

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUAR LA EFICIENCIA DEL EXTRACTO DE MANGO COMO INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN EN CUPONES DE ACERO AL CARBONO MEDIANTE PRUEBAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS DE LABORATORIO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Br(s):

Conforti C., Giovanni L.

González S., Carlos E.

Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUAR LA EFICIENCIA DEL EXTRACTO DE MANGO COMO INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN EN CUPONES DE ACERO AL CARBONO MEDIANTE PRUEBAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS DE LABORATORIO

TUTORES ACADÉMICOS: Ing. Francisco Yánez.
Ing. Maribel Suárez.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Br(s):
Conforti C., Giovanni L.
González S., Carlos E.

Para optar al Título
de Ingeniero Químico.

Caracas, 2012

Caracas, Noviembre de 2012

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Giovanni L. Conforti C. y Carlos E. González S., titulado:

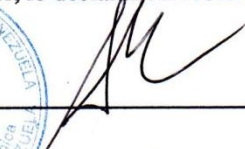
**“EVALUAR LA EFICIENCIA DEL EXTRACTO DE MANGO COMO
INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN EN CUPONES DE ACERO AL
CARBONO MEDIANTE PRUEBAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS DE
LABORATORIO”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



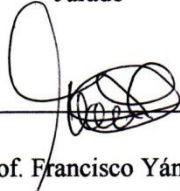
Prof. Armando Vizcaya

Jurado



Prof. Andrés Rosales

Jurado



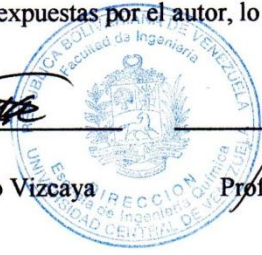
Prof. Francisco Yáñez

Tutor Académico



Profa. Maribel Suárez

Tutor Académico



DEDICATORIA

A Dios,

A mis Padres, mis ejemplos de perseverancia y superación.

*A la Ilustre Universidad Central de Venezuela, la casa que vence las
sombras.*

Giovanni Conforti

DEDICATORIA

A toda mi familia un ejemplo de superación.

A mis hermanos Ing. Cristóbal Armas Toro y Fernando Martínez.

Carlos González

AGRADECIMIENTOS

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela, por abrirme sus puertas, brindándome la oportunidad de formarme como Ingeniero Químico, siendo un hogar más, durante mi periodo de formación.

A mis padres, Carmine Conforti y Ana Cardoni, a quienes les debo la vida y quienes me formaron inculcándome los mejores valores, dándome una formación integra como persona. A mi hermana Emilia Conforti por su apoyo incondicional y su comprensión en todo momento. Al resto de mis familiares quienes siempre me han brindado su apoyo y motivación.

A mis tutores el Profesor Francisco Yáñez y la Profesora Maribel Suárez, por el apoyo y la asesoría que me brindaron en el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, aclarando mis dudas a medida que se desarrollaba el proyecto.

A mi amigo y compañero de tesis Carlos González por ayudarme a afrontar esta fase y acompañarme en los logros obtenidos en esta última etapa de la carrera.

Al señor Armando Martínez por siempre estar dispuesto a brindar su apoyo para resolver los problemas que se fueron presentando a lo largo del desarrollo de este proyecto, y por todas sus anécdotas.

A mis amigos Alfonzo Rastelli, Lessa Henao, Manuel Antelo y Johnattan Morantes por la colaboración brindada para conseguir los insumos necesarios para la elaboración de los ensayos experimentales.

A los profesores Engel Ochoa, Carolina Paff, María Rodríguez, Migués Ríos y Luis García quienes aportaron su granito de arena para permitir que este proyecto se llevase a cabo.

Al compañero tesista Francisco Delgado, por facilitarme el acceso al laboratorio de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, donde se llevaron a cabo parte de los ensayos experimentales contemplados en la presente investigación.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Química por todos los conocimientos que me brindaron a lo largo de mi carrera.

A todos mis compañeros y amigos de carrera quienes hicieron que todo este periodo de formación fuera mucho más corto y agradable.

Y a todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron a que esto fuera posible.

Muchas Gracias.

Giovanni Conforti

AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos totales a la ilustre Universidad Central de Venezuela por ser la casa que me permitiera vivir momentos inolvidables tanto personales y académicos durante todo este proceso de aprendizaje con el fin de culminar con éxito la carrera universitaria.

Agradecimiento a nuestros tutores académicos el Prof Francisco Yanez conocido como “Yeyo” y la Prof(a) Maribel Suárez, por ser los pioneros de este trabajo, intercambiar sus ideas con nosotros, asesorándonos y apoyando en cada momento.

Gracias a Dios Todopoderoso, por mantenerme con una excelente salud y permitirme de esta manera combatir y superar los obstáculos presente durante este lapso de mi vida.

A mis padres Domingo González y Miriam Sánchez de González que de verdad no juegan carrito al momento de ser ejemplos de vida y superación, con altas y bajas nunca renunciaron para buscar el bienestar de toda mi familia. Mil gracias de verdad por traerme al mundo y compartir su existencia con la mía.

A Giovanni Conforti mi compañero y amigo cuya colaboración y determinación permitieron que lográramos tan excepcional meta y superar los vaivenes que se presentaron en el camino de la realización de este trabajo.

A nuestros amigos Rastelli y Lessa Henao, gracias a ellos tuvimos acceso al agua destilada, insumo fundamental para los ensayos que se realizaron.

A mis panas y compañeros Manuel Antelo, Fernando Medina, Carlos La Maida (Tycho) y sus respectivas familias cuya ayuda incondicional fueron fundamentales durante mi desarrollo universitario y personal.

A mis amigos y hermanos el Ing. Ronald Ybarra y el Ing. Geovanny Silva sin su ayuda tal vez el camino se me hubiese sido mucho más espinoso y empinado. Son

ese tipo de personas que te consigues en el camino y se convierten en tu sangre. Mil Gracias!

Al Sr Armando Martínez, su ayuda incondicional es para mí un ejemplo de vida.

A los Profesores Engel Ochoa, María Rodríguez, Luis García, Migue Ríos y Carolina Paff por su coloración en cada momento que se le solicito.

Al tesista Francisco Delgado por facilitarnos el ingreso a la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales.

A los Ingenieros Jean Rivero y Anmary González por su ayuda y colaboración para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente a todos aquellos amigos, compañeros y profesores, gracias de todo corazón.

Carlos González

Conforti C., Giovanni L.

González S., Carlos E.

**EVALUAR LA EFICIENCIA DEL EXTRACTO DE MANGO
COMO INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN EN CUPONES DE
ACERO AL CARBONO MEDIANTE PRUEBAS ESTÁTICAS Y
DINÁMICAS DE LABORATORIO**

Tutores Académicos: Prof. Francisco Yáñez. Profa. Maribel Suárez.

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química
2012, n° pág. 89.**

Palabras Claves: Corrosión, Inhibidores, Extracto de Mango, Rotavapor.

Resumen. La corrosión es un fenómeno que produce el deterioro de los materiales, como consecuencia de la tendencia que tienen los elementos en alcanzar su nivel de menor energía. Este fenómeno trae consigo una serie de problemas que van desde lo económico hasta lo social. Es por ello que durante las últimas décadas se han realizado investigaciones para combatir la problemática que conlleva la corrosión, algunas de ellas se centran en el uso de inhibidores, cuyas propiedades químicas y físicas permiten disminuir la velocidad de corrosión. Sin embargo, muchos de estos inhibidores han resultado ser poco amigables con el medio ambiente, lo que genera la necesidad de encontrar o desarrollar inhibidores que cumplan un papel más favorable con el medio, por lo que el objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar la eficiencia del extracto de mango a diferentes concentraciones como inhibidor natural de la corrosión en cupones de acero al carbono mediante pruebas estáticas y dinámicas de laboratorio. Para lograr este objetivo se ejecutaron ensayos de corrosión en tres sistemas. El primero consistía de un equipo de exposición a flujo continuo, donde se evaluó la velocidad de corrosión que presentaron las muestras metálicas impregnadas con el extracto de mango mediante inmersión y rotavaporación, utilizando como medio corrosivo una solución salina de cloruro de sodio (NaCl) al 5% p/p a una temperatura de 65°C y una velocidad de flujo de 1,1 m/s. De manera similar se efectuaron ensayos de corrosión en una cámara de niebla salina bajo la norma ASTM B117-03 y se llevaron a cabo ensayos de inmersión bajo la norma ASTM G31-72 a una temperatura de 65°C y presión atmosférica. Para determinar la velocidad de corrosión se hizo uso de la técnica de pérdida de peso, cuyos resultados permitieron obtener eficiencias relacionadas para cada prueba. En el caso de los ensayos en régimen estático se obtuvieron eficiencias de hasta 42% con la técnica de la rotavaporación y 31% para la técnica de inmersión. En relación a las pruebas en régimen dinámico se obtuvieron resultados bastantes satisfactorios para la técnica de rotavaporación, cuya eficiencia alcanzó un 72%, mientras para el método de impregnación por inmersión se obtuvieron eficiencias de inhibición de un 14% aproximadamente.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS	xviii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Objetivos.	6
CAPÍTULO II	7
ANTECEDENTES	7
2.1 Aspectos Generales de la Corrosión.	9
2.2 Tipos de Corrosión.....	11
2.3 Variables que Afectan la Corrosión.	13
2.4 Inhibidores de Corrosión.....	16
2.5 Técnicas de Aplicación de los Inhibidores.	22
2.6 Recubrimientos.	22
CAPÍTULO III	25
MARCO METODOLÓGICO	25
3.1 Preparación de los Cupones de Acero al Carbono.....	26
3.2 Medio Corrosivo.	26
3.3 Métodos de Impregnación.....	27

3.4 Pruebas de Corrosión en Régimen Estático.	28
3.5 Pruebas de Corrosión en Régimen Dinámico.	31
3.6 Evaluación de los Cupones Corroídos.	33
3.7 Selección de la Concentración más Eficaz.....	35
CAPÍTULO IV	36
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	36
4.1 Metalografía de los Cupones de Acero al Carbono.	36
4.2 Ensayo de Corrosión en la Cámara de Niebla Salina.....	37
4.3 Ensayo de Corrosión en el Equipo de Exposición a Flujo.	41
4.4 Ensayo de Corrosión por Inmersión.....	46
4.5 Microscopía Óptica de los Cupones Corroídos.....	50
4.6 Análisis de la Superficie Corroída Mediante los Métodos de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopía de Rayos X (EDX).	54
4.7 Comparación del Inhibidor para cada uno de los casos evaluados.	62
4.8 Análisis de la adsorción del inhibidor sobre los cupones metálicos.	65
CAPÍTULO V	69
CONCLUSIONES	69
CAPÍTULO VI	71
RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	72
APÉNDICES	78
Apéndice A: Preparación de los cupones para realizar la metalografía.....	78
Apéndice B: Preparación de los cupones de corrosión previa a los ensayos de corrosión.....	78

Apéndice C: Preparación de la solución salina al 5% p/p de cloruro de sodio (NaCl).....	79
Apéndice D: Proceso de decapado de los cupones de acuerdo a la Norma ASTM G1-03.	79
Apéndice E: Uso de la planta desmineralizadora.....	80
Apéndice F: Acondicionamiento previo del sistema para evaluación de corrosión a flujo continuo.	81
Apéndice G: Composición de los cupones de acero al carbono según norma ASTM A53-02.	82
ANEXOS	83
Anexo A: Cálculos tipo.....	83
Anexo B: Curva de Decapado.....	86
Anexo C: Imágenes.	86
Anexo D: Plan de Trabajo.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formas de corrosión.	13
Figura 2. Velocidad de corrosión en función de la concentración cloruro de sodio a condiciones constantes.	15
Figura 3. Mecanismo de acción de los inhibidores.	18
Figura 4. Isoterma de Langmuir.	21
Figura 5. Esquema general de trabajo.	25
Figura 6. Rotavapor.	27
Figura 7. Cámara de niebla salina.	30
Figura 8. Diagrama del equipo utilizado para los ensayos en dinámico.	31
Figura 9. Microscopios utilizados.	34
Figura 10. Microestructura de los cupones de acero en estudio.	36
Figura 11. Eficiencia del inhibidor aplicado mediante la técnica de inmersión para las diferentes concentraciones evaluadas en el ensayo efectuado en la cámara salina.	40
Figura 12. Eficiencia del inhibidor aplicado mediante la técnica de inmersión para las diferentes concentraciones evaluadas en el ensayo de exposición a flujo.	45
Figura 13. Eficiencia del inhibidor aplicado mediante la técnica de inmersión para las diferentes concentraciones evaluadas en el ensayo de inmersión.	49
Figura 14. Microestructura de un cupón impregnado por rotavaporación para el ensayo en régimen dinámico luego del decapado.	50
Figura 15. Microestructura de un cupón en blanco para el ensayo en régimen dinámico luego del decapado.	51
Figura 16. Microestructura de un cupón impregnado por rotavaporación para el ensayo en la cámara salina luego del decapado.	52

Figura 17. Microestructura de uno de los cupones en blanco para el ensayo en la cámara salina luego del decapado.	53
Figura 18. Fotomicrografía a 100X de una muestra impregnada por la técnica de rotavaporación que fue sometida al ensayo de exposición a flujo y posteriormente decapada.	54
Figura 19. EDX puntual sobre la zona 1 de la muestra impregnada por la técnica de rotavaporación que fue sometida al ensayo de exposición a flujo y posteriormente decapada.	55
Figura 20. Fotomicrografía a 100X de una muestra impregnada por la técnica de rotavaporación que fue sometida al ensayo de corrosión en la cámara de niebla salina y posteriormente decapada.	56
Figura 21. Fotomicrografía a 1000X de la superficie de la muestra impregnada por la técnica de rotavaporación que fue sometida al ensayo en la cámara de niebla salina y posteriormente decapada. (b) EDX puntual sobre la zona 1. (c) EDX puntual sobre la zona 2.	57
Figura 22. (a) Fotomicrografía a 100X de una muestra en blanco que fue sometida al ensayo de exposición a flujo y posteriormente decapada. (b) EDX puntual sobre la zona 1.	59
Figura 23. (a) Fotomicrografía a 1000X de la muestra en blanco que fue sometida al ensayo de exposición a flujo y posteriormente decapada. (b) EDX puntual sobre la zona 1.	60
Figura 24. Fotomicrografía a 100X de las muestras que fueron sometidas al ensayo de exposición a flujo y posteriormente decapadas. (a) Muestra en blanco. (b) Muestra impregnada por rotavaporación.	61
Figura 25. Velocidad de corrosión obtenida en los diferentes ensayos para cada uno de los casos evaluados.	62

Figura 26. Eficiencia del inhibidor obtenida en los diferentes ensayos para cada uno de los casos evaluados.....	64
Figura 27. Comparación de las muestras metálicas con y sin inhibidor.....	66
Figura 28. Equipo de desmineralización de agua.	81
Figura 29. Curva de decapado de las cupones metálicos.....	86
Figura 30. Piezas metálicas utilizadas en los ensayos de corrosión.....	86
Figura 31. Cupones metálicos decapados luego de efectuar ensayos corrosivos.	87
Figura 32. Equipo empleado en la impregnación de las muestras por rotavaoracion y muestras impregnadas.	87
Figura 33. Impregnación de las muestras por inmersión.	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Velocidades de corrosión de los cupones de acero para el ensayo efectuado en la cámara salina con un tiempo de exposición de 168h.	37
Tabla 2. Eficiencia del inhibidor para los diferentes casos estudiados en el ensayo efectuado en la cámara salina con un tiempo de exposición de 168h.	39
Tabla 3. Velocidades de corrosión de los cupones de acero para el ensayo efectuado en el equipo de exposición a flujo con un tiempo de exposición de 24h.	42
Tabla 4. Eficiencia del inhibidor para los diferentes casos estudiados en el ensayo efectuado en el equipo de exposición a flujo.	43
Tabla 5. Velocidad de corrosión de los cupones de acero para el ensayo de inmersión efectuado a presión atmosférica y temperatura de 65°C durante un periodo de 168h.	46
Tabla 6. Eficiencia del inhibidor para los diferentes casos estudiados en las pruebas de inmersión.	47
Tabla 7. Masa ganada por los cupones luego del proceso de impregnación.....	65
Tabla 8. Composición del acero al carbono según norma ASTM A53-02.	82
Tabla 9. Cronograma de actividades.	89

LISTA DE SÍMBOLOS

- a : Constante de adsorción [L/mg].
 A : Factor preexponencial.
 A_m : Área de la muestra [cm²].
ASTM: American Society for Testing and Materials.
 C : Concentración de las especies adsorbidas en solución [mg/L].
 $C_{extracto}$: Concentración del extracto [% m/V].
 CR : Velocidad de corrosión [mpy].
 $(CR)_0$: Velocidad de corrosión de la muestra en blanco [mpy].
 $(CR)_i$: Velocidad de corrosión de la muestra con inhibidor [mpy].
 CR_m : Velocidad media [mpy].
 CR_i : Velocidad i [mpy]
 e : Espesor de la muestra [cm].
 E : Energía de activación [J·mol⁻¹].
EDX: Espectroscopía de Rayos X.
 h : Altura de la muestra [cm].
 I_e : Eficiencia del inhibidor.
 K : Constante de velocidad.
MEB: Microscopía electrónica de barrido.
 m_{NaCl} : Masa de NaCl [g].
 n : Número de mediciones.
 P_0 : Peso inicial de la muestra [g].
 P_{0c} : Masa inicial de las conchas [g].
 P_f : Peso Final de la muestra [g].
 P_{fc} : Masa final de las conchas [g].
 P_i : Peso en la medición i [g]
 P_m : Peso medio [g].
PIB: Producto interno bruto.
 L : Longitud de la muestra [cm].
 R : Constante universal de los gases [J·K⁻¹·mol⁻¹].
 S : Fracción de la superficie cubierta por adsorbato.
 T : Temperatura [K].
 t : Tiempo de exposición [h].
 V_{H_2O} : Volumen de agua requerido [L].
 V_{sol} : Volumen de solución [mL].
 ρ : Densidad de la muestra [g/cm³].
 ρ_{H_2O} : Densidad del agua [g/L].

INTRODUCCIÓN

La corrosión es el deterioro de las propiedades de un material a consecuencia de una reacción química o electroquímica con su entorno (Uhlig, 2011). Esto ocurre básicamente, por la tendencia natural que tienen los elementos de llegar a estados energéticos más bajos. La corrosión de los metales es un tema de suma relevancia, pues constituye una de las pérdidas económicas más grandes de la civilización moderna, generando el deterioro de una gran variedad de estructuras y equipos metálicos pudiendo ocasionar una serie de imprevistos tales como la ruptura de tanques de almacenamiento y tuberías, derrumbe de puentes, derrames de crudo a consecuencia de la ruptura de oleoductos y un sinnúmero de problemas, los cuales no solo tienen un impacto económico, sino que pueden impactar directamente sobre el ambiente e inclusive atentar en contra de la seguridad de las personas.

Entre los medios que aceleran y facilitan el fenómeno de la corrosión es el medio salino uno de los que cobra más relevancia en el campo industrial, ya que constituye un medio sumamente corrosivo debido a la presencia de especies que aumentan la conductividad del medio. En miras a combatir este fenómeno se han desarrollado una serie de métodos que buscan evitarlo o disminuirlo, entre los cuales se encuentran los ánodos de sacrificio, los recubrimientos y los inhibidores. Sin embargo, en la aplicación de la mayoría de los métodos que se utilizan para prevenir la corrosión, existen compuestos tóxicos y poco amigables con el ambiente, surgiendo la necesidad de desarrollar métodos de protección que sean ambientalmente amigables, de esta manera surge el presente Trabajo Especial de Grado en el cual se evaluó la eficiencia del extracto de mango como inhibidor de la corrosión en cupones de acero al carbono mediante pruebas estáticas y dinámicas de laboratorio.

Es de vital importancia e interés realizar un estudio de la corrosión en un sistema estático, el cual está caracterizado por la inmersión de las piezas metálicas en

el medio corrosivo, sin embargo los sistemas estáticos poseen una clara limitante ya que no permiten simular las condiciones reales de flujo tal como ocurre en el campo industrial, es por ello que también es de interés efectuar un estudio mediante un sistema dinámico, que permite someter a las piezas metálicas a un flujo continuo. Este sistema será el eje central de estudio, ya que permite simular las condiciones de operación real de las industrias, en donde se presentan diversos casos en los que equipos metálicos se encuentran expuestos directamente al medio salino. Para hacer frente a esta problemática surge la implementación de inhibidores, siendo de interés particular del presente trabajo el uso el extracto de mango como inhibidor orgánico de la corrosión.

Finalmente, para llevar a cabo cada uno de los objetivos planteados se hizo uso del sistema para ensayos dinámicos de corrosión, ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Central de Venezuela, el cual permite exponer a los cupones metálicos a un flujo salino continuo. Adicionalmente se realizaron ensayos de inmersión según la norma ASTM G31-72 y se sometieron a las muestras con y sin inhibidor a ensayos en una cámara salina según la norma ASTM B117-03 para evaluar de forma gravimétrica la velocidad de corrosión. Así es como se estudió el efecto de la variación de la concentración del extracto de mango sobre la velocidad de corrosión de los cupones de acero al carbono.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se describe la situación objeto de estudio, ubicándola en un contexto que permite comprender su origen y relaciones.

1.1 Planteamiento del Problema.

La corrosión es una reacción química o electroquímica entre un material (generalmente metálico) y su entorno, generando el deterioro del material y sus propiedades (Cicek, 2011). Esto ocurre básicamente por la tendencia natural que tienen los elementos de llegar a estados energéticos más bajos.

El fenómeno de la corrosión es causante de una variedad de problemas que pueden generar el cierre de plantas de procesos, la pérdida o contaminación de los productos en la industria, el colapso de estructuras, el aumento de los costos de mantenimiento e inclusive puede colocar en peligro la seguridad de las personas (UNLP, 2010), (Rosario, 2003). Por esta razón, cada día se desarrollan nuevos recubrimientos, se mejoran los diseños de piezas y estructuras, se crean nuevos materiales y se sintetizan mejores inhibidores, en un esfuerzo permanente por minimizar el impacto negativo de la corrosión.

Uno de los problemas de mayor importancia ocasionado por el fenómeno de corrosión son las innumerables pérdidas económicas, por ejemplo en el sector industrial existen pérdidas millonarias a consecuencia de este fenómeno, para tener una idea, solo en los Estados Unidos se estiman pérdidas que rondan los 500 billones de dólares anuales, lo que representa alrededor del 4% del producto interno bruto (PIB) de dicha nación (Sastri, 2011); según investigaciones estos costos pudieran ser reducidos en un 20% mediante un mejor uso del conocimiento existente en protección contra la corrosión (Bardal, 2004).

Entre las medidas que pueden tomarse a la hora de controlar el fenómeno de la corrosión, destacan las siguientes: la elección adecuada del material, el uso de recubrimientos e inhibidores, la protección catódica o anódica y un buen diseño (Davis, 2000). Tomando en consideración el enfoque que tendrá este Trabajo Especial de Grado, se hace referencia al uso de los inhibidores, los cuales permiten disminuir la velocidad de los ataques corrosivos en ambientes que catalizan la acción de estos, de manera que su eficacia radica en el efecto que tienen sobre las reacciones que se llevan a cabo en las zonas catódicas y anódicas de los materiales.

En la industria de extracción de petróleo y su procesamiento, los inhibidores siempre se han considerado como la primera línea de defensa contra la corrosión. Existe un gran número de estudios científicos que se han dedicado al tema de los inhibidores de la corrosión; pero la mayoría de estos han crecido a partir de experimentos de ensayo y error, efectuados tanto en laboratorios como en el campo industrial. Por tanto reglas, ecuaciones y teorías para guiar el desarrollo de inhibidores y su uso, son muy limitadas (Pierre, 2007). Entre los diferentes inhibidores existentes en el mercado, se encuentra los inhibidores de tipo orgánico, surgiendo de esta manera el uso de inhibidores alternativos como lo es el extracto de mango, el cual está constituido por una variedad de compuestos, como lo son los flavonoides, los taninos, las pectinas y los ácidos grasos, que le confieren propiedades antioxidantes, representando una alternativa totalmente orgánica como inhibidor de la corrosión y un agente amigable al momento de entrar en contacto con el medio ambiente.

En relación a los medios existentes que aportan las condiciones adecuadas para que los ataques corrosivos se aceleren, se puede mencionar al medio salino, el cual constituye uno de los ambientes más importantes a considerar en la lucha contra la corrosión, debido a que las soluciones salinas constituyen generalmente un medio mucho más corrosivo que el agua dulce a consecuencia de su mayor conductividad.

Siendo Venezuela un país netamente petrolero y en proceso de desarrollo, es de necesidad encontrar métodos de control frente al fenómeno de la corrosión; es en

este punto donde el estudio de los inhibidores permitió la creación del presente Trabajo Especial de Grado, el cual consistió en evaluar la eficiencia del extracto de mango como inhibidor de la corrosión en cupones de acero al carbono mediante pruebas estáticas y dinámicas de laboratorio. Para llevar a cabo eficazmente esta evaluación los estudios que se realizaron fueron a través de ensayos de corrosión en un sistema de flujo continuo y ensayos de corrosión efectuados en una cámara de niebla salina, así mismo los cupones de acero fueron sometidos a pruebas de inmersión.

1.2 Objetivos.

A continuación se presentan los objetivos a desarrollar en el presente trabajo de investigación.

1.2.1 Objetivo General.

Evaluar la eficiencia del extracto de mango a diferentes concentraciones como inhibidor de la corrosión en cupones de acero al carbono mediante pruebas estáticas y dinámicas de laboratorio.

1.2.2 Objetivos Específicos.

- Caracterizar los cupones de acero al carbono a fin de constatar el tipo de acero objeto de estudio.
- Determinar la velocidad de corrosión sobre cupones de acero al carbono en solución salina mediante pruebas estáticas de laboratorio (Cámara Salina e Inmersión de los cupones), con extracto de mango a diferentes concentraciones.
- Determinar la velocidad de corrosión sobre cupones de acero al carbono en solución salina en régimen dinámico con extracto de mango a diferentes concentraciones.
- Determinar la eficiencia del extracto de mango como inhibidor para las diferentes concentraciones evaluadas.
- Caracterizar mediante las técnicas de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopía de rayos X (EDX) los cupones de acero al carbono, luego de los ensayos de corrosión.
- Comparar el inhibidor de acuerdo a la eficiencia para las diferentes concentraciones evaluadas y seleccionar la que proporciona mayor protección al metal.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

En la última década se han realizado numerosos esfuerzos en la búsqueda de inhibidores capaces de mitigar el problema de la corrosión, sin embargo los trabajos relacionados en esta área se enfocan en su mayoría en compuestos inorgánicos, que resultan tóxicos y agresivos con el medio ambiente, por lo que es deseable el desarrollo de inhibidores totalmente naturales que no produzcan un impacto ambiental desfavorable. En esta línea a continuación se mencionan las investigaciones más importantes que guardan relación con el presente trabajo:

“Inhibición de la corrosión del acero al carbono en solución de ácido clorhídrico mediante el uso de extractos acuosos de la cascara de frutas.” (Cardozo, J., Cunha, J. y D’Elia, E. 8/04/2010).

Cardozo y colaboradores (2010), realizaron pruebas para evaluar la eficiencia de los extractos acuosos de la piel de naranja, mango, parchita y merey como inhibidores de corrosión del acero al carbono en una solución de ácido clorhídrico (HCl), para lograr dicho cometido los investigadores obtuvieron los extractos de frutas y realizaron un montaje de una celda electroquímica en donde se utilizó una solución de ácido clorhídrico (HCl) a 1M de concentración, así mismo realizaron la preparación de cupones de acero con dimensiones de 4·2·0,15cm los cuales fueron desbastados con lijas, posteriormente desengrasados, lavados y secados. Para la ejecución de los experimentos añadieron diferentes concentraciones de cada uno de los inhibidores y realizaron pruebas de electroquímica obteniendo así la eficiencia de los inhibidores a diferentes concentraciones, luego de comparar con una muestra patrón. De manera similar hicieron ensayos de inmersión, evaluando la corrosión con las técnicas de pérdida de peso y análisis superficial. Como resultados obtuvieron que la eficiencia del inhibidor se incrementa con el aumento de la concentración del extracto y decrece al aumentar la temperatura. Adicionalmente concluyeron que la

adsorción de los extractos de fruta en la superficie del acero al carbono sigue la isoterma de Langmuir.

“Efecto del extracto de té como inhibidor de la corrosión en acero dulce en una solución diluida de ácido sulfúrico.” (Loto, C. 1/08/2011).

Loto (2011) realizó pruebas a temperatura ambiente para estudiar el efecto inhibidor del extracto de té en la corrosión del acero dulce en presencia de una solución de ácido sulfúrico diluido. Las pruebas que se realizaron, se basaron en técnicas de pérdida de peso y en medidas potenciométricas (Curvas de polarización); para lograr su cometido el investigador tomó el extracto de té a partir de bolsitas de té “Lipton” y realizó la preparación en soluciones de 350 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 0,2 M y 0,5 M por separado, con concentraciones diferentes de extracto: 100%, 50% y 25%. Realizó experimentos de inmersión de las muestras metálicas durante 21 días en cada una de las soluciones, tomando los valores de pérdida de peso cada 3 días. Como resultados obtuvo que existe una inhibición efectiva de la corrosión del acero de bajo carbono a las diferentes concentraciones del inhibidor empleado, con valores de eficiencia de inhibición de hasta 94%, pero estableció que no existe una variación significativa en la eficiencia de inhibición para las diferentes concentraciones de extracto empleadas, es decir la eficiencia de inhibición no varía de manera significativa al variar la concentración del extracto.

“Análisis de la resina de Aloe Vera en polvo: Una alternativa en la inhibición de la corrosión.” (Bustamante, K. 2008).

Bustamante (2008), analizó el uso del Aloe Vera como pigmento y aditivo anticorrosivo de fondo alquídicos y epóxicos industriales, como una medida para controlar la corrosión. Para alcanzar dicho objetivo el investigador realizó la formulación de los recubrimientos anticorrosivos de manera de incorporar la resina de Aloe Vera en polvo, evaluó posteriormente la resistencia, estabilidad y propiedades de los recubrimientos alquídicos y epóxicos formulados. Como resultados obtuvo que los recubrimientos no presentaron ningún tipo de deterioro al ser expuestos a la intemperie en una zona del Estado Falcón. Por otra parte el investigador señala que

los ensayos químicos revelaron que los recubrimientos epóxicos son resistentes al ataque de agentes orgánicos y a electrolitos, mientras que los recubrimientos alquídicos no lograron resistir ese ataque.

2.1 Aspectos Generales de la Corrosión.

El término corrosión puede definirse de diferentes formas, de manera general hace referencia al deterioro de un material por interacción con el medio que le rodea (Bardal, 2004), a fines del presente trabajo conviene limitarse a la corrosión metálica, de esta forma la corrosión se define como el ataque destructivo que sufre un metal por reacción química o electroquímica con el ambiente (Uhlig, 2011). Este fenómeno tiene su origen en el hecho de que todos los elementos tienen la tendencia natural de combinarse con otros para alcanzar sus estados energéticos más bajos.

El fenómeno de corrosión puede clasificarse según el medio en el cual se desarrolla, como corrosión química y corrosión electroquímica (FIUBA, 2004); siendo la más frecuente y particularmente la de interés para el presente trabajo la corrosión de tipo electroquímica. La corrosión electroquímica se produce normalmente a temperatura ambiente o temperaturas no muy elevadas, afectando a un gran conjunto de elementos en los cuales el material constituyente es el acero, tales como tanques, tuberías, calderas, intercambiadores y estructuras (Gómez, 2006). La corrosión electroquímica involucra la formación de zonas anódicas y catódicas en donde se llevan a cabo reacciones de oxidación y reducción de manera simultánea, que implican la circulación de cargas eléctricas sobre el metal expuesto a corrosión (Ortega, 1990). Para que este tipo de corrosión tenga lugar es necesaria la existencia de dos zonas de diferente potencial, una de las cuales conformará al ánodo el cual sufrirá corrosión al ceder electrones, mientras que la otra zona constituirá al cátodo el cual aceptará los electrones cedidos por el ánodo. Similarmente es necesaria la presencia de un conductor eléctrico líquido y una conexión conductora entre el ánodo y el cátodo en cuestión.

Habiendo establecido la naturaleza electroquímica del fenómeno de corrosión, es útil examinar el proceso de corrosión del hierro, el cual se ilustra a continuación:

En las zonas anódicas se produce el fenómeno de oxidación o pérdida de electrones tal como se muestra en la Ecuación (1).



La reacción anódica produce la disolución del material afectado, en este caso el hierro, lo cual genera la transferencia de iones metálicos al medio corrosivo (FIUBA, 2004) acompañado del desplazamiento de los electrones hacia zonas catódicas.

El caso de las reacciones de reducción o de ganancia de electrones, que se llevan a cabo en las zonas catódicas envuelve más posibilidades, las más relevantes se muestran a continuación:

En la Ecuación (2) se muestra la reacción de desprendimiento de hidrógeno, la cual cobra importancia en medios fuertemente ácidos o en ausencia de oxígeno.



Las reacciones catódicas más relevantes en medios oxigenados, son las reacciones de reducción del oxígeno, las cuales depende del medio imperante en el sistema de corrosión.

La reacción de reducción del oxígeno en medio neutro o alcalino se muestra en la Ecuación (3).



La Ecuación 3 es de suma importancia puesto que ocurre en prácticamente todo los procesos corrosivos que se llevan a cabo en medio acuoso. Otra reacción importante es le reducción del oxígeno en medio ácido tal como se muestra en la Ecuación (4).



El desprendimiento del hidrogeno y la reducción del oxígeno son las reacciones catódicas que ocurren con mayor frecuencia en los procesos corrosivos. Diferentes reacciones catódicas pueden ocurrir simultáneamente sobre una superficie metálica que se corroe. En resumen la corrosión electroquímica se produce mediante la oxidación del metal que pasa a generar iones metálicos cargados positivamente en solución esta oxidación ocurre en las zonas anódicas, mientras que el exceso de electrones pasa a través del metal hacia las zonas catódicas donde los electrones son eliminados por una reacción de reducción (Davis, 2000).

2.2 Tipos de Corrosión.

Diversos tipos de corrosión se han establecido en base a la morfología aparente del material corroído, es decir se ha establecido una clasificación de la corrosión de acuerdo al aspecto de la superficie del material afectado. Esta clasificación es muy útil pues permite evaluar los daños generados sobre el material que ha sido atacado. De esta forma la corrosión se clasifica básicamente en:

2.2.1 Corrosión Uniforme.

La corrosión uniforme es la forma más común de corrosión e implica el desgaste continuo del metal, debido a que el ataque se lleva a cabo de manera uniforme sobre toda la superficie (Costa, 2005). Este tipo de corrosión es el menos peligroso pues permite predecir con cierta exactitud la vida útil de los materiales, salvo en casos excepcionales en los cuales se haya efectuado una elección groseramente inadecuada del material para un servicio en particular o cuando se presente un cambio drástico del medio corrosivo en cuestión (Sastri, 2011).

2.2.2 Corrosión por Picaduras.

La corrosión por picaduras es el ataque del material de forma no uniforme y muy localizada, lo cual da lugar a la formación de cavidades o

agujeros estrechos y profundos sobre la pieza afectada. Este tipo de corrosión se considera más peligroso que la uniforme puesto que resulta muy difícil, su detección y predicción así como el diseño preventivo. A pesar de que solo una pequeña porción del metal es corroída este tipo de perforaciones puede ocasionar la falla del sistema afectado (Pierre, 2007). Este tipo de corrosión se produce comúnmente en soluciones en donde existe la presencia de ciertos aniones como los cloruros.

2.2.3 Corrosión por Hendiduras.

La corrosión por hendiduras o grietas es una forma de ataque localizado que se produce dentro de pequeños espacios confinados o huecos que se forman cuando entran en contacto varios elementos existentes en el medio. Este tipo de ataque se produce comúnmente en juntas y roscas produciendo la corrosión acelerada en dichos lugares por la formación de zonas que favorecen la corrosión continuada. La corrosión por hendiduras es particularmente peligrosa debido a su difícil detección pudiendo generar que el material falle aunque en apariencia no existan signos visibles de corrosión (Davis, 2000).

2.2.4 Corrosión Bajo Tensión.

La corrosión bajo tensión es un tipo de corrosión que se produce por el efecto combinado de tensiones en el material y ataques del medio corrosivo, pudiendo generar el fallo del material, el cual se hace imprevisible. La tensión sobre el material puede ser aplicada o puede ser residual debido a tratamientos a los que se les ha sometido previamente al material en cuestión, como por ejemplo soldadura, corte y torneado (MetalImprovement, 2010).

La Figura 1 muestra de manera esquemática los tipos de corrosión antes mencionados.

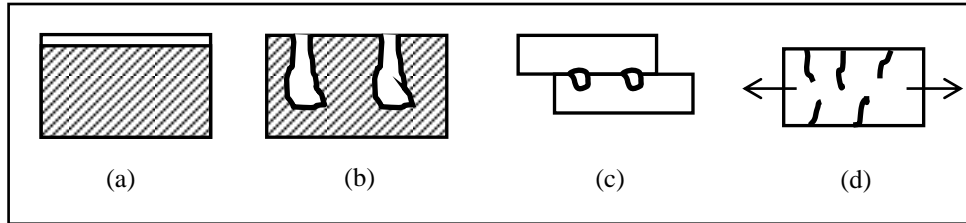


Figura 1. Formas de corrosión.

(a) Corrosión uniforme. (b) Corrosión por picaduras. (c) Corrosión por hendiduras. (d) Corrosión bajo tensión.

2.3 Variables que Afectan la Corrosión.

La velocidad con que ocurre el proceso de corrosión depende del material en cuestión y del medio al cual se es sometido. Diversas variables relacionadas con el medio corrosivo pueden afectar la velocidad de corrosión, cobrando importancia la temperatura, la velocidad de flujo y la concentración del medio corrosivo.

2.3.1 Efecto de la Temperatura.

La temperatura es una variable externa que afecta al proceso de corrosión de diversas maneras. Para el caso en que la velocidad de corrosión está gobernada completamente por el proceso de la oxidación del metal, la velocidad de corrosión tiende a incrementarse exponencialmente con el aumento de la temperatura, este comportamiento se refleja en la ecuación de Arrhenius, tal como se observa en la Ecuación (5) (ASM, 1992).

$$K = Ae^{\frac{-E}{RT}} \quad (5)$$

Donde:

K : Constante de velocidad.

A : Factor preexponencial.

E : Energía de activación [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$].

R : Constante universal de los gases [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$].

T : Temperatura [K].

Si bien lo expuesto anteriormente no deja de ser cierto, usualmente la temperatura no puede estudiarse aisladamente de otras variables en el proceso corrosivo. Los cambios de temperatura pueden afectar el límite de solubilidad de ciertos elementos constituyentes del medio en cuestión, esta alteración tiene profundos efectos sobre el fenómeno de corrosión. Para el caso particular de la corrosión del hierro en un sistema abierto, la velocidad de corrosión tiende a incrementarse con la temperatura hasta alcanzar los 80°C, punto después del cual comienza a disminuir. Este comportamiento se debe al hecho de que la velocidad de corrosión está controlada por la concentración de oxígeno en el medio; a medida que la temperatura se incrementa la solubilidad del oxígeno disminuye ocasionando una disminución de la velocidad de corrosión (ASM, 1992).

2.3.2 Efecto de la Velocidad Flujo.

La velocidad de flujo es una variable compleja que afecta al proceso de corrosión, su influencia depende de diversos factores propios del material o del medio corrosivo. De manera general la velocidad de corrosión aumenta lentamente con el flujo en régimen laminar, puesto que la formación de una capa de depósitos de corrosión, ocasiona un aumento en la resistencia de la difusión que domina el proceso de corrosión. Sin embargo cuando la velocidad de flujo alcanza valores suficientemente altos, típicamente en régimen turbulento, se produce la erosión de la superficie evitando la formación de depósitos, en este punto la velocidad de corrosión tiende a incrementarse fuertemente con el aumento de la velocidad de flujo, alcanzando un punto en el cual la velocidad de corrosión se hace independiente de la velocidad de flujo (Bardal, 2004).

La velocidad de flujo puede ser beneficiosa para el control de la corrosión localizada, velocidades de flujo bajas afectan la transferencia de

oxígeno causando que la superficie no pueda permanecer pasiva, favoreciendo el ataque localizado, mientras que si el movimiento del fluido es lo suficientemente alto la corrosión será generalizada (ASM, 1992).

2.3.2 Efecto de la Concentración del Medio.

La composición del medio corrosivo tiene en general efecto en la forma en que otras variables se manifiestan. Típicamente la corrosión se incrementa con la disminución del pH, y se mantiene independiente del mismo en soluciones neutras. Sin embargo para medios fuertemente alcalinos se observa un aumento de la velocidad de corrosión con el pH (ASM, 1992).

Desde el punto de vista de los constituyentes del medio corrosivo, cobra especial importancia la presencia del cloruro de sodio. Al medio corrosivo que posee una concentración de cloruro de sodio mayor o igual al 3,5% se le conoce como medio salino, el cual constituye uno de los ambientes más importantes a considerar en la lucha contra la corrosión, puesto que las soluciones salinas constituyen generalmente un medio mucho más corrosivo que el agua dulce debido a su mayor conductividad. Sin embargo la velocidad de corrosión se ve principalmente influenciada por la disponibilidad de oxígeno, lo que produce que por encima de ciertas concentraciones del cloruro de sodio disminuya la solubilidad del oxígeno y por ende la velocidad de corrosión. La Figura 2 refleja de manera ilustrativa este fenómeno.

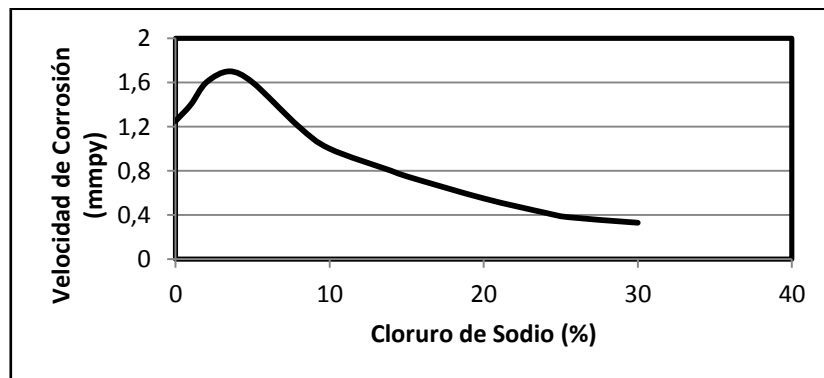


Figura 2. Velocidad de corrosión en función de la concentración cloruro de sodio a condiciones constantes (Corrosion Doctors, 2012).

2.4 Inhibidores de Corrosión.

El fenómeno de corrosión es indeseable puesto que genera numerosas pérdidas económicas, asociadas a la disminución de la vida útil de los materiales, por ello se han desarrollado una serie de estrategias para minimizar, en la medida de lo posible, la corrosión de los materiales. En este ámbito el uso de inhibidores químicos para disminuir la velocidad de corrosión está ampliamente extendido. En la extracción de petróleo y su procesamiento los inhibidores siempre se han considerado como la primera línea de defensa en contra de la corrosión. En los últimos años un gran número de estudios científicos se han dedicado al tema de los inhibidores de corrosión, sin embargo la mayoría de estos estudios se han desarrollado en base a experimentos de ensayo y error, por lo que las teorías o ecuaciones para guiar el desarrollo de inhibidores son inexistentes o muy limitadas (Pierre, 2007).

Por definición, un inhibidor es una sustancia química, que al ser añadida a un medio corrosivo disminuye efectivamente la velocidad de corrosión hasta un nivel aceptable (Uhlig, 2011). Los inhibidores de corrosión suelen usarse a bajas concentraciones. Un inhibidor no solo debe mitigar la velocidad de corrosión, además debe ser compatible con el ambiente. Estudios sugieren que la velocidad de corrosión disminuye a medida que aumenta la concentración del inhibidor con un comportamiento que se asemeja a las isoterms de adsorción (Sastri, 2011). Un parámetro comúnmente utilizado para la evaluación de inhibidores es la eficiencia del inhibidor, la cual es el cociente de la diferencia entre la velocidad de corrosión de una muestra con inhibidor y otra libre de inhibidor, con respecto a la que no posee inhibidor.

En general, la eficiencia del inhibidor se incrementa con el aumento de la concentración del inhibidor (Pierre, 2007).

Los inhibidores pueden ser compuestos orgánicos o inorgánicos, y usualmente se encuentran disueltos en entornos acuosos. Entre los inhibidores inorgánicos más eficaces se encuentran cromatos, nitritos, silicatos, carbonatos, fosfatos, sulfatos y arseniatos. Mientras que entre los inhibidores orgánicos se incluyen aminas,

compuestos heterocíclicos de nitrógeno, compuestos de azufre y algunos compuestos naturales como por ejemplo las proteínas (Davis, 2000).

Algunos criterios deben tomarse en cuenta a la hora de realizar la selección de un inhibidor de corrosión. El primer criterio que se debe utilizar es el factor económico, inhibidores menos costosos son siempre deseables, además otro punto importante a considerar es el efecto que puede producir el inhibidor sobre la salud de las personas y el ambiente. Desafortunadamente, la mayoría de los inhibidores eficaces de la corrosión son compuestos sintéticos con alto costo y al mismo tiempo, el uso de tales compuestos puede ocasionar daños a los seres humanos y al medio ambiente (El-Etre, 2008).

2.4.1 Clasificación de los Inhibidores.

Los inhibidores han sido clasificados de diferentes maneras, por ejemplo, de acuerdo a su funcionalidad química. Sin embargo, el esquema de clasificación más difundido se basa en el modo de interacción de los inhibidores con el material y con el medio. Desde este punto de vista existen básicamente dos vías en las que el inhibidor puede mitigar la corrosión, lo cual da lugar a dos grupos de inhibidores: los inhibidores de adsorción y los inhibidores modificadores de ambiente (Sastri, 2011).

Los inhibidores de adsorción son aquellos que reducen la velocidad de corrosión mediante la formación de una capa de moléculas que se adsorbe sobre la superficie del metal (Kopeliovich, 2009), lo cual dificulta el contacto entre su superficie y el medio corrosivo. Los inhibidores de adsorción pueden ser anódicos, catódicos o mixtos dependiendo de la reacción electroquímica que bloquean (Godínez, 2003).

Por otra parte los inhibidores modificadores de ambiente controlan la corrosión removiendo las especies corrosivas presentes en el medio, lo cual previene el ataque del metal (Uhlig, 2011).

2.4.2 Mecanismo de Acción de los Inhibidores.

El mecanismo de inhibición puede en general corresponder a un mecanismo de inhibición en la intercara o un mecanismo de inhibición en la interfase. El mecanismo de inhibición en la intercara implica la adsorción del inhibidor en la superficie del metal, para formar una estructura que es capaz de retardar las semi-reacciones de corrosión; mientras que el mecanismo de inhibición en la interfase se basa en el bloqueo de las reacciones de corrosión mediante la formación de películas multimoleculares (Godínez, 2003). La Figura 3 ilustra el mecanismo de acción de los inhibidores.

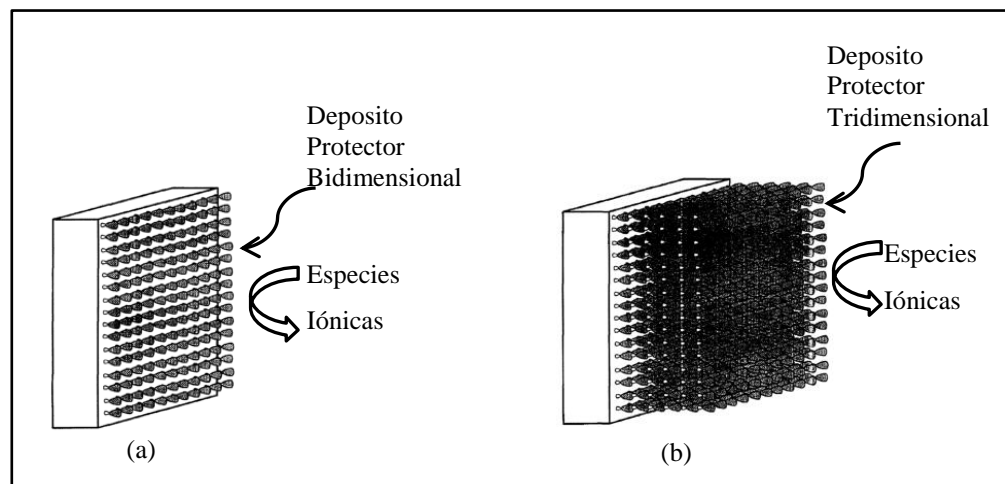


Figura 3. Mecanismo de acción de los inhibidores.

(a) Inhibición intercara. (b) Inhibición interfase.

(Godínez, 2003).

2.4.3 Extracto de Mango.

Si bien es cierto que se han llevado a cabo numerosos estudios de una cantidad innumerable de compuestos que pueden actuar como inhibidores de corrosión en medios acuosos, la realidad es que la gran mayoría de estos compuestos no cumplen las normativas de toxicidad y de protección del ambiente. Es por esto que el desarrollo de inhibidores no tóxicos y que sean amigables con el medio ambiente es un área que cobra gran importancia en el

campo de la corrosión, con miras a remplazar el uso de sustancias que son consideradas como altamente tóxicas (INTI, 2005). En este sentido los extractos vegetales encabezan la lista de las posibles alternativas a los inhibidores tradicionales. Los extractos de plantas son ambientalmente amigables, no tóxicos y se encuentran fácilmente disponibles. Estos extractos contienen muchos compuestos que son adsorbidos en la superficie del metal formando películas protectoras que mitigan las reacciones de corrosión (Sangeetha, 2011).

El extracto de mango representa una alternativa como inhibidor corrosivo. Este extracto se obtiene a partir del mango el cual es un fruto de forma ovoide y tamaños variados, con pesos que oscilan entre los 200 y los 2000 g. Posee un color verde característico o amarillo con tonalidades rojas, siendo muy apreciado para su consumo. La composición del mango puede variar de una especie a otra, numerosos compuestos y propiedades se le atribuyen (Torres, 2007). El extracto de mango posee una diversidad de compuestos entre los cuales se encuentran un conjunto de vitaminas, minerales, ácidos grasos, carbohidratos, ácidos orgánicos, aminoácidos, compuestos fenólicos, proteínas y fibra (Belén, 2000), (Correa, 1993), (AlimentosOrg, 2012). Los estudios referentes al uso del extracto de mango como inhibidor son escasos. Se ha señalado que el extracto de mango posee propiedades anticorrosivas, las cuales se deben a la presencia de compuestos antioxidantes tales como los polifenoles y los flavonoides; cuya capacidad antioxidante está relacionada con sus características estructurales. Además se ha dicho que la adsorción del extracto de mango sobre la superficie del acero al carbono sigue la isoterma de Langmuir (Cardozo, 2010). También se ha señalado que el mango contiene una cantidad apreciable de pectinas y taninos (AlCentral, 2012). Los taninos han sido señalados como compuestos capaces de inhibir la corrosión, a tal punto que se ha sugerido la fabricación de “primers” en base a taninos, cuya acción inhibidora se debe a la formación de

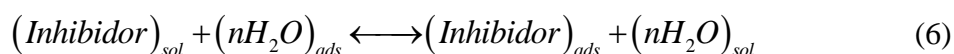
tanatos ferrosos y férricos, a los cuales se les considera compuestos de gran capacidad inhibidora (Matamala, 2000).

Se ha establecido que el mango es rico en pectinas, este tipo de polisacáridos se forma del gel de las paredes celulares de las plantas y sus frutos. Es un tipo de fibra viscosa la cual es de importante interés debido a sus aplicaciones en la industria alimenticia y farmacéutica, recientemente viene cobrando importancia en la industria química y posiblemente sea un agente anticorrosivo a considerar debido a que favorece interacciones hidrofóbicas. En base a esto se han realizado estudios para extraer la pectina del mango que se encuentra presente en semillas y cascaras. Landaeta y Orta (2010) estudiaron la extracción de la pectina de la semilla del mango con diversos solventes y técnicas llegando a la conclusión que la mejor técnica para la extracción de pectina de la semilla de mango es la extracción tipo Soxhlet ya que esta fue la que alcanzo el mejor rendimiento resultando ser de 25,42%. En este mismo sentido Dugarte (2011) realizó estudios para efectuar la extracción de la pectina contenida en la cáscara de mango, de donde obtuvo rendimientos hasta del 62% utilizando extracción tipo Soxhlet.

2.4.4 Adsorción de los Inhibidores.

La adsorción se produce como resultado de las fuerzas electrostáticas entre la carga eléctrica existente sobre el metal y las cargas iónicas o dipolos en las moléculas inhibidoras (Uhlig, 2011).

La adsorción de una sustancia orgánica en la interfase metal/solución puede escribirse tal como se muestra en la Ecuación (6).



De esta forma la adsorción del inhibidor ocurre mediante el desplazamiento de las moléculas de agua. Este fenómeno se produce ya que la energía de interacción entre la superficie metálica y el inhibidor es más fuerte que la interacción entre la superficie y las moléculas de agua (Llanos, 2002).

2.4.5 Isotermas de Adsorción.

La Isoterma de Adsorción es la relación matemática entre la masa de soluto adsorbido y la concentración del soluto en la solución una vez que se ha alcanzado el equilibrio (Leyva, 2012). Diversos modelos de isotermas se han desarrollado a través de los años, siendo de particular interés la isoterma de Langmuir (Sastri, 2011), la cual puede observarse en la Figura 4. La Ecuación (7) muestra la expresión matemática que representa a la isoterma de adsorción de Langmuir.

$$S = \frac{aC}{1 + aC} \quad (7)$$

Donde:

S : Fracción de la superficie cubierta por adsorbato [Adimensional].

a : Constante de adsorción [L/mg].

C : Concentración de las especies adsorbidas en solución [mg/L].

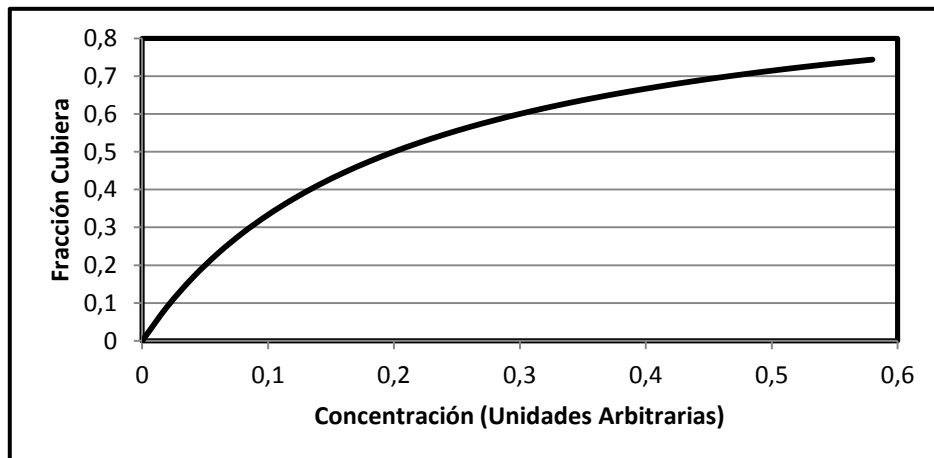


Figura 4. Isoterma de Langmuir.

2.5 Técnicas de Aplicación de los Inhibidores.

Tradicionalmente se utilizan tres técnicas de aplicación de los inhibidores las cuales son la inyección continua, la inyección por lotes y como aditivo de pinturas o recubrimientos. La inyección continua, es comúnmente utilizada para sistemas en fase acuosa e implica la aplicación de una porción del inhibidor en el sistema, mientras que la inyección por lotes se efectúa generalmente en sistemas en donde el espesor de película formado se mantiene continuo cubriendo la superficie del metal a proteger, de manera que se efectúan aplicaciones cada ciertos intervalos de tiempo para garantizar la persistencia de la película. Una de las técnicas de aplicación más utilizadas implica su uso como aditivo de pinturas o como recubrimiento los cuales protegen las áreas expuestas o susceptibles a corrosión (Uhlig, 2011).

2.6 Recubrimientos.

Los recubrimientos son el método más utilizado en la lucha contra la corrosión (Davis, 2000). Un recubrimiento es en esencia un material líquido que al ser aplicado sobre una superficie, produce una película seca o revestimiento que permanece adherido sobre la superficie (PDVSA, 2006); o dicho de otro modo un recubrimiento no es más que un fluido que, aplicado sobre una superficie, se transforma en una película sólida que se adhiere a la superficie recubriéndola y protegiéndola. Existen ciertas características que deben poseer los recubrimientos anticorrosivos para que proporcionen una buena resistencia a la corrosión; en base a esto es deseable un grado alto de adherencia a la superficie, baja porosidad y alta resistencia al flujo de electrones, mientras que los coeficientes de difusión de las especies iónicas como los cloruros deben ser bajos (Ahmad, 2006).

En general un recubrimiento consta básicamente de cuatro elementos, los cuales son: el solvente, el pigmento, los aditivos y el vehículo. Desde el punto de vista de los recubrimientos anticorrosivos puede decirse que los componentes más importantes son el solvente y el pigmento ya que son los que efectúan el trabajo de

protección, en el recubrimiento curado (Forsgren, 2006). El solvente tiene como misión principal mantener unidas las partículas sólidas y los pigmentos de la pintura una vez que este se seca, protegiendo al sustrato de la corrosión mediante la formación de una película homogénea. Por otra parte los pigmentos son compuestos que le confieren ciertas características a la pintura como el color, y el poder de cubrición, inclusive proveen resistencia a la corrosión. El vehículo constituye la porción líquida de la pintura en la que el pigmento se dispersa, mientras que los aditivos son compuestos que se le añaden con la finalidad de mejorar la calidad de la pintura (Ahmad, 2006).

Los recubrimientos anticorrosivos pueden clasificarse según su principio de inhibición de la velocidad de corrosión, en tres tipos: anódicos, catódicos y de resistencia. Los recubrimientos catódicos y anódicos controlan las reacciones catódicas y / o anódicas que se producen en la superficie del material, mientras que los de resistencia producen una disminución del movimiento de los iones. (UNT, 2009).

Los pigmentos anticorrosivos han venido experimentando un desarrollo importante en los últimos años buscando su remplazo por pigmentos menos tóxicos, auge que comenzó con la necesidad de remplazar el minio (óxidos de plomo), dando lugar a la introducción de diversos pigmentos como el cromato y el borato de zinc, también se habla de pigmentos basados en fosfatos de zinc (Schweigger, 2005) . En torno a la premisa del desarrollo de inhibidores que no sean tóxicos y sean ambientalmente amigables, un posible campo se abre ante la posibilidad de utilizar extractos vegetales como aditivos en la formulación de pinturas anticorrosivas.

Los recubrimientos anticorrosivos suelen estar constituidos por tres capas según las necesidades del sistema en particular. La primera es el fondo anticorrosivo el cual es el encargado de realizar la protección de la superficie mediante diversos mecanismos que dependen de la naturaleza de la pintura. Una segunda capa que usualmente es utilizada sobre el fondo anticorrosivo recibe el nombre de capa intermedia o de relleno, y su principal objetivo es aumentar la durabilidad del

recubrimiento mediante un aumento del espesor. Por último, frecuentemente se utiliza una tercera capa a la cual se le denomina como acabado cuya función es la protección frente a la intemperie y proporcionar un efecto decorativo (Schweigger, 2005).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se muestran las estrategias que se utilizaron para alcanzar los objetivos que han sido planteados en el presente Trabajo Especial de Grado. Para esto se hará descripción de los detalles concernientes a las técnicas y procedimientos que fueron empleados para la ejecución de los ensayos experimentales que guardan relación con la presente investigación. En esta línea la Figura 5 muestra un esquema general de la metodología de trabajo que se utilizó para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

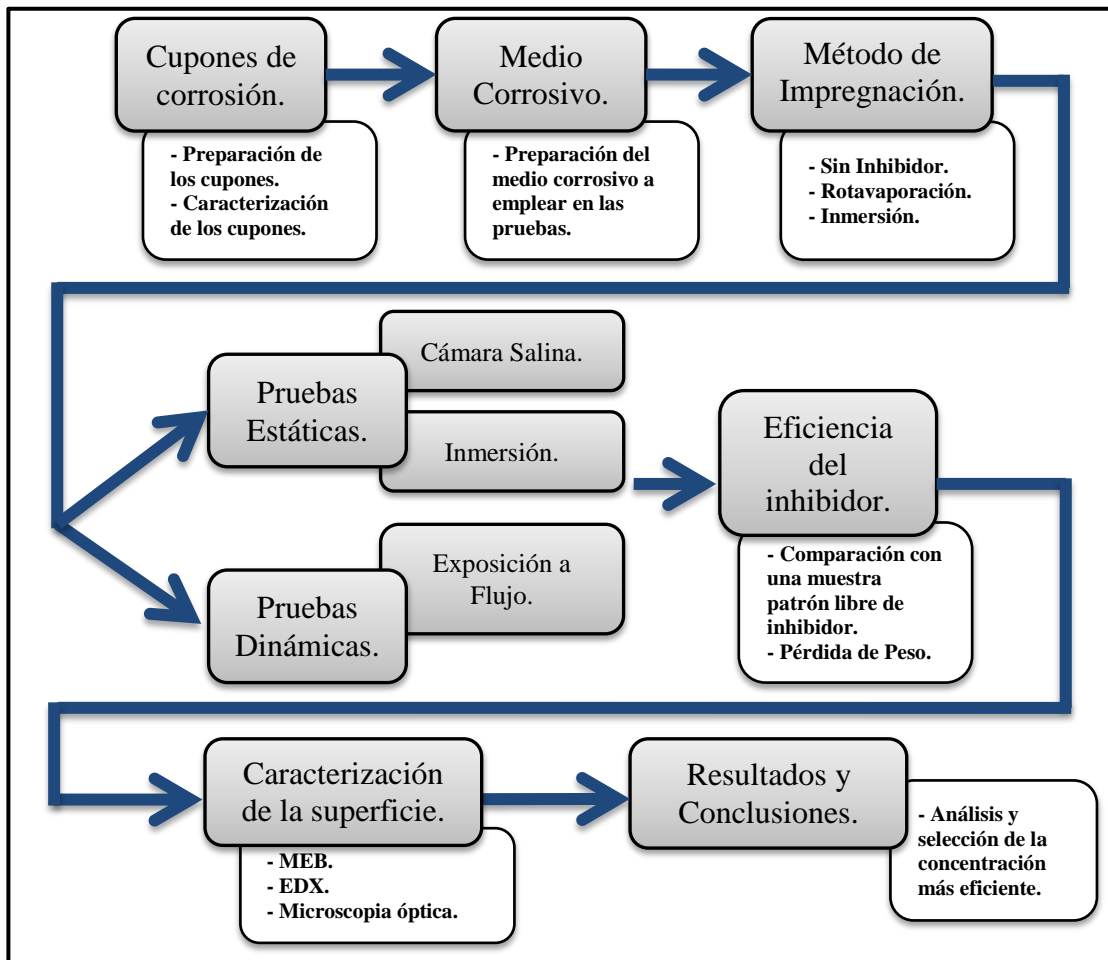


Figura 5. Esquema general de trabajo.

3.1 Preparación de los Cupones de Acero al Carbono.

Previo a los ensayos de corrosión los cupones metálicos fueron caracterizados a fin de conocer la composición inicial del material; para ello se hizo uso de técnicas de metalografía. El proceso consistió en realizar el desbaste de la superficie de los cupones mediante el uso de lijas de carburo de silicio de diferentes grados de abrasión (80, 240, 360, 400 y 600), la finalidad no era otra que preparar a la superficie para el pulido, eliminar las superficies distorsionadas y obtener una superficie plana (Morral, 2004). Posteriormente las muestras fueron pulidas mediante el uso de paños y alúminas de hasta 0,05 micrones (Cheng, 2011), con la finalidad de eliminar las rayas dejadas por el desbaste. Finalmente las muestras fueron sometidas a un ataque químico, el cual buscaba revelar la microestructura y hacerla visible al microscopio óptico. El ataque químico se efectuó con una solución de ácido nítrico en metanol al 5%, que es comúnmente conocida como Nital (Morral, 2004). Véase Apéndice A.

Previo a las pruebas de corrosión los cupones fueron preparados de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM G1-03. El procedimiento consistió básicamente en desbastar la superficie con papel de carburo de sílice (80, 240, 360, 400 y 600) y posteriormente sumergir la muestra en acetona para eliminar posibles restos de grasa que pudieran estar adheridos sobre la superficie del metal e interfirieran con el proceso de corrosión (Freitas, 2011). De manera similar las muestras fueron ser marcadas, medidas y pesadas, el procedimiento empleado se presenta de forma más detallada en el Apéndice B.

3.2 Medio Corrosivo.

El medio corrosivo empleado en los distintos ensayos efectuados fue una solución electrolítica de cloruro de sodio (NaCl) en agua al 5% p/p. La técnica empleada para la preparación del medio corrosivo puede detallarse en el Apéndice C.

3.3 Métodos de Impregnación.

Para el estudio del inhibidor en cuestión (Extracto de Mango) se hizo uso de dos métodos de impregnación los cuales se mencionan a continuación:

3.3.1 Impregnación por Inmersión.

Los cupones de acero al carbono fueron impregnados del inhibidor mediante su inmersión en una solución concentrada del inhibidor de extracto de mango y se dejaron interactuar por un tiempo de 168 horas para garantizar que ocurriera la adherencia del inhibidor en la superficie metálica.

3.3.2 Impregnación por Rota Evaporación.

La técnica de rota evaporación fue realizada a través de un dispositivo que se conoce comúnmente como rotavapor, el cual es ampliamente utilizado en los laboratorios que trabajan con sustancias orgánicas, y su función principal es la evaporación rápida de solventes. Estos dispositivos constan de un motor de velocidad variable que permite mantener homogénea a la solución durante el proceso de evaporación (Gilbert, 2011). La Figura 6 muestra un rotavapor típico.



Figura 6. Rotavapor (Geminibv, 2012).

Los cupones de acero fueron sumergidos en el extracto de mango y se colocaron en el evaporador rotatorio, retirándose posteriormente cuando ocurrió la evaporación del solvente, formándose así una capa de inhibidor sobre la superficie metálica.

3.4 Pruebas de Corrosión en Régimen Estático.

Con la finalidad de evaluar la velocidad de corrosión y la eficiencia del inhibidor se realizaron ensayos en régimen estático por inmersión y mediante el uso de una cámara salina destinada a evaluar corrosión.

3.4.1 Pruebas por Inmersión.

Estos ensayos se efectuaron con la finalidad de evaluar el comportamiento de la corrosión del acero al carbono en el medio salino (NaCl 5%). Las pruebas consistieron en sumergir los cupones metálicos en solución salina a fin de observar el fenómeno de corrosión. Se efectuaron a una temperatura de 65 °C y a presión atmosférica con un periodo de exposición de 168 horas.

Para la elaboración de estos ensayos se utilizaron los siguientes equipos:

10 Beakers de 400 mL.

1 Estufa.

1 Beaker de 1000 mL.

A continuación se muestra el procedimiento utilizado para efectuar las pruebas de corrosión por inmersión en el medio corrosivo:

1. Preparar los anillos o cupones de corrosión tal como se muestra en el Apéndice B.
2. Pesar 25 cupones de acero al carbono y tomar sus dimensiones.

3. Impregnar 20 de los anillos con el inhibidor a diferentes concentraciones.
4. Introducir cada uno de los anillos en los beakers de 400 mL.
5. Agregar 400 mL de la solución salina que fue preparada previamente (Apéndice C), a cada uno de los beakers.
6. Colocar los beakers en la estufa a una temperatura de 65 °C.
7. Esperar que transcurran las 168 horas de duración del ensayo manteniendo el nivel de la solución salina.
8. Transcurridas las 168 horas se retiran los cupones y se decapan 20 cupones de acuerdo al procedimiento que se muestra en el Apéndice D.
9. Se determina la pérdida de peso de las probetas decapadas.

3.4.2 Pruebas en la Cámara Salina.

Una cámara de niebla salina es un sistema que es capaz de reproducir las condiciones de un ambiente marino para realizar ensayos de corrosión en metales y evaluar la calidad de los medios de protección superficial. Las cámaras de niebla salina son capaces de reproducir las condiciones del ambiente marino tanto de manera estable como alternativa (CCI, 2008).

Las pruebas a efectuar se llevaron a cabo en una cámara salina perteneciente a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Central de Venezuela la cual puede apreciarse en la Figura 7. Este equipo posee aislamiento térmico y está provisto de un sistema de generación de niebla el cual posee un recipiente en donde se colocan soportes para las muestras a evaluar. Además consta de un dispositivo pulverizador mediante el cual se suministra la solución salina a la cámara, impulsada por un compresor que se encarga de ajustar la presión del aire de suministro. La solución salina y el agua destilada se encuentran en depósitos destinados para tal fin, mientras que la temperatura en la cámara es controlada mediante un dispositivo de calentamiento (Freitas, 2011).



Figura 7. Cámara de niebla salina (Escuela de Ingeniería Metalúrgica UCV, 2005).

A continuación se muestra el procedimiento que se empleó para efectuar las pruebas de corrosión en la cámara salina, conforme a lo establecido en la norma ASTM B117-03:

1. Preparar la solución salina tal cual como se muestra en el Apéndice C.
2. Realizar la preparación de los cupones según la norma ASTM G1-03 (Véase Apéndice B).
3. Medir el pH de la solución salina (NaCl 5%) verificando que se encuentre en el rango comprendido entre 6,5 y 7,2.
4. Colocar las muestras en los soportes destinados para ello en la cámara salina, evitando el contacto entre las piezas.
5. Se fija la temperatura a 35°C.
6. Se comienza el ensayo haciendo circular la solución salina por un tiempo de 168 horas.
7. Se hace uso de métodos gravimétricos para evaluar la corrosión sobre las muestras.

3.5 Pruebas de Corrosión en Régimen Dinámico.

Para evaluar la corrosión en régimen dinámico se hizo uso de un equipo existente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela.

El equipo consiste en un tanque con calentamiento que contiene al medio corrosivo que se hace circular por el sistema. El sistema consta de un arreglo de tuberías de PVC por el que circula la solución corrosiva impulsada por una bomba, pasando así a través de un porta muestras de plexiglás con rejillas para evitar el escape de los cupones de corrosión. De esta manera la solución pasa a través del sistema de tuberías y es continuamente recirculada al tanque. También se dispone de un grupo de válvulas y de un rotámetro para el control de flujo en el sistema. En la Figura 8 puede observarse de manera detallada los elementos constituyentes del sistema.

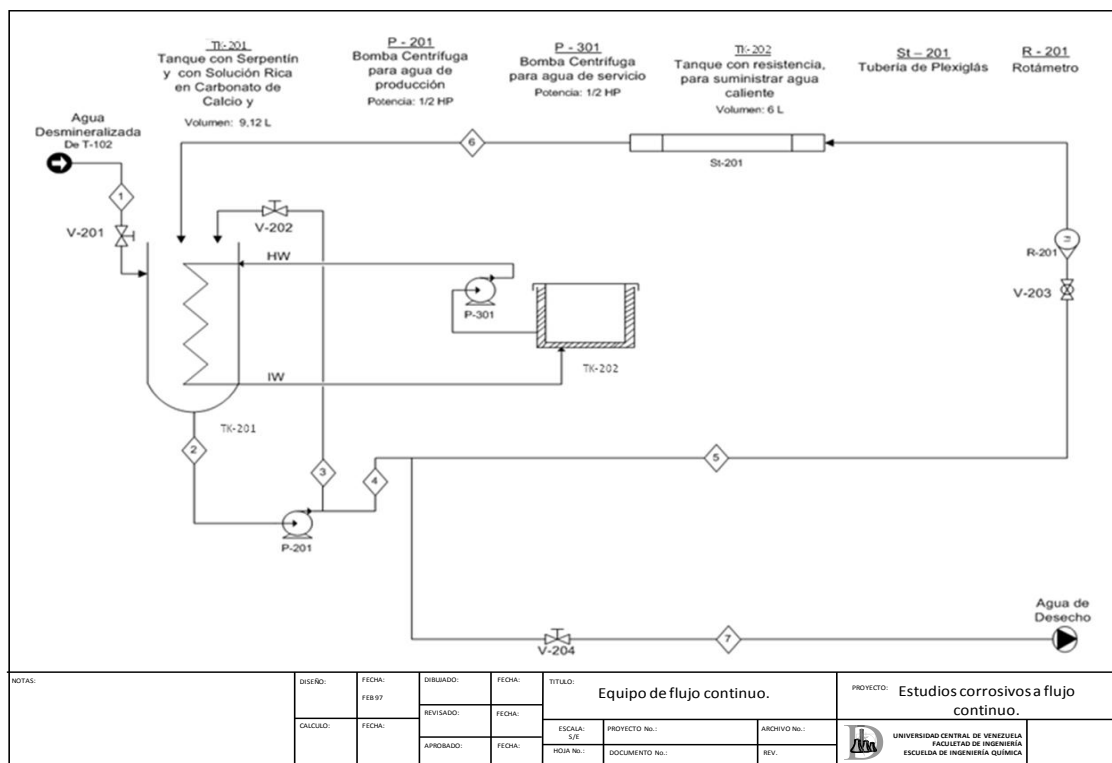


Figura 8. Diagrama del equipo de corrosión utilizado para los ensayos en dinámico (Cabrera, 2010).

Adicionalmente se cuenta con una planta desmineralizadora que se empleó para obtener agua desmineralizada, La cual se utilizó en la preparación de la solución salina y como medio de calentamiento en el tanque TK-202. Los detalles de operación de esta unidad pueden observarse en el Apéndice E.

A continuación se muestra el procedimiento empleado para efectuar las pruebas de corrosión en el sistema a flujo continuo, previo se realizó el acondicionamiento del sistema tal como se muestran en el Apéndice F:

1. Preparar 15 L del medio corrosivo agregando la cantidad necesaria de cloruro de sodio (NaCl) a una solución madre para su posterior disolución (Véase Apéndice C). Agregar la solución preparada al tanque TK-201.
2. Desmontar la tubería de plexiglás ST-201 para colocar los cupones de corrosión de acero al carbono. Una vez hecho esto se monta nuevamente en el sistema apretando las juntas de la tubería para evitar posibles fugas.
3. Llenar el tanque TK-202 hasta un 75% con agua desmineralizada.
4. Verificar que todas las válvulas encuentren cerradas excepto la válvula de recirculación V-202 la cual debe permanecer abierta.
5. Encender la bomba P-301 y fijar la temperatura a 65°C mediante el termostato ubicado en el tanque.
6. Encender la Bomba P-201 la cual se encarga de circular el medio corrosivo. Una vez hecho esto se regula el flujo que pasa a través del sistema mediante la manipulación de la válvula V-203 y la lectura del rotámetro R-201.
7. Transcurrido el tiempo de exposición se procede a apagar la resistencia en el tanque de calentamiento así como las bombas P-201 y P-301.
8. Tomar una muestra de la solución del sistema y guardarlas para análisis futuros.
9. Desechar la solución del sistema a través del drenaje (V-204).

10. Retirar las muestras del tubo de plexiglás las cuales luego serán sometidas a análisis gravimétricos.
11. Realizar el lavado del sistema siguiendo el procedimiento que se indica en el Apéndice F.

3.6 Evaluación de los Cupones Corroídos.

La evaluación de los cupones corroídos se efectuó mediante el uso de las técnicas de pérdida de peso, a continuación se describen brevemente dicha técnica.

La técnica de evaluación de corrosión por pérdida de peso es la más utilizada por su eficacia y sencillez para realizarse. Esta técnica consiste básicamente en someter la pieza al medio corrosivo durante un cierto período de tiempo y posteriormente evaluar la cantidad de material que se ha perdido durante el proceso de corrosión. Los parámetros que necesitan conocerse para efectuar esta prueba son el tiempo de exposición, la masa inicial y final de la pieza sometida a corrosión, el área de la pieza y la densidad del material (Villela, 2004).

Para evaluar la pérdida de peso se tomó la masa inicial de la muestra y posteriormente del ensayo corrosivo se realizó el dekapado de la misma (Véase Apéndice D). Una vez realizado lo anterior se determinó la masa de la muestra, obteniéndose por diferencia la masa perdida. La Ecuación (8) permitió calcular la velocidad de corrosión mediante la técnica de pérdida de peso.

$$CR = \frac{3,45 \cdot 10^6 (P_0 - P_f)}{A_m \cdot t \cdot \rho} \quad (8)$$

Donde:

CR : Velocidad de corrosión [mpy].

P_0 : Peso inicial de la muestra [g].

P_f : Peso Final de la muestra [g].

A_m : Área de la muestra [cm^2].

t : Tiempo de exposición [h].

ρ : Densidad de la muestra [g/cm^3].

La eficiencia del inhibidor pudo ser calculada con la Ecuación (9) a fin de realizar la posterior comparación de las diferentes concentraciones evaluadas.

$$I_e = \frac{(CR)_0 - (CR)_i}{(CR)_0} \cdot 100 \quad (9)$$

Donde:

I_e : Eficiencia del inhibidor.

$(CR)_0$: Velocidad de corrosión de la muestra en blanco [mpy].

$(CR)_i$: Velocidad de corrosión de la muestra con inhibidor [mpy].

Adicionalmente se hizo uso de las técnicas de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (MEB – EDX) la cuales permitieron observar las características superficiales de los cupones corroídos, por tanto resultaron útiles para evaluar las muestras observando de manera más detallada el proceso de corrosión sobre la superficie del metal permitiendo así la caracterización de las muestras y su comparación con el blanco o muestra patrón. Para observar las muestras se utilizaron los microscopios que pueden apreciarse en la Figura 9.



Figura 9. Microscopios utilizados.

(a) Microscopio óptico Olympus modelo Bx60. (SpectraServices, 2010). (b) Microscopio electrónico de barrido Hitachi S – 2400 (Nanovision, 2012).

3.7 Selección de la Concentración más Eficaz.

Una vez utilizadas las técnicas antes mencionadas para realizar la evaluación de la corrosión se procedió a seleccionar la concentración del inhibidor más eficaz mediante la interpretación de los resultados que se obtuvieron.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos luego del desarrollo de la metodología establecida para la elaboración del presente trabajo de investigación. Así mismo se muestran los respectivos análisis y discusiones que permitieron lograr los objetivos planteados en este Trabajo Especial de Grado. Inicialmente se reseña la metalografía de los cupones de acero, luego en secciones subsiguientes se tratan los resultados obtenidos en los ensayos de corrosión, haciendo referencia a la velocidad de corrosión y la eficiencia del inhibidor. De manera similar, se efectúa un estudio comparativo con los resultados obtenidos para así finalizar con la elección de la concentración más eficiente.

4.1 Metalografía de los Cupones de Acero al Carbono.

En la Figura 10 puede observarse una fotografía que muestra la microestructura de los cupones de acero al carbono utilizados. Esta imagen se obtuvo mediante microscopía óptica luego de utilizar las técnicas metalográficas que se referenciaron en el marco metodológico.

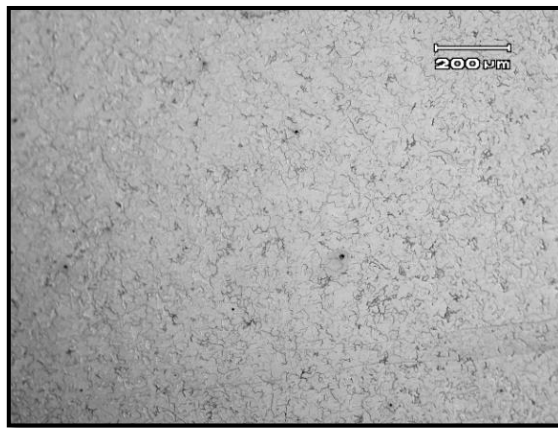


Figura 10. Microestructura de los cupones de acero en estudio.

La microestructura del acero objeto de estudio, puede apreciarse en la Figura 10, donde se observa dos fases características, la primera es una fase ferrítica (zonas claras), distribuida en mayor proporción en forma de granos poligonales, y la segunda es una fase a la que se le denomina perlita que es una combinación de ferrita (α) y cementita (Fe_3C) (zona gris oscura). La distribución y proporción en que se encuentran las dos fases, indica que la microestructura corresponde a la de un acero que cumple la norma ASTM A53, cuya especificación señala un contenido no menor de 0,25% C (Ver Apéndice G).

4.2 Ensayo de Corrosión en la Cámara de Niebla Salina.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el ensayo de corrosión efectuado en la cámara salina. El ensayo se efectuó durante un tiempo de 168h con cupones metálicos impregnados con el inhibidor por inmersión en soluciones de diferentes concentraciones del extracto, además se utilizaron cupones impregnados por la técnica de rotavaporación.

En la Tabla 1 se muestran las velocidades de corrosión de los cupones metálicos, las cuales se obtuvieron en el ensayo efectuado en la cámara de niebla salina.

Tabla 1. Velocidades de corrosión de los cupones de acero para el ensayo efectuado en la cámara salina con un tiempo de exposición de 168h.

Descripción.	Velocidad de Corrosión [mpy].
Blanco	20,40±1,68
Rotavaporación	11,82±1,19
Inmersión (1,5% m/V)	14,00±2,14
Inmersión (0,75% m/V)	14,98±1,48
Inmersión (0,38% m/V)	16,46±1,10

En los Resultados (Tabla 1) puede apreciarse las velocidades de corrosión para cada uno de los casos evaluados, las cuales oscilaron en el rango de 11,8 mpy a 20,4 mpy. Se destaca que la velocidad de corrosión más alta se obtuvo para el cupón metálico en blanco o sin extracto, mientras que la velocidad de corrosión más baja la obtuvo la muestra que fue impregnada mediante la técnica de rotavaporación con el extracto de mango, obteniéndose una diferencia de 8,58 mpy entre ambas muestras. Este resultado es consecuente con la definición de inhibidor, el cual puede decirse que es una sustancia capaz de disminuir la velocidad de corrosión cuando es añadida a un ambiente corrosivo que contiene a un elemento metálico o a una aleación (Sharma, 2011). Además puede notarse, que las velocidades de corrosión obtenidas para las muestras impregnadas con el extracto de mango por la técnica de inmersión fueron mayores en todos los casos estudiados a la velocidad de corrosión que presentó la muestra impregnada con la técnica de rotavaporación, esto estaría sustentado en el hecho de que esta técnica permite la formación de una película sobre la superficie metálica, lo que ocasiona una disminución significativa del contacto entre el medio corrosivo y el material, mientras que la técnica de inmersión simple no presenta una adsorción significativa del extracto sobre la superficie del metal.

En la Tabla 1 puede apreciarse que para el caso de las muestras impregnadas por inmersión simple, se destaca que la velocidad de corrosión aumenta al disminuir la concentración del extracto, lo cual es consecuente con lo que reporta la literatura (Sastri, 2011). Sin embargo cabe también destacar que a pesar de que se cumple con la premisa fundamental de una disminución de la velocidad de corrosión al aumentar la concentración del inhibidor, las velocidades son del mismo orden de magnitud, esta situación ha sido observada en estudios anteriores de otros inhibidores (Loto, 2011).

Finalmente, puede decirse que en términos generales se observa una disminución de la velocidad de corrosión para las muestras que fueron impregnadas con extracto, resultando más efectiva la técnica de impregnación por rotavaporación en la cual no puede hablarse específicamente de una concentración, pues la técnica misma implica el secado del extracto sobre la superficie de la muestra.

Una vez que se obtuvieron las velocidades de corrosión de los cupones metálicos se determinó la eficiencia de inhibición en cada caso. La Tabla 2 muestra la eficiencia de inhibición obtenida para cada uno de los casos evaluados.

Tabla 2. Eficiencia del inhibidor para los diferentes casos estudiados en el ensayo efectuado en la cámara salina con un tiempo de exposición de 168h.

Descripción	Eficiencia del Inhibidor [%]
Blanco	-
Rotavaporación	42,0
Inmersión (1,5% m/V)	31,4
Inmersión (0,75% m/V)	26,6
Inmersión (0,38% m/V)	19,3

En la Tabla 2 se observan las eficiencias de inhibición obtenidas, en donde se puede apreciar que la eficiencia más elevada se obtuvo para la muestra impregnada por rotavaporación la cual resultó del 42%, mientras que la eficiencia más baja se obtuvo para el caso de la muestra impregnada con la menor concentración del extracto de mango, la cual fue de 19,3%. Queda una vez más aquí reflejado, que la técnica de rotavaporación supera a la técnica de inmersión como método de impregnación obteniéndose una diferencia de 10,4 puntos porcentuales a favor de la técnica de rotavaporación frente a la más eficiente de las impregnadas por inmersión, esto podría deberse a la formación de una película protectora que actúa como un impedimento de contacto entre el medio y el material limitando la velocidad de difusión. Por supuesto estos resultados son consecuentes con lo expresado anteriormente con respecto a las velocidades de corrosión obtenidas, ya que la eficiencia de inhibición no es más que un parámetro que representa la diferencia de la velocidad de corrosión inhibida frente a la velocidad de corrosión de una muestra sin inhibidor siempre y cuando ambas se hallan sometido a las mismas condiciones de servicio (Baboian, 2005), por tanto velocidades de corrosión inhibidas más bajas implican eficiencias más altas (siempre y cuando que sea menor a la velocidad de

corrosión de la muestra patrón), este hecho puede notarse fácilmente si se recurre a la Ecuación (9) la cual se muestra en el marco metodológico.

Haciendo referencia a las eficiencias para el caso de las muestras impregnadas por inmersión puede notarse que la eficiencia tiende a crecer en función del aumento de concentración, algunos investigadores han sugerido que la eficiencia crece con respecto a la concentración de manera abrupta a concentraciones bajas y luego va disminuyendo su pendiente hasta llegar a un punto en que la eficiencia se hace prácticamente independiente de la concentración, con un comportamiento que pudiera asociarse a un isoterma de Langmuir (Sastri, 2011). En 2010 Freitas y González evaluaron la eficiencia de inhibición del extracto de mango en un ensayo de cámara salina a condiciones similares a las que aquí se estudiaron, obteniendo una eficiencia de 12,15%, lo cual es consecuente con los resultados aquí obtenidos, ya que la eficiencia más baja resultó ser de 19,3% este hecho está sustentado en que en la presente investigación se utilizaron concentraciones más elevadas del inhibidor.

Para observar de manera más detallada el comportamiento del inhibidor que se aplicó sobre las muestras mediante la técnica de impregnación de inmersión, en la Figura 11 se muestra como varía la eficiencia del inhibidor al variar la concentración empleada del extracto.

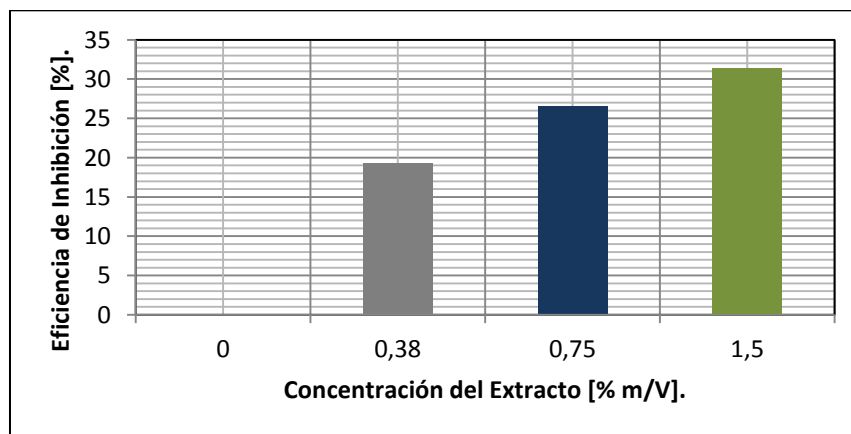


Figura 11. Eficiencia del inhibidor aplicado mediante la técnica de inmersión para las diferentes concentraciones evaluadas en el ensayo efectuado en la cámara salina.

La Figura 11 refleja como aumenta la eficiencia de inhibición al aumentar la concentración del inhibidor empleado, el cual se aplicó por la técnica de inmersión, puede destacarse que existe una tendencia claramente creciente. En efecto este hecho no es simple casualidad, la literatura reporta que la inhibición debe seguir una ley básica de la adsorción del inhibidor sobre la superficie metálica, o dicho de otro modo el grado de protección esta de alguna manera relacionado con el grado de cobertura de la superficie, inclusive se ha propuesto relaciones entre la eficiencia y la concentración del inhibidor asumiendo que el grado de inhibición es igual al grado de cobertura de la superficie (Baboian, 2005). Dicho esto, es de esperarse que al aumentar la concentración del inhibidor se incremente la eficiencia siguiendo un comportamiento asociado a la isoterma de adsorción que presenta el inhibidor sobre la superficie. Cardozo y colaboradores (2010) llegaron a la conclusión de que la adsorción del extracto de mango sobre la superficie del acero al carbono sigue la isoterma de Langmuir, más aun Sastri (2011) denota que el comportamiento de la eficiencia de inhibición frente a la concentración puede asociarse generalmente a dicho tipo de isoterma. En este sentido, el comportamiento a esperar es el de un aumento de la eficiencia de inhibición con el aumento de la concentración hasta alcanzar un punto en el que la eficiencia se mantiene aunque aumente la concentración del inhibidor.

4.3 Ensayo de Corrosión en el Equipo de Exposición a Flujo.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el ensayo de corrosión efectuado en el equipo de exposición a flujo el cual se encuentra disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela. Los ensayos se efectuaron durante un tiempo de 24h a una temperatura de 65°C y una velocidad de flujo de 1,1 m/s. Los cupones metálicos fueron impregnados con el inhibidor por inmersión en soluciones de diferentes concentraciones del extracto, además se utilizaron cupones impregnados por la técnica de rotavaporación.

En la Tabla 3 se muestran las velocidades de corrosión de los cupones de acero al carbono que se obtuvieron en las pruebas de corrosión en régimen dinámico las cuales fueron efectuadas en un equipo de exposición a flujo.

Tabla 3. Velocidades de corrosión de los cupones de acero para el ensayo efectuado en el equipo de exposición a flujo con un tiempo de exposición de 24h.

Descripción.	Velocidad de Corrosión [mpy].
Blanco	111,86±1,66
Rotavaporación	31,27±1,09
Inmersión (1,5% m/V)	97,93±2,41
Inmersión (0,75% m/V)	96,28±2,11
Inmersión (0,38% m/V)	108,00±1,58

Realizando un análisis para los resultados que se muestran en la Tabla 3, se determinó que para los métodos de impregnación a que fueron sometidas las probetas de acero, es el método de rotavaporación el que presenta una menor velocidad de corrosión, frente al método impregnación por inmersión a diferentes concentraciones del extracto. En las probetas impregnadas por inmersión se aprecia que la velocidad de corrosión disminuye con el aumento de la concentración, con una ligera discrepancia para el caso entre 1,5% m/V y 0,75% m/V la cual podría deberse a que posiblemente se alcanzó el valor de concentración umbral a partir del cual no se observa variación significativa de la velocidad de corrosión aunque varíe la concentración del inhibidor. Este comportamiento obtenido por el método de impregnación por inmersión a diferentes concentraciones es congruente a lo expresado en la literatura, donde se señala que la velocidad de corrosión disminuye a medida que aumenta la concentración del inhibidor con un comportamiento que se asemeja a las isothermas de adsorción (Sastri, 2011). Estos resultados permiten apreciar el efecto inhibidor frente al ataque corrosivo en una solución salina por parte del extracto de mango para el acero en régimen dinámico, observándose una diferencia considerable en función del método de impregnación.

La diferencia entre los resultados de los dos métodos de impregnación se puede atribuir al hecho de que el empleo de la rotavaporación da lugar a la formación de una película del extracto sobre la superficie del metal, el cual que posee una mayor adherencia como consecuencia de las condiciones operacionales a las que fueron sometidas las probetas sumergidas en el extracto mediante el uso del equipo de rotavaporación. Por otro lado, el método de inmersión consiste simplemente en sumergir las probetas en las soluciones del extracto a temperatura ambiente. Al presentar una mayor adherencia en la superficie del metal la inhibición es notable, debido a que la película orgánica que se forma entre el metal y el medio corrosivo es más resistente y se mantiene mucho más tiempo durante el ensayo; al ser un ensayo en régimen dinámico existe una constante remoción de los depósitos sobre la superficie del metal, es en este punto donde la adhesión del inhibidor en la superficie es fundamental y determinante para el estudio el efecto inhibidor de los recubrimientos orgánicos o cualquier tipo de recubrimiento.

A partir de las velocidades de corrosión que se reportaron anteriormente (Tabla 3) se obtuvo la eficiencia del inhibidor en cada caso. En la Tabla 4 pueden apreciarse los resultados a los que se llegó.

Tabla 4. Eficiencia del inhibidor para los diferentes casos estudiados en el ensayo efectuado en el equipo de exposición a flujo.

Descripción	Eficiencia del Inhibidor [%]
Blanco	-
Rotavaporación	72,0
Inmersión (1,5% m/V)	12,5
Inmersión (0,75% m/V)	13,9
Inmersión (0,38% m/V)	3,4

Al realizar un análisis de los porcentajes de eficiencia del extracto de mango a diferentes concentraciones que se encuentran reportados en la Tabla 4, se aprecia que es el método de impregnación por rotavaporación el que presenta un mejor

desempeño con un 72% de eficiencia, porcentaje notablemente superior en comparación a los obtenidos por el método de inmersión, cuyo valor más destacado es para la concentración del 0,75% m/V con una eficiencia de 13,9%, representado un desempeño poco alentador. La diferencia entre los métodos de impregnación es debida posiblemente a la características operacionales de cada uno de los dos métodos, permitiendo que la adsorción del extracto mango en la superficie de metal sea mayor para el método de rotavaporación y por ende se obtiene una mayor eficiencia.

Para el caso en particular del método de inmersión a diferentes concentraciones se aprecia que en líneas generales la eficiencia del inhibidor se incrementa con el aumento de la concentración del inhibidor (Pierre, 2007), cabe destacar una leve diferencia con esta cita ya que entre los valores de los porcentajes de concentración de 1,5% m/V y 0,75% m/V se observa una mayor eficiencia de inhibición para el ultimo. Otro aspecto interesante es que la eficiencia obtenida para la concentración de 0,38% m/V es significativamente menor con respecto a las que se obtuvieron para las concentraciones de 1,5% m/V y 0,75% m/V las cuales son de órdenes de magnitud similares, lo cual permite inferir la posible existencia de un valor de concentración umbral a partir del cual la eficiencia tiende a hacerse asintótica.

En la Figura 12 puede apreciarse de manera más detallada el comportamiento del inhibidor que se aplicó sobre las muestras mediante la técnica de impregnación de inmersión. Se muestra como varía la eficiencia del inhibidor al variar la concentración del extracto, para el ensayo de exposición a flujo.

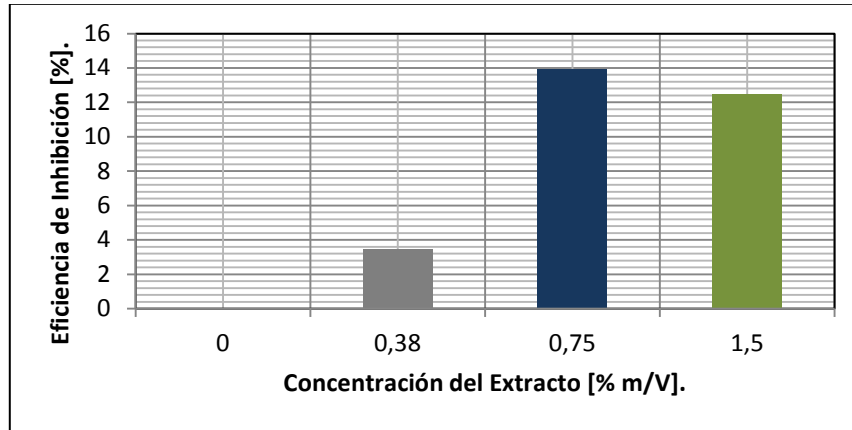


Figura 12. Eficiencia del inhibidor aplicado mediante la técnica de inmersión para las diferentes concentraciones evaluadas en el ensayo de exposición a flujo.

Al observar la Figura 12 se puede notar como varía la eficiencia del inhibidor en función de la concentración para las muestras que fueron impregnadas por inmersión, de donde se observa que la eficiencia más alta la tuvo la muestra impregnada con una concentración del 0,75% m/V. Este hecho refleja un comportamiento anómalo para este tipo de datos, pues por principio fundamental se espera un incremento de la eficiencia de inhibición al aumentar la concentración del inhibidor, ya que se estaría garantizando mayor grado de cobertura de la superficie a proteger, dicho esto era de esperarse una eficiencia de inhibición mayor para la concentración de 1,5% m/V. Sin embargo se puede también constatar que la diferencia los datos obtenidos en las concentraciones de 0,75% m/V y 1,5% m/V, no es muy significativa a nivel de eficiencia.

4.4 Ensayo de Corrosión por Inmersión.

Seguidamente se presenta los resultados obtenidos para los ensayos de inmersión, los cuales se llevaron a cabo a presión atmosférica, a una temperatura de 65°C durante un tiempo de 168h. Del mismo modo que para los casos previos se utilizaron diferentes concentraciones del inhibidor así como métodos de impregnación.

En la Tabla 5 se pueden observar las velocidades de corrosión de los cupones de acero, obtenidas en los ensayos de corrosión por inmersión.

Tabla 5. Velocidad de corrosión de los cupones de acero para el ensayo de inmersión efectuado a presión atmosférica y temperatura de 65°C durante un periodo de 168h.

Descripción.	Velocidad de Corrosión [mpy].
Blanco	5,42±0,97
Rotavaporación	4,08±0,16
Inmersión (1,5% m/V)	4,88±0,32
Inmersión (0,75% m/V)	5,19±0,26
Inmersión (0,38% m/V)	5,32±0,23

En la Tabla 5 se pueden apreciar las velocidades de corrosión para el ensayo de inmersión, de donde se destaca que las velocidades de corrosión son inferiores a las obtenidas en los ensayos detallados anteriormente (cámara salina y ensayo de exposición a flujo) lo cual es lógico puesto que los otros ensayos presentan condiciones más adversas, que aceleran el proceso de corrosión. Es de notar que la velocidad más alta obtenida, corresponde a la muestra en blanco o libre de inhibidor, mientras que la más baja la obtuvo la muestra impregnada por la técnica de rotavaporación, hecho que permite denotar nuevamente que el extracto de mango posee características inhibitoras. Una vez más se destaca que la velocidad de corrosión de la muestra impregnada por rotavaporación es menor a la de las muestras impregnadas por inmersión lo cual es indicativo de que la adsorción que ocurre por

inmersión simple no es muy significativa, mientras que utilizando el rotavapor se obtiene una película de apariencia homogénea que recubre al metal, la cual impide el proceso corrosivo en mayor medida.

Si observamos la tendencia de la velocidad de corrosión con respecto a la concentración del extracto para las muestras impregnadas por inmersión, se tiene que la velocidad asciende a medida que disminuye la concentración del extracto empleado, nuevamente este comportamiento se corresponde con la literatura, la cual establece que la velocidad de corrosión disminuye al aumentar la concentración del inhibidor (Pierre, 2007). Sin embargo las velocidades de corrosión obtenidas para las muestras impregnadas por inmersión a las diferentes concentraciones no difieren de manera significativa por lo que no sería justificable el uso de concentraciones elevadas puesto que se elevarían los costos asociados al inhibidor. Para respaldar lo anteriormente dicho cabe destacar que la diferencia entre la velocidad de corrosión entre la muestra impregnada por inmersión con el extracto más concentrado con respecto al menos concentrado fue de 0,44 mpy. Este hecho evidencia que posiblemente el extracto se disuelve con facilidad en el medio corrosivo dejando al metal libre de protección.

En la Tabla 6 se reportan las eficiencias de inhibición obtenidas a partir de las velocidades de corrosión que se determinaron para los ensayos de inmersión.

Tabla 6. Eficiencia del inhibidor para los diferentes casos estudiados en las pruebas de inmersión.

Descripción	Eficiencia del Inhibidor [%]
Blanco	-
Rotavaporación	24,8
Inmersión (1,5% m/V)	10,1
Inmersión (0,75% m/V)	4,3
Inmersión (0,38% m/V)	1,9

En la Tabla 6 se observan las eficiencias de inhibición obtenidas para el ensayo de inmersión, en donde se puede apreciar que la eficiencia más elevada se obtuvo para la muestra impregnada por rotavaporación la cual resultó del 24,8%, mientras que la eficiencia más baja se obtuvo para el caso de la muestra impregnada con la menor concentración del extracto de mango, la cual resultó ser de solo el 1,9%. La muestra impregnada por rotavaporación se alza como la que mayor eficiencia presenta frente al ataque corrosivo superando en 14,7 puntos a la más eficiente de las que fue impregnada por la técnica de inmersión. Este hecho estaría ligado posiblemente a que el procedimiento de rotavaporación favorece la formación de una película homogénea sobre la superficie que desfavorece la formación de zonas más susceptibles al ataque corrosivo. Por supuesto, los resultados anteriores concuerdan con las velocidades de corrosión a las que ya se hizo referencia (Véase Tabla 5) ya que la eficiencia es proporcional a la diferencia de velocidades de la muestra impregnada con respecto a la muestra patrón o en blanco, obsérvese que la eficiencia más alta se obtuvo para la muestra impregnada por rotavaporación la cual es precisamente la que presenta la velocidad más baja, este comportamiento puede corroborarse si se recurre a la Ecuación (9).

Si se observan las eficiencias de las muestras impregnadas por inmersión puede notarse que la eficiencia tiende a crecer en función del aumento de concentración, hecho sustentado en la literatura. Sin embargo puede observarse que no existen diferencias significantes entre los casos evaluados, este hecho podría deberse a los efectos de evaporación del medio corrosivo durante el ensayo el cual puede causar variaciones significantes de la concentración del medio; si bien el medio corrosivo era llevado al nivel adecuado en intervalos de tiempo podría haber ocurrido que durante el lapso en el cual se produce la disminución se hubiera favorecido la degradación del inhibidor debido al cambio de pH del medio.

Para observar de manera más detallada el comportamiento del inhibidor que se aplicó sobre las muestras mediante la técnica de impregnación de inmersión, en la

Figura 13 se muestra como varia la eficiencia del inhibidor para cada una de las concentraciones de extracto empleadas.

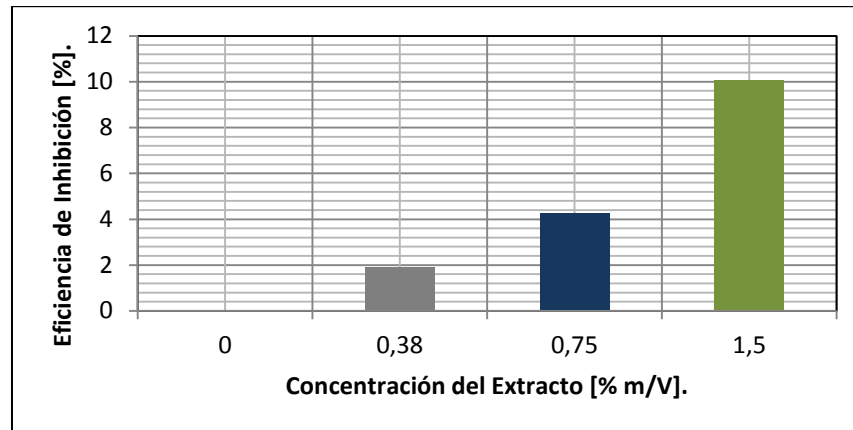


Figura 13. Eficiencia del inhibidor aplicado mediante la técnica de inmersión para las diferentes concentraciones evaluadas en el ensayo de inmersión.

En la Figura 13 puede apreciarse que las eficiencias obtenidas en el ensayo de inmersión mediante la técnica de impregnación por inmersión fueron relativamente bajas, siendo la menor cercana al 2% y la mayor alrededor del 10%. Sin embargo puede apreciarse el cumplimiento de la tendencia esperada, esto es ante un aumento de la concentración se incrementa la eficiencia del inhibidor. Una vez más se hace énfasis en que esta tendencia está asociada al proceso de adsorción del inhibidor sobre la superficie metálica puesto que al aumentar la concentración del inhibidor aumenta el grado de cobertura de la superficie metálica y por ende tiende a disminuir la velocidad de corrosión a consecuencia de que disminuye el área de contacto entre el material y el medio corrosivo limitando las semireacciones que se llevan a cabo para dar lugar a la corrosión.

4.5 Microscopía Óptica de los Cupones Corroídos.

En esta sección, puede apreciarse las fotomicrografías para los cupones de acero, las cuales se efectuaron con la finalidad de observar cualquier cambio a nivel de microestructura luego del ensayo de corrosión y así realizar la comparación respectivas entre las imágenes. Estas imágenes se obtuvieron mediante la técnica de microscopía óptica.

En Figura 14 puede observarse la microscopía óptica de un cupón impregnado con extracto de mango mediante la técnica de rotavaporación luego de ser sometido al ensayo de exposición a flujo. De manera similar en la Figura 15 se muestra la fotografía de un cupón metálico sometido al mismo ensayo, pero libre de inhibidor.

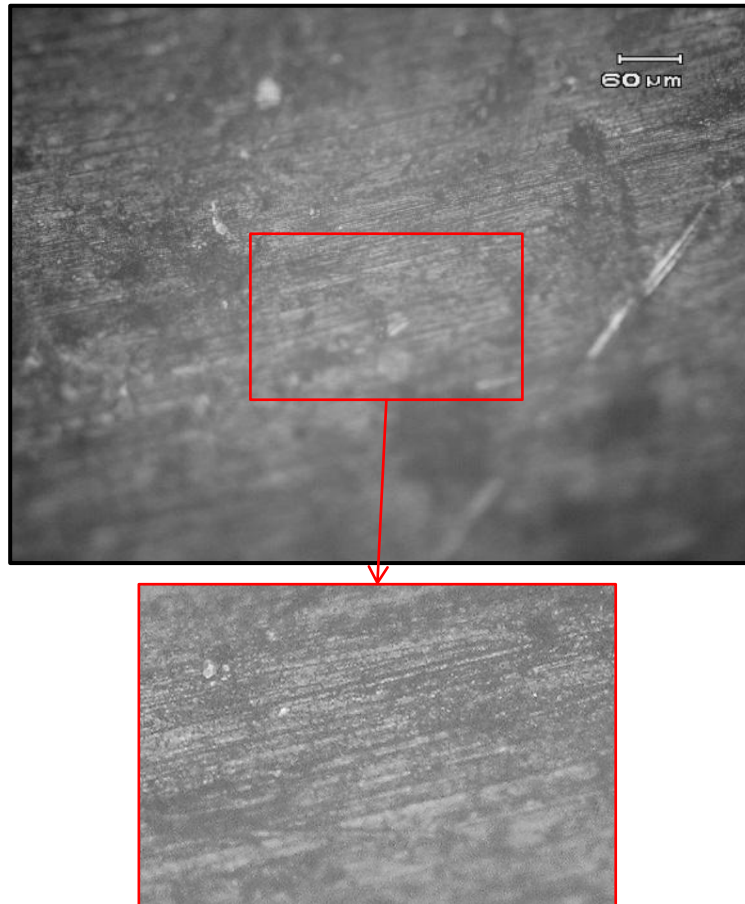


Figura 14. Microestructura de un cupón impregnado por rotavaporación para el ensayo en régimen dinámico luego del decapado.

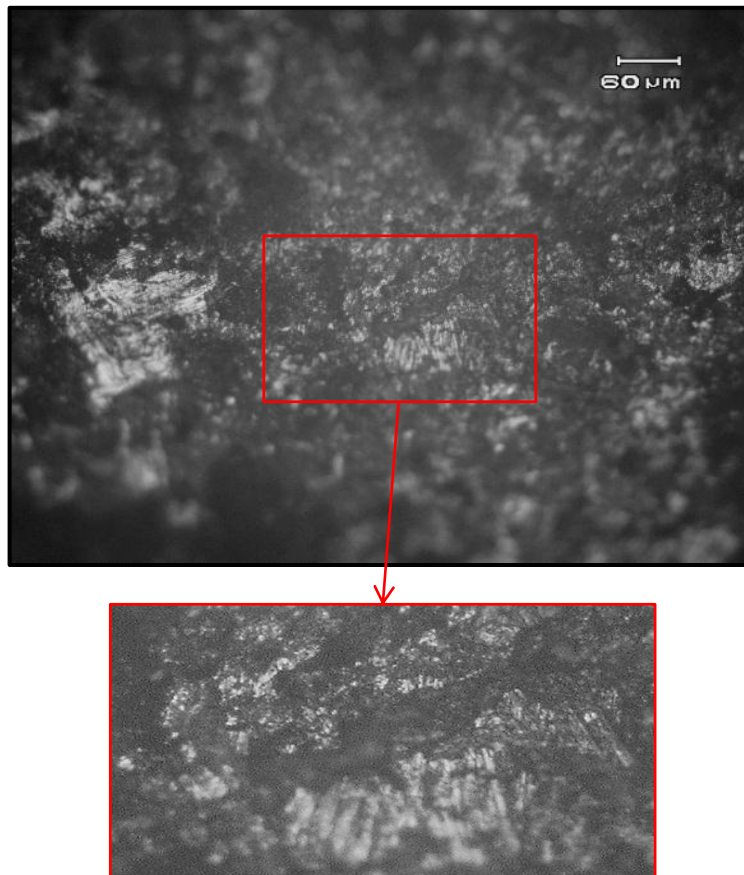


Figura 15. Microestructura de un cupón en blanco para el ensayo en régimen dinámico luego del decapado.

En la Figura 14, se observa una superficie libre de productos de corrosión y sin daños en la microestructura del metal, que pudieran ser indicativos de algún tipo de hendiduras y picaduras sobre la muestra, ocasionadas por el ambiente corrosivo acelerado a que fueron sometidas cada uno de las muestras metálicas en el ensayo en régimen dinámico. En contraposición a esto en la Figura 15, se puede observar uno de los cupones en blanco o sin impregnación previa, está fotomicrografía muestra un contraste significativo en comparación con la Figura 14, ya que en su microestructura superficial se aprecian signos evidentes de corrosión en una mayor proporción, lo cual señala que la técnica de rotavaporación mostró una inhibición efectiva para este tipo de ensayo de corrosión.

En la Figura 16 y en la Figura 17 , pueden observarse las fotomicrografías para los cupones de acero que fueron sometidos al ensayo de corrosión en la cámara de niebla salina. La primera corresponde a la muestra impregnada por la técnica de rotavaporación, mientras que la segunda corresponde a la muestra en blanco o libre de inhibidor, lo que permite realizar una comparación superficial de ambas muestras.

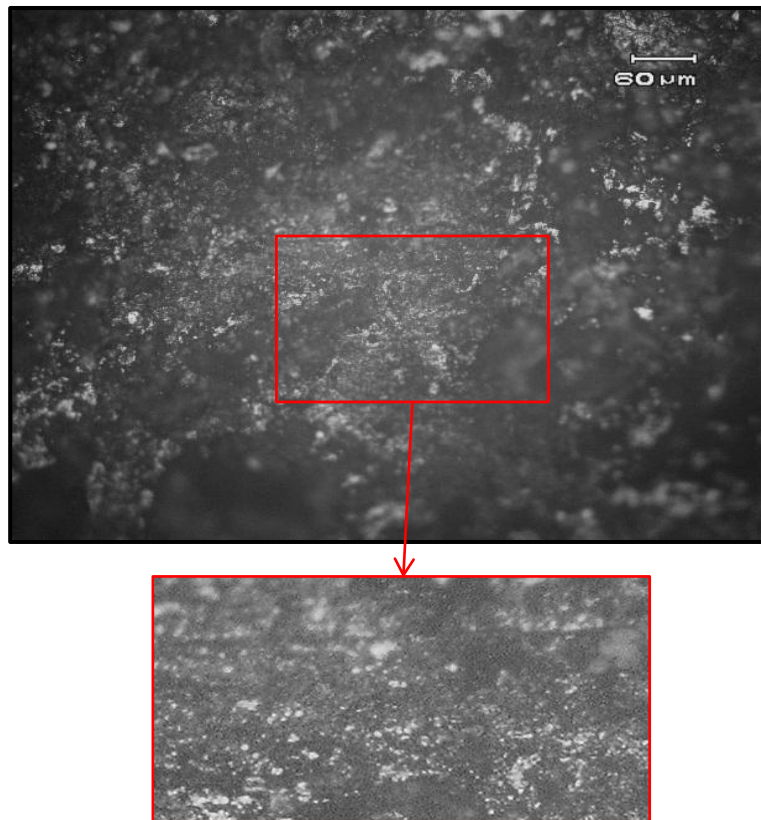


Figura 16. Microestructura de un cupón impregnado por rotavaporación para el ensayo en la cámara salina luego del decapado.

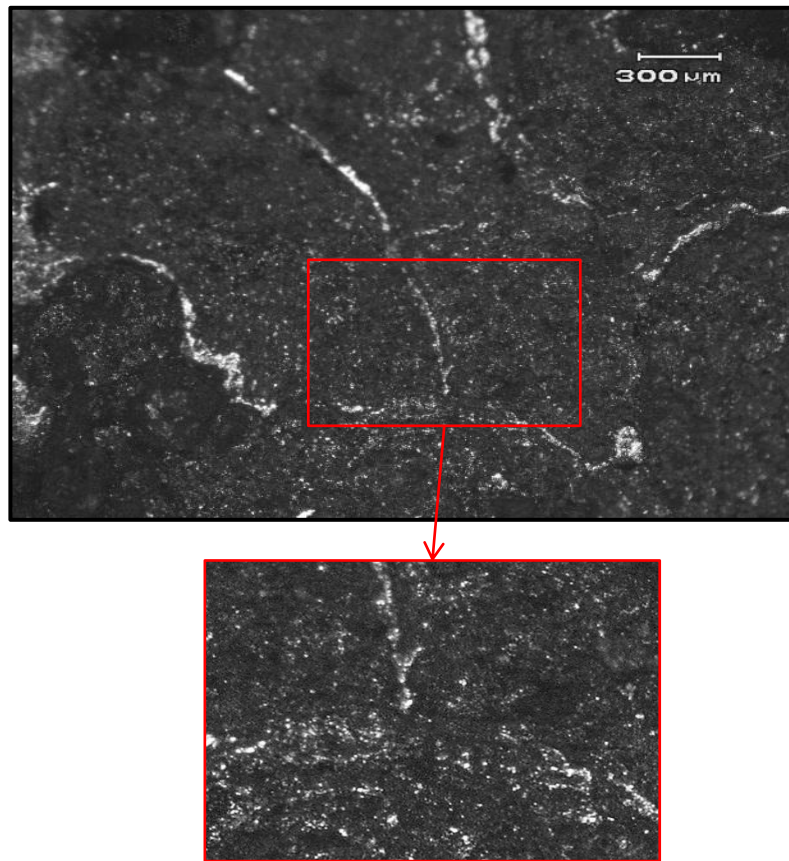


Figura 17. Microestructura de uno de los cupones en blanco para el ensayo en la cámara salina luego del decapado.

En la Figura 16 se observa una fotomicrografía para uno de los cupones impregnados por la técnica de rotavaporación luego de ser sometido al ensayo de corrosión en la cámara salina, en ella se puede apreciar productos de corrosión (zonas oscuras) y la base metálica (zonas claras). La distribución de las zonas oscuras señalan una posible corrosión uniforme, la cual es la forma más común de corrosión e implica el desgaste continuo del metal, debido a que el ataque se lleva a cabo de manera uniforme sobre toda la superficie (Costa, 2005). En relación con la Figura 17 se aprecia una mayor cantidad de depósitos de corrosión, lo cual es consecuente a lo esperado, debido a que es una fotomicrografía hecha para uno de los cupones en blanco, por lo que se esperaba que el ataque corrosivo sea mucho más agresivo en comparación con la muestra impregnada con el inhibidor.

La presencia de depósitos de corrosión en ambas indica que la efectividad de la impregnación por el uso del rotavapor no es muy elevada para este caso, pero en comparación con la muestra en blanco se observa que el inhibidor produce que la corrosión se desacelere evitando el aumento de los daños superficiales. Además al presentarse una corrosión uniforme en la pieza impregnada, se puede predecir con cierta exactitud la vida útil del acero (Sastri, 2011).

4.6 Análisis de la Superficie Corroída Mediante los Métodos de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopia de Rayos X (EDX).

Luego de realizar los ensayos de corrosión, se tomaron los cupones metálicos más resaltantes, para evaluar la superficie mediante el uso de la técnica de Microscopia electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de rayos X (EDX).

4.6.1 Imágenes de MEB correspondientes a la muestra impregnada por el método rotavaporación que fue sometida al ensayo de exposición a flujo.

En la Figura 18 se presenta una fotomicrografía a 100X, correspondiente a una muestra impregnada por rotavaporación que fue sometida al ensayo de corrosión en dinámico y posteriormente decapada.

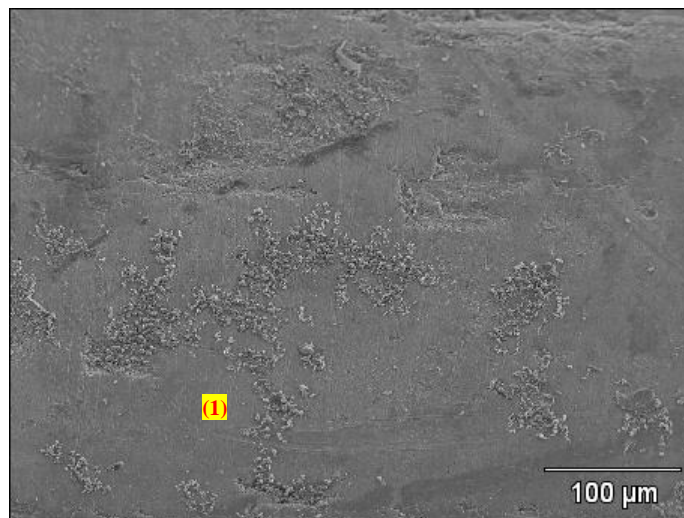


Figura 18. Fotomicrografía a 100X de una muestra impregnada por la técnica de rotavaporación que fue sometida al ensayo de exposición a flujo y posteriormente decapada.

Al observar la Figura 18 puede verse la superficie de una muestra impregnada por rotavaporación que fue sometida al ensayo de exposición a flujo a una temperatura de 65°C, velocidad de flujo de 1,1 m/s y un tiempo de exposición de 24 horas. Puede notarse la presencia de depósitos sobre la superficie, además de zonas libres lo cual es indicativo de que el inhibidor ejerció una buena actividad protectora sobre la superficie metálica sin observarse signos de corrosión localizada. En la Figura 19 puede apreciarse un EDX puntual sobre la superficie metálica.

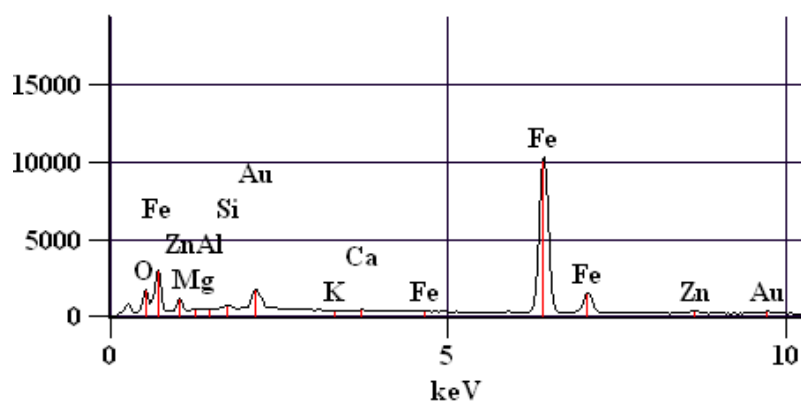


Figura 19. EDX puntual sobre la zona 1 de la muestra impregnada por la técnica de rotavaporación que fue sometida al ensayo de exposición a flujo y posteriormente decapada.

El EDX en el punto (1) (Figura 18 y Figura 19) muestra la presencia de oxígeno y hierro lo que es un posible indicativo de la existencia de óxido de hierro sobre la superficie, que pudo haberse formado luego del proceso de decapado. Además se observan elementos característicos del extracto de mango como lo son el calcio, el potasio y el magnesio, los cuales persistieron luego del decapado de las muestras.

4.6.2 Imágenes de MEB correspondientes a la muestra impregnada por el método rotavaporación que fue sometida al ensayo en la cámara de niebla salina.

En la Figura 20 se presenta una fotomicrografía a 100X, correspondiente a una muestra impregnada por rotavaporación que fue sometida al ensayo de corrosión en la cámara de niebla salina y posteriormente decapada.

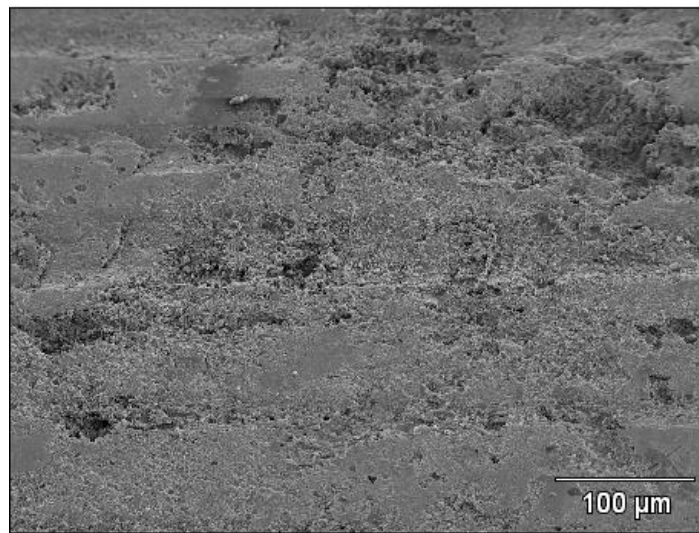
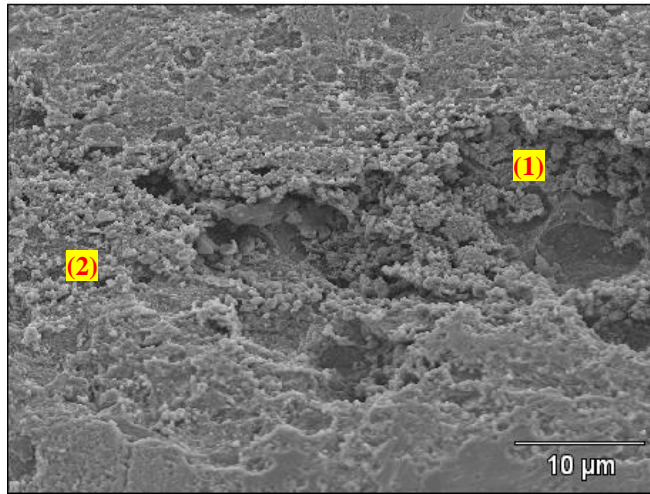
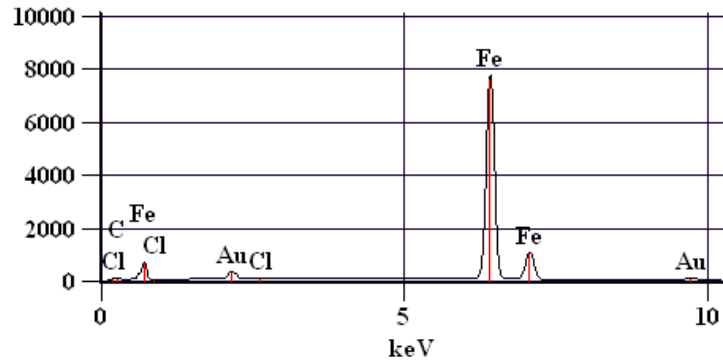


Figura 20. Fotomicrografía a 100X de una muestra impregnada por la técnica de rotavaporación que fue sometida al ensayo de corrosión en la cámara de niebla salina y posteriormente decapada.

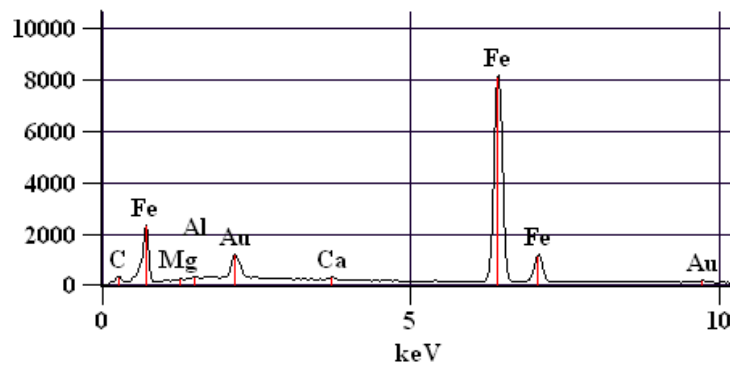
Al observar la Figura 20 puede verse la superficie de una muestra impregnada por rotavaporación y sometida al ensayo de corrosión en la cámara de niebla salina durante un tiempo de 168h. Puede notarse la presencia de depósitos sobre la superficie, además de zonas libres, observándose signos de corrosión localizada, por lo que se puede decir que a pesar de que el inhibidor proporcione una protección a la muestra, no impidió que se produjera ataque localizado el cual no es deseable ya que es el tipo de corrosión más peligrosa. Para indagar con más detalle las irregularidades presentes en la superficie, en la siguiente figura se puede apreciar una zona de la superficie de la muestra con una magnificación de 1000X.



(a)



(b)



(c)

Figura 21. Fotomicrografía a 1000X de la superficie de la muestra impregnada por la técnica de rotavaporación que fue sometida al ensayo en la cámara de niebla salina y posteriormente decapada. (b) EDX puntual sobre la zona 1. (c) EDX puntual sobre la zona 2.

Al observarse la Figura 21 puede notarse la existencia de irregularidades sobre la superficie metálica, el EDX en el punto (1) indica la presencia de cloro en la superficie lo cual se debe a que este es un elemento característico del medio corrosivo al que fue sometida la muestra. Referente al EDX en el punto (2) destaca la existencia de calcio y magnesio, lo cual puede ser justificado ya que estos son elementos característicos del extracto de mango de acuerdo a observaciones en estudios anteriores.

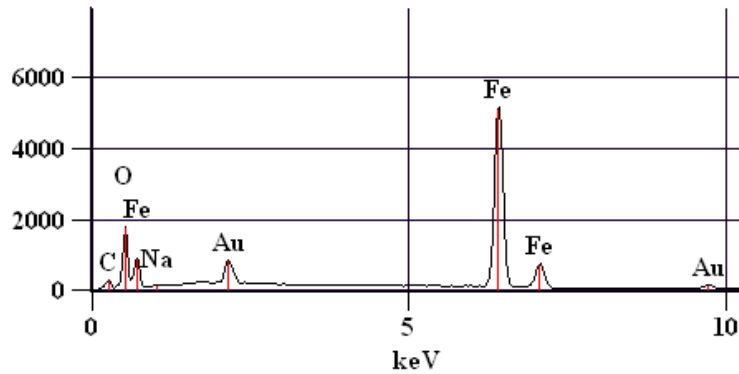
En base a lo anteriormente discutido puede establecerse que el extracto de mango produjo una inhibición considerable de la velocidad de corrosión sobre las muestras metálicas, pero no evito que se produjera daño superficial localizado sobre la superficie.

4.6.3 Imágenes de MEB correspondientes a la muestra en blanco que fue sometida al ensayo de exposición a flujo.

En la Figura 22 se presenta una fotomicrografía a 100X, correspondiente a una muestra en blanco que fue sometida al ensayo de corrosión en dinámico.



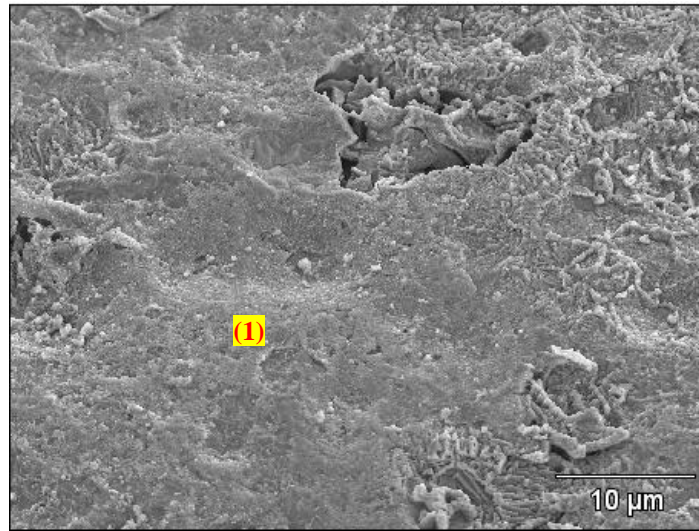
(a)



(b)

Figura 22. (a) Fotomicrografía a 100X de una muestra en blanco que fue sometida al ensayo de exposición a flujo y posteriormente decapada. (b) EDX puntual sobre la zona 1.

Al observar la Figura 22 puede verse la superficie de una muestra en blanco que fue sometida al ensayo de exposición a flujo a una temperatura de 65°C, velocidad de flujo de 1,1 m/s y un tiempo de exposición de 24 horas. Puede notarse la presencia de depósitos sobre la superficie, además de una superficie de apariencia irregular. Igualmente en el EDX realizado sobre un punto de la superficie se observa la presencia de oxígeno, hierro y sodio, lo que indica la existencia de óxido de hierro y sodio proveniente del medio corrosivo. Para observar con más detalle la superficie, en la Figura 23 se puede apreciar la apariencia de la superficie metálica con una mayor amplificación.



(a)

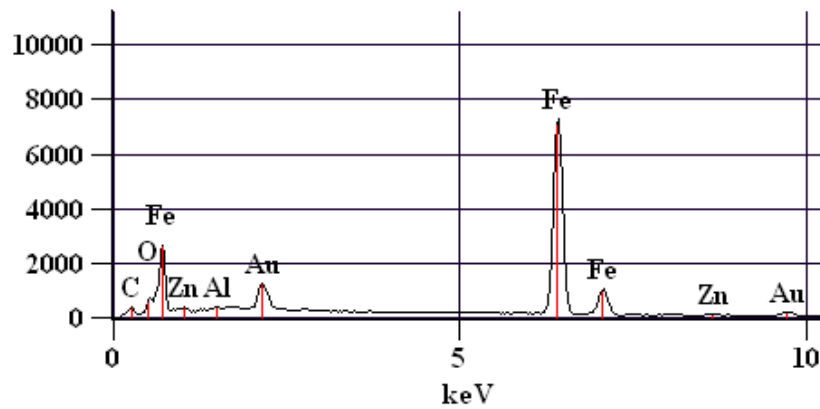


Figura 23. (a) Fotomicrografía a 1000X de la muestra en blanco que fue sometida al ensayo de exposición a flujo y posteriormente decapada. (b) EDX puntual sobre la zona 1.

En la Figura 23 se aprecia la superficie de la muestra en blanco sometida al ensayo de corrosión de exposición a flujo de donde destaca una superficie irregular con presencia de ruptura que aparentemente es debida al desprendimiento de los productos de corrosión en la superficie. El análisis de EDX en el punto (1) indica la existencia de oxígeno y hierro en su mayoría lo cual permite inferir que se trata de una capa de óxido de hierro existente sobre la superficie metálica.

4.6.4 Comparación de imágenes de MEB correspondientes a las muestras sometidas al ensayo de exposición a flujo.

En la

Figura 24 se muestra a manera comparativa la fotomicrografía de la muestra en blanco sometida al ensayo de exposición a flujo y posteriormente decapada. Así mismo se muestra la fotomicrografía de la muestra impregnada con la técnica de rotavaporación que fue sometida al mismo ensayo.

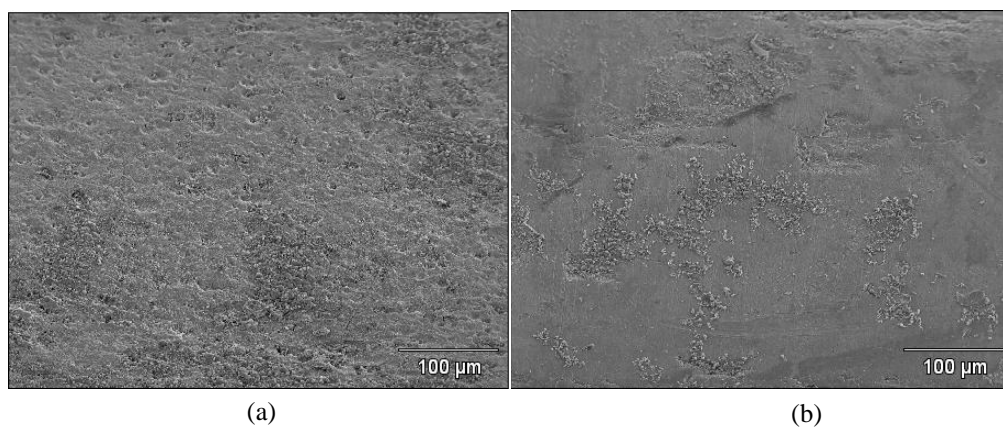


Figura 24. Fotomicrografía a 100X de la muestras que fueron sometida al ensayo de exposición a flujo y posteriormente decapadas. (a) Muestra en blanco. (b) Muestra impregnada por rotavaporación.

Al observar la Figura 24 se puede notar que existe un mayor daño superficial claramente apreciable en la muestra que fue sometida al ensayo, libre de extracto de mango (a), con respecto a la que fue impregnada con la técnica de rotavaporación (b). Este hecho refleja las características inhibitorias del extracto de mango el cual impidió que se produjera el ataque corrosivo sobre la superficie metálica obteniendo una alta eficiencia de protección. Además destaca que no se observan signos de ataque localizado por tanto el inhibidor proporciono una buena protección al metal.

4.7 Comparación del Inhibidor para cada uno de los casos evaluados.

A continuación se muestra de manera consolidada las eficiencias obtenidas en los diferentes ensayos de corrosión efectuados (cámara salina, exposición a flujo e inmersión) a las diferentes concentraciones evaluadas; con la finalidad de poder establecer la comparación respectiva que permita la selección de la concentración más eficiente.

En la Figura 25 puede apreciarse las velocidades de corrosión obtenidas en los diferentes ensayos efectuados a las distintas concentraciones evaluadas.

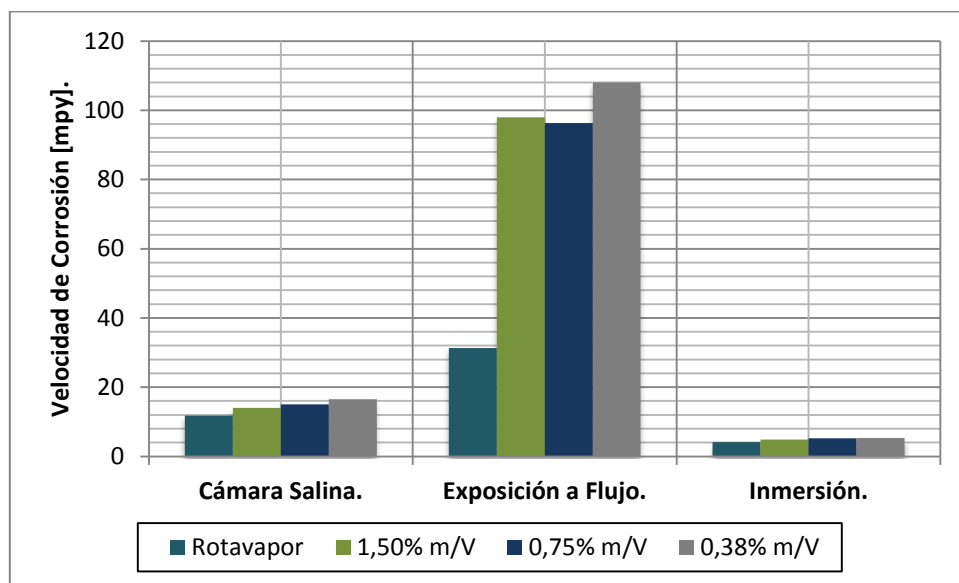


Figura 25. Velocidad de corrosión obtenida en los diferentes ensayos para cada uno de los casos evaluados.

En la Figura 25 podemos notar como la velocidad de corrosión fue muy superior en el ensayo que fue efectuado en el equipo por exposición a flujo en donde se obtuvieron velocidades cercanas a los 100 mpy, situación que evidencia la alta agresividad del medio sobre las piezas metálicas. En segundo lugar se observa que las

velocidades de corrosión obtenidas en el ensayo en la cámara salina estuvieron alrededor de los 16 mpy resultando muy inferiores a las obtenidas en el ensayo corrosivo por exposición a flujo, pero en todo caso resultaron mayores a las velocidades de corrosión arrojadas por el ensayo de inmersión, las cuales estuvieron alrededor de los 5 mpy. Estos resultados anteriormente mencionados, reflejan que ambiente es más agresivo con el acero objeto de estudio, en este sentido el orden obtenido concuerda con lo esperado de acuerdo a los basamentos teóricos, pues era de esperarse que en el equipo de exposición a flujo la velocidad de corrosión fuera mayor, ya que el movimiento del fluido produce erosión sobre las muestras, evitando la formación de depósitos que limitan el proceso de corrosión (Bardal, 2004). Por otra parte, la cámara salina obtuvo la segunda velocidad más alta a consecuencia de que este ensayo somete al metal o aleación a un ataque acelerado en una atmósfera de niebla salina saturada (Bermúdez, 1992), mientras que en ensayo de inmersión solo se sometió a la muestra a una solución electrolítica. En relación al ensayo efectuado en la cámara salina se tiene que en un estudio previo se utilizó extracto de mango como inhibidor en condiciones similares obteniéndose una velocidad de corrosión de 17,68 mpy (Freitas, 2011), situación que constata los resultados aquí obtenidos ya que esta velocidad fue mayor a las que se obtuvieron en la presente investigación, motivado a que los investigadores utilizaron concentraciones más bajas del inhibidor.

Otro aspecto que puede observarse en la Figura 25 es el hecho de que en general se obtuvo una disminución de la velocidad de corrosión al aumentar la concentración del inhibidor a excepción de la velocidad de corrosión de una muestra correspondiente al ensayo de exposición a flujo.

En todos los ensayos se observa que las muestras que fueron impregnadas por la técnica de rotavaporación presentaron velocidades de corrosión significativamente menores a las del resto, por lo que de aquí la rotavaporación se perfila como la mejor técnica de impregnación, ya que garantiza velocidades más bajas. Con respecto a las muestras impregnadas por inmersión la concentración de 1,5% m/V resultó ser la que presenta más inhibición de las velocidades de corrosión en todos los ensayos

efectuados con la salvedad del ensayo efectuado en el equipo de exposición a flujo, en el que la eficiencia obtenida fue ligeramente inferior a la que obtuvo la muestra impregnada con 0,75%.

A continuación se muestra la Figura 26, en la cual se muestran las eficiencias de inhibición obtenidas en los diferentes ensayos realizados para cada uno de los casos que se estudiaron.

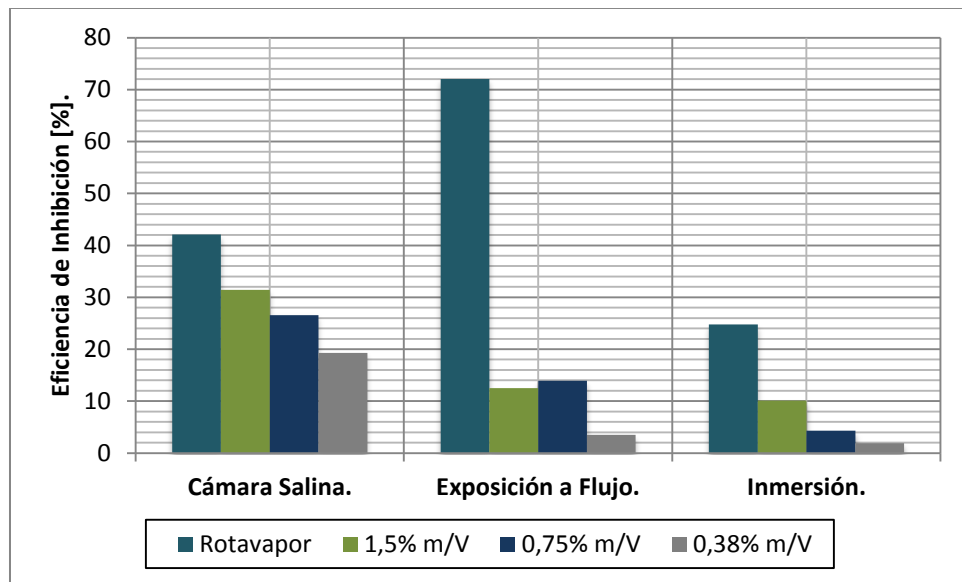


Figura 26. Eficiencia del inhibidor obtenida en los diferentes ensayos para cada uno de los casos evaluados.

En relación a las eficiencias obtenidas se puede apreciar que no existe una tendencia claramente establecida (Figura 26), ya que el inhibidor presenta eficiencias diferenciadas en cada sistema estudiado, lo cual indica que la eficiencia de un inhibidor no depende solamente de la cantidad o de sus propiedades, sino que también depende de la manera en que es aplicado y de las condiciones de operación imperantes en el sistema (UNAM, 2012). Puede también notarse que las eficiencias más altas se obtuvieron para las muestras impregnadas por rotavaporación, cuyos valores estuvieron por encima del 70%, 20% y 40% para las pruebas efectuadas en el equipo de exposición a flujo, por inmersión y en la cámara salina respectivamente. En

cuanto a las muestras impregnadas por inmersión la concentración más eficiente resultó ser la de 1,5% m/V con valores que estuvieron entre 30% y 10% para los distintos ensayos, lo cual podría ser debido a una débil persistencia de la película adsorbida de extracto de mango sobre los cupones de corrosión (Freitas, 2011).

El hecho de que la eficiencia más elevada se obtuvo para el caso de la prueba por exposición a un flujo continuo está sustentado, ya que el ensayo por exposición a flujo remueve la película de productos de corrosión que se forma sobre las muestras metálicas, mientras que en los ensayos en estático no ocurre este fenómeno limitando la velocidad de corrosión debido a la formación de una capa de productos de corrosión sobre el metal.

4.8 Análisis de la adsorción del inhibidor sobre los cupones metálicos.

En esta sección se muestra un estudio sobre la ganancia de masa que presentaron los cupones luego de ser impregnados con el extracto de mango, el cual fue empleado como inhibidor en los ensayos corrosivos que aquí se estudiaron.

En la Tabla 7 puede apreciarse la masa ganada por los cupones metálicos luego del proceso de impregnación respectivo, dicha ganancia se calculó como la diferencia entre la masa del cupón luego del proceso de impregnación menos la masa antes del proceso de impregnación.

Tabla 7. Masa ganada por los cupones de acero luego del proceso de impregnación.

Método de Impregnación	Ganancia de Masa [g] ± 0,0001
Rotavaporación	0,0322
Inmersión 1,5 %	0,0031
Inmersión 0,75% m/V	0,0026
Inmersión 0,38%	0,0020

En la Tabla 7 se puede apreciar que las piezas impregnadas mediante la técnica de rotavaporación fueron las que presentaron mayor ganancia de masa, la cual fue significativamente superior a la ganancia de masa que se obtuvo con las diferentes

impregnaciones por inmersión que se realizaron. En cuanto a las piezas impregnadas por inmersión puede observarse que la ganancia de masa guarda una relación directamente proporcional a la concentración, es decir a medida que aumenta la concentración de la solución impregnante aumenta la masa ganada por las piezas metálicas, esta tendencia concuerda con todos los resultados aquí obtenidos pues las velocidades de corrosión descritas en las secciones precedentes mantienen una tendencia a disminuir al aumentar la concentración y por consiguiente se tiene que la eficiencia de inhibición tiende a incrementarse con el aumento de la concentración del inhibidor, hecho que demuestra claramente la dependencia directa entre el proceso de adsorción sobre el grado de protección del metal. El aumento de la ganancia de masa al incrementar la concentración se debe al hecho de que el grado de adsorción a partir de una disolución tiende a incrementarse con la concentración, pero es probable que se alcance un límite en la adsorción, es decir con el aumento de la concentración, se favorece el contacto con la superficie adsorbente y por ende se beneficia a la adsorción, pero se alcanza un punto en el que la superficie adsorbente se satura y por esto no se evidencian cambios significativos de la cantidad adsorbida, aunque se produzca un incremento de la concentración (Glasstone, 1979).

En la Figura 27 se observa a manera comparativa las piezas metálicas sin inhibidor en contraposición a las que fueron impregnadas por rotavaporación, las cuales como ya se dijo antes fueron las que presentaron mayor ganancia de masa.



Figura 27. Comparación de las muestras metálicas con y sin inhibidor.

- (a) Muestras metálicas sin inhibidor. (b) Muestras metálicas impregnadas con inhibidor mediante la técnica de rotavaporación.

Al observar la Figura 27 puede constatar que las muestras impregnadas por la técnica de rotavaporación presentaron la formación de una película de compuestos orgánicos sobre la superficie metálica, con coloración de tonalidades oscuras. En base a la apariencia de las muestras impregnadas y al comportamiento observado a lo largo del desarrollo de los ensayos de corrosión en el presente trabajo de investigación, podría inferirse que el extracto de mango presenta un comportamiento típico de un inhibidor de adsorción, comúnmente observado en compuestos orgánicos. Este tipo de inhibidores actúan como resultado de la existencia de fuerzas entre el inhibidor y el metal; normalmente se trata de compuestos orgánicos de cadenas largas que son capaces de ser adsorbidos por la superficie metálica (Gómez, 2006), dicha adsorción puede ser física o química e inclusive podrían darse los dos tipos de manera simultánea (Reyes, 2011).

Para el extracto de mango se observó que la película adsorbida formada sobre la superficie metálica, podía removerse con cierta facilidad por lo que posiblemente el tipo de adsorción en cuestión sea la física, ya que este tipo de interacción se genera con relativa facilidad y es mucho más débil que las interacciones de tipo químico, debido a que no hay formación de enlaces fuertes localizados.

En cuanto al mecanismo de acción del inhibidor, se puede establecer en base al comportamiento observado, en el que la velocidad de corrosión disminuía a medida que aumentaba la concentración y por ende el grado de cobertura de la superficie; que el extracto posiblemente presenta un mecanismo de inhibición del tipo fílmico o de barrera en el que la inhibición se produce en la intercara, este mecanismo implica la adsorción del inhibidor en la superficie del metal, para formar una estructura que es capaz de retardar las semireacciones de corrosión (Godínez, 2003). Este tipo de inhibidores fílmicos o formadores de películas, basan su mecanismo de acción en aislar el metal del medio a través de una capa orgánica semipermeable, lo cual aumenta la resistencia del medio (Goncalves, 2008), dificultando la difusión de oxígeno o de los iones metálicos a través de la capa formada.

Otro aspecto a considerar es la aplicabilidad industrial del inhibidor; en base al método de impregnación de rotavaporación utilizado queda expuesto que el inhibidor actuó de manera similar a un recubrimiento ya que en esencia estos son materiales que al ser aplicados sobre una superficie producen una película o revestimiento que protege a la superficie (PDVSA, 2006), desde este punto de vista sería de interés estudiar en futuras investigaciones la aplicación del extracto de mango como posible aditivo para la formulación de un pigmento anticorrosivo, análogo a esto, Bustamante (2008) analizó el uso del aloe vera como un posible aditivo para fondos anticorrosivos, obteniendo que los recubrimientos formulados utilizando aloe vera como aditivo presentaron buena resistencia al ser expuestos a la intemperie, además los recubrimientos epóxicos fueron resistentes al ataque de agentes orgánicos y a electrolitos, mientras que los recubrimientos alquídicos no resistieron a dicho ataque.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se determinó la eficiencia del extracto de mango como inhibidor de la corrosión a diferentes concentraciones, impulsado por la necesidad de encontrar nuevas sustancias que permitan controlar la corrosión sin producir daños al sistema y al medio ambiente. Después de elaborar los análisis y las discusiones de resultados pertinentes se llegó a las siguientes conclusiones:

- El acero utilizado en cada uno de los ensayos presenta una microestructura característica de los aceros al carbono bajo la norma ASTM A53.
- Las velocidades de corrosión obtenidas en el ensayo de cámara salina estuvieron en el rango de 11 a 20 mpy de donde la velocidad más baja se obtuvo para la muestra impregnada por rotavaporación, la cual resultó ser de 11,82 mpy.
- Las velocidades de corrosión obtenidas en el ensayo por exposición a flujo estuvieron en el rango de 31 a 112 mpy de donde la velocidad más baja se obtuvo para la muestra impregnada por rotavaporación, la cual resultó ser de 31,27 mpy.
- Las velocidades de corrosión obtenidas en las pruebas de inmersión estuvieron alrededor de los 5 mpy, de donde la velocidad más baja se obtuvo para la muestra impregnada por rotavaporación, la cual resultó ser de 4,08 mpy.
- Las eficiencias de inhibición obtenidas oscilaron entre el 42 y 19% para los ensayos efectuados en la cámara salina, 72 y 3% para los ensayos efectuados en el equipo de exposición a flujo, mientras que en las pruebas de inmersión los valores estuvieron entre 24 y 2% aproximadamente.

- Los cupones metálicos presentaron mayor velocidad de corrosión en el ensayo de exposición a flujo, mientras que las velocidades de corrosión más bajas se obtuvieron en las pruebas por inmersión.
- Las fotomicrografías indicaron que las piezas impregnadas por la técnica de rotavaporación mostraron una inhibición efectiva de la corrosión para el ensayo en régimen dinámico.
- En todos los ensayos evaluados las muestras impregnadas por rotavaporación obtuvieron las eficiencias más elevadas, las cuales resultaron ser de 42%, 72% y 24,8% para los ensayos de cámara salina, exposición a flujo e inmersión respectivamente.
- Para las muestras impregnadas por inmersión la eficiencia más elevada en las pruebas de cámara salina e inmersión las obtuvo la concentración de 1,5% m/V con valores del 31,4% y 10,1% respectivamente, mientras que para la prueba de exposición a flujo la eficiencia más elevada la obtuvo la concentración de 0,75% m/V con un 13,9%.
- La adsorción del extracto de mango sobre la superficie metálica se incrementa al aumentar la concentración cuando el método de impregnación utilizado es la inmersión.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

A continuación se presentan algunas recomendaciones, que surgieron luego del desarrollo del presente Trabajo Especial de Grado, las cuales pueden considerarse para mejorar e innovar en el desarrollo de futuras investigaciones relacionadas al tema que aquí compete.

- Estudiar la aplicación del extracto de mango como posible aditivo para la formulación de un pigmento anticorrosivo.
- Estudiar el comportamiento del inhibidor en medio ácido o alcalino.
- Estudiar de manera detallada el proceso de impregnación de las muestras metálicas variando la temperatura a concentración constante a fin de notar como se ve afectada la adsorción.
- Realizar los ensayos de corrosión en condiciones más severas de temperaturas, velocidades de flujo y tiempos de exposición al medio corrosivo, empleando el método de impregnación por rotavaporación, con el fin de estudiar el efecto del inhibidor en condiciones variables.
- Para corroborar los resultados de una metalografía, es recomendable realizar un análisis de la composición química de metal objeto de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, Z. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Oxford, Gran Bretaña: ElSevier. 672 p.
- AlCentral. (s.f.). *Mango*. Obtenido el 10 de Marzo de 2012, de http://www.alcentral.com.ar/fh_mango.html.
- AlimentosOrg. (2012). *Información general acerca del mango*. Obtenido el 16 de Marzo de 2012, de <http://alimentos.org.es/mango>.
- ASM. (1992). *ASM Metals Handbook*, 4ta ed., Vol. XIII. Ohio, Estados Unidos: ASM International. 3455 p.
- Baboian, R. (2005). *Corrosion Test and Standars* (2da ed.). Baltimore, Estados Unidos: ASTM International. 882 p.
- Bardal, E. (2004). *Corrosion and Proteccion*. London, Inglaterra: Springer. 328 p.
- Belén, D. y otros. (2000). *Características Físico-Químicas de la Grasa de la Semilla de Mango*. Revista Unellez de Ciencia y Tecnología (18): 131-141.
- Bermúdez, M. (1992). *Prácticas de Ciencia de Materiales: Fundamento y Desarrollo*. Murcia, España: EDITUM. 178 p.
- Bustamante, K. (2008). *Análisis de la Resina de Aloe Vera en Polvo: "Una Alternativa en la Inhibición de la Corrosión"*. Revista Saber, Universidad de Oriente XX (1): 79-86.
- Cabrera, R., y Losada, R. (2010). *Evaluación de Inhibidores de Incrustaciones en Tuberías de Agua de Producción en Presencia de CO₂*. Trabajo Especial de Grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Cardozo, J., Cunha, J., y D'Elia, E. (2010). *Corrosion Inhibition of Carbon Steel in Hydrochloric Acid Solution by Fruit Peel*. Corrosion Science, (52): 2341-2348.

- CCI. (2008). *Cámaras Climáticas*. Obtenido el 21 de Marzo de 2012, de <http://ccicalidad.blogspot.com/2008/10/camara-de-niebla-salina.html>.
- Cheng, J., y Rivero, J. (2011). *Evaluación de la Corrosión en Cupones Metálicos en Medio Salino Bajo Condiciones Variables de Temperatura y Flujo en Presencia de Inhibidores Naturales y Químicos en un Sistema Continuo*. Trabajo Especial de Grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Cicek, V. y Al-Numan, B. (2011). *Corrosion Chemistry*. New Jersey, Estados Unidos: Wiley. 190 p.
- Correa, C. (1993). *Riqueza Química del Mango*. Universidad Eafit, (83): 77-82.
- Corrosion Doctors. (s.f.). *Corrosion Inhibitors*. Obtenido el 14 de Marzo de 2012, de <http://corrosion-doctors.org/Inhibitors/Introduction.htm>.
- Corrosion Doctors. (s.f.). *Types of Water*. Obtenido el 20 de Marzo de 2012, de <http://corrosion-doctors.org/Corrosion-by-Water/Types-of-water.htm>.
- Costa, J. (2005). *Diccionario de Química Física*. Barcelona, España: Díaz de Santos. 893 p.
- Davis, J. (2000). *Corrosion: Understanding the Basics*. Ohio, Estados Unidos: ASM International. 574 p.
- Dugarte, D. (2011). *Determinación del Método y las Condiciones de Operación Óptimas para la Extracción de la Pectina Contenida en la Cáscara de Mango y su Aplicación para la Inhibición de Hidratos de Tetrahidrofurano*. Trabajo Especial de Grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- El-Etre, A. (2008). *Corrosion inhibition*. Obtenido el 14 de Marzo de 2012, de http://www.scitopics.com/Corrosion_inhibition_the_natural_way.html.
- Escuela de Ingeniería Metalúrgica UCV. (2005). *Laboratorio de Corrosión y Electroquímica*. Obtenido el 21 de Marzo de 2012, de http://www.ing.ucv.ve/Escuelametalurgia/2_61i.html.

- FIUBA. (2004). *Corrosión*. Obtenido el 20 de Marzo de 2012, de <http://materias.fi.uba.ar/6303/TPN3.pdf>.
- Forsgren, A. (2006). *Corrosion Control Through Organic Coatings*. New York, Estados Unidos: CRC Press. 184 p.
- Freitas, J. y González, A. (2011). *Evaluación de la Resistencia a la Corrosión del Acero al Carbono y el Acero Inoxidable Mediante el Uso de Inhibidores en Pruebas Estáticas de Laboratorio*. Trabajo Especial de Grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Geminibv. (s.f.). *Rotary-Evaporator*. Obtenido el 21 de Marzo de 2012, de <http://www.geminibv.nl/labware/buchi-re111-rotary-evaporator/>.
- Gilbert, C. y Martin, S. (2011). *Experimental Organic Chemistry: A Miniscale and Microscale Approach* (5ta ed.). Boston: Cengage Learning. 960 p.
- Glasstone, S. (1979). *Tratado de Química Física* (7ma ed.). Aguilar. 1180 p.
- Godínez, L. y otros. (2003). *Los Inhibidores de Corrosión*. Revista de Metalurgia (39): 140-158.
- Gómez, F. (2006). *Manual Básico de Corrosión para Ingenieros*. Murcia, España: Universidad de Murcia. 175 p.
- Goncalves, A. (2008). *Selección de Inhibidores de Corrosión para Aplicaciones en Fondo de Pozos con Levantamiento Artificial por Bombeo Electrosomergible*. Maracaibo, Zulia, Venezuela: Universidad del Zulia.
- INTI. (2005). *Inhibidores de Corrosión no Tóxicos y Biodegradables*. Obtenido el 15 de Marzo de 2012, de <http://www.inti.gob.ar/hilo/h3/h3-5.php>.
- Kopeliovich, D. (2009). *Corrosion inhibitors*. Obtenido el 16 de Marzo de 2012, de http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=corrosion_inhibitors.
- Landaeta, F., & Orta, L. (2010). *Extracción de la Pectina de la Semilla del Mango (Mangifera Indica L.)*. Trabajo Especial de Grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

- Leyva, R. (s.f.). *Fundamentos de Adsorción*. Obtenido el 19 de Marzo de 2012, de <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/iberoarsen/docs/taller08/Presentaciones/4c%20Fundamentos%20de%20Adsorcion%20Roberto%20Leyva.pdf>.
- Llanos, B., y Tapia, M. (2002). *Estudio Selectivo de Compuestos Orgánicos como Inhibidores de Corrosión de Cobre, Aluminio y Acero en Agua Salina (Agua de Mar Artificial)*. Revista Peruana de Química e Ingeniería Química V (1): 64-74.
- Loto, C. (2011). *Inhibition Effect of Tea (Camellia Sinensis) Extract on the Corrosion of Mild Steel in Dilute Sulphuric Acid*. Journal of Materials and Environmental Science II (4): 335-344.
- Matamala, G. (2000). *Protección Anticorrosiva del Acero*. Información Tecnológica, VI (3): 155-158.
- MetalImprovement. (2010). *Corrosión Bajo Tensión*. Obtenido el 2 de Mayo de 2012, de <http://spanish.metalimprovement.com/corrosion.php>.
- Morral, F., Jimeno, E. y Molera, P. (2004). *Metalurgia General Vol. II*. Barcelona, España: Reverte. 764 p.
- Nanovision. (2012). *Nanovision*. Obtenido el 1 de Octubre de 2012, de http://www.nanovision.it/hitachi_s-2400.html
- Norma ASTM A53. (2002). *Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless*.
- Norma ASTM B117. (2003). *Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*.
- Norma ASTM G1. (2003). *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*.
- Norma ASTM G31. (2004). *Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*.

- Norma PDVSA. (2006). *Selección y Especificaciones de Aplicación de Sistemas Anticorrosivos de Pinturas*.
- Ortega, J. (1990). *Corrosión Industrial*. Barcelona, España: Marcombo. 116 p.
- Pierre, R. (2007). *Corrosion Inspection and Monitoring*. New Jersey, Estados Unidos: Wiley. 383 p.
- Reyes, R. (2011). *Evaluación Electroquímica de Extractos Vegetales como Inhibidores de Corrosión*. Poza Rica, México: Universidad Veracruzana.
- Rosario, S. y Yácono, J. (2003). *Materiales: La Corrosión, su Tradición y Alcances*. Revista del Instituto de Investigación Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica y Geográfica de la UNMSM. VI (11): 71-77.
- Sangeetha, M. y otros. (2011). *Green Corrosion Inhibitors: An Overview*. *Zaštita Materijala*, (52): 3-19.
- Sastri, V. (2011). *Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice*. New Jersey, Estados Unidos: Wiley. 328 p.
- Schweigger, E. (2005). *Manual de Pinturas y Recubrimientos Plásticos*. España: Días de Santos. 277 p.
- Sharma, S. (2011). *Green Corrosion Chemistry and Engineering: Opportunities and Challenges*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH. 430 p.
- Spectra Services, S. (2010). *Olympus BX60*. Obtenido el 2 de Octubre de 2012, de http://spectraservices2.com/Merchant2/merchant.mvc?Screen=PROD&Product_Code=BX60F3transreflected
- Torres, J. (2007). *Optimización de las Condiciones de Operación de Tratamientos Osmóticos Destinados al Procesado Mínimo de Mango*. Valencia, España.: Universidad Politécnica de Valencia.
- Uhlig, H. (2011). *Corrosion Handbook* (Tercera ed.). New Jersey, Estados Unidos: Wiley. 1285 p.

- UNAM. (s.f.). *Scribd*. Obtenido el 6 de Octubre de 2012, de <http://es.scribd.com/doc/51612603/Anticorrosivos-e-inhibidores-de-corrosion>
- UNLP. (2010). *Corrosión*. Obtenido el 26 de Marzo de 2012, de <http://www.ing.unlp.edu.ar/quimica/corrosion.htm>.
- UNT, F. (2009). *Niebla Salina*. Obtenido el 20 de Marzo de 2012, de <http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/corrosion/nieblasalina.pdf>.
- Villela, I. (2004). *Evaluación a la Microestructura y a las Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable 316LS y del Titanio Ti-6Al-4V Como Biomateriales*. Cholula: Universidad de las Américas Puebla.

APÉNDICES

Apéndice A: Preparación de los cupones para realizar la metalografía.

1. Embutir la muestra en una resina plástica.
2. Desbastar la superficie con papel de carburo de sílice bajo los siguientes grados 80, 240, 360, 400 y 600.
3. Realizar el pulido de la muestra según la siguiente secuencia:
 - Paño verde con alúmina de 0,3 micrones.
 - Paño rojo con alúmina de 0,05 micrones.
4. Efectuar un ataque químico empleando Nital al 5% durante un tiempo de 3 a 5 segundos.
5. Lavar la muestra con agua destilada enjuagar con alcohol y secar.
6. Se efectúa la fotografía de la muestra mediante la técnica de microscopía óptica.

Apéndice B: Preparación de los cupones de corrosión previa a los ensayos de corrosión.

1. Desbastar la superficie con papel de carburo de sílice bajo los siguientes grados 80, 240, 360, 400 y 600.
2. Introducir los cupones en un recipiente con acetona de manera que queden totalmente cubiertos y dejarlos en inmersión por 5 minutos con la finalidad de eliminar posibles restos de grasa.
3. Retirar los cupones mediante el uso de pinzas o guantes para evitar su contaminación y dejarlos escurrir para eliminar el exceso de acetona.
4. Secar los cupones en la estufa a 60°C por un tiempo de 24 h.
5. Una vez secos se retiran de la estufa y se guardan en recipientes sellados herméticamente para ser utilizados cuando se requiera.

Apéndice C: Preparación de la solución salina al 5% p/p de cloruro de sodio (NaCl).

Para preparar la solución salina a emplear como medio corrosivo debe calcularse la masa de cloruro de sodio a agregar de acuerdo al volumen de solución requerido, luego se agrega la cantidad de agua desmineralizada necesaria y se agita la solución hasta homogenizar la misma. De acuerdo a lo establecido en la norma ASTM B117-03 la Ecuación (10) permiten efectuar el cálculo de la masa de NaCl y en función del volumen de agua requerido.

$$m_{NaCl} = 0,053 * V_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \quad (10)$$

Donde:

m_{NaCl} : Masa de NaCl [g].

V_{H_2O} : Volumen de agua requerido [L].

ρ_{H_2O} : Densidad del agua [g/L].

Apéndice D: Proceso de decapado de los cupones de acuerdo a la Norma ASTM G1-03.

1. Se debe preparar una solución que posea la siguiente composición en un balón de 1L:
 - 200 g de NaOH,
 - 20 g de zinc granulado.
 - Agua destilada hasta el aforo.
2. Calentar la solución entre los 80°C y 90°C.
3. Sumergir los cupones en la solución por un tiempo de entre 30 y 40 minutos.
4. Se retiran los cupones de la solución manipulando con cuidado y se lavan con agua destilada.
5. Se colocan a cercar en la estufa usando un vidrio de reloj.

Nota: El tiempo de inmersión de los cupones en la solución debe determinarse mediante la obtención de una curva de decapado que permita observar la pérdida de peso en función del tiempo de exposición. El tiempo óptimo vendrá dado por el punto en el cual ocurre un cambio brusco de pendiente y la curva se hace prácticamente horizontal.

Apéndice E: Uso de la planta desmineralizadora.

La planta desmineralizadora ubicada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela es un equipo destinado a eliminar los iones presentes en el agua a través del paso de esta por resinas de intercambio. La Figura 28 muestra el diagrama del equipo.

El procedimiento para el uso de la planta desmineralizadora se muestra a continuación:

1. Verificar que todas las válvulas estén cerradas. Proceder a abrir las válvulas V-122, V-101, V-102, V-103, V-104, V-105 y V-128.
2. Esperar que el tanque T-101 se llene hasta un 70% de su capacidad aproximadamente.
3. Encender la bomba P-101 y aperturar de manera parcial las válvulas V-107, V-108, V-109, V-110, V-117 y V-118.
4. Fijar un flujo de 3L/min mediante la manipulación de la válvula V-106.
5. Circular en el sistema por un tiempo de 10 minutos.
6. Transcurrido los 10 minutos se comprueba la conductividad del sistema si esta es mayor a los 10 μS se deja circular midiendo la conductividad en intervalos de 5 minutos hasta que esta sea menor a los 10 μS .
7. Abrir la válvula V-111 y cerrar las válvulas V-117 y V-118.

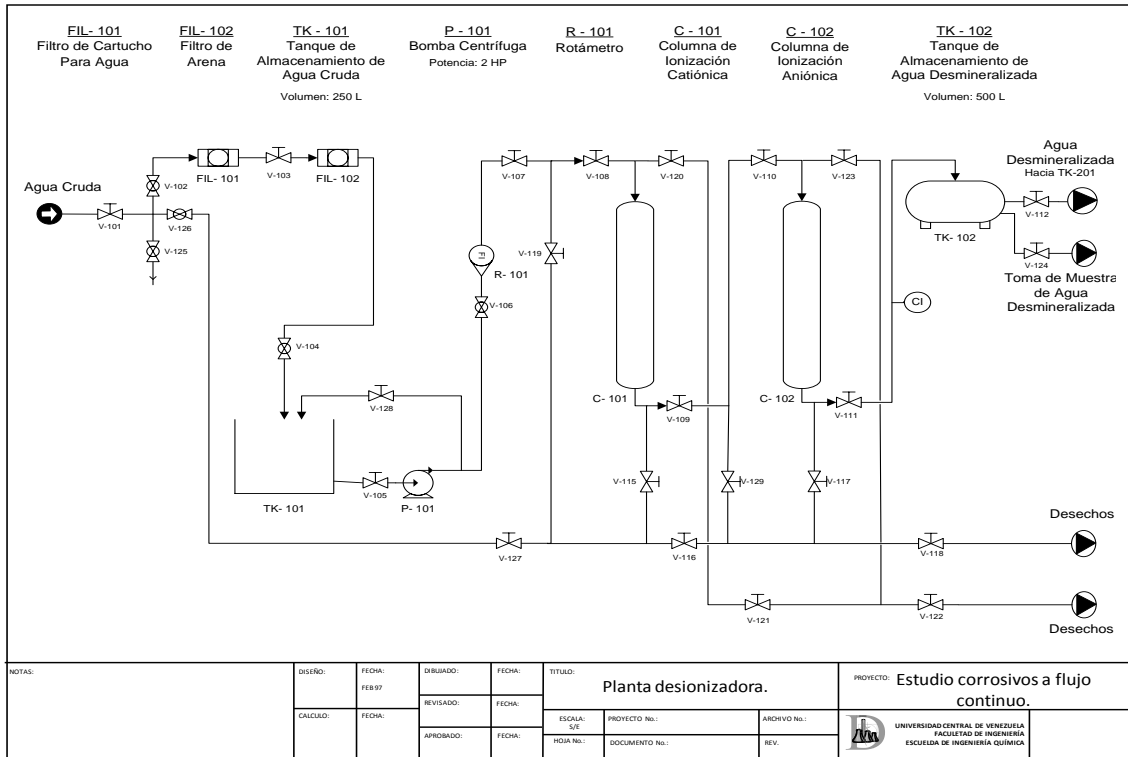


Figura 28. Equipo de desmineralización de agua (Cabrera, 2010).

8. Verificar la conductividad a través del medidor en línea.
9. Una vez llenado del Tanque TK-102, se procede a apagar la bomba y cerrar todas las válvulas del sistema.

Apéndice F: Acondicionamiento previo del sistema para evaluación de corrosión a flujo continuo.

Antes de efectuar los ensayos de corrosión se deberá realizar una limpieza del sistema con el objetivo de evitar posibles interferencias sobre los resultados. El procedimiento a emplear para el lavado del equipo se muestra a continuación:

1. Cerrar todas las válvulas del sistema.
2. Abrir las válvulas V-201 y V-202. Llenar el tanque TK-201 con agua hasta un 75% de su capacidad y cerrar la válvula V-201.

3. Poner a funcionar la bomba P-201 y regular el flujo a través de la válvula V-203.
4. Circular el agua en el sistema por un tiempo de 15 minutos.
5. Transcurrido el tiempo se apaga la bomba y se realiza el drenaje del sistema a través de la válvula V-204.
6. Se repita nuevamente los pasos del 1 al 5 adicionando 25 mL de una solución de NaOH al 50% durante el llenado del tanque TK-201.
7. Se repiten nuevamente los pasos del 1 al 5 para eliminar el NaOH del sistema.

Nota: Para el caso del lavado del sistema posterior a cada uno de los ensayos se utiliza la misma metodología con la única diferencia que en el paso número 6 se añadirán 16,3 mL de NaOH al 49% en sustitución de los 25mL de NaOH al 50%.

Apéndice G: Composición de los cupones de acero al carbono según norma ASTM A53-02.

Tabla 8. Composición de los cupones de acero al carbono según norma ASTM A53-02.

Composición Máxima [%].								
C	Mn	F	S	Cu	Ni*	Cr*	Mo*	W*
0,25	0,95	0,05	0,045	0,40	0,40	0,40	0,15	0,08

* La combinación de estos elementos no debe exceder al 1%.

ANEXOS

En esta sección se presentan los Anexos que podrían ser útiles y de interés para una mejor comprensión de las ideas aquí expuestas.

Anexo A: Cálculos tipo.

Aquí se presentan los cálculos tipo más relevantes que guardan relación con el presente Trabajo Especial de Grado.

1. Área de los cupones metálicos

$$A_m = 2(L \cdot e + h \cdot e + L \cdot h) \quad (11)$$

Donde:

A_m : Área de la muestra [cm^2].

L : Longitud de la muestra [cm].

e : Espesor de la muestra [cm].

h : Altura de la muestra [cm].

$$A_m = 2(5,20\text{cm} \cdot 0,3\text{cm} + 1,08\text{cm} \cdot 0,3\text{cm} + 5,20\text{cm} \cdot 1,08\text{cm}) = 15,00\text{cm}^2$$

2. Peso medio

$$P_m = \frac{\sum_i^n P_i}{n} \quad (12)$$

Donde:

P_m : Peso medio [g].

P_i : Peso en la medición i [g]

n : Número de mediciones.

$$P_m = \frac{11,7018g + 11,7017g + 11,7018g}{3} = 11,7018g$$

3. Velocidad de corrosión

$$CR = \frac{3,45 \cdot 10^6 (P_0 - P_f)}{A_m \cdot t \cdot \rho} \quad (13)$$

Donde:

CR : Velocidad de corrosión [mpy].

P_0 : Peso inicial de la muestra [g].

P_f : Peso Final de la muestra [g].

A_m : Área de la muestra [cm^2].

t : Tiempo de exposición [h].

ρ : Densidad de la muestra [g/cm^3].

$$CR = \frac{3,45 \cdot 10^6 (11,0375 g - 10,9728 g)}{14,56 cm^2 \cdot 168h \cdot 7,85 \frac{g}{cm^3}} = 11,63 mpy$$

4. Velocidad de corrosión media

$$CR_m = \frac{\sum_i^n CR_i}{n} \quad (14)$$

Donde:

CR_m : Velocidad media [mpy].

CR_i : Velocidad i [mpy]

n : Número de mediciones.

$$CR_m = \frac{13,13 \text{ mpy} + 10,30 \text{ mpy} + 12,23 \text{ mpy} + 11,63 \text{ mpy}}{4} = 11,82 \text{ mpy}$$

5. Eficiencia de inhibición

$$I_e = \frac{(CR)_0 - (CR)_i}{(CR)_0} \cdot 100 \quad (15)$$

Donde:

I_e : Eficiencia del inhibidor.

$(CR)_0$: Velocidad de corrosión de la muestra en blanco [mpy].

$(CR)_i$: Velocidad de corrosión de la muestra con inhibidor [mpy].

$$I_e = \frac{20,40 \text{ mpy} - 11,82 \text{ mpy}}{20,40 \text{ mpy}} \cdot 100 = 42,0\%$$

6. Concentración del Inhibidor

$$C_{\text{extracto}} = \frac{P_{0c} - P_{fc}}{V_{\text{sol}}} \cdot 100 \quad (16)$$

Donde:

C_{extracto} : Concentración del extracto [% m/V].

P_{0c} : Masa inicial de las conchas [g].

P_{fc} : Masa final de las conchas [g].

V_{sol} : Volumen de solución [mL].

$$C_{\text{extracto}} = \frac{117,4491 \text{ g} - 108,0406 \text{ g}}{626 \text{ mL}} \cdot 100 = 1,5\% \text{ m/V}$$

Anexo B: Curva de Decapado.

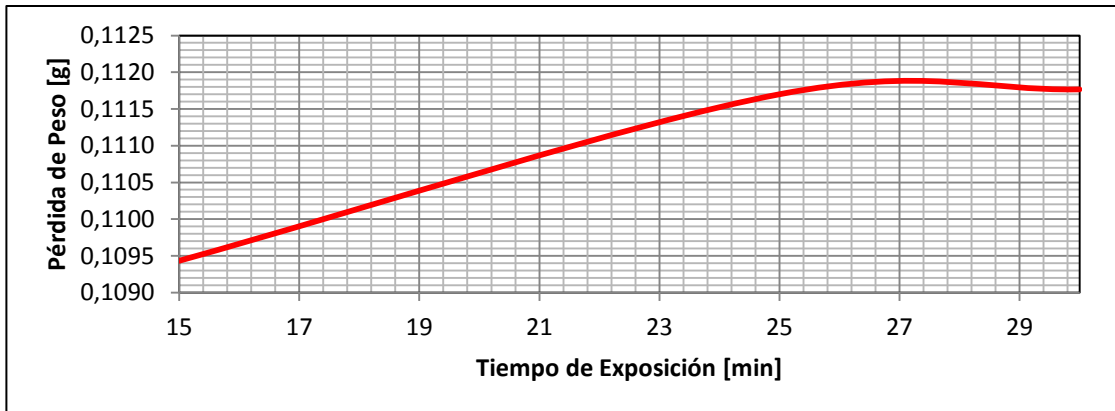


Figura 29. Curva de decapado de las cupones metálicos.

Anexo C: Imágenes.



Figura 30. Piezas metálicas utilizadas en los ensayos de corrosión.



Figura 31. Cupones metálicos decapados luego de efectuar ensayos corrosivos.

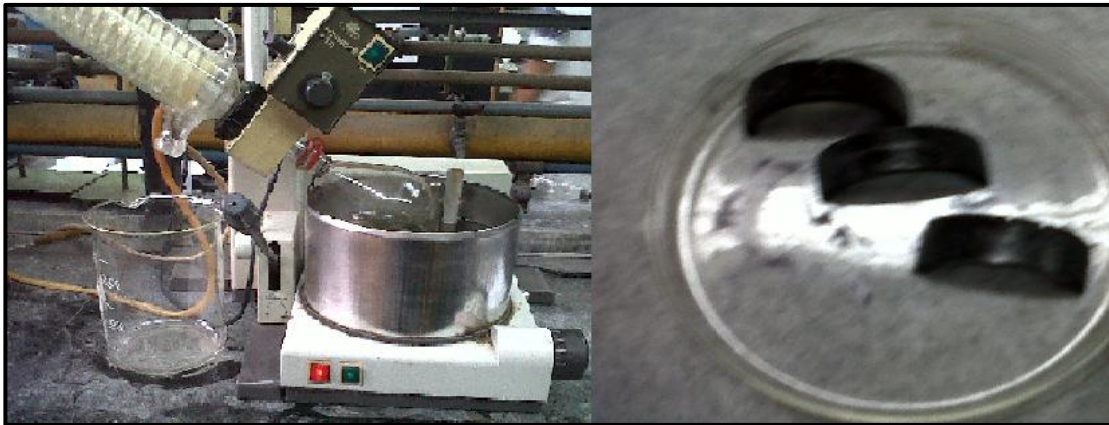


Figura 32. Equipo empleado en la impregnación de las muestras por rotavaoracion y muestras impregnadas.



Figura 33. Impregnación de las muestras por inmersión.

Anexo D: Plan de Trabajo.

En esta sección se presenta el plan de trabajo que se utilizó con la finalidad de alcanzar los objetivos propuestos en el presente Trabajo Especial de Grado. Para tal fin en la Tabla 9 se presenta el cronograma general de actividades que se siguió.

Tabla 9. Cronograma de actividades.

Actividad	Semana											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Recolección y limpieza de los materiales a emplear.	■											
Caracterización de los cupones de corrosión.		■										
Puesta a punto del equipo para efectuar las pruebas a flujo.			■									
Preparación de las muestras a ser sometidas a los diferentes ensayos.				■								
Preparación del medio corrosivo.				■								
Ejecución de las pruebas de inmersión				■	■	■	■	■	■			
Ejecución de las pruebas en la cámara salina.				■	■	■	■	■	■			
Ejecución de las pruebas en dinámico.				■	■	■	■	■	■			
Caracterización de los cupones corroídos.										■		
Determinar la velocidad de corrosión y la eficiencia del inhibidor.											■	
Discusión y análisis de los resultados obtenidos.											■	■