión del acero de refuerzo estructural. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, Vol.6, No.3, pp.9-23
19. Hsu, C.H.; Mansfield, F. Concerning the conversion of the constant phase element parameter Y_0 into a capacitance. *Corrosion* **2001**, 57, 747–748.

20. Kugo Islas Gabriela (2010) 2 Evaluación de la corrosividad atmosférica aplicando la normativa ISO y los métodos electroquímicos (probetas planas cada estación del año) “Tesis de Licenciatura, Poza Rica de Hidalgo Ver. Pág. 26-35.
21. Loaiza & Vidal, 2013. Evaluación de la capacidad inhibidora de la corrosión de los extractos del árbol de NEEM (*Azadirachta Indica*) en un medio salino. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Cartagena. Colombia.76pp.
22. A.Lopez Villa, A. Pérez-Terrazo y G.J. Gutiérrez, C.A. Vargas (2011). Formas de equilibrio de gotas que emergen lentamente de cilindros. *REVISTA MEXICANA DE FÍSICA* 57 (4) , 330–337.
23. M. Palomar-Pardavé, M. Romero-Romo, H. Herrera-Hernández, M.A. Abreu-Quijano, Natalya V. Likhanova b, J. Uruchurtu c, J.M. Juárez-García (2012). Influence of the alkyl chain length of 2 amino 5 alkyl 1, 3, 4 thiadiazole compounds on the corrosion inhibition of steel immersed in sulfuric acid solutions *Corrosion Science* 54 pp. 231-243.
24. Meas, Y. (2012). Técnicas electroquímicas para la medición de velocidades de corrosión. Centro de investigación y desarrollo en electroquímica, Tecnológico de Sanfandila. Querétaro. 15 p.
25. Medel Zavala Adriana Elizabeth y Ortiz Velazquez Jose Rodrigo (2006). Estudio de Factibilidad para el cultivo de sábila (aloe-vera) en San Luis Potosi. (Tesis de Licenciatura) Universidad Autonoma de San Luis Potosi, Facultad de Economía, pp. 31-40.
26. Mendoza, Duran & Genescá. 2014. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en Corrosión, Recuperado de <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF>
27. Nelson S.C. (2003) *Morinda Citrifolia* L. University of Hawai‘i at Manoa, College of Tropical Agriculture and Human Resources, Obtenido de <http://www.ctahr.hawaii.edu/noni/noni.pdf> (Consulta: 11 de Junio de 2015)
28. Olivares Xometl Crescencio Octavio (2005). Desarrollo de inhibidores de corrosión derivados de a-aminoácidos y b-amino alcoholes usando simulación molecular y técnicas electroquímicas. (TESIS DOCTORAL). Departamento de posgrado en metalurgia y materiales. ESIQIE, IPN. pp. 1-11.

29. Oshas. 18001 (16 de Julio de 2015). Obtenido de http://www.ingenieroambiental.com/4023ohsas_18001.pdf.
30. Pech-Canul Máximo A, González Dzul Carlos E. (2007) Inhibición de la corrosión de acero, zinc y cobre en soluciones de HCl usando jugo de sábila Departamento de Física Aplicada, Cinvestav-Mérida, México. Memorias de Extenso SMEQ128 10p.
31. Perez Nestor (2004) Electrochemistry and Corrosion Science (Information Technology: Transmission, Processing & Storage), Kluwer Academic Publishers pp 01-200.
32. Procuraduría Federal de Protección al Medio Ambiente (16 de junio de 2015) Obtenido de http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/212/1/mx/documentos_tecnicos.html.
33. Qin Hu, Yubing Qiu, Guoan Zhang, Xingpeng Guo (2015). Capsella bursa-pastoris extract as an eco-friendly inhibitor on the corrosion of Q235 carbon steels in 1 mol·L⁻¹ hydrochloric acid. Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol. 23, Issue 8, pp. 1408-1415.
34. R. Alvarez-Bustamante, G. Negron-Silva, M. Abreu-Quijano, H. Herrera-Hernandez, M Romero, Romo, A. Cuan, M. Palomar-Pardavé (2009) Electrochemical study of 2-mercaptoimidazole as a novel corrosion inhibitor for steels. Electrochimica Acta 54 pp. 5393–5399.
35. R. Winston Revie & Herbert H. Uhlig. (2008) Corrosion and Corrosion Control An Introduction to Corrosion Science and ENgineering. 4th Edition Editorail WILEY-INTERSCIENCE pp 479.
36. Raicho Raichev, Lucien Veleva, Benjamin Valdez, *Corrosión de metales y degradación de materiales*, Departamento de Editorial Universitaria, Mexicali, México (2009) pp. 58-61.
37. Ramírez Reyes J.L., “Métodos Experimentales en la Ciencia de la Corrosión” Ed. Instituto de Ingeniería, UV Veracruz (2007).
38. Räuchle Fritz y Díaz Tang María Isabel (1990) Inhibición de la Corrosión PARTE C: Descripción y consideraciones prácticas de los inhibidores en fase vapor. Revista de Química. Vol. IV, N° 2. PP 167-173.

39. Reyes, R. (2011). Evaluación Electroquímica de extractos vegetales como inhibidores de corrosión. (Tesis de licenciatura). Universidad Veracruzana. Poza Rica. 283pp
40. Rodrigo Sanchotene Silva, Carlos Alemán, Carlos Arthur Ferreira, Elaine Armelin, Jane Zoppas Ferreira, Álvaro Meneguzzi (2015). Smart paint for anodic protection on steel. Vol. 78, pp. 116-123
41. Spies H. J. (2015). Corrosion behaviour of nitrided, nitrocarburized and carburised steels. Thermochemical Surface Engineering of Steels, pp.267-309.
42. T. Coan, G.S. Barroso, R.A.F. Machado, F.S. de Souza, A. Spinelli, G. Motz (2015). A novel organic-inorganic PMMA/polysilazane hybrid polymer for corrosion protection. Progress in Organic Coatings, Vol. 89, pp.220-230.
43. Torres Peydró, Arturo; Toranzo Reyes, Amelia.. *Morinda Citrifolia (Tahitian Noni) History Current Studies About its Medical Use*. Holguín , Cuba: Departamento de Estomatología Infantil. Unidad Docente de Estomatología Fuente: Correo Cient Med Holguin; 13(4), 2009.
44. Ulloa , J. A., Rosas Ulloa, P., Ramírez Ramírez, J. C., & Ulloa Rangel, E. B. (2012). El noni: propiedades, usos y aplicaciones potenciales. *Revista Fuente Año 4*, pp.44-49.
45. United Nations Environment Programme.(16 de Junio de 2015) Obtenido de <http://www.unep.org/ecosystemmanagement/>
46. Vera, E. (2010). Uso de métodos electroquímicos como herramientas para evaluar parámetros de interface en sistemas heterogéneos metal/medio acuoso. Academia, 34(131), 241-251.