

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE UN RECUBRIMIENTO EPÓXICO
POLIAMIDA EN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE TUBERÍA DE
TRANSPORTE DE CRUDO GRADO API 5L X70**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DE GRADO DE MÁSTER (MSc.) EN
TRANSPORTE DE PETRÓLEO Y SUS DERIVADOS**

MARCELO FERNANDO SALVADOR QUIÑONES

marsalqui@yahoo.es

DIRECTOR: ING. HERNÁN PATRICIO ESTUPIÑAN MELO

patricio.estupinan@epn.edu.ec

Quito, Enero 2012

© Escuela Politécnica Nacional 2012

Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Marcelo Fernando Salvador Quiñones, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Marcelo Fernando Salvador Quiñones

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Marcelo Fernando Salvador Quiñones, bajo mi supervisión.

Ing. Patricio Estupiñán
DIRECTOR DE PROYECTO

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo el de mostrar como ciertos componentes químicos (polímeros y sales inorgánicas) dispuestas sobre las superficies metálicas pueden actuar como barreras que frenan o disminuyen la velocidad de corrosión del metal en ambientes o medios corrosivos que afectan al metal tanto en su microestructura como en propiedades mecánicas.

Para este fin se ha preparado un conjunto de probetas cuyo material base corresponde a un acero del tipo API 5L X 70, y de estas probetas algunas presentan recubrimiento total con pintura epóxica, otras probetas están parcialmente cubiertas con pintura epóxica y en la zona descubierta aplicadas soluciones inhibidoras de corrosión, y en otras probetas no presentan ninguna barrera de protección. Los ensayos realizados a las probetas mencionadas son desarrolladas tanto en ambientes salinos como dentro de soluciones salinas, con el objetivo de ver la influencia y la eficacia que poseen estos sistemas de protección ante la corrosión en comparación con las probetas que no presentan ningún tipo de protección.

Los ensayos de evaluación de probetas constan de ensayos gravimétricos (variación de masa), macrográficos (observación si existe cambios dentro de las superficies de las probetas), metalográfico (determinación del avance de la corrosión a través de los límites de grano). Para cumplir este objetivo se emplean los equipos pertenecientes al Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

Todos los ensayos y técnicas empleadas a lo largo de este estudio, son basados en las normas ASTM, NACE, SSPC, con el fin de garantizar la repetibilidad de este trabajo de investigación. Los resultados arrojados al finalizar este trabajo son que los sistemas de revestimiento con inhibidores retardan la velocidad de corrosión, pero únicamente si la superficie del revestimiento no presenta defectos, caso contrario la corrosión entra a través de estos defectos.

INTRODUCCIÓN

Dentro de la industria del transporte del petróleo, la corrosión que sufre la tubería es la responsable que se produzcan grandes derrames de crudo que no solo afectan a la parte económica de las industrias petroleras, sino también al medio ambiente, trayendo consigo graves problemas de contaminación, toxicidad y destrucción del medio ambiente.

Aunque el uso de los recubrimientos (en especial los internos) en nuestro país no son muy empleados ya que las empresas dedicadas a las actividades petroleras prefieren esperar a que las tuberías corroídas colapsen para reemplazarlas en vez de emplear un sistema de recubrimientos logrando aumentar la vida útil de la tubería y retardar el proceso corrosivo.

En base a lo citado en los párrafos anteriores, los objetivos planteados en este trabajo de investigación son:

- Estudiar la influencia de un recubrimiento epóxico poliamida en la velocidad de corrosión en tubería de transporte de crudo grado API 5L X70.
- Evaluar el efecto de un recubrimiento epóxico poliamida en el proceso de corrosión dentro de una tubería API 5L X70.
- Evaluar el efecto combinado epóxico poliamida junto a inhibidores en el proceso de corrosión dentro de una tubería API 5L X70.
- Obtener los resultados de manera experimental para determinar las velocidades de corrosión en el proceso corrosivo producido por el agua contenida en la producción de crudo en el material base de la tubería API 5L X70 en base a las normas NACE desarrollados en la cámara salina dentro de los parámetros normalizados en la norma ASTM B 117.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	6
1 ESTUDIO TEÓRICO	11
1.1 INTRODUCCIÓN	11
1.1.1 MATERIALES UTILIZADOS PARA TUBERÍA DE OLEODUCTOS	11
1.1.2 RECUBIMIENTOS INTERNOS	14
1.1.3 INHIBIDORES DE CORROSIÓN	19
1.2. CORROSIÓN	25
1.2.1 TEORÍA DE LA CORROSIÓN	25
1.2.2 TIPOS DE CORROSIÓN	26
1.3. PROPIEDADES DE LOS REVESTIMIENTOS	29
1.3.1 ADHERENCIA	29
1.3.2 RESISTENCIA A LA ABRASIÓN	31
1.3.3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	32
1.3.4 DUREZA SUPERFICIAL	34
1.3.5 ESPESORES	35
2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	37
2.1 INTRODUCCIÓN	37
2.2 PROCESO BASICO DE INVESTIGACION	39
2.2.1 REPETIBILIDAD DEL PROCESO DE INVESTIGACION	41
2.3 CAMARA DE NIEBLA SALINA	43
2.3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES	43
2.3.2 OBTENCIÓN DE LAS PLACAS DE ACERO	44

2.3.3	LIMPIEZA DE LAS PLACAS METALICAS	44
2.3.4	RECUBRIMIENTO DE LAS PLACAS DE ACERO	45
2.3.5	EXTRACCION DE LAS PROBETAS A PARTIR DE LAS PLACAS DE ACERO CON LA PINTURA DE RECUBRIMIENTO	46
2.3.6	PREPARACION DE LAS SOLUCIONES INHIBIDORAS	47
2.3.7	CODIFICACION DE LAS PROBETAS PARA LOS ENSAYOS	47
2.3.8	CAMARA DE NIEBLA SALINA	49
2.3.9	CAMARA DE INMERSION	50
2.3.10	EVALUACIÓN DE PROBETAS EN DIFERENTES ENSAYOS	51
2.3.11	EQUIPOS UTILIZADOS	54
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	56
3.1	RESULTADOS OBTENIDOS	56
3.1.1	RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LAS PROBETAS COLOCADAS EN LA CÁMARA DE INMERSION	56
3.1.2	RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LAS PROBETAS COLOCADAS EN LA CÁMARA DE NIEBLA SALINA	61
3.1.3	ANALISIS DE RESUSLTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS DE LAS PROBETAS DE LA CÁMARA DE INMERSION	66
3.1.4	ANALISIS DE RESUSLTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LAS PROBETAS COLOCADAS EN LA CÁMARA DE NIEBLA SALINA	71
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
4.1.	CONCLUSIONES	77
4.2.	RECOMENDACIONES	80
	BIBLIOGRAFIA Y CITAS DE INTERNET	82

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1.1: Polímeros termoestables empleados como revestimientos	16
Tabla 2.1: Fallas en la Industria Petrolera	39
Tabla 2.2: Mecanismos de corrosión que provocan fallas en la industria petrolera	40
Tabla 2.3: Propiedades físicas de la pintura UNIMASTIC 4020	43
Tabla 2.4: Espesores húmedos de recubrimiento aplicado a las placas de acero	45
Tabla 2.5: Espesores secos de recubrimiento aplicado a las placas de acero	46
Tabla 2.6: Número de probetas extraídas a partir de las placas de acero	47
Tabla 2.7: Componentes empleados como inhibidores de corrosión	47
Tabla 2.8: Datos y codificación de las probetas de la cámara salina	48
Tabla 2.9: Datos y codificación de las probetas de la cámara de inmersión	48
Tabla 2.10: Parámetros de Operación de la Cámara de Niebla Salina	50
Tabla 2.11: Parámetros de Operación de la Cámara de Inmersión	51
Tabla 3.1: Codificación de las fotografías correspondientes al análisis visual	57
Tabla 3.2: Datos obtenidos de los ensayos de adherencia	61
Tabla 3.3: Codificación empleada en las fotografías del análisis visual	62
Tabla 3.4: Datos obtenidos de los ensayos de adherencia	66

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1.1: Materiales y los medios den los cuales se produce corrosión	25

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	PÁGINA
Fotografía 3.1: Probeta 5.2 con la presencia del recubrimiento	59
Fotografía 3.2: Microestructura de la probeta 5.2 100X	60
Fotografía 3.3: Detalle del recubrimiento 100X	60
Fotografía 3.4: Probeta 5.1 con la presencia del recubrimiento	63
Fotografía 3.5: Microestructura de la probeta 5.1 100X	65
Fotografía 3.6: Detalle del recubrimiento 100X	65

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	PÁGINA
Gráfica 1.13: Probeta 5.2 vs semanas de ensayo en la cámara de inmersión	58
Gráfica 1.26: Probeta 5.1 vs semanas de ensayo en la cámara salina	63

CAPITULO 1

ESTUDIO TEÓRICO

1.1 INTRODUCCIÓN

1.1.1 MATERIALES UTILIZADOS PARA TUBERÍA DE OLEODUCTOS¹

En general, los materiales que se pueden emplear dentro de los diseños de los oleoductos, están normados dentro de la norma ASME B31.4 “Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids”. El equipo de diseño del sistema de oleoductos tendrá en consideración el aspecto de la temperatura en el desempeño del material del oleoducto.

Como material fundamental empleado en la construcción de las tuberías de oleoductos es el acero, el cual puede ser empleado en cualquier tipo de operaciones. Podrá emplearse fundiciones de hierro, hierro maleable y hierro forjado para ciertas secciones del oleoducto que no soporten elevados valores de presión, es decir que no sobrepasen los 250 psi. Sin considerar la norma ASME B31.4, se puede encontrar que los materiales que se emplean dentro de la construcción de oleoductos se clasifican en dos grandes grupos: metálicos y los no metálicos.

¹ Yoon, Mike, Pipeline System Design: Introduction, 2010, Yoon Consulting, Alberta, pp: 27 – 33

Dentro de los **Materiales Metálicos** para tuberías de oleoducto, se puede decir que son duros y resistentes a la fractura, poseen elevada conductividad eléctrica y son más propensos a la corrosión en comparación con los materiales no metálicos. Se puede citar a diversos materiales metálicos para este objetivo, pero los más representativos empleados son:

- Aceros al carbono.
- Hierros dúctiles.
- Aceros inoxidable.
- Cobre.

Estas tuberías de acero al carbono pueden presentar cordón de soldadura para la fabricación de las mismas (welded), pero también existen tuberías de acero que no presenten cordón de soldadura (seamless). La vía más empleada para soldar tuberías largas es el arco eléctrico. Mientras que las tuberías de acero que no presentan costura, son elaboradas por medio de la penetración de una varilla fría a través de la barra de acero caliente que será conformada y empleada como tubería, para esto el acero debe sobrepasar una temperatura mayor a los 1100 °C.

Dentro de los **Materiales No Metálicos** para tuberías, se afirma que no son tan resistentes estructuralmente en comparación con los materiales metálicos. Las ventajas que poseen estos materiales sobre los materiales metálicos radican en que son más ligeros, más económicos y más resistentes a la corrosión. Se puede citar a diversos materiales no metálicos para la fabricación de tuberías, pero los más empleados son:

- Concretos.
- Polímeros.
- Compuestos

El concreto como material base para tuberías pueden ser elaboradas para resistir valores moderados y elevados de presión interna, colocando concreto reforzado, los cuales son empleados ampliamente en tareas de transporte de agua y de aguas residuales. Como ventajas se pueden citar que son estructuralmente fuertes, resistentes a la corrosión además de ser económicos. Como desventajas se pueden citar que son dificultosos al trasladarlos, difíciles de cortar y limitados en su uso con respecto al tipo de juntas que puedan ser empleadas sobre estas.

Mientras que en los polímeros, pueden ser empleados para transporte de agua, aguas residuales, gas natural y otros fluidos los cuales no disuelvan o interaccionen químicamente con el material plástico. Como ventajas se puede citar su bajo costo, su bajo peso, su facilidad para el corte y para ser acoplados por juntas, pero la más importante es la resistencia a la corrosión que estos materiales poseen. Como desventajas se cita su baja resistencia en comparación con los materiales metálicos, fácilmente deformables ante cualquier esfuerzo, gran expansión como resultado de pequeños cambios de temperatura, la fácil combustión de estos a elevadas temperaturas (termoplásticos) y la fragilidad de estos materiales al ser empleados en ambientes a bajas temperaturas.

Los materiales compuestos han sido creados para mejorar la combinación de propiedades mecánicas como rigidez, tenacidad y resistencia a la tracción a

diferentes temperaturas. Estos materiales no son más que la combinación de dos o más componentes, con el fin de que las propiedades del material final sean superiores a las propiedades de cada componente por separado. Estos materiales están formados por una fase denominada **MATRIZ** que puede ser metálica, cerámica o polimérica y que es continua rodeando a la otra fase de nominada fase **DISPERSA**.

Los compuestos empleados en la construcción de oleoductos son las matrices epóxicas o poliéster y como refuerzos en fibras de vidrio tejidas o fibra de carbono. Como características ventajas al emplear los materiales compuestos en la construcción de oleoductos son la resistencia a la humedad, el aislamiento térmico, resistencia al ataque químico y al ataque corrosivo, rigidez y resistencia mecánica a las fuertes presiones, mientras que como desventajas son el elevado precio, mala resistencia a temperaturas superiores a 200°C, sometidos a fuertes restricciones mecánicas en un ambiente altamente corrosivo presenta dificultad en medir la degradación soportada y por tanto la resistencia a la corrosión.

1.1.2 RECUBRIMIENTOS INTERNOS²

Los recubrimientos internos de tuberías son compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica, los cuales tienen como fin en evitar el contacto de las superficies metálicas de las tuberías con el material que están transportando y de esta manera evitar el proceso de corrosión. Debe quedar claro que los recubrimientos en servicio del lado interno de la tubería (inmersión) son diferentes al

² Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios, Protección Interior de Ductos con Inhibidores NRF – 005 – PEMEX- 2000, 2000, PEMEX, México D.F., pp: 8, 10, 11, 15, 16, 19 – 21.

servicio del lado externo de la tubería (expuesta al aire o enterrada). Los recubrimientos internos en general deberán poseer las siguientes características:

- Buenas propiedades de aislamiento eléctrico.
- Buena adherencia sobre las superficies metálicas en las que son aisladas.
- Buena resistencia a los agentes corrosivos.
- Estabilidad de sus propiedades a través del tiempo.

Se puede clasificar en dos grandes grupos a los recubrimientos internos en base a su naturaleza química:

Recubrimientos Inorgánicos.- En el caso de los recubrimientos inorgánicos, los más empleados son el vidrio y los cerámicos, los cuales proporcionan acabados tersos y duraderos. Muy pocos son empleados como recubrimientos internos, más bien estos son empleados en recubrimientos externos.

Recubrimientos Orgánicos.- La aplicación de revestimientos poliméricos que se realiza hoy en día es el fruto de años de investigación logrando una buena reputación con el fin de proteger las superficies internas de tuberías y de equipos, tanques y recipientes sometidos a fluidos corrosivos. En el caso de los recubrimientos orgánicos que en su gran mayoría son polímeros termoplásticos y termoestables.

Los recubrimientos poliméricos termoestables son aquellos en los que las reacciones químicas se desarrollan al aplicarlos los convierten en una película

irreversiblemente sólida debido al entrecruzamiento de cadenas poliméricas del tipo covalente.

En los recubrimientos de polímeros termoplásticos son aquellos en los que el estado sólido está dependiendo de la temperatura, este estado sólido no está determinado por el entrecruzamiento de moléculas, sino por los enlaces secundarios del tipo Van Der Waals o dipolo inducido entre cadenas moleculares adyacentes, aunque son débiles, estas están distribuidas a lo largo de toda la molécula y son suficientes para formar un sólido debajo de ciertas temperaturas críticas por acumulación de moléculas poliméricas.

Los recubrimientos poliméricos termoestables son los más empleados como revestimientos internos de tuberías y dispositivos que manejan y transportan fluidos corrosivos y son de diferentes tipos los cuales se presentan en la tabla 1.1.

Tabla N°1.1 Polímeros termoestables empleados como revestimientos.

Polímeros termoestables empleados en revestimientos internos	
Fenólicos	Fenólico Modificado
Epoxy Modificados	Epoxy Fenólico
Cresol Novalaca	Epoxy Novalaca
Epoxy	Fluorados

Estos pueden ser colocados por medio de pinturas, lacas, barnices y muchos materiales poliméricos han dado buen resultado como protección de la corrosión. Estos materiales proveen barreras finas tenaces y duraderas para proteger

al sustrato metálico de medios corrosivos. Desde el punto de vista de la forma de aplicación, se puede clasificar a los revestimientos en:

Revestimientos aplicados en estado sólido.- Es la tecnología de aplicación de revestimiento aún utilizado en la actualidad. Una de las técnicas más antiguas es la de Recubrimiento Fundido en Condiciones de Servicio (FBC), la cual el sustrato metálico es unido revestimiento polimérico por la fusión de este último. Para aplicar en el estado sólido se emplea la tecnología denominada Recubrimientos Epoxi Fundidos en Condiciones de Servicio (FBE) o Recubrimientos Epoxi Fenólicas Fundidos en Condiciones de Servicio (FBEF), en la cual el polímero en estado sólido es aplicado en forma de polvo por un sistema que hace uso de la aplicación electrostática de polvos. Para cumplir esta técnica la gente del medio se fundamenta en la norma API 5L7, Unprimed Internal Fusion Bonded Epoxy Coating of Line Pipe.

Es posible aplicar estos revestimientos vía lecho fluidizado, en la cual el polvo se fluidifica por la acción de aire insuflado dese abajo que lo mantiene en suspensión formando un fluido poco denso, posteriormente la pieza a revestir es introducida en este fluido a la temperatura de proceso (próxima a los 200°C) y por efecto de la acción electrostática, el polvo se precipita y cubre todas las superficies expuestas.

Los FBE al emplearse en el interior de la tubería, estarán en inmersión como ocurre en los tubings de producción, en los inyectores o en los line pipe los cuales están sometidos a elevadas temperaturas conjuntamente con la presencia de CO₂ y H₂S, para estos los FBE deben estar formulados para que soporten este tipo de aplicaciones. Jamás deberá reemplazarse una formulación de FBE externa por una formulación de FBE interna, ya que las formulaciones de FBE externa no contemplan las condiciones de servicio mencionados en este párrafo.

Revestimientos aplicados en estado líquido.- La aplicación en estado líquido de la mezcla de base polimérica con el agente curador, los cuales comenzarán la reacción de polimerización y el curado, se realiza en muy poco tiempo antes de la aplicación. Algunas veces el polímero y el agente curador se aplican simultáneamente, mezclándose segundos antes de formar el spray polimérico. Debido a la separación entre la resina base y el agente curador, el tiempo de vida en estiba (shelf life) de la materia prima es casi indefinida, ya que no existen reacciones químicas de polimerización.

Como características se puede mencionar al gran contenido de sólidos en volumen, esto se refiere al porcentaje de sólidos que quedará en el revestimiento seco y curado. A más de los aspecto técnicos de aplicación, la necesidad de usar revestimientos con altos sólidos en volumen es referido a razones medio ambientales. Este tipo de revestimientos poseen gran fluidez por lo que poseen gran capacidad e cobertura, ayudando al mojado del revestimiento sobre la superficie metálica y de esta manera provocar el máximo acercamiento entre los átomos del metal y los de las cadenas poliméricas, esta ventaja provoca que en algunos epoxi aplicados en estado líquido no sea necesario utilizar un primer fenólico, sino se los aplique directamente sobre el metal.

Revestimientos de última generación.- A este tipo de revestimientos pertenecen a los revestimientos poliméricos – cerámicos. En la actualidad han surgido revestimientos de aplicación en estado líquido y a temperaturas cercanas a la ambiental, las cuales por su diseño químico polimérico pueden ser utilizadas en servicios con un estado de curado no del todo completo, dejando un entrecruzamiento no tan denso lo que permite una mayor ductilidad y tenacidad. Si la temperatura de servicio es mayor a la del curado a la salida de planta, el curado continua hasta adecuarse a esta temperatura pero manteniendo un máximo posible de ductilidad. Otras propiedades como son la dureza, la resistencia al impacto, la abrasión y la resistencia a la corrosión, vienen dadas reemplazando la densificación

de la masa polimérica que en otros revestimientos se logra por curado, empleando un determinado contenido de partículas cerámicas, muy duras e inertes embebidas en la fase polimérica. Estas partículas además de estar embebida en la fase polimérica, no deben presentar segregación y deben estar adheridas al polímero. El efecto de las partículas cerámicas sobre las propiedades del conjunto del revestimiento es interesante, presentando las siguientes características:

- Controlan la resistencia a la abrasión y al impacto en sinergia con la ductilidad de la fase continua polimérica.
- Mejoran la resistencia a la corrosión al producir un camino sinuoso para las especies químicas que permean el revestimiento, aumentando el espesor efectivo del mismo.
- Aumentan la adhesión al sustrato metálico que hubiese tenido el polímero solo (valores de adherencia aproximados a los 400 kg/cm² equivalente a los 5600 psi).
- En este tipo de revestimientos al aumentar la adhesión al sustrato metálico, hacen innecesario el amplio de un primer.
- Aumentan en forma importante la conductividad térmica del revestimiento.

1.1.3 INHIBIDORES DE CORROSIÓN³

³ Pyc, Wioleta, Performance Evaluation of Epoxy – Coated Reinforcing Steel and Corrosion Inhibitors in a Simulated Concrete Pore Water Solution, 1997, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, pp: 4-6

Se define como inhibidor de corrosión a un compuesto químico o a una formulación química de naturaleza orgánica o inorgánica, que se adiciona al fluido transportado por medio de oleoductos en concentraciones adecuadas con el fin de controlar o reducir la corrosión. Un inhibidor de corrosión fílmico, es un compuesto químico orgánico que al dosificarse al interior de los tubos forma una película entre la pared metálica y el medio corrosivo, con el fin de disminuir la velocidad de corrosión interna.

Existen muchas maneras de clasificar a los inhibidores de corrosión, pero la forma más aceptada es por el mecanismo de acción, y dentro de esta se clasifica de la siguiente manera:

- Inhibidores pasivadores.
- Inhibidores convertidores de película.
- Inhibidores de adsorción.
- Inhibidores neutralizantes.
- Inhibidores secuestrantes.
- Inhibidores misceláneos.

Los inhibidores pasivadores, convertidores de película y de adsorción son los grupos de inhibidores más numerosos y corresponden a compuestos que pueden formar barreras entre el metal y el medio agresivo, en cambio los inhibidores neutralizantes y secuestrantes actúan sobre el medio agresivo eliminando agentes muy corrosivos como el ion hidrógeno o el oxígeno disuelto.

Los inhibidores de adsorción (fílmicos) son los más empleados para la protección interna de los ductos, estos compuestos se adsorben sobre la superficie

del metal formando películas delgadas que resultan de la atracción física o química entre el compuesto y la superficie metálica del ducto. El nivel de protección depende tanto de la concentración, que conduzca a una cobertura de la superficie, como también de la fuerza de atracción entre el metal y el compuesto. Las barreras del inhibidor formadas son hidrofóbicas, es decir que rechazan al agua existente en las especies corrosivas. Este tipo de inhibidores son adsorbidos y desadsorbidos de la superficie del metal. Estos inhibidores son largas moléculas orgánicas con ramificaciones, las cuales pueden limitar la difusión del oxígeno a la superficie, atrapando los iones metálicos en la superficie y reduciendo la velocidad de disolución o estabilizando la capa pasivante.

Otra forma de clasificación de los inhibidores es en base a la reacción que inhiben, estos pueden clasificarse en:

- Inhibidores anódicos.
- Inhibidores catódicos.
- Inhibidores mixtos.

Los inhibidores anódicos reaccionan con los iones de los metales corroídos incrementando la polarización del ánodo, produciendo una delgada capa pasivante o pequeñas capas de sales las cuales recubren al ánodo. Dos tipos de inhibidores anódicos de corrosión existen para el acero, los primeros son agentes oxidantes (nitratos, nitritos y cromatos) y los que requieren oxígeno disuelto para ser efectivos (silicatos, fosfatos, molibdatos y boratos).

Los inhibidores catódicos afectan las reacciones catódicas, estos inhibidores reaccionan con los iones hidroxilos (OH^-) con el fin de precipitar compuestos insolubles en el cátodo previniendo de esta manera el ingreso del oxígeno (sales de cinc, calcio y magnesio) o formar una capa de hidrógeno adsorbido

en la superficie del cátodo (arsénico, bismuto, antimonio y algunos compuestos orgánicos).

Los inhibidores anódicos son más eficientes que los inhibidores catódicos, pero en la actualidad una combinación de ambos inhibidores es usada para brindar la mayor protección de corrosión, un ejemplo de la combinación de inhibidores son los sistemas formado por cromatos / polifosfatos / cinc.

Propiedades y Características de los Inhibidores de Corrosión.- Los inhibidores de corrosión que se seleccionan para el control de la corrosión en el interior de las tuberías de oleoductos que transportan hidrocarburos (dulces o amargos) pueden ser:

- Formadores de películas.
- Solubles en aceite y dispersables en agua.
- Solubles en agua y dispersables en aceite.
- Parcialmente solubles en agua y en aceite.
- Parcialmente dispersables en agua y aceite.

Agentes Corrosivos en los Fluidos Transportados en Ductos.- Antes de la aplicación de los inhibidores de corrosión dentro del interior de las tuberías de oleoducto, los hidrocarburos líquidos y los hidrocarburos gaseosos deben ser sometidos a procesos de eliminación de impurezas.

Dentro de los agentes residuales agresivos más frecuentes que se puede detectar en los flujos de transporte en oleoductos son: químicos (dióxido de carbono (CO₂), oxígeno (O₂), gas sulfhídrico (H₂S)) y biológicos (microorganismos) los cuales en presencia de humedad, temperatura presión y condiciones particulares de

operación, pueden provocar efectos sinérgicos o individuales, con los consecuentes daños por corrosión en el interior de los ductos.

Limpieza Interna de los Ductos.- Si se desea que el desempeño de los inhibidores de corrosión sea la esperada, se requiere que el nivel de limpieza en el interior de los ductos sea aceptable, por lo que es necesario implementar un programa de limpieza periódica en función de los productos contaminantes.

Selección de Inhibidores de Corrosión.- Para seleccionar un inhibidor de corrosión, debe tomarse en cuenta los siguientes puntos:

- Conocer la composición del fluido a transportar, ya que la existencia de compuestos corrosivos (gas sulfhídrico, oxígeno, dióxido de carbono), presencia en grandes cantidades de parafinas, asfaltenos, cloruros y bacterias afectan el mecanismo de formación de la película del inhibidor.
- Relación flujo / volumen, la cual es determinante para el cálculo de la dosificación del inhibidor.
- Relación de agua / aceite, ya que al elevar el valor de esta relación el tiempo de contacto con el agua se incrementa, de la misma manera aumenta la velocidad de corrosión.
- A mayor temperatura el efecto inhibidor disminuye, cambiando su solubilidad y hasta llegar a degradarse. Sobre los 150°C muy pocos inhibidores permanecen efectivos.
- La compatibilidad entre el fluido a transportar y el inhibidor empleado, así también se debe analizar la compatibilidad entre el inhibidor con

otros productos que se adicionen al ducto. Junto con los ensayos de compatibilidad, deben hacerse otros ensayos como pruebas de tenencia a la emulsión, formación de espuma y solubilidad del inhibidor en salmuera.

- Se debe considerar las características particulares del fluido y del yacimiento de procedencia, volumen del producto manejado, especificaciones del ducto, servicio para el que fue diseñado, antecedentes de fugas por corrosión interior así como el costo beneficio.

Caracterización de los Inhibidores.- Una vez que el inhibidor ha sido seleccionado, se procede a someterle a pruebas de comportamiento a nivel de laboratorio, las cuales se citan a continuación:

- Pruebas para oleoductos y gaseoductos.
- Pruebas gravimétricas.
- Pruebas electroquímicas.
- Pruebas para ductos que transportan productos derivados de petróleo.
- Pruebas de corrosión interior en ductos que transportan productos petroquímicos.

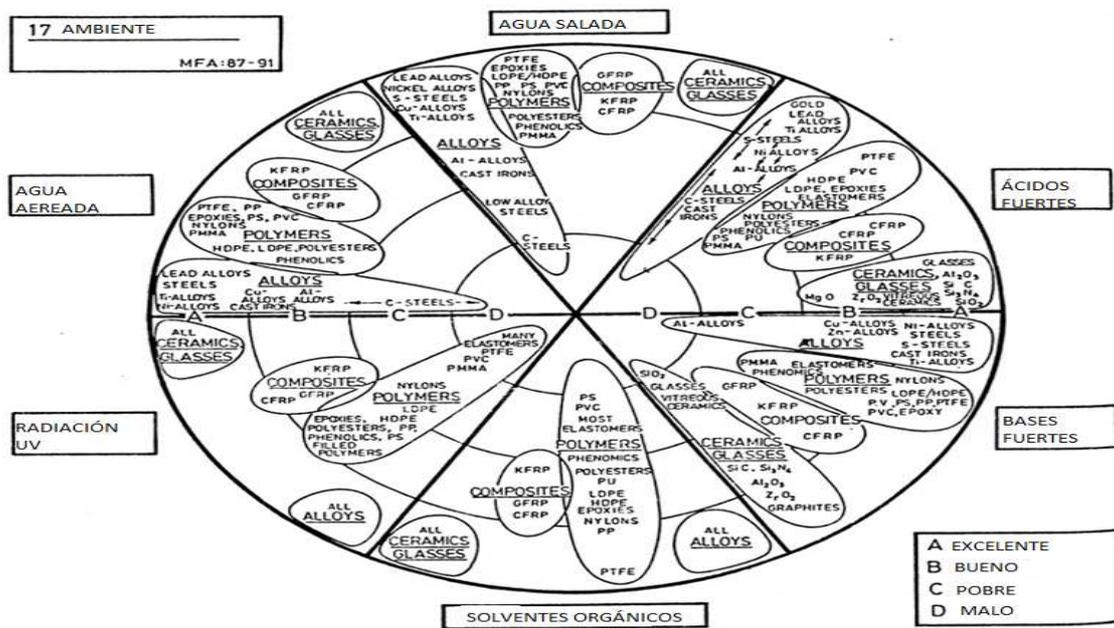
Una vez que el inhibidor ha sido aceptado en las pruebas de comportamiento a nivel de laboratorio, se procede a realizar la caracterización correspondiente que consiste en determinar los valores de parámetros o propiedades físico químicas, los cuales servirán como la base para establecer los parámetros y

valores de control de calidad que deberán cumplir los inhibidores de corrosión para cada programa que se establezca de inyección de los mismos.

1.2 CORROSIÓN

1.2.1 TEORÍA DE LA CORROSIÓN⁴

La corrosión es un fenómeno presente en todos los materiales, con la diferencia en la velocidad con la que esta se manifiesta, los materiales que interesan para el estudio de la corrosión son los metales debido a sus características y propiedades. En otros materiales, como los poliméricos, compuestos cerámicos, la corrosión también está presente, pero manifestada en otros medios. En la figura 1.1, se aprecia los medios y los materiales en los cuales se puede presentar problemas de corrosión.



⁴ The Corrosion Society, Standard Recommended Practice The Application of Internal Plastic Coatings for Oilfield Tubular Goods and Accessories RP0191-2002, 2002, NACE, Houston, pp: 4,5

Figura N°1.1 Materiales y los medios den los cuales se produce corrosión. [Fuente: Ashby, Michael, Materiales para Ingeniería I : Introducción a las Propiedades Aplicaciones y al Diseño, 2008, Reverte S.A., Barcelona]

El fenómeno de la corrosión puede definirse (en el caso de los metales) como el proceso en el cual un material retorna a su condición de material original (mineral).

1.2.2 TIPOS DE CORROSIÓN⁵

Existen diferentes tipos o mecanismos de corrosión por medio de los cuales provocan que el material sea corroído. A continuación se comentará sobre los principales tipos y mecanismos de corrosión existentes.

Corrosión Galvánica.- Este tipo de corrosión es producida si se cuenta con la presencia de los siguientes elementos:

Cátodo.- Es el material electropositivo en el circuito.

Ánodo.- Es el elemento electronegativo del circuito, se lo puede reconocer en la corrosión galvánica por la pérdida de material que sufre.

Electrolito.- Es el elemento ionizante, que permite el movimiento de cargas eléctricas.

Cierre del circuito.- Es el elemento por medio del cual se cierra el camino para el movimiento o el flujo de electrones.

⁵ Fontana, Mars, Corrosion Engineering, 2008, Mc Graw Hill, Singapur, pp: 39 – 151

Además de tener los elementos necesarios para obtener la corrosión galvánica que se han citado en el párrafo anterior, se debe tener presente también el tipo de metales que se pueden poner en contacto con el menor riesgo de que generen corrientes galvánicas y sufran de una corrosión galvánica agresiva, para este fin se emplea el concepto de la serie galvánica de los materiales.

Corrosión Generalizada.- Este tipo de corrosión tiene como principal característica la homogeneidad de corrosión existente en toda la superficie del elemento metálico, debido a que el material metálico está expuesto en su totalidad al medio ambiente corrosivo.

Los defectos presentes en la superficie del material metálico corroído, permiten que la velocidad de corrosión se incremente. Mientras mayor sea la cantidad de defectos en la superficie metálica, mayor será la velocidad de corrosión.

Corrosión por Picadura.- Este tipo de corrosión es identificada por las siguientes características:

- Es de difícil detección.
- Tiene pequeña área de interacción,
- Las picaduras son muy profundas y con formas semiesféricas.
- Esta reacción de corrosión es auto-catalítica,
- Las picaduras son equidistantes y las cuales producen pérdidas considerables en el metal.

Debido a que la reacción de corrosión es auto-catalítica, el proceso corrosivo es continuo e irreversible. Además los orificios que se generan por esta

corrosión están a la misma distancia (equidistantes), se observa una superficie porosa en la superficie metálica.

Corrosión Solapada o Hendidura.-Este tipo de corrosión presenta las siguientes características:

- Es de difícil detección, ya que no se evidencia fácilmente en la superficie.
- Tiene áreas pequeñas como consecuencia de este tipo de corrosión.
- Este tipo de reacción de corrosión es auto-catalítica.
- Produce grandes pérdidas de material.
- La velocidad de corrosión por picadura es mayor en comparación con la velocidad de corrosión por picadura.

Este tipo de corrosión se presenta en sitios cubiertos o de difícil accesibilidad, por ejemplo en bridas de tuberías o bajo el sistema de protección de recubrimientos de la superficie metálica.

Corrosión Intergranular.- Este tipo de corrosión puede ser identificado por las siguientes características:

- Se requiere de altas temperaturas que permitan el crecimiento de grano y la difusión de los elementos, es decir la difusión de los átomos se hacia los límites de grano, formando de esta manera fases intermetálicas.
- Independiente de la formación del par galvánico, es decir puede o no existir un par galvánico,
- Este tipo de corrosión se presenta con mayor facilidad en objetos compuestos de acero inoxidable.

Corrosión Bajo Tensión.- Este proceso de corrosión se presenta en elementos sometidos a esfuerzos mecánicos de tensión. Las características de este tipo de corrosión son las siguientes:

- Este tipo de corrosión es un proceso transgranular.
- Puede presentarse perpendicularmente a las cargas aplicadas, muchas veces después de deformaciones plásticas (movimiento de dislocaciones).
- Este tipo de corrosión se presenta en todos los materiales de ingeniería.
- Se verifica este tipo de corrosión vía la observación microscópica.
- La corrosión bajo tensión puede evitarse con la aplicación de recocidos de alivio de esfuerzos.

1.3 PROPIEDADES DE LOS REVESTIMIENTOS

1.3.1 ADHERENCIA⁶

La adhesión a la superficie metálica es la propiedad más importante que posee un revestimiento ya que sin existir una buena adhesión no podrán existir adecuadamente las otras propiedades de los revestimientos, y más aún cuando estos revestimientos actúan como barreras físicas, a diferencia de los revestimientos

⁶ "Revestimientos Poliméricos", www.intercover.com/PDFs/ct_RevPolimericos.Pdf, 27 / 04 / 2011.

que actúan como inhibidores de corrosión como ánodos de sacrificio. La fuerza de adhesión de un revestimiento a una superficie metálica depende de tres factores:

- El tipo de unión entre átomos de las cadenas poliméricas y átomos de la superficie metálica.
- El mojado del polímero al metal, que acerca átomos de las cadenas poliméricas a los átomos del metal para formar la unión de átomos con la mayor densidad posible.
- La textura de la superficie metálica que da el perfil de anclaje que aumenta la superficie real y produce áreas de anclaje mediante cavernas cóncavas.

Unión Polímero Metal.- Esta fuerza está determinada por el tipo de unión que se forma entre los átomos de las cadenas poliméricas y los átomos de la superficie metálica. Las uniones que se pueden encontrar entre estos átomos son los siguientes:

- Uniones química, las cuales son las más fuertes, pero necesitan de grupos funcionales tanto en las moléculas poliméricas como en la superficie metálica. Raramente estas uniones son empleadas en revestimientos.
- Uniones polares, las cuales son las más frecuentes y son las que unen el revestimiento a la superficie metálica.
- Uniones polares inducidas o de Van Der Waals, las cuales son las más débiles. Estas uniones se encuentran entre las cadenas moleculares de los termoplásticos.

Mojado.- Para lograr la máxima capacidad de adhesión del polímero y la superficie metálica, es necesario que el revestimiento polimérico en el estado que se aplica moje bien la superficie a revestir. Para esto la tensión superficial de la sustancia polimérica relativa a la superficie metálica a revestir, desempeña un papel importante en el momento de la aplicación. Para que exista el mojado completo, es necesario que la tensión de la superficial de la interfase revestimiento/metal σ_{ab} , más de la interfase polímero/aire σ_{bc} , sea menor a la de la interfase metálica/aire. En la figura 1.11, el equilibrio se establece entre las fuerzas de la tensión superficial de cada interfase sobre la gota líquida sobre la superficie metálica, expresada matemáticamente:

$$\sigma_{ac} = \sigma_{ab} + \sigma_{bc} \cdot \cos(\theta) \quad [1.2]$$

Anclaje.- Se refiere a la textura de la superficie, en este caso metálica a revestir. Esta textura genera una superficie real mucho mayor a la aparente. La preparación de la superficie que se realiza por granallado o arenado produce el perfil de anclaje con picos y valles, y se ha determinado que este debe ser mayor a 35 μm medido entre esos picos y valles. La medición puede realizarse mediante un rugosímetro o por una cinta plástica que copia la textura y permite medir sobre esta, con un micrómetro, la altura entre picos y valles.

1.3.2 RESISTENCIA A LA ABRASIÓN⁷

La abrasión se define como la pérdida de material producida por la fricción contra otra superficie. El proceso de abrasión implica una compleja combinación de otros fenómenos como desgarramiento, tracción, fatiga, envejecimiento

⁷ Friedenthal, Esteban, 2000, Tecnología Básica del Caucho, CITIC – INTI: Buenos Aires, pp: 32,33

cada uno con respuestas distintas frente a la variación de las condiciones que se establezcan. La abrasión es un complejo fenómeno vinculado a una serie de procesos combinados (mecánicos, térmicos, químicos) influyendo además de la formulación, el diseño y los métodos de fabricación empleados para elaborar el producto. La abrasión comienza con un desgarramiento tangencial del material que desprende finalmente la partícula. El contacto entre el compuesto y la superficie o medio abrasivo es específico, se produce en determinados puntos cuyo tamaño y número depende de la rugosidad de la superficie en cuestión.

El proceso de abrasión tiene lugar en el área de contacto entre el medio abrasivo y la superficie, y su magnitud depende de la severidad de los factores que directa o indirectamente la producen como son la velocidad, carga, temperatura y rugosidad de la superficie. Las propiedades del recubrimiento tienen gran influencia sobre el proceso de desgaste, en especial con la dureza, pero con distinto efecto según sea la rugosidad de la superficie.

1.3.3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

La flexibilidad es la capacidad o habilidad que posee un material en ser doblado o flexionado sin que ocurra ruptura o que sea sometido a falla. Los revestimientos deben poseer una determinada flexibilidad para resistir ruptura cuando están sometidos a esfuerzos producidos por encogimiento o hinchado, conformado, abuso mecánico y desgaste. La flexibilidad de un recubrimiento aplicado a un sustrato metálico no solo depende de su distensibilidad, depende también de su espesor y de la adhesión con el sustrato metálico.

Las capas de recubrimiento tienden a perder flexibilidad durante su uso debido a la volatilización de componentes plastificantes libres, a los cambios químicos como la degradación y a la reacción de entrecruzamiento.

Los recubrimientos que son formados a partir de polímeros, son de naturaleza viscoelástica, debido a este comportamiento, los recubrimientos poseen una recuperación elástica que permite deformarse al ser sometido a un esfuerzo. En general el comportamiento viscoelástico y las propiedades mecánicas son afectados cuando el recubrimiento entra a la zona de transición vítrea. La flexibilidad no es una característica constante de un recubrimiento específico, y los factores externos que afectan a la flexibilidad son:

Humedad.- El agua es un buen plastificante para la mayoría de recubrimientos a base de pintura. Un cambio en la humedad relativa del 2% puede ser detectado por medidas en la flexibilidad. Pinturas a base de látex absorben muy fácil la humedad, mientras que otras pinturas alcanzan un equilibrio con la humedad atmosférica en forma lenta. Por esto, las especificaciones a ser evaluadas deben realizarse en atmósferas controladas en humedad.

Temperatura.- La flexibilidad de los recubrimientos es dependiente de la temperatura y más si los recubrimientos son termoplásticos, y en cierta medida para los recubrimientos termoestables. En general si los recubrimientos se encuentran a una temperatura menor a la temperatura de transición vítrea (T_g) poseen un comportamiento duro y frágil, con poca flexibilidad y baja resistencia al impacto. En cambio si los recubrimientos se hallan a una temperatura ligeramente mayor a la temperatura de transición vítrea (T_g) poseen un comportamiento flexible y tienden a desarrollar un comportamiento viscoso en vez de un comportamiento elástico.

Velocidad de Deformación.- Se define como velocidad de deformación a la velocidad en la cual el espécimen es deformado. Se lo expresa en %/min, in/in/min o cm/cm/min. Poseen una gran influencia en la flexibilidad de los recubrimientos, si aumenta la velocidad de deformación, la flexibilidad del recubrimiento disminuye.

Pueden existir velocidades de deformación críticas donde la flexibilidad tiene importantes efectos los cuales son similares a los efectos producidos cuando el material se encuentra a temperatura de transición vítrea (T_g). La velocidad de deformación debe ser un parámetro controlado, ya que ensayos realizados a velocidades de deformación bajas producirán diferentes valores de flexibilidad en comparación a los ensayos realizados a altas velocidades de deformación.

1.3.4 DUREZA SUPERFICIAL⁸

La dureza es la resistencia de un material a la deformación localizada. El término puede aplicarse a la deformación provocada por indentación, por corte, por doblado o por rascado. En metales, cerámicas y en la mayoría de polímeros, la deformación considerada es plástica de la superficie. Para elastómeros y algunos polímeros, la dureza es definida como la resistencia a la deformación elástica de la superficie.

La dureza superficial es una variante del concepto de la dureza, la cual se define como la resistencia de la superficie de un revestimiento continuo a la penetración, por ejemplo el analizar la superficie de un acero que ha sido tratado por carburización para medir su dureza. Dependiendo de la aplicación se prefiere el uso de materiales duros cuando estos deben resistir el roce con otros elementos.

El ensayo que se emplea para determinar la dureza superficial es el ensayo de dureza Rockwell de dureza superficial, que es semejante a el ensayo de dureza Rockwell regular excepto en que la indentación es menos profunda. Este ensayo es empleado para ensayar materiales delgados, superficies ligeramente carburizadas o partes que han sido dobladas o aplastadas en ensayos regulares.

⁸ "Rockwell Superficial Hardness Test", www.china-total.com/Product/meter/leeb-hardness-tester/What-is-Hardness.htm, 25 / 06 / 2011

1.3.5 ESPESORES⁹

El espesor de un recubrimiento es quizás el factor más importante que se debe controlar dentro de un revestimiento, ya que el revestimiento es la barrera física que se aplica sobre una superficie (generalmente metálica) con el fin de protegerla de los procesos de desgaste o corrosión que la misma pueda sufrir por contacto con el ambiente (superficies metálicas en contacto con el aire) o por el contacto con fluidos corrosivos (superficies metálicas de tuberías que transportan petróleo, hidrocarburos, etc.). Si se tiene un mayor valor de espesor de recubrimiento, se asegura un mayor tiempo de operación de las superficies metálicas recubiertas. A medida que transcurre el tiempo, el espesor de revestimiento disminuirá a una tasa determinada. Dicha tasa de disminución de espesor depende de muchos factores, pero entre los principales se pueden citar a:

- El tipo y la naturaleza del recubrimiento empleado en la superficie metálica a cubrir.
- La naturaleza físico química del fluido que estará en contacto con el revestimiento.
- Parámetros de operación como presión, temperatura, humedad relativa, pH, etc.
- La adherencia (unión polímero metal, mojado y anclaje) del revestimiento con la superficie metálica.

⁹ Koleske, Joseph, 1995, Paint and Coating Testing Manual, ASTM: Philadelphia, pp: 547,548,731,732.

Al hablar del tamaño del espesor de recubrimiento, se hablan de dos tipos de tamaños de espesores:

- Tamaño de espesor húmedo.
- Tamaño de espesor seco.

Cuando se refiere al tamaño de espesor húmedo, este se refiere al tamaño que posee el recubrimiento en estado líquido cuando se aplica sobre la superficie metálica a recubrir, mientras que el tamaño de espesor seco se refiere al tamaño que posee el recubrimiento una vez que ha sido aplicado y secado en la superficie metálica (a un determinado tiempo y temperatura de secado).

El tamaño del espesor húmedo es más grande que el tamaño de espesor seco de recubrimiento, ya que en la etapa de secado se volatilizan muchos componentes de los revestimientos y por este efecto se produce la disminución del tamaño de espesor.

Los valores recomendados de espesores de recubrimientos internos para diferentes dispositivos en diferentes operaciones están regidos por normas internacionales. Para citar un ejemplo, la norma internacional NACE RP0191-2002, Standard Recommended Practice: "The Application of Internal Plastic Coatings for Oilfield Tubular Goods and Accessories", sugiere que para acoples y las terminaciones roscadas en base a normas API así como objetos de acoples tubulares y accesorios, deben ser recubiertos con un espesor mínimo seco de film de 51 μm (2 mils) en la porción de roscado, pero si todos los acoples y las demás dispositivos están expuestos a fluidos, estos deberán ser recubiertos con un espesor seco de film entre 76 a 127 μm (3 a 5 mils), mientras que el interior de las tuberías de perforación y las conexiones de las mismas que están en contacto o expuestas con crudo deben tener un espesor seco de film no menor a 127 μm (5 mils).

CAPITULO 2

DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explica el procedimiento experimental que se ha realizado en estudio de la influencia de un recubrimiento epóxico poliamida en la velocidad de corrosión en tubería de transporte de crudo API 5L X70, indicando los materiales que se han empleado, los procedimientos previos a la realización de los ensayos, las técnicas de ensayo y las condiciones de las mismas, los procesos de evaluación de las probetas ensayadas.

Antes de la realización de cualquier ensayo, se realiza la caracterización de la microestructura y la composición química del acero que será empleado como el material a ser recubierto por la resina. Así también se realiza el análisis físico químico del agua que se empleará dentro de la solución salina corrosiva.

Para la placa de acero que será cortada en probetas y recubiertas de resina, se procede a limpiarla por dos vías, la primera por limpieza química con el objetivo de eliminar cualquier residuo orgánico existente dentro del material y finalmente se realiza la limpieza mecánica por medio de la cual se elimina cualquier imperfección existente en la superficie metálica y dejándola de esta manera lista para el proceso de aplicación de la resina epóxica.

Dentro de los métodos que se emplearon para el análisis de determinación de la velocidad de corrosión, se ha empleado dos métodos, el primero por medio de una cámara salina en la cual las probetas estarán expuestas a un ambiente salino y el segundo por medio de una cámara de inmersión en la cual las probetas están sumergidas parcialmente dentro del medio salino corrosivo.

A condiciones de operación, temperatura y tiempo de exposición, se deja a las probetas tanto en la cámara salina como en la cámara de inmersión, mientras transcurre el tiempo de experimentación se realizan a las probetas ensayos de evaluación para observar la influencia del medio corrosivo sobre estas.

Para los procesos de evaluación a las probetas ensayadas, se realiza inspección visual (vía macroscopía) y gravimétrica (pérdida de masa) para determinar cuál ha sido el cambio que han sufrido las mencionadas probetas por el proceso de corrosión existente.

Se debe mencionar que los ensayos realizados en este estudio están apegadas conforme a lo estipulado en las siguientes normas: ASTM B 117 – 03 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, ASTM D 1193 -99 Standard Specification for Reagent Water, ASTM G 31 – 72 Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, NACE Standard RP0191-2002 Standard Recommended Practice: The Application of Internal Plastic Coatings for Oilfield Tubular Goods and Accessories, SSPC-SP 1 Surface Preparation Specification N°1 (Solvent Cleaning), SSPC-SP COM Surface Preparation Specifications, SSPC-SP 5 / NACE N°1 Joint Surface Preparation Standard (White Metal Blast Cleaning), SSPC-SP COM Surface Preparation Specifications (Surface Preparation Commentary for Steel and Concrete Substrates).

2.2 PROCESO BÁSICO DE INVESTIGACIÓN

La corrosión que sufre la tubería es la responsable que se produzcan grandes derrames de crudo que no solo afectan a la parte económica de las industrias petroleras, sino también al medio ambiente, trayendo consigo graves problemas de contaminación, toxicidad y destrucción del medio ambiente.

Aunque el uso de los recubrimientos (en especial los internos) en nuestro país no son muy empleados ya que las empresas dedicadas a las actividades petroleras prefieren esperar a que las tuberías corroídas colapsen para reemplazarlas en vez de emplear un sistema de recubrimientos logrando aumentar la vida útil de la tubería y retardar el proceso corrosivo.

Las posibles fallas más importantes y las que ocurren con mayor frecuencia en las operaciones de la industria del petróleo son las generadas por la corrosión, mientras que las producidas por otros factores son de menor importancia tal como se muestran en tabla 2.1

Tabla Nº 2.1 Fallas en la Industria Petrolera.

FALLAS EN LA INDUSTRIA PETROLERA	
TIPOS DE FALLA	%
Corrosión	33
Fatiga	18
Daño Mecánico	14
Fractura Frágil	9
Defecto de Fabricación	9
Defecto de Soldadura	7
Otros	10

Fuente: Wulpi, Donald, Understanding How Components Fall, ASM, 1991, USA.

Y dentro de la falla provocada por corrosión, existen diferentes mecanismos que la provocan, los cuales se presentan en la tabla 2.2.

Tabla N° 2.2 Mecanismos de corrosión que provocan fallas de dispositivos en la industria petrolera.

CORROSIÓN EN LA INDUSTRIA PETROLERA	
MECANISMOS DE CORROSION	%
Por dióxido de carbono (CO ₂)	28
Por ácido sulfhídrico (H ₂ S)	18
En soldadura	18
Por picadura (pitting)	12
Erosión	9
Galvánica	6
Hendidura (Crevice)	3
Impacto	3
Tensión (Stress)	3

Fuente: Fontana, Mars, Corrosion Engineering, Mc Graw Hill, 2008, Singapur

Es inevitable la presencia de la corrosión en la industria petrolera, pero la velocidad de corrosión puede ser disminuida o retardada, evitando de esta manera la existencia de una corrosión agresiva en el interior de los principales dispositivos empleados en el transporte de crudo

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, se propone estudiar y analizar el efecto de la corrosión de una sección de tubería API 5L X70 con un sistema de protección contra la corrosión a fin de controlar la velocidad de corrosión en tuberías con altos contenidos de agua de producción por medio de sistemas poliméricos (epóxico poliamida) junto a inhibidores de corrosión (sales inorgánicas). El efecto de corrosivo será analizado cuando se transporta el crudo a través de tuberías sobre la superficie antes de entrar a los sistemas de separación trifásica, ya que la corrosividad del crudo en esta zona es la más crítica, dando así los mayores problemas de falla en las tuberías de transporte de crudo.

2.2.1 REPETIBILIDAD DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

Para la repetibilidad de los resultados en el estudio de la influencia de un recubrimiento epóxico poliamida en la velocidad de corrosión en tubería de transporte de crudo API 5L X70, debe tenerse en cuenta las siguientes consideraciones. Un factor fundamental el cual afectará directamente en los resultados que se obtengan es la limpieza que se dé a la superficie metálica a recubrir, ya que si no existe una buena limpieza de la misma, puede generar una pobre adhesión de la resina en el sustrato metálico lo cual afectaría a la velocidad de corrosión del material base. Para este estudio se emplea una limpieza química por medio del lavado de una solución de fosfato de sodio con detergente a la superficie metálica para posteriormente aplicar limpieza mecánica vía sandblasting de grado metal blanco (SSPC SP5) con un perfil de rugosidad de 25 a 37 μm .

El tipo de resina empleada ofrece una elevada o mínima resistencia a la velocidad de corrosión que es aplicada en la superficie de un sustrato metálico. Existen diferentes tipos de revestimientos que se ofrecen en el mercado que tienen diferentes comportamientos ante la corrosión. Para este estudio se emplea una resina de naturaleza epóxica con poliamidas.

El procedimiento de aplicación de la resina, ya que existen dos maneras de aplicarlas, una vía rodillo o brocha y otra vía pistola sin aire convencional (airless). Sea el método empleado, se debe asegurar en lo posible la homogeneidad en toda la superficie del tamaño de espesor aplicado, ya que al existir una heterogeneidad en el espesor de recubrimiento la velocidad de corrosión sobre esta será diferente comparado con una superficie homogénea en espesor.

La extracción de las probetas para el ensayo tanto en la cámara salina como en la cámara de inmersión debe ser realizada de tal modo que no afecte la microestructura de las mismas ya que al modificarlas pueden generar diferentes

respuestas ante un medio corrosivo. Para esto se efectuó la extracción de las probetas por medio de una cortadora universal de disco ($\varnothing=14$ inch) enfriando al elemento con agua a temperatura ambiente (20°C).

Los inhibidores de corrosión son empleados también para disminuir la velocidad de corrosión sobre sustratos metálicos, la velocidad de corrosión sobre sustratos metálicos dependerá del tipo de inhibidor empleado. Se utiliza para este estudio soluciones de inhibidores de naturaleza inorgánica al 5% en masa de sulfato de cinc, dicromato de potasio y una combinación de las dos sales.

Dentro de la cámara de inmersión se emplea una solución salina agresiva, sin la presencia de otros agentes químicos corrosivos como son ácidos y gases. En este estudio la solución agresiva corresponde a una solución salina al 15% de masa de cloruro de sodio a temperatura ambiente (20°C) y asegurando que la solución corrosiva esté libre de agentes contaminantes, ya que la presencia de cualquier agente contaminante dentro de la solución salina puede generar diferentes resultados en la velocidad de corrosión. También se menciona que las probetas empleadas en este ensayo deben estar colocadas de tal manera que la solución salina las cubra parcialmente.

De la misma manera en la cámara salina se emplea una solución salina al 15% de masa de cloruro de sodio sin la presencia de otros agentes corrosivos, y libre de agentes contaminantes, pero esta solución es atomizada y rociada sobre las probetas por 5 minutos en cada hora de operación, de esta manera trabaja 8 horas al día en un lapso de 90 días, a una temperatura de cámara de 28°C . Si el período de rociado de la solución salina es diferente y si se opera a diferentes temperaturas de cámara, la velocidad de corrosión será diferente a las presentadas en este estudio.

Los párrafos anteriores detallan los parámetros que afectan directa o indirectamente en la repetibilidad de los resultados de este estudio los cuales

deberán ser considerados en estudios futuros al considerar como tópico la influencia de la corrosión en superficies metálicas.

2.3 CÁMARA DE NIEBLA SALINA

Antes de mencionar a la cámara de niebla salina, se comentará de los procesos o pasos previos para la obtención de probetas del acero en estudio que se colocarán en este dispositivo y en la cámara inmersión.

2.3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES

El sustrato metálico que se emplea para este estudio corresponde a una sección de tubería API 5L X 70 empleada para el transporte de crudo perteneciente a la empresa Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), por medio de la cual se obtuvieron láminas para la posterior obtención de las probetas de ensayos.

Para recubrir las probetas metálicas pertenecientes a la sección de tubería se emplea la pintura a base de resina epóxica de poliamidas MARINE AND INDUSTRIAL COATINGS, UNIMASTIC 4020 junto al catalizador DC-001, que es un producto comercial de la compañía Pinturas Unidas S.A. En la tabla 2.3 se presentan las propiedades físicas de la mencionada pintura.

Tabla N° 2.3 Propiedades físicas de la pintura UNIMASTIC 4020.

Color	Blanco
Acabado	Brillante o Mate
Sólidos por Volumen	80 % \pm 2%
Número de Componentes	Dos
Proporción de la Mezcla	4 partes por volumen de la Pintura 1 partes por volumen del Catalizador

Tiempo de Vida Útil de la Mezcla	6 Horas a 25°C o 4 Horas a 30°C
Punto de Inflamación	Mayor a 21°C
Espesor Recomendado	Húmedo: 123 µm (5mils) Seco: 100 µm (4mils)
Rendimiento Teórico	8,1 m ² / litro a 100 µm (4 mils)

Para la preparación de las soluciones inhibidoras, se emplean las siguientes sales inorgánicas: sulfato de cinc ($ZnSO_4$), dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y una combinación de las dos últimas.

2.3.2 OBTENCIÓN DE LAS PLACAS DE ACERO

Para la obtención de las placas se procedió a cortar la sección de la tubería por medio del equipo de oxi corte perteneciente al Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, el cual emplea el acetileno como combustible y el oxígeno como comburente dando como resultado una flama que es capaz de cortar elementos metálicos de gran espesor.

2.3.3 LIMPIEZA DE LAS PLACAS METÁLICAS

Limpieza Química.- Esta etapa se fundamenta en la norma SSPC-SP COM: The Society for Protective Coatings, SURFACE PREPARATION SPECIFICATIONS.

Limpieza Mecánica.- Una vez que las placas han sido limpiadas vía química, se procede a realizar la limpieza mecánica con el fin de eliminar imperfecciones, protuberancias existentes en la superficie interna de las placas. Para esto se procede realizar la limpieza mecánica vía sand blasting (chorro por arena) en base a la norma SSPC-SP 5/NACE N°1 The Society for Protective Coatings, JOINT SURFACE PREPARATION STANDARD White Metal Blast Cleaning dentro de las instalaciones de la empresa ACINDEC.

2.3.4 RECUBRIMIENTO DE LAS PLACAS DE ACERO

Una vez terminada la etapa de limpieza de las placas de acero, se inicia con la etapa de recubrimiento de las mencionadas placas. Para el efecto, se realizan los siguientes pasos:

- Se mezcla 4 litros de la pintura UNIMASTIC 4020 junto con 1 litro del catalizador DC – 001 y con 1 litro de disolvente de pintura.
- A la mezcla resultante se la agita hasta que esta sea homogénea y no exista sólidos suspendidos dentro de la misma.
- Luego se aplica la mezcla resultante a la superficie metálica a recubrir por medio de pistola sin aire (airless) convencional.
- Se aplica el recubrimiento hasta el espesor deseado.
- Después se determina si el espesor del recubrimiento ha alcanzado el valor requerido.
- Una vez que se ha alcanzado el valor requerido finaliza el proceso de recubrimiento, casi contrario se sigue aplicando el recubrimiento hasta que el espesor del mismo alcance el valor requerido.

Los valores de espesores húmedos de recubrimiento para este estudio son los que se presentan en la tabla 2.4.

Tabla N° 2.4 Espesores húmedos de recubrimiento aplicado a las placas de acero.

PLACA	ESPESOR (mils / μm)
1A	5 / 127
1B	5 / 127
2	6 / 152
3	7 / 178

Una vez aplicado el revestimiento en las superficies de las placas con la medida de espesor adecuada, se procede a realizar los siguientes pasos:

- Colocar las placas con el recubrimiento dentro de una cámara de secado a una temperatura de 40°C por el lapso de tres horas.
- Posteriormente se retira las placas de la cámara de secado y se las deja a las mencionadas placas que sigan secándose a temperatura ambiente (20°C) por el lapso de una semana, sin que exista la posibilidad de contaminación del recubrimiento por parte de agentes contaminantes.

Los valores de espesores secos de recubrimiento para este estudio son los que se presentan en la tabla 2.5.

Tabla N° 2.5 Espesores secos de recubrimiento aplicado a las placas de acero.

PLACA	ESPESOR (mils / μm)
1A	3 / 76
1B	3 / 76
2	4 / 102
3	5 / 127

2.3.5 EXTRACCIÓN DE LAS PROBETAS A PARTIR DE LAS PLACAS DE ACERO CON LA PINTURA DE RECUBRIMIENTO

Para esto se deberán cortar probetas cuadrangulares de tamaños basándose en la norma ASTM B 117-03 Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, es decir las mencionadas probetas tendrán tamaños aproximados a 100,00 mm x 100,00 mm. En la tabla 2.6 se presenta el número de probetas extraídas de las mencionadas placas.

Tabla N° 2.6 Número de probetas extraídas a partir de las placas de acero con recubrimiento.

PLACA	NÚMERO DE PROBETAS
1A y 1B	8
2	8
3	8
TOTAL	24

2.3.6 PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES DE INHIBIDORAS DE CORROSIÓN

En la tabla 2.7 se presentan las sales inorgánicas y la concentración que son empleadas en las probetas.

Tabla N° 2.7 Componentes y concentraciones empleados como inhibidores de corrosión.

SAL INORGÁNICA	CONCENTRACIÓN (% masa)
Sulfato de Zinc (Zn SO ₄)	5.00
Dicromato de Potasio (K ₂ Cr ₂ O ₇)	5.00
Sulfato de Zinc + Dicromato de Potasio (Zn SO ₄) + (K ₂ Cr ₂ O ₇)	2.50 % (Zn SO ₄) 2.50 % (K ₂ Cr ₂ O ₇)

Como estas sales inorgánicas no son compatibles con el recubrimiento orgánico, se procede a retirar la tercera parte del mencionado recubrimiento de las probetas, con el objetivo de que el sustrato metálico adsorba la solución de inhibidores y observar el comportamiento de la corrosión en la interfase del recubrimiento, el sustrato metálico y el inhibidor.

2.3.7 CODIFICACIÓN DE LAS PROBETAS PARA LOS ENSAYOS

Una vez que las probetas ya han sido aplicadas las soluciones de las sales inorgánicas (inhibidores de corrosión), se procede a codificarlas. En las tablas

2.8 y 2.9 se presenta la codificación, dimensiones y masas de las probetas que serán colocadas dentro de la cámara salina e inmersión.

Tabla N° 2.8 Datos y codificación de las probetas que se colocan dentro de la cámara salina.

CÓDIGO	TIPO INHIBIDOR	MASA (g)	ESPESOR RECUBRIMIENTO (mils)	SUPERFICIE TOTAL (mm x mm)	SUPERFICIE RECUBRIMIENTO (mm x mm)
SR1	xxx	997,991	Xxx	96,20 x 96,30	Xxx
3.1	xxx	902,486	3	94,20 x 92,90	94,20 x 92,90
3.3	ZnSO ₄	880,705	3	94,40 x 96,90	94,40 x 64,60
3.5	K ₂ Cr ₂ O ₇	867,186	3	91,30 x 95,85	91,30 x 63,90
3.7	ZnSO ₄ + K ₂ Cr ₂ O ₇	880,204	3	97,00 x 95,25	97,00 x 63,50
4.1	xxx	904,791	4	99,80 x 98,10	99,80 x 98,10
4.3	ZnSO ₄	954,521	4	100,00 x 102,75	100,00 x 68,50
4.5	K ₂ Cr ₂ O ₇	903,893	4	96,90 x 102,15	96,90 x 68,10
4.7	ZnSO ₄ + K ₂ Cr ₂ O ₇	924,957	4	102,50 x 103,05	102,50 x 68,70
5.1	ZnSO ₄ + K ₂ Cr ₂ O ₇	926,684	5	96,30 x 102,9	96,30 x 68,60
5.3	ZnSO ₄	994,500	5	102,00 x 100,65	102,00 x 67,10
5.5	K ₂ Cr ₂ O ₇	925,765	5	101,00 x 97,65	101,00 x 65,10
5.7	xxx	886,990	5	99,80 x 98,00	99,80 x 98,00

Tabla N° 2.9 Datos y codificación de las probetas que se colocan dentro de la cámara de inmersión.

CÓDIGO	TIPO INHIBIDOR	MASA (g)	ESPESOR RECUBRIMIENTO (mils)	SUPERFICIE TOTAL (mm x mm)	SUPERFICIE RECUBRIMIENTO (mm x mm)
SR2	xxx	995,952	Xxx	94,70 x 94,15	Xxx
3.2	xxx	798,090	3	91,60 x 94,90	91,60 x 94,90
3.4	ZnSO ₄	865,086	3	91,20 x 95,70	91,20 x 63,80
3.6	K ₂ Cr ₂ O ₇	869,669	3	91,70 x 92,10	91,70 x 61,40
3.8	ZnSO ₄ + K ₂ Cr ₂ O ₇	873,074	3	91,90 x 96,90	91,90 x 64,60
4.2	xxx	938,745	4	96,40 x 94,30	96,40 x 94,30

4.4	ZnSO ₄	908,391	4	94,30 x 91,70	94,30 x 61,10
4.6	K ₂ Cr ₂ O ₇	943,535	4	98,80 x 94,70	98,80 x 63,10
4.8	ZnSO ₄ + K ₂ Cr ₂ O ₇	876,092	4	96,10 x 96,60	96,10 x 64,40
5.2	ZnSO ₄ + K ₂ Cr ₂ O ₇	849,815	5	96,15 x 93,30	96,15 x 62,20
5.4	ZnSO ₄	861,740	5	101,00 x 99,00	101,00 x 66,00
5.6	K ₂ Cr ₂ O ₇	864,158	5	88,40 x 86,70	88,40 x 57,80
5.8	xxx	794,481	5	99,00 x 94,15	99,00 x 94,15

2.3.8 CÁMARA DE NIEBLA SALINA

Para este ensayo, se construye una cámara de niebla salina en base a los criterios y parámetros de construcción y operación de la norma ASTM B117 -03 "Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus".

Solución que se Atomiza dentro de la Cámara de Niebla Salina.- En base a la norma ASTM B 117 – 03, la solución que debe atomizarse dentro de la cámara es una solución salina cuya concentración dependerá al tipo de ambiente que estará expuesto el material a ensayar. Para el presente estudio se empleará una solución salina al 15,0% en masa de cloruro de sodio debido a que el contenido de total de cloruros en el crudo al momento de ser extraído de los pozos es del 16,5%.

Colocación de las Probetas dentro de la Cámara de Niebla Salina.- Una vez que están preparadas las probetas para ser ensayadas como también la solución salina, se procede a colocar las mencionadas probetas de la tabla 2.9 dentro de los cables de la cámara de niebla salina de tal modo que las probetas estén distribuidas a lo largo de la mencionada cámara con el fin de que todas las probetas a ser ensayadas reciban el rociado de la solución salina.

Parámetros de Operación de la Cámara de Niebla Salina.- En la tabla 2.10 se presenta los parámetros de operación de la cámara de niebla salina.

Tabla N° 2.10 Parámetros de Operación de la Cámara de Niebla Salina.

PARÁMETRO DE OPERACIÓN	VALOR
Temperatura dentro de la cámara (°C)	28 ± 1
Caudal de rociado (ml / min)	20
Tiempo de rociado (minutos/hora)	5
Concentración de cloruro de sodio en solución (% masa)	15
pH de la solución de cloruro de sodio	7 ± 1

2.3.9 CÁMARA DE INMERSIÓN

Conjuntamente con el ensayo de la cámara de niebla salina, se procede a realizar el ensayo de la cámara de inmersión, con el objetivo de determinar el efecto de sumergir dentro de un fluido a las probetas que servirán para el análisis. Para este ensayo, se dispone de una cámara de inmersión tomando en cuenta algunos criterios y parámetros de operación de la norma ASTM G 31 - 72 "Standard Practice for Laboratory Inmrsion Corrosion Testing of Metals".

Solución que se emplea dentro de la Cámara de Inmersión.- Este análisis es empleado para observar el comportamiento corrosivo que presenta el material a ser evaluado al ponerlo en contacto con una solución la cual estará en contacto. Esta solución debe poseer las características similares a las del fluido que transporta la tubería metálica por su interior. Para el presente estudio se empleará una solución salina al 15,0% en masa de cloruro de sodio debido a que el contenido de total de cloruros en el crudo al momento de ser extraído de los pozos es del 16,5%.

Colocación de las Probetas dentro de la Cámara de Inmersión.- Una vez que están preparadas las probetas para ser ensayadas como también la solución salina, se procede a colocar las mencionadas probetas de la tabla 2.9dentro de la cámara

de inmersión de tal modo que las probetas queden parcialmente sumergidas en la solución salina.

Parámetros de Operación de la Cámara de Inmersión.- En la tabla 2.11 se presenta los parámetros de operación en los cuales la cámara de inmersión operó para este estudio.

Tabla N° 2.11 Parámetros de Operación de la Cámara de Inmersión.

PARÁMETRO DE OPERACIÓN	VALOR
Temperatura dentro de la cámara (°C)	20 ± 1
Tiempo de exposición de las probetas a la solución salina (días)	90
Concentración de cloruro de sodio en solución (% masa)	15,0
pH de la solución de cloruro de sodio	7 ± 1

2.3.10 EVALUACIÓN DE LAS PROBETAS DE LOS DIFERENTES ENSAYOS

Las probetas de acero con y sin recubrimiento correspondientes a los ensayos de cámara de niebla salina como también de la cámara de inmersión son evaluadas semanalmente mientras duran los 90 (noventa) días de experimentación. El procedimiento de evaluación para las probetas con o sin recubrimiento epóxico de la cámara de inmersión es el siguiente:

- Se procede a retirar las 13 (trece) probetas de la cámara de inmersión.
- Por medio de agua fresca y con la acción mecánica de un cepillo, se procede a lavar y a retirar los componentes de herrumbre así como depósitos de sal existentes en las probetas.
- Posteriormente se procede a remojar a la probeta en etanol y en seguida se la somete a un proceso de secado.
- Después por medio del estéreo microscopio Meiji con aumentos de 10X se procede a realizar las macrografías de las probetas.

- Luego se determina la masa existente en cada una de las probetas por medio de la balanza Mettler Toledo.
- Finalmente se vuelve a colocar las probetas dentro de la cámara de inmersión.

El procedimiento descrito anteriormente es aplicado semanalmente por el lapso de 13 semanas. Además se registra el valor de pH de la solución salina de la cámara de inmersión una vez al día durante el tiempo del ensayo.

El procedimiento de evaluación para las probetas con o sin recubrimiento epóxico de la cámara de niebla salina es el siguiente:

- Se procede a retirar las 13 (trece) probetas de la cámara de niebla salina.
- Por medio de agua fresca y con la acción mecánica de un cepillo, se procede a lavar y a retirar los componentes de herrumbre así como depósitos de sal existentes en las probetas.
- Posteriormente se procede a remojar a la probeta en etanol y en seguida se la somete a un proceso de secado.
- Después por medio del estéreo microscopio Meiji con aumentos de 10X se procede a realizar las macrografías de las probetas.
- Luego se determina la masa existente en cada una de las probetas por medio de la balanza Mettler Toledo.
- Finalmente se vuelve a colocar las probetas dentro de la cámara de niebla salina.

El procedimiento descrito anteriormente es aplicado semanalmente por el lapso de 13 semanas. Además se registra el valor de la temperatura del interior de la cámara de niebla salina así también el valor de pH de la solución salina de la mencionada cámara una vez al día durante el tiempo del ensayo.

Una vez transcurrido los 90 (noventa) días de exposición de las probetas en las soluciones salinas de la cámara de niebla salina así como de la cámara de inmersión, se procede a realizar la evaluación de las mismas en base a los siguientes pasos:

- Se procede a retirar las 13 (trece) probetas de la cámara de inmersión y las 13 (trece) probetas de la cámara de niebla salina.
- Por medio de agua fresca y con la acción mecánica de un cepillo, se procede a lavar y a retirar los componentes de herrumbre así como depósitos de sal existentes en las probetas.
- Se prepara una solución de 6 litros de fosfato de sodio (Na_3PO_4) y detergente a una concentración de 30 gramos de fosfato de sodio (Na_3PO_4) /litro y 21 gramos de detergente /litro para la limpieza de las probetas.
- Se procede a la limpieza de las probetas por medio de la solución preparada junto a la acción mecánica de un cepillo de cerda plástica con el fin de no provocar ralladuras dentro de la superficie de las mencionadas probetas.
- Una vez que las probetas han sido enjuagadas de la solución mencionada en el párrafo anterior, se procede a remojar a la probeta en etanol y en seguida se la somete a un proceso de secado.
- Después por medio del estéreo microscopio Meiji con aumentos de 10X se procede a realizar las macrografías de las probetas.
- Luego se determina la masa existente en cada una de las probetas por medio de la balanza analítica Citizen.

Una vez que se analizan las zonas donde está más evidente la corrosión en las probetas, se procede a realizar las metalografías de las mismas con el fin de observar como avanza la corrosión dentro de la microestructura de las probetas. El procedimiento a realizarse es en base a la norma ASTM E3-11: STANDARD GUIDE FOR PREPARATION OF METALLOGRAPHIC SPECIMENS, para que finalmente

por medio del microscopio metalográfico Meiji a los aumentos de 100 y 500X se procede a la obtención de las metalografías y la medida de los espesores de los recubrimientos epóxicos. Este procedimiento se realiza para las 25 probetas restantes.

Una vez realizados los ensayos metalográficos, se procede a tomar el resto de las probetas y se realiza el ensayo de adherencia de recubrimientos. El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Se toma el juego de 4 cuchillas con separación de 1.0 mm y se procede a rayar la superficie del revestimiento por medio de un trazo continuo y profundo.
- Posteriormente se realiza el trazo mencionado pero rotando la dirección del trazado de las cuchillas 90° del trazo original.
- Como resultado de lo anterior se tienen 9 cuadrados.
- Luego se coloca sobre estos cuadrados una cinta adhesiva que esté muy bien adherida a las mismas.
- Se procede a retirar la mencionada cinta por medio de un simple movimiento.
- Se reporta el número de cuadrados de revestimiento que han sido removidos para posteriormente realizar una relación proporcional para obtener el valor de la adherencia del revestimiento al material base.

2.3.11 EQUIPOS UTILIZADOS

En esta sección se presentan los equipos empleados en la etapa experimental además de las especificaciones de los mismos.

Estéreo Microscopio.- El estéreo microscopio es empleado para la realización de los ensayos de macrografía y determinación de la existencia de inclusiones en las microestructuras de las probetas ensayadas.

Microscopio Metalográfico.- El microscopio metalográfico es empleado para la realización de los ensayos de metalografía para la determinación de las microestructuras, avance de la corrosión y medida de espesores de los recubrimientos epóxicos de las probetas ensayadas

Desbastadora.- La desbastadora es empleada en el desbaste grueso de las probetas metalográficas.

Banco de Pulido.- El banco de pulido es empleado en la etapa del desbaste fino de las probetas metalográficas.

Pulidora.- La pulidora es empleada en la etapa del pulido grueso y fino de las probetas metalográficas.

Termocupla.- La termocupla tipo K es empleada en la medición de la temperatura en el interior de la cámara de niebla salina.

Balanza Analítica.- La balanza analítica es empleada en la medición de las masas de las probetas ensayadas en las cámaras de inmersión y de niebla salina.

CAPITULO 3

RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 RESULTADOS OBTENIDOS

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos en los ensayos macrográficos, metalográficos y pérdida de masa de las probetas que han sido colocadas dentro de las cámaras de inmersión y de niebla salina. Primero se presentan los resultados obtenidos en las probetas colocadas en la cámara de inmersión y posteriormente se presentan los resultados de los ensayos realizados en las probetas colocadas en la cámara de niebla salina.

3.1.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LAS PROBETAS COLOCADAS EN LA CÁMARA DE INMERSIÓN.

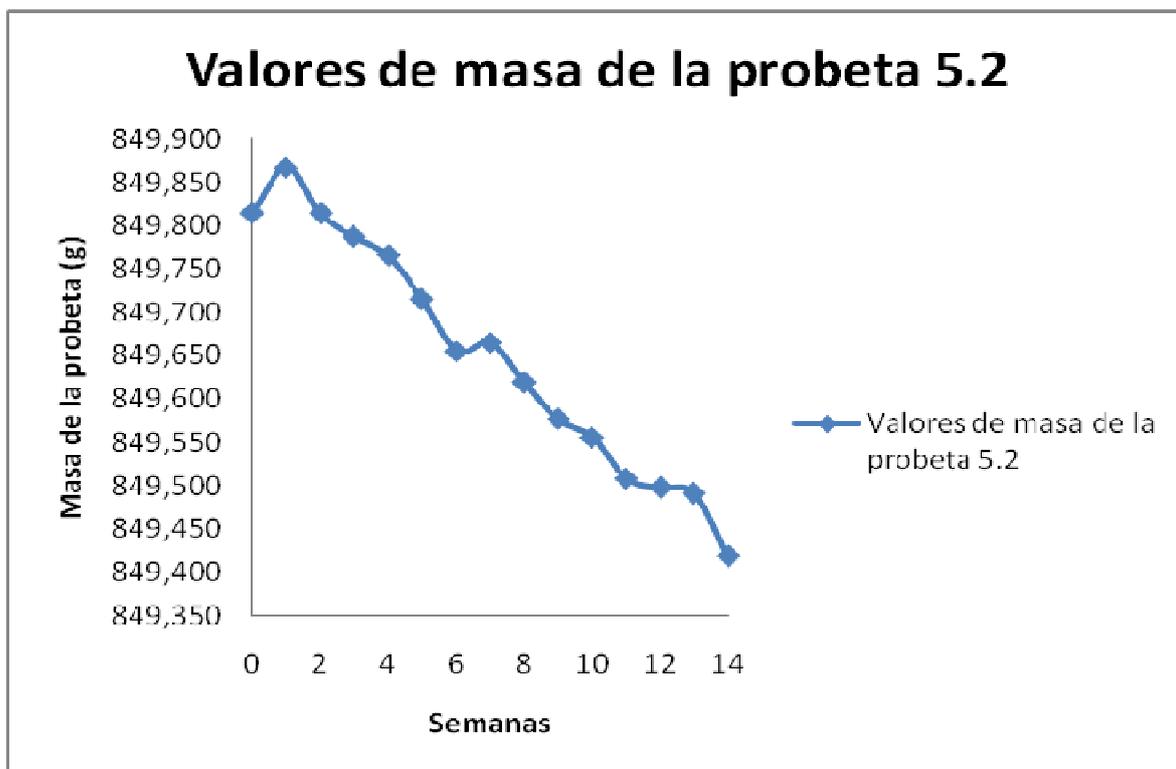
Análisis Visual.- Por medio de una cámara digital se procede a obtener las fotografías de las probetas de la cámara de inmersión cuyas superficies no poseen recubrimiento conjuntamente con las probetas que poseen recubrimiento. Todas las fotografías son tomadas a un aumento de 3X. Todos los presentes ensayos serán realizados para la probeta 5.2.

A continuación se presenta la tabla 3.1 que representa la codificación empleada para la identificación de las fotografías conjuntamente con las fechas realizadas de ensayo.

Tabla N°3.1 Codificación empleada en las fotografías correspondientes al análisis visual.

Codificación	Fecha del ensayo	Codificación	Fecha del ensayo
a	02 mayo 2011	h	20 junio 2011
b	09 mayo 2011	i	27 junio 2011
c	16 mayo 2011	j	04 julio 2011
d	23 mayo 2011	k	11 julio 2011
e	30 mayo 2011	l	18 julio 2011
f	06 junio 2011	m	25 julio 2011
g	13 junio 2011	n	01 agosto 2011

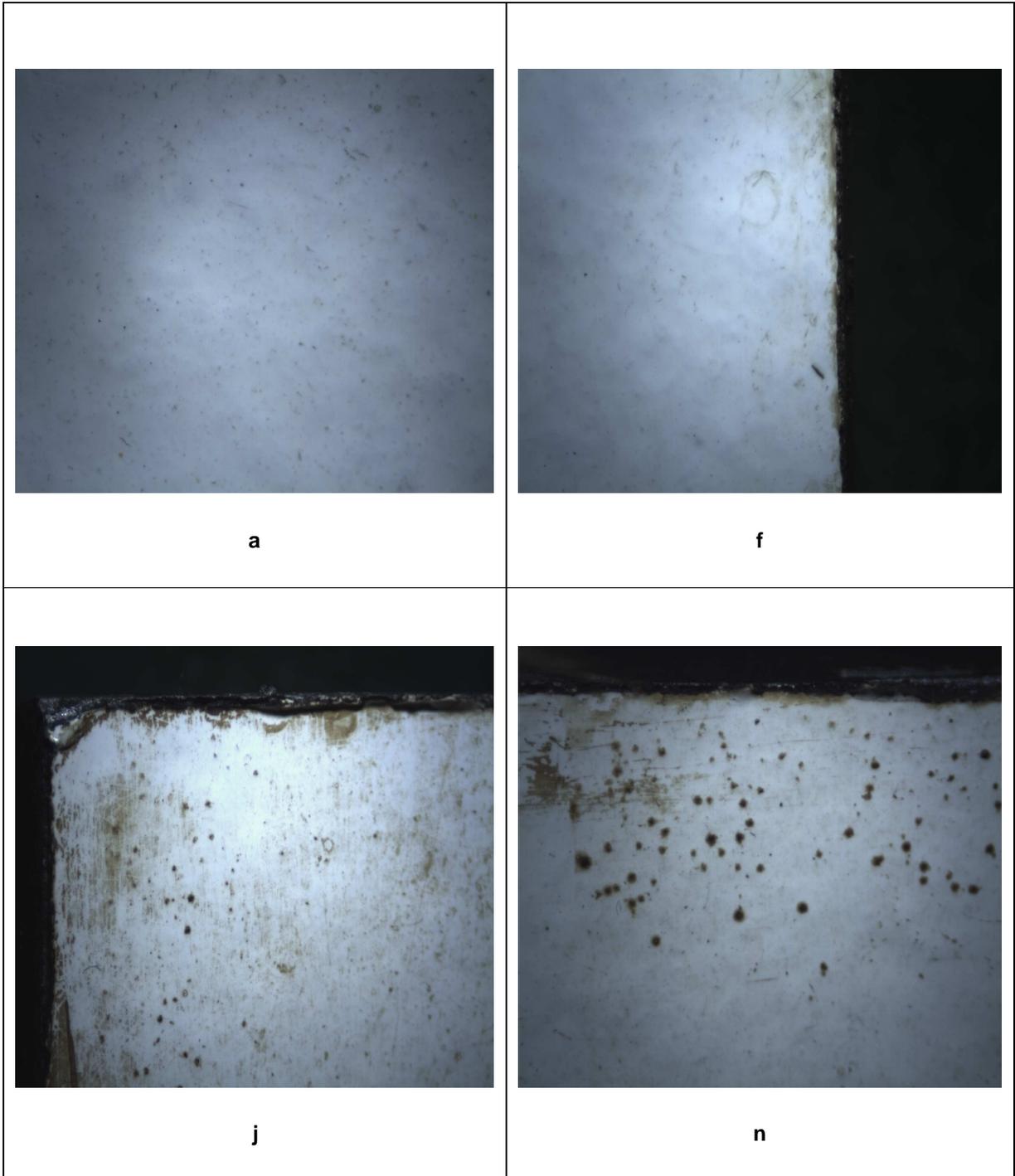
Análisis Gravimétrico- Por medio de este análisis, se podrá observar la variación de las masas de las probetas expuestas a la cámara de inmersión. En la gráfica 3.1 se observa la variación de la masa de la probeta 5.2 vs las semanas de ensayo.



Gráfica N°3.1 Valores de masa de la probeta 5.2 vs semanas de ensayo en la cámara de inmersión.

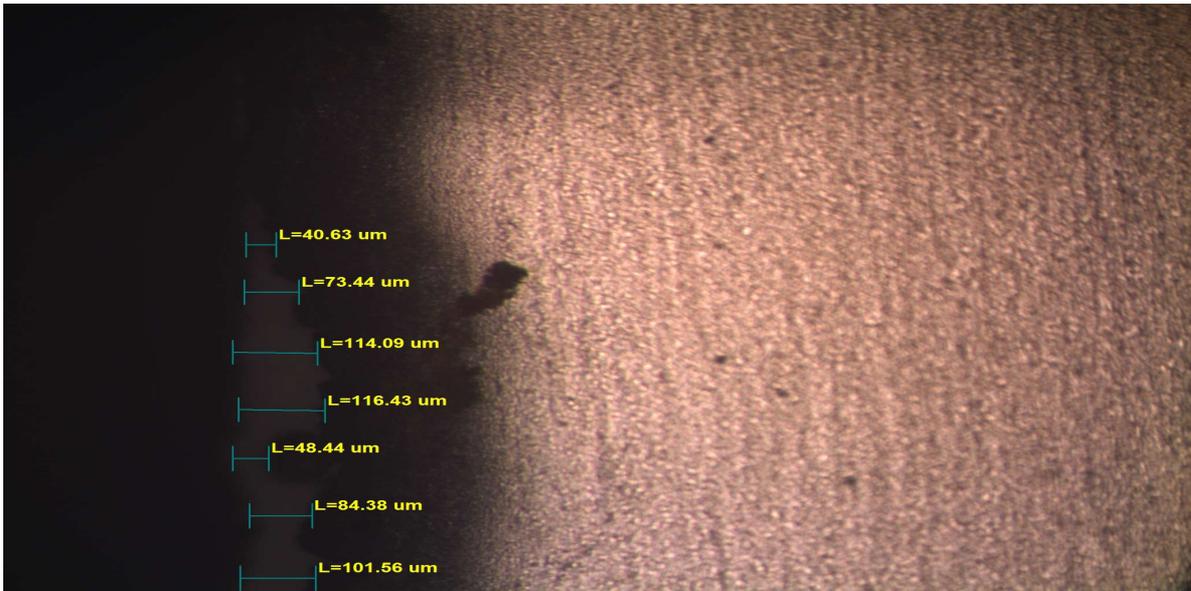
Análisis Macrográfico.- Por medio del estéreo zoom microscopio MEIJI, se procede a realizar las macrografías de las probetas que han sido colocadas dentro de la cámara de inmersión.

Para fines prácticos se empleará las macrografías correspondientes a la probeta 5.2 con el objetivo de observar como la ha variado la mencionada probeta ante el efecto corrosivo que se presentan en la fotografía 3.1.

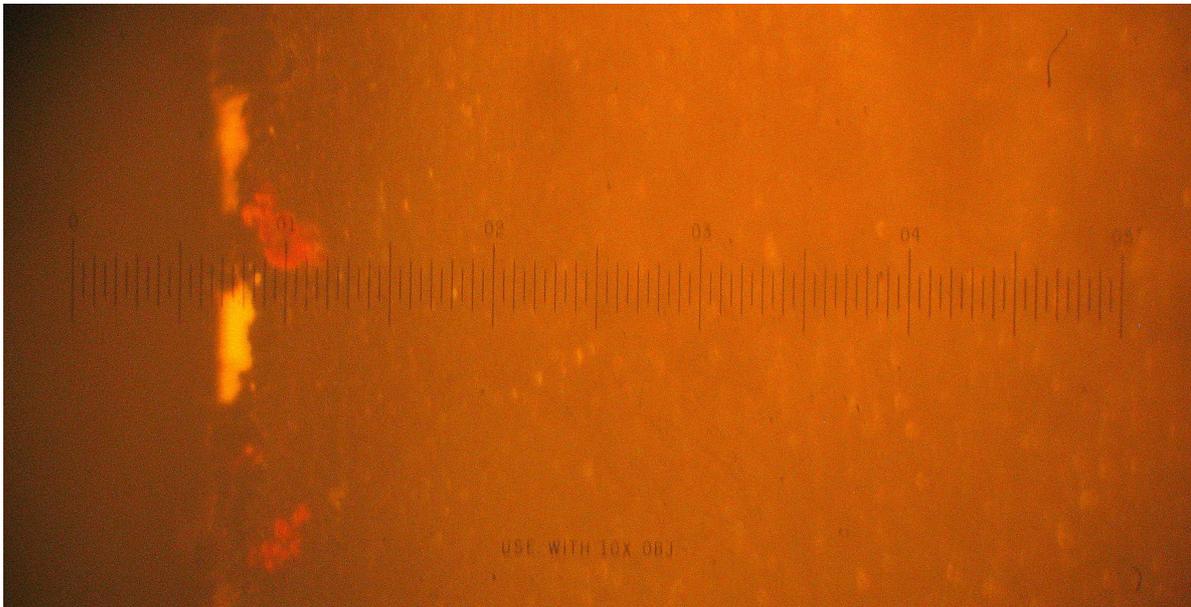


Fotografía N°3.1 Probeta 5.2 con codificación **a, f, j** y **n** con la presencia de recubrimiento 10X

Análisis Metalográfico.- Se procede a realizar las metalografías de las probetas que han sido colocadas dentro de la cámara de inmersión.



Fotografía N°3.2 Acero de matriz ferrítica perlítica con bajo contenido de carbono, se observa que el recubrimiento epóxico sufre un proceso de disminución de espesor 100X



Fotografía N°3.3 Puede observarse que en los sitios donde el recubrimiento epóxico es nulo o mínimo, el avance de la corrosión es mayor 100X

Análisis de Adherencia.- Se procede a realizar los ensayos e adherencia de los recubrimientos en las probetas que han sido colocadas dentro de la cámara de inmersión. En la tabla 3.2 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de adherencia correspondiente a la probeta 5.2 una vez que se ha realizado el ensayo.

Tabla 3.2 Datos obtenidos de los ensayos de adherencia realizados a las probetas colocadas en la cámara de inmersión.

PORCENTAJE DE ADHERENCIA EN PROBETA SIN HABER ESTADO EN LA CÁMARA DE INMERSIÓN					
100					
PROBETA	PORCENTAJE ADHERENCIA	PROBETA	PORCENTAJE ADHERENCIA	PROBETA	PORCENTAJE ADHERENCIA
3.2	100	4.2	100	5.2	100
3.4	100	4.4	100	5.4	100
3.6	100	4.6	100	5.6	100
3.8	100	4.8	100	5.8	100

3.1.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LAS PROBETAS COLOCADAS EN LA CÁMARA DE NIEBLA SALINA.

Análisis Visual.- Por medio de una cámara digital se procede a obtener las fotografías de las probetas de la cámara de niebla salina cuyas superficies no poseen recubrimiento conjuntamente con las probetas que poseen recubrimiento. Todas las fotografías son tomadas a un aumento de 3X. A continuación se presenta

la tabla 3.3 que representa la codificación empleada para la identificación de las fotografías conjuntamente con las fechas realizadas de ensayo.

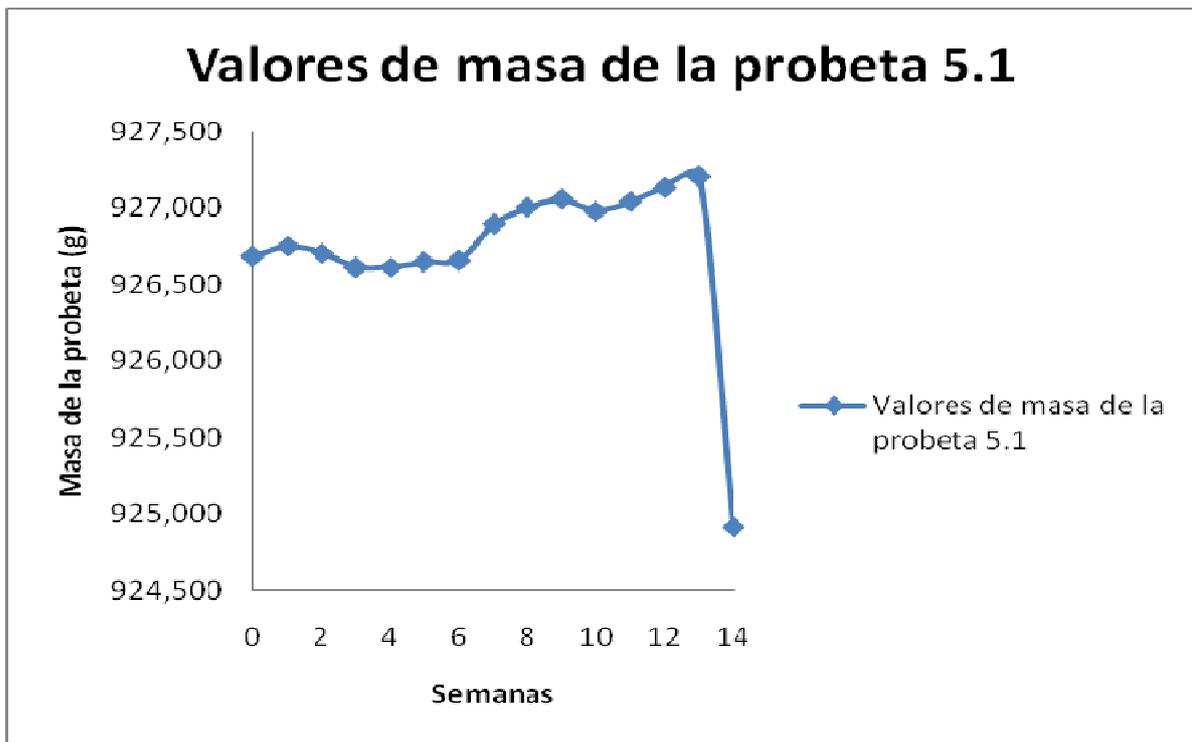
Tabla N°3.3 Codificación empleada en las fotografías correspondientes al análisis visual.

Codificación	Fecha del ensayo	Codificación	Fecha del ensayo
n	03 mayo 2011	t	21 junio 2011
o	10 mayo 2011	u	28 junio 2011
p	17 mayo 2011	v	05 julio 2011
q	24 mayo 2011	w	12 julio 2011
r	31 mayo 2011	x	19 julio 2011
rr	07 junio 2011	y	26 julio 2011
s	14 junio 2011	z	02 agosto 2011

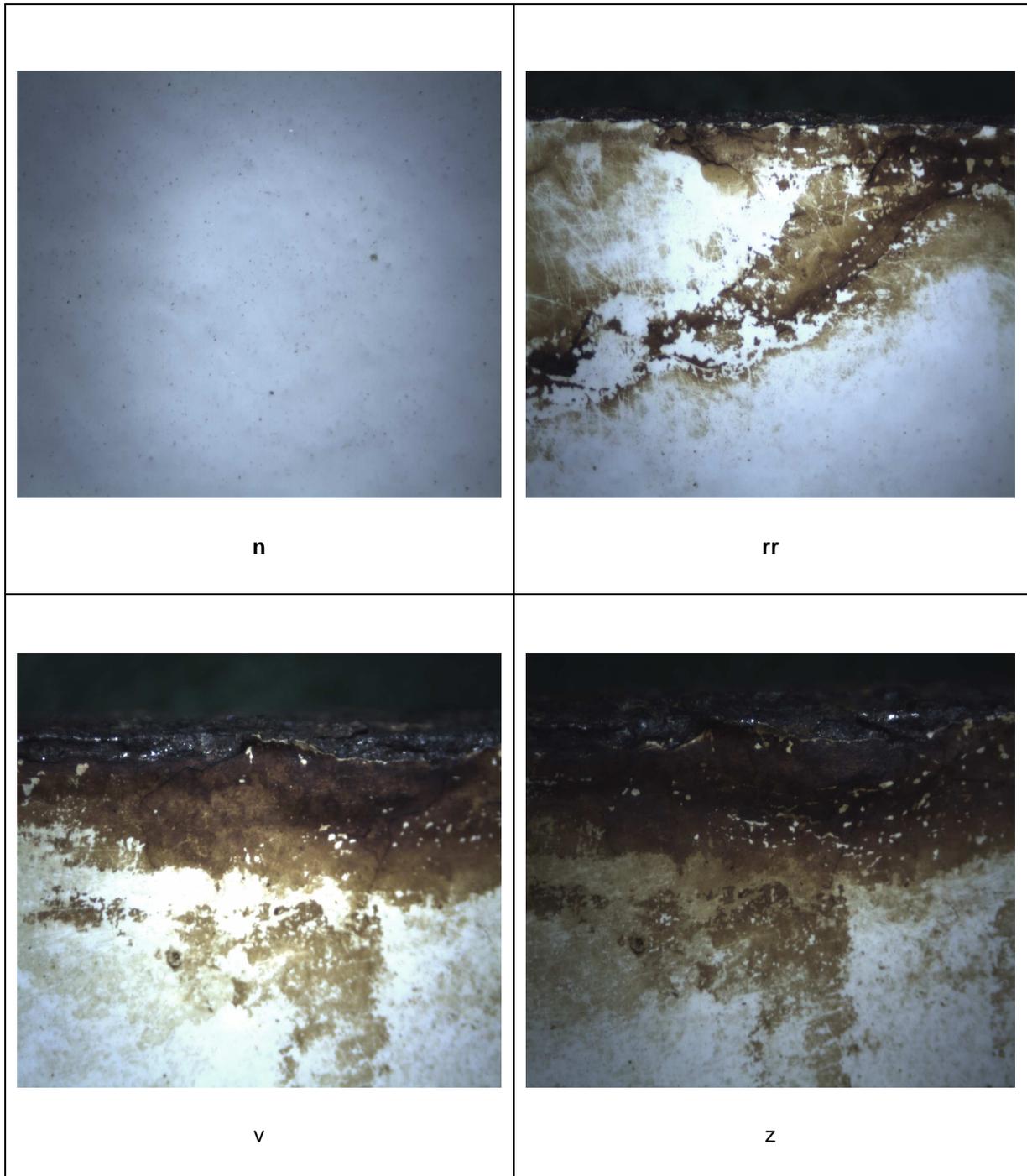
Análisis Gravimétrico- Por medio de este análisis, se podrá observar la variación de las masas de las probetas expuestas a la cámara de niebla salina. En la gráfica 3.2 se observa la variación de la masa de la probeta vs las semanas de ensayo dentro de la cámara de niebla salina. Para estos ensayos se empleará la probeta 5.1.

Análisis Macrográfico.- Por medio del estéreo zoom microscopio MEIJI, se procede a realizar las macrográficas de las probetas que han sido colocadas dentro de la cámara de niebla salina. Para fines prácticos se empleará las macrográficas correspondientes a la probeta 5.1 con el objetivo de observar como la

ha variado la mencionada probeta ante el efecto corrosivo que se presentan en las fotografías 3.4.



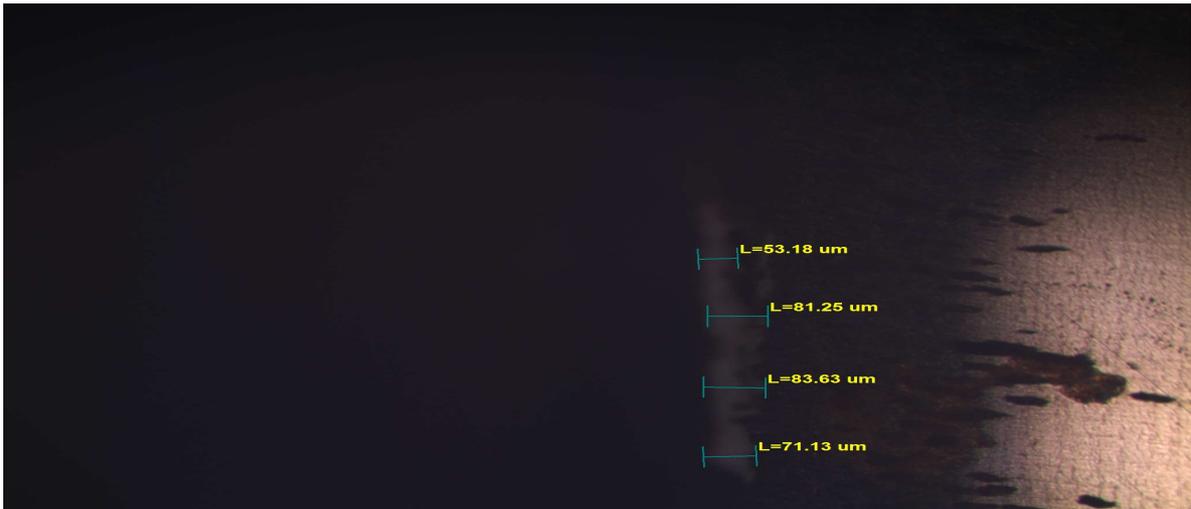
Gráfica N°3.2 Valores de masa de la probeta 5.1 vs semanas de ensayo en la cámara de niebla salina.



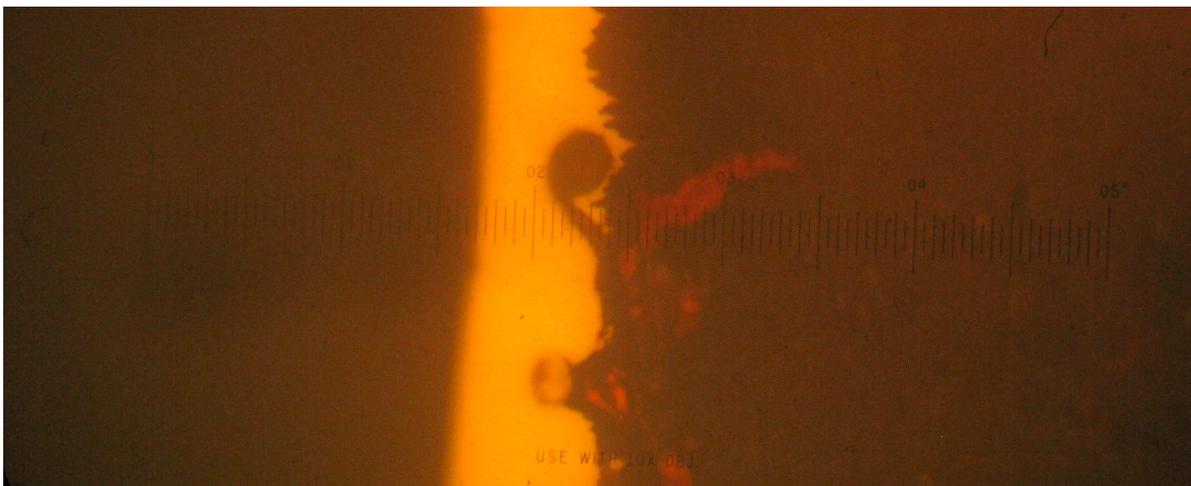
Fotografía N°3.4 Probeta 5.1 con codificación ñ, rr, v y z con la presencia de recubrimiento 10X

Análisis Metalográfico.- Se procede a realizar las metalografías de las probetas que han sido colocadas dentro de la cámara de niebla salina. Para fines

prácticos se empleará las metalografías correspondientes a la probeta 5.1 con el objetivo de observar como se ha afectado la microestructura de la misma ante el avance de la corrosión.



Fotografía N°3.5 Acero de matriz ferrítica perlítica con bajo contenido de carbono, se observa que el recubrimiento epóxico sufre un proceso de disminución de espesor 100X



Fotografía N°3.6 Puede observarse que bajo el recubrimiento epóxico se desarrolla el avance de la corrosión 100X

Análisis de Adherencia.- Se procede a realizar los ensayos e adherencia de los recubrimientos en las probetas que han sido colocadas dentro de la cámara de niebla salina. En la tabla 3.4 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de adherencia correspondiente a la probeta 5.1 una vez que se ha realizado el ensayo.

Tabla 3.4 Datos obtenidos de los ensayos de adherencia realizados a las probetas colocadas en la cámara de niebla salina.

PORCENTAJE DE ADHERENCIA EN PROBETA SIN HABER ESTADO EN LA CÁMARA DE NIEBLA SALINA					
100					
PROBETA	PORCENTAJE ADHERENCIA	PROBETA	PORCENTAJE ADHERENCIA	PROBETA	PORCENTAJE ADHERENCIA
3.1	100	4.1	100	5.1	100
3.3	100	4.3	100	5.3	100
3.5	100	4.5	100	5.5	100
3.7	100	4.7	100	5.7	100

3.1.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LAS PROBETAS COLOCADAS EN LA CÁMARA DE INMERSIÓN.

Análisis Visual.- Dentro de la cámara de inmersión, una sección de las probetas están sumergidas dentro de la solución salina, de esta manera generando una interfase. Sumergidas dentro de la solución se encuentran las secciones recubiertas con el revestimiento, dejando a la zona descubierta de las probetas sin contacto con la solución.

Transcurrido 90 días se observa que en la zona del recubrimiento, en algunas secciones aparecen protuberancias o hinchamientos, puntos de ruptura, disminución del espesor del revestimiento. Estos defectos se observan con más frecuencia en los bordes de las probetas.

Debajo de los defectos generados en la zona del recubrimiento por el contacto con la solución salina que se menciona en el párrafo anterior puede observarse la existencia de corrosión solapada, de esta manera generando una disminución y pérdida de la masa metálica de las probetas que está bajo el recubrimiento epóxico.

Mientras que en la zona no recubierta de las probetas, se observa que existe corrosión por picadura debido al ambiente salino predominante dentro de la cámara, consecuencia de esto es la disminución de espesor del material a pesar de la aplicación de las soluciones inhibidoras de corrosión.

El recubrimiento cumple el objetivo proteger a las probetas en contacto con el medio salino, pero al existir una pequeña irregularidad o heterogeneidad en la superficie de la misma, el fluido corrosivo ingresará por estos defectos y en consecuencia de esto el proceso de corrosión atacará al material base (metal) al cual se está protegiendo.

Análisis Gravimétrico.- En base de la gráfica 3.1 se observa que la tendencia de las probetas al estar expuestas y sumergidas en un ambiente salino dentro de la cámara de inmersión es el de disminuir su masa, aunque en algunas de se presenta en un tiempo de ensayo un aumento de la misma.

Esto se debe a que la cantidad de sal que se deposita sobre las paredes de las probetas analizadas no se extrae por completo al momento de la limpieza para la extracción de datos y de fotografías semanalmente, debido a que no se debe realizar una limpieza exhaustiva vía mecánica porque se corre el riesgo de eliminar

señales características e importantes del proceso de corrosión existente y predominante.

Pero en la última extracción de datos una vez obtenidas las fotografías con las señales ya mencionadas, se procede a la limpieza profunda de las probetas y se puede comprobar desde este punto la disminución de la masa de las probetas al estar sometidas y sumergidas en una solución salina.

Por medio de la gráfica citada, puede observarse que la disminución de masa de la probeta que no posee recubrimiento epóxico presenta una mayor pérdida de material en comparación de las mismas que están recubiertas y protegidas con un sistema de inhibidor de sales inorgánicas.

La tendencia de las probetas que poseen recubrimiento total en toda la superficie presentan una menor pérdida de masa en comparación con las probetas que están parcialmente cubiertas con el revestimiento y colocadas sistemas de inhibidores, aunque se presenta en el caso de la probeta 4.2 recubierta totalmente con el revestimiento tiene una menor masa que la probeta 4.8 parcialmente cubierta, esto se debe a que debajo del recubrimiento epóxico se produce pérdida de masa del sustrato metálico vía corrosión solapada por las irregularidades existentes en la superficie del revestimiento de la probeta.

Con respecto a este análisis en el caso de las probetas parcialmente cubiertas con epóxico y protegidas con el sistema de inhibidores, se dice que la solución al 5% de la sal inorgánica de dicromato de potasio presenta menores pérdidas de masa en comparación con las restantes sales inorgánicas aplicadas, aunque el conjunto con el revestimiento epóxico hace que la acción de estas sales sea más eficaz ante la pérdida de masa vía corrosión.

Análisis Macrográfico.- En base a las fotografía 3.1, se observa que en las probetas que están cubiertas totalmente con el revestimiento epóxico no existe una gran afección en la superficie de las mismas. Por ejemplo en la superficie recubierta

de la probeta 5.2 se observa la presencia de pequeños puntos de depósito de material corroído conjuntamente con el desprendimiento del material epóxico en los bordes de la probeta en mención. Se recuerda que la zona recubierta con el revestimiento está totalmente recubierta de la solución salina. Y este efecto se hace más notorio cuando el tiempo de ensayo es mayor y fuertemente influenciado con el tamaño de espesor del recubrimiento, es decir que a mayor espesor de recubrimiento se presentan estos defectos pero en menor intensidad y cantidad en comparación con recubrimientos de menor espesor.

Se debe insistir en el cuidado que debe tener la superficie del recubrimiento, ya que debe estar libre de imperfecciones debido a que cualquier defecto en la superficie del mismo, el fluido corrosivo ingresará generando de esta manera corrosión, provocando el desprendimiento del material metálico y la posterior remoción del material polimérico de recubrimiento.

El lugar donde se observa mayor cantidad de los defectos mencionados en el párrafo anterior es en la interfase de la probeta donde confluye la fase aérea cargada de salinidad con la fase de solución salina. En esta zona es donde se produce la mayor corrosión posible debido a la presencia de oxígeno. La cantidad y el tipo de defectos generados por el efecto corrosivo son mayores en comparación que de otras zonas. Al igual que se menciona en el párrafo anterior, el tiempo de exposición será un parámetro fundamental para el avance de la corrosión.

Mientras que en la zona que no posee recubrimiento epóxico y solo está protegido por soluciones inhibidoras de sales inorgánicas, presentan un mayor defecto en la superficie por el avance de la corrosión. Esto quiere decir que no solo se puede aplicar la solución inhibidora, sino esta solución inhibidora en conjunto con el revestimiento epóxico para generar una mayor barrera y resistencia a la corrosión.

Análisis Metalográfico.- El material base es un acero de matriz ferrítica perlítica con bajo contenido de carbono, con gran cantidad de inclusiones y de gran

tamaño del tipo silicato. Además se observa que este acero ha sido trabajado en caliente y terminado en frío en la dirección del conformado, consecuencia de esto es que la mayoría de las inclusiones del tipo silicato han sido deformadas a lo largo de la dirección del conformado mecánico.

Se aprecia que en la zona del recubrimiento epóxico la penetración de la corrosión a través de los límites de grano es mínima indicando de esta manera que la barrera epóxica colocada es efectiva, salvo en los puntos donde existen imperfecciones superficiales. En la zona de la interfase puede observarse con mayor notoriedad la efectividad de la barrera epóxica ya que la corrosión avanza con mayor facilidad en la zona descubierta a través de los límites de grano. Como se puede observar en las fotografías mencionadas, el avance de la corrosión a través de los límites de grano llegan a valores mayores de 0,04 mils mientras que en otras probetas llegan a ser menores que 0,01 mils. Además de avanzar la corrosión a través de los límites de grano, también avanza a través de las inclusiones, ya que tanto inclusiones como los límites de granos existentes en una estructura, son sitios dentro de la microestructura con mayor energía por donde la corrosión ingresa con mayor facilidad.

Mientras que en la zona donde las probetas no están cubiertas por material epóxico y solo están cubiertas por soluciones inhibidoras de sales inorgánicas, se observa que el avance de la corrosión es mayor en comparación a las zonas donde las probetas están con el recubrimiento epóxico, llegando el avance de la corrosión a distancias mayores que los 0,04 mils.

Los procesos de corrosión encontrados en las probetas analizadas corresponden al tipo de corrosión general debido a que toda la superficie sin recubrimiento está afectada por la corrosión y al proceso de corrosión por picadura debido a los pequeños orificios que se encuentran en la zona donde no existe recubrimiento epóxico, mientras que en la zona de recubrimiento existe la evidencia de corrosión solapada debido a que debajo del revestimiento el sustrato metálico ha

perdido masa como consecuencia del ingreso del fluido corrosivo a través de una de las imperfecciones existentes del recubrimiento.

Análisis de Adherencia.- Como se puede observar en la tabla 3.2, la adherencia del recubrimiento epóxico con el sustrato metálico es del 100% para todas las probetas, pero estos valores disminuyen al realizar el mencionado ensayo en los bordes de las probetas o en los lugares donde existan imperfecciones del recubrimiento, generando de esta manera una pobre adherencia entre el recubrimiento y el material base (sustrato metálico).

3.1.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LAS PROBETAS COLOCADAS EN LA CÁMARA DE NIEBLA SALINA.

Análisis Visual.- Dentro de la cámara de niebla salina, todas las probetas están en contacto con un ambiente salino que es provocado por la atomización de una solución salina durante 8 veces al día por un lapso de 5 minutos.

Transcurrido 90 días se observa que en la zona del recubrimiento, en algunas secciones aparecen protuberancias o hinchamientos, puntos de ruptura, disminución del espesor del revestimiento. Estos defectos se observan con más frecuencia en los bordes de las probetas.

Debajo de los defectos generados en la zona del recubrimiento por el contacto con la solución salina que se menciona en el párrafo anterior puede observarse la existencia de corrosión solapada, de esta manera generando una disminución y pérdida de la masa metálica de las probetas que está bajo el recubrimiento epóxico.

Además se evidencia la pérdida del espesor del revestimiento por el escurrido del material metálico corroído de la zona que no está recubierta por el revestimiento epóxico.

Mientras que en la zona no recubierta de las probetas, se observa que existe corrosión por picadura debido al ambiente salino predominante dentro de la cámara, consecuencia de esto es la disminución de espesor del material a pesar de la aplicación de las soluciones inhibidoras de corrosión.

El recubrimiento cumple el objetivo proteger a las probetas en contacto con el medio salino, pero al existir una pequeña irregularidad o heterogeneidad en la superficie de la misma, el fluido corrosivo producto del ambiente corrosivo ingresará por estos defectos y en consecuencia de esto el proceso de corrosión atacará al material base (metal) al cual se está protegiendo.

Análisis Gravimétrico.- En base de la gráfica 3.2 se observa que la tendencia de las probetas al estar expuestas al ambiente salino dentro de la cámara de niebla salina es el de disminuir su masa, aunque se presenta en un tiempo de ensayo el aumento de la misma.

Esto se debe a que la cantidad de sal que se deposita sobre las paredes de las probetas analizadas no se extrae por completo al momento de la limpieza para la extracción de datos y de fotografías semanalmente, debido a que no se debe realizar una limpieza exhaustiva vía mecánica porque se corre el riesgo de eliminar señales características e importantes del proceso de corrosión existente y predominante.

Pero en la última extracción de datos una vez obtenidas las fotografías con las señales ya mencionadas, se procede a la limpieza profunda de las probetas y se puede comprobar desde este punto la disminución de la masa de las probetas al estar sometidas a un ambiente salino.

Por medio de las gráficas citadas, puede observarse que la disminución de masa de la probeta que no posee recubrimiento epóxico presenta una mayor pérdida de material en comparación de las mismas que están recubiertas y protegidas con un sistema de inhibidor de sales inorgánicas.

La tendencia de las probetas que poseen recubrimiento total en toda la superficie presentan pérdidas mayores de masa en comparación con las probetas que están parcialmente cubiertas con revestimiento y colocadas sistemas de inhibidores como es en el caso del sistema epóxico con la solución inhibidora de dicromato de potasio, aunque se presenta en el caso de la probeta 5.2 que está parcialmente cubierta con revestimiento epóxico de espesor 5 mils y como inhibidor una mezcla de sales inhibidoras (sulfato de cinc y dicromato de potasio) al 5% que presenta una menor pérdida de material.

Con respecto a este análisis en el caso de las probetas parcialmente cubiertas con epóxico y protegidas con el sistema de inhibidores, se dice que la solución al 5% de la sal inorgánica de dicromato de potasio presenta menores pérdidas de masa en comparación con las restantes sales inorgánicas aplicadas, aunque el conjunto con el revestimiento epóxico hace que la acción de estas sales sea más eficaz ante la pérdida de masa vía corrosión.

Análisis Macrográfico.- Se observa que en las probetas que están cubiertas totalmente con el revestimiento epóxico no existe una gran afección en las superficies de las mismas. Por ejemplo en la superficie recubierta de la probeta 5.1 se observa la presencia de pequeños puntos de depósito de material corroído conjuntamente con el desprendimiento del material epóxico en los bordes de la probeta en mención. Estos defectos se hace más notorio cuando el tiempo de ensayo es mayor y fuertemente influenciado con el tamaño de espesor del recubrimiento, es decir que a mayor espesor de recubrimiento se presentan estos defectos pero en menor intensidad y cantidad en comparación con recubrimientos de menor espesor.

Se debe insistir en el cuidado que debe tener la superficie del recubrimiento, ya que debe estar libre de imperfecciones debido a que cualquier defecto en la superficie del mismo, el ambiente corrosivo ingresará generando de esta manera corrosión, provocando el desprendimiento del material metálico y la posterior remoción del material polimérico de recubrimiento.

El lugar donde se observa mayor cantidad de los defectos mencionados es en la interfase de la probeta. La cantidad y el tipo de defectos generados por el efecto corrosivo son mayores en comparación que de otras zonas. Al igual que se menciona en el párrafo anterior, el tiempo de exposición será un parámetro fundamental para el avance de la corrosión. Además se presenta un factor importante que es la generación del desgaste del recubrimiento como consecuencia del arrastre del material metálico corroído al estar en contacto la probeta con el ambiente salino.

Mientras que en la zona que no posee recubrimiento epóxico y solo está protegido por soluciones inhibidoras de sales inorgánicas, presentan un mayor defecto en la superficie por el avance de la corrosión. Esto quiere decir que no solo se puede aplicar la solución inhibidora, sino esta solución inhibidora en conjunto con el revestimiento epóxico para generar una mayor barrera y resistencia a la corrosión.

Análisis Metalográfico.- El material base es un acero de matriz ferrítica perlítica con bajo contenido de carbono, con gran cantidad de inclusiones y de gran tamaño del tipo silicato. Además se observa que este acero ha sido trabajado en caliente y terminado en frío en la dirección del conformado, consecuencia de esto es que la mayoría de las inclusiones del tipo silicato han sido deformadas a lo largo de la dirección del conformado mecánico.

Se aprecia que en la zona del recubrimiento epóxico la penetración de la corrosión a través de los límites de grano es mínima indicando de esta manera que la barrera epóxica colocada es efectiva, salvo en los puntos donde existen

imperfecciones superficiales. En la zona de la interfase puede observarse con mayor notoriedad la efectividad de la barrera epóxica ya que la corrosión avanza con mayor facilidad en la zona descubierta a través de los límites de grano. Como se puede observar en las fotografías mencionadas, el avance de la corrosión a través de los límites de grano llegan a valores mayores de 0,03 mils mientras que en otras probetas llegan a ser menores que 0,01 mils. Además de avanzar la corrosión a través de los límites de grano, también avanza a través de las inclusiones, ya que tanto inclusiones como los límites de granos existentes en una estructura, son sitios dentro de la microestructura con mayor energía por donde la corrosión ingresa con mayor facilidad.

Mientras que en la zona donde las probetas no están cubiertas por material epóxico y solo están cubiertas por soluciones inhibidoras de sales inorgánicas, se observa que el avance de la corrosión es mayor en comparación a las zonas donde las probetas están con el recubrimiento epóxico, llegando el avance de la corrosión a distancias mayores que los 0,04 mils.

Los procesos de corrosión encontrados en las probetas analizadas corresponden al tipo de corrosión general debido a que toda la superficie sin recubrimiento está afectada por la corrosión y al proceso de corrosión por picadura debido a los pequeños orificios que se encuentran en la zona donde no existe recubrimiento epóxico, mientras que en la zona de recubrimiento existe la evidencia de corrosión solapada debido a que debajo del revestimiento el sustrato metálico ha perdido masa como consecuencia del ingreso del fluido del ambiente corrosivo a través de una de las imperfecciones existentes del recubrimiento.

Análisis de Adherencia.- Como se puede observar en la tabla 3.4, la adherencia del recubrimiento epóxico con el sustrato metálico es del 100% para todas las probetas, pero estos valores disminuyen al realizar el mencionado ensayo en los bordes de las probetas o en los lugares donde existan imperfecciones del

recubrimiento, generando de esta manera una pobre adherencia entre el recubrimiento y el material base (sustrato metálico).

Los sistemas compuestos por el revestimiento epóxico y por las soluciones de sales inorgánicas inhibidoras ofrecen una buena barrera ante el ingreso de la corrosión al estar en contacto con ambientes corrosivos.

CAPITULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Este proyecto de investigación es importante porque permite entender como un sistema de protección (inhibidor (sales inorgánicas) con revestimiento polimérico (epóxico poliamida)) frena el avance del proceso corrosivo al interior de las tuberías de oleoducto aumentando el tiempo de vida útil e integridad de las tuberías que transportan crudo.
- A partir de los resultados obtenidos, los sistemas de protección mencionados en el punto anterior no son aplicados en el interior de tuberías de extracción de crudo, ya que al existir afecciones o daños en la superficie del revestimiento generados por transportar crudo con sólidos, la corrosión se desarrolla y avanza a partir de estos daños, provocando que el sistema de protección falle prematuramente.
- Dentro del presente estudio se comprueba la hipótesis de que los sistemas de protección interna (inhibidores junto a recubrimientos poliméricos) son efectivos al frenar el avance y la velocidad de corrosión, siempre y cuando toda la superficie del material a proteger está recubierta del sistema de protección interna.
- Los sistemas de barrera formados por revestimientos epóxicos del tipo poliamida son eficientes para evitar el paso de la corrosión hacia las paredes de cualquier tubería metálica.
- Factores que influirán directamente en este comportamiento de resistencia de la corrosión son: el tipo de revestimiento epóxico, el espesor del mismo, el tiempo de exposición de este en los diferentes medios corrosivos.

- Los sistemas de barreras formados por los revestimientos epóxicos tipo poliamida junto con sales inhibidoras de corrosión, son parcialmente efectivos ante medios corrosivos, ya que por un lado el revestimiento protege la superficie mientras que la solución inhibidora salina frena o retarda la velocidad de corrosión pero en ningún momento crea una barrera como los revestimientos epóxicos.
- Se observa que las probetas con el mismo sistema de protección de barrera contra la corrosión que han sido empleadas tanto en la cámara de inmersión como en la cámara de niebla salina, poseen diferentes velocidades de corrosión.
- Las velocidades de corrosión correspondientes a las probetas colocadas dentro de la cámara de niebla salina presentan elevados valores de velocidades de corrosión en comparación con las velocidades de corrosión de las probetas colocadas dentro de la cámara de inmersión.
- La evidencia de defectos que se presentan en las probetas colocadas en estas dos cámaras, la de inmersión y de la cámara de niebla salina, se observa la existencia en la parte del revestimiento protuberancias del revestimiento como hinchazones, desprendimiento del material de revestimiento, pequeñas rupturas del revestimiento por la salida del material metálico base desprendido, desgaste del espesor por el contacto con el medio corrosivo y también por el arrastre del metal corroído a través del revestimiento epóxico, mientras que en la zona de interfase de probetas (zona donde confluyen la zona de revestimiento y la zona descubierta) se observa desgaste del revestimiento, pequeñas picaduras correspondientes a la zona sin revestimiento, mientras que en la zona que no está recubierta por el revestimiento se observa pérdida de material a lo largo de toda la zona, existencia de picaduras.

- Los principales procesos de corrosión encontrados en las probetas analizadas en este estudio fueron corrosión uniforme y por picadura a lo largo de la sección que no está protegida la probeta con el revestimiento epóxico, mientras que en la zona del recubrimiento epóxico se observa corrosión solapada debajo del revestimiento polimérico.
- Mientras la superficie del revestimiento epóxico no presente daños, irregularidades o defectos, es una excelente barrera contra la corrosión. Pero al existir alguna de los defectos comentados con anterioridad, el revestimiento pierde su función protectora y de esta manera inicia un proceso corrosivo perjudicial.
- En la extracción del crudo, no puede aplicarse este tipo de barreras en los tubings, ya que al extraer el crudo desde los pozos de producción va arrastrando diferentes tipos de sólidos, piedras, etc., los cuales provocan defectos sobre este revestimiento y facilitando así el proceso corrosivo solapado del mismo. Estos revestimientos epóxicos servirán únicamente al transportar fluidos que no presenten sólidos en su interior, tal es el caso de los oleoductos como también de los poliductos que transportan derivados del crudo.

4.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir con este tipo de estudios de velocidades de corrosión analizando los diferentes parámetros físico químicos que posee el crudo ecuatoriano, tal es el caso del pH, temperatura, el contenido de gases como monóxido de carbono (CO), gas sulfhídrico (H₂S) ya que en esta investigación se realizó el estudio de la influencia de las velocidades de corrosión en función de la salinidad del crudo.
- Se recomienda también realizar el análisis de velocidades de corrosión de las tuberías de transporte de petróleo empleando como barreras de protección contra la corrosión diferentes tipos de revestimientos epóxicos conjuntamente con emulsiones de sales inorgánicas dentro de medios orgánicos, con el objetivo de observar la influencia y la resistencia a la corrosión que presentan estos sistemas.
- Los ensayos de la determinación de las velocidades de corrosión como lo es la cámara de inmersión y la cámara de niebla salina simplemente es el contacto de las probetas a ensayar ante ambientes y fluidos estáticos. Se recomienda realizar un tercer ensayo en el cual las probetas a ensayar estén en contacto con las soluciones corrosivas en movimiento, ya que los resultados de velocidades de corrosión varían si el fluido corrosivo está o no en movimiento.
- El mecanismo de limpieza sea mecánica o química de las probetas previo al análisis macrográfico y metalográfico debe ser empleado de tal manera que solo provoque la remoción del material corroído y de la herrumbre, sin afectar al material en sí como también en lo posible no afectar las líneas y señales características existentes de los tipos de corrosión que se encuentran en las probetas a analizar, ya que si se hace caso omiso a estas recomendaciones, los datos de velocidades de corrosión como los ensayos macrográficos pueden estar alejados de la realidad.
- En lo posible el material base (acero) debe ser inspeccionado previamente su microestructura, ya que ciertos tipos de

microestructuras de aceros presentarán una mayor tendencia a ser corroídos que otros y en especial si estos presentan gran cantidad de inclusiones, para esto un ensayo metalográfico previo es recomendable para aprobar o rechazar el acero que vaya a ser empleado en este tipo de operaciones.

- El éxito o fracaso de un sistema de barreras contra la corrosión depende notablemente de la limpieza química y mecánica que se aplica a la superficie del sustrato metálico al cual se lo vaya a aplicar, ya que al presentar elevada adherencia entre el revestimiento y el sustrato metálico frena el avance de la corrosión, caso contrario fomentaría el avance del mismo. Para esto se debe basar en las normas SSPC: Especificaciones de Preparación de Superficies.
- La obtención de las propiedades físico químicas del producto a transportar dan las características fundamentales y necesarias para la aplicación e implementación de un sistema de protección de los dispositivos que servirán de transporte como de almacenamiento del producto corrosivo.
- En la norma ASTM B 117 – 03, Prácticas Estándares para la Operación de la Cámara de Aspersión de Niebla Salina, sugiere el uso de un tipo de agua de ciertas características para el mencionado ensayo. Se recomienda al emplear esta técnica el tipo de agua de características similares a las cuales el sistema de protección estará en contacto en el momento de las operaciones.

BIBLIOGRAFÍA Y CITAS DE INTERNET

1. Yoon, Mike, Pipeline System Design: Introduction, 2010, Yoon Consulting, Alberta, pp: 27 – 33.
2. “Revestimientos Poliméricos”, www.intercover.com/PDFs/ct_RevPolimericos.Pdf, 27 / 04 / 2011.
3. Pyc, Wioleta, Performance Evaluation of Epoxy – Coated Reinforcing Steel and Corrosion Inhibitors in a Simulated Concrete Pore Water Solution, 1997, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, pp: 4-6
4. The Corrosion Society, Standard Recommended Practice The Application of Internal Plastic Coatings for Oilfield Tubular Goods and Accessories RP0191-2002, 2002, NACE, Houston, pp: 4,5.
5. Fontana, Mars, Corrosion Engineering, 2008, Mc Graw Hill, Singapur, pp: 39 – 151.
6. “Revestimientos Poliméricos”, www.intercover.com/PDFs/ct_RevPolimericos.Pdf, 27 / 04 / 2011.
7. Friedenthal, Esteban, 2000, Tecnología Básica del Caucho, CITIC – INTI: Buenos Aires, pp: 32,33.
8. “Rockwell Superficial Hardness Test”, www.china-total.com/Product/meter/leeb-hardness-tester/What-is-Hardness.htm, 25 / 06 / 2011.
9. Koleske, Joseph, 1995, Paint and Coating Testing Manual, ASTM: Philadelphia, pp: 547,548,731,732.
10. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios, Protección Interior de Ductos con Inhibidores NRF – 005 –

- PEMEX- 2000, 2000, PEMEX, México D.F., pp: 8, 10, 11, 15, 16, 19 – 21.
11. The Corrosion Society, Standard Recommended Practice The Application of Internal Plastic Coatings for Oilfield Tubular Goods and Accessories RP0191-2002, 2002, NACE, Houston, pp: 4,5.
 12. American Society Mechanical Engineers, Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids B31.4, 1998, ASME, New York, pp: 35, 36.
 13. “Dureza Rockwell Superficial “, www.fullmecanica.com/d/dureza-rockwell-superficial, 25 / 06 / 2011.
 14. “Desarrollo Tecnológico e Innovación en Procesos, Producción, y Mercadotecnia a Través de la Cooperación en la Cadena de Valor de los Plásticos Técnicos y Composites Plásticos de la Comunidad 4Valenciana”, www.avep.es/uploads/noticias/guia2.pdf, 08/12/2011.