



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EFFECTO DE LA PRESIÓN HIDROSTÁTICA EN LA VELOCIDAD DE
CORROSIÓN DE UN ACERO API X52 SIMULANDO CONDICIONES
DE AGUAS PROFUNDAS.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO
PRESENTA:**

OMAR DAVID GONZÁLEZ SEGOVIA

MÉXICO, D. F.

2012





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: M. en I. Teresita del Niño de Jesús Robert Núñez
VOCAL: Dr. Francisco Javier Rodríguez
SECRETARIO: M. en I. Vianey Torres Mendoza
PRIMER SUPLENTE: M. en C. Carlos Rodríguez Rivera
SEGUNDO SUPLENTE: M en I. Karina Cruz Hernández

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de Corrosión
Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica
Facultad de Química
Universidad Nacional Autónoma de México

Asesor del tema: M en I Vianey Torres Mendoza _____

Sustentante: Omar David González Segovia _____

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de formar parte de esta gran institución, por representar toda una ciudad de intercambio intelectual y cultural, por las investigaciones que realiza y por la representación de un entorno completamente distinto al que vive México actualmente, Universidad por siempre.

A mi asesora de Tesis la M. en I. Vianney Torres, por el apoyo y paciencia que brindo en todas las etapas de la realización de esta tesis, gracias por el financiamiento junto con Dr. J Genescá por aportar tantas ideas en tan poco tiempo es una persona admirable.

Al departamento de Corrosión por permitirme realizar la experimentación en el laboratorio, en especial al Jefe de departamento el M. C. Carlos Rodríguez por su apoyo y su disposición.

A Micra Ingeniería, S.A, de C.V por el apoyo que me brindo al prestarme el Microscopio electrónico de Barrido.

A Pedro Cabrera Juárez, por el apoyo en la fabricación del equipo, aportando ideas y soluciones

DEDICATORIAS

A mis padres Alicia Segovia y Alfredo González, por darme la oportunidad de estudiar, ellos me han demostrado con ejemplos el panorama de la vida brindándome valores fundamentales cada uno a su manera y complementándose entre ellos, además de darme todo lo que he necesitado no solo ahora sino durante toda mi vida muchísimas gracias por todo mamá y papá.

A mis hermanos Eric e Ivonne, por ser parte de mi, cada uno me aporta buenas cosas, gracias por las figuras que me ayudaste a hacer en mi tesis Ivonne y por la ayuda de Eric con sus ejemplos y por su forma de ser.

A mi familia gracias a los cuatro abuelos (Roque, Carlos, Alicia y Cordelia), por que cuando estoy junto a ellos me dan paz, por ser pilares y jefes de mi familia, por aún seguirme dando obsequios en mi cumpleaños, son muy bondadosos y cariñosos ,ya dos de ellos ya no estan conmigo, (Alicia y Carlos) siempre estarán en mis recuerdos más preciados, a mis tíos (Carlos, Sergio y Jorge) y tías (Paty,Guadalupe, Yoli, Rosi, Chata y Adriana) por los viajes que me dispararon, por prestarme el microscopio, por ser responsables y trabajadores y pos su cariño, a todos mis primos los de aquí (Edgar, Andrés y Pablo) y los de Chiapas (Roque, Carlos y José).

A mi Tía Adriana por darme tanto apoyo incondicional en la tesis y en mi vida.

A Walleska Sarai, por todo su amor y apoyarme tanto en la realización de éste trabajo, por compartir tantos momentos juntos y estar a mi lado te quiero mucho y cuentas conmigo, también a su familia por abrirme las puertas de su casa y por su confianza.

A Dios o la energía del universo. Por la existencia de los planetas y todo lo que es posible estudiarlo y admirarlo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México de nuevo por ser grande y espero que luche por su autonomía para siempre y por siempre.

A los buenos profesores por enseñarme a razonar, darme herramientas para pensar y formar mi propio criterio. Gracias a cada uno de ellos, a mi asesora de tesis, a Oscar Rendon por sus clases de alto nivel académico, al Dr Francisco por enseñarme corrosión, al Dr. Carlos González por sus buenas clases de Termodinámica, al Maestro Huerta porque es de los pocos que vincula la Universidad con el ámbito laboral.

A mis amigos por aportar tanto en mi persona y estar presentes algunos por mucho tiempo a los compañeros de carrera. Andrés, Rodrigo, Miguelon, Monky, Manuel, Juanito, Giovanna, Mau, Eduardo, Diana, Verónica, Jerry y Diego. A los de primer semestre Job, Isaac, Ricardo, Pancho, Eli, Ernesto, Alma, Pedrito, Anely, Vania a todos los del CUC en especial a Ulises y Marrio, a mis buenos amigos de la preparatoria y secundaria, Enrique, David, Lic, Juan Pablo, al buen Bono por ser tan chevere, Jordi, Ana, Nely, mi tocayo, Pablo, Julito, Ingrid, Nora y a muchos más espero les vaya muy bien y gracias por todo.

Y por último pero no menos importante a mis mascotas, (Max, Tequila, Balam, Lola, Baco), sobre todo al Max y Junior por “tener todas las cualidades de los humanos pero sin sus defectos”.

Índice

Introducción.....	3
CAPÍTULO I ANTECEDENTES.....	5
1.1 Prospectivas de México para el desarrollo económico y tecnológico en el sector petrolero.....	5
1.1.1 Situación de México en aguas profundas.....	11
1.2 Descripción del medio ambiente oceánico.....	14
1.2.1 Movimiento oceánico.....	15
1.2.2 Movimiento vertical de los constituyentes (Modelo simple de la doble capa para los océanos).....	18
1.2.3 Transferencia de gases y oxígeno disuelto.....	21
1.3 Corrosión.....	24
1.3.1 Tipos de corrosión.....	27
1.3.2 Evaluación del fenómeno de corrosión, por pérdida de peso.....	28
1.3.3 Corrosión en ambientes marinos.....	32
1.3.4 Factores que afectan la corrosividad en el agua de mar.....	32
CAPÍTULO II. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.....	44
2.1 Diseño del recipiente a presión.....	44
2.1.1 Requerimientos generales para la fabricación de recipientes a presión.....	45
2.1.2 Diseño del sistema para operar el recipiente de alta presión.....	56
2.2 Proceso de fabricación del recipiente a presión.....	58
2.2.1 Maquinado del cuerpo del recipiente a presión.....	60
2.2.2 Maquinado de la brida.....	62

2.2.3 Maquinado de los soportes para electrodos de trabajo.	64
2.2.4 Instalación de los aditamentos del sistema.	66
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	69
3.1 Pruebas preliminares del recipiente a presión para determinar las condiciones experimentales	69
3.2 Maquinado de las muestras de acero API X52.....	70
3.3 Caracterización metalúrgica del sustrato.....	71
3.4 Técnica de pérdida de peso (gravimetría).	71
3.5 Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).	75
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
4.1 Caracterización metalúrgica del material de prueba API-X52.	78
4.2 Técnica de pérdida de peso.	82
4.3 Microscopio electrónico de barrido.	86
CONCLUSIONES.	90
RECOMENDACIONES.....	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
APÉNDICE	96

Introducción.

Los hidrocarburos representan una parte fundamental en la economía de un país. En México, la explotación de los yacimientos ha sido tal, que en los últimos años se ha presentado la necesidad de explorar nuevos yacimientos. Se sabe por ejemplo, que en la extracción de hidrocarburos se obtiene un mayor beneficio proveniente de pozos petroleros que se encuentran a 200 m de profundidad; y para un futuro no muy lejano se obtendrá mayor beneficio de pozos de aguas profundas, cuya profundidad considera Pemex a partir de 500 m, como por ejemplo el Tamil-1 a una profundidad de 660m, el cual empezaría a producir crudo para el 2015. (4)

El estudio que compete a este trabajo será dirigido a evaluar el efecto que tiene la presión hidrostática en la velocidad de corrosión, partiendo de un acero API X52 comúnmente utilizado en ductos petroleros de PEMEX. Tomando en cuenta que los factores que afectan a la velocidad de corrosión en un ducto en condiciones de aguas profundas, son amplios, se tomará principalmente uno de ellos que es la presión hidrostática, siendo actualmente según la bibliografía (21, 23) un parámetro poco estudiado; por consiguiente se espera que este trabajo sea una herramienta para emprender una serie de investigaciones teórico-prácticas, respecto al tema.

Para este estudio se diseñó y construyó una celda electroquímica, que permitió simular condiciones semejantes a las características de aguas poco profundas de más de 250 m de profundidad. Además se evaluó el efecto de la presión hidrostática sobre la velocidad de corrosión a través de pruebas de gravimetría.

Se realizaron tres ensayos de pérdida de peso conforme las normas ASTM G1 y ASTM G31 (30,31), conservando las siguientes presiones hidrostáticas: presión atmosférica de la ciudad de México 0.77 atm, presión hidrostática a 14.3 atm (210 lb/in²) que equivalen a 140 m de profundidad sobre el nivel del mar y a 25

atm (370 lb/in^2) que son equivalentes a una profundidad de 250 m sobre el nivel del mar.

Como complemento se analizaron las muestras utilizando un microscopio electrónico de barrido para corroborar los daños de corrosión que sufrieran las muestras.

Objetivos.

- Diseñar y construir un equipo de bajo costo que permita realizar estudios de corrosión en condiciones de aguas profundas a través de técnicas gravimétricas (pérdida de peso) y electroquímicas, así como la variación de parámetros como la presión hidrostática.
- Evaluar el efecto de la presión hidrostática sobre la velocidad de corrosión en un acero API X52 por medio de la técnica de gravimetría (pérdida de peso) a temperatura constante de $6^\circ \text{ C} \pm 1^\circ \text{ C}$ y una composición de 3.5 % NaCl.

Hipótesis.

El equipo que será diseñado y construido en el laboratorio, se espera soporte presiones hidrostáticas de más de 10 atmosferas, equivalentes a 100 lb/in^2 , lo cual equivaldría a una profundidad de 100 m bajo el nivel del mar; asimismo, con el equipo se podrán realizar pruebas gravimétricas (pérdida de peso) y pruebas electroquímicas.

CAPÍTULO I ANTECEDENTES

1.1 Prospectivas de México para el desarrollo económico y tecnológico en el sector petrolero. (1-5)

Los sectores económicos que continuarán mostrando un dinamismo en nuestro país durante los próximos 20 años serán: el energético, el de la construcción, el automotriz, los relacionados con maquiladoras, telecomunicaciones, servicios financieros, turismo y el comercio; así como las tecnologías de desarrollo de infraestructura continuarán siendo un elemento clave en el crecimiento económico de las empresas y del país.

México requiere impulsar el desarrollo y la especialización de actividades susceptibles de generar tecnologías que sean cada vez más competitivas a nivel internacional, esto se logrará solo si se toman factores de relevancia a nivel mundial como el ahorro de energía y que sean amigables con el medio ambiente. El actual crecimiento de la economía mundial demanda el uso de cada vez más cantidad de energía, siendo la fuente principal los hidrocarburos, ya que cubre aproximadamente 70% del consumo mundial. Los hidrocarburos seguirán siendo la principal fuente de energía para el transporte y la industria en los próximos años. (1)

Actualmente las reservas de crudo en México y el mundo se encuentran en periodo de declinación, esto quiere decir que el tiempo que queda de suministro energético de petróleo es muy corto. México tiene el compromiso de tener un incremento de reservas naturales mediante el descubrimiento de nuevos yacimientos y mejoramiento de los campos existentes; de hecho los países con un alto grado de desarrollo humano como China, Estados Unidos, Reino Unido y actualmente países como la India, Brasil y Noruega, han puesto inversiones altas en la investigación y desarrollo tecnológico para la obtención de hidrocarburos que se obtienen en aguas profundas, teniendo resultados

favorables para la economía de sus países. En fechas recientes la producción mundial de barriles al día es de aproximadamente seis millones y sigue en crecimiento. (2)

En México el consumo final de energía muestra una ascendencia continua, con una tasa media de crecimiento anual del 6%, por lo menos en los próximos 20 años la producción de petróleo tendrá que ser fructífera y crear un Producto Interno Bruto (PIB) cada vez mayor. Tal y como se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. PIB vs consumo final de energía. (Prospectivas de la investigación y el desarrollo tecnológico del sector petrolero al año 2025). (1)

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2000-2025 Tmca**
PIB (MMP de 1993)	1.231	1.583	2.038	2.771	3.719	5.067	6.855	6.0%
Consumo de energía*	3.302	3.675	4.527	5.630	6.983	8.477	10.191	4.1

- *No incluye consumo de coque, bagazo y leña. Contempla consumo de gas para petroquímica como combustible. MMP = Miles de millones de pesos.

- **Tmca. Tasa media de crecimiento anual

Para alcanzar el consumo de energía que exigirá la población y obtener el crecimiento del PIB nacional, se requerirá de una inversión grande en la refinación de estos energéticos para poder competir con países más desarrollados y así asegurarse de cumplir con el crecimiento económico del país.

En México, la mayor parte de la inversión se encuentra en la exploración y la explotación (tabla 2), mientras que a la refinación sólo se le otorga el 6.7 %. Si los mayores beneficios se obtienen de la transformación industrial de estos hidrocarburos, entonces es necesaria una mayor inversión hacia este sector, sin descuidar la exploración de nuevos yacimientos, para que el desarrollo tecnológico vaya de la mano con un desarrollo económico en nuestro país.

Tabla 2. Distribución del presupuesto de programas y proyectos de Inversión, en miles de millones de pesos (El petróleo de México la disputa del futuro, 2010). (4)

Pemex Exploración y Producción	2787	90.50%
Pemex Refinación	205	6.70%
Pemex Gas y Petroquímica Básica	41	1.30%
Pemex Petroquímica	43	1.40%
Pemex Corporativo	5	0.20%
Total	3081	100%

Reservas Totales de Petróleo Crudo (2)

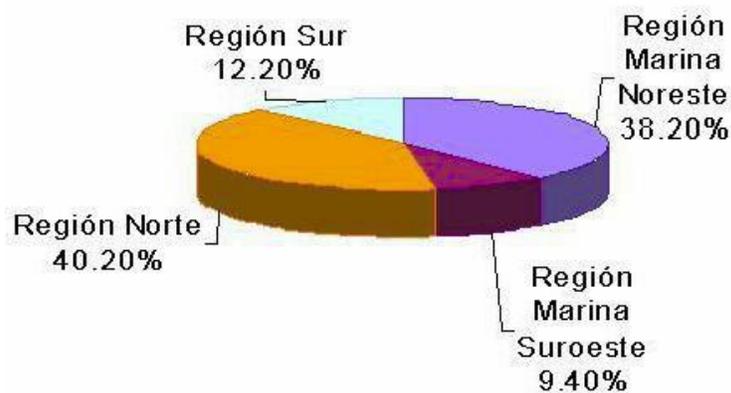


Figura 1. Reservas totales de petróleo crudo (Greenpeace hoja informativa, Agosto 2010). (5)

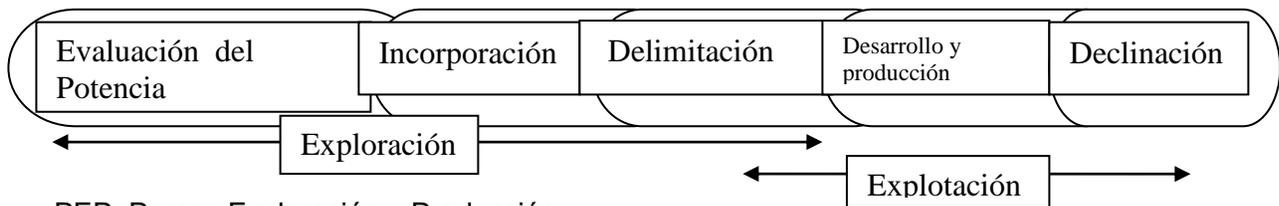
En la figura 1, se aprecian las localidades donde existe la mayor parte de las reservas naturales e hidrocarburos y estas se localizan en el Golfo de México, a profundidades de un tirante de agua entre 91.4 a 200 m de profundidad, sin embargo en un corto periodo de tiempo la mayor producción se obtendrá de pozos entre 450 m hasta 2500 m. (4)

El petróleo tiene dos componentes básicos: el crudo o aceite, que es la parte líquida tal y como existe en la naturaleza; y el gas natural, que es la parte gaseosa. Las características que presenta México según su tipo de región (figura 1), favorecen la formación de hidrocarburos generados principalmente por las fallas geológicas que existen en nuestro país. Una vez que se genera crudo, al paso del tiempo o con mayor temperatura se convierten en gas y con más tiempo en carbón. Para la obtención de los hidrocarburos es necesario un proyecto de inversión y dentro de este desarrollo se toman en cuenta dos grandes etapas: la primera es la parte exploratoria y la segunda el área de producción.

Para comprender de un modo práctico y sin tocar a fondo cómo es la vida de un pozo desde el principio hasta su declinación, en la figura 2 se ilustran estos pasos. Básicamente se divide en dos puntos importantes: exploración y explotación. La exploración es el segmento en donde existen inversiones altas, se podría decir que son los gastos que se tienen que hacer para posteriormente introducirse en la parte de explotación, que es en donde se recuperan las inversiones y se obtienen ganancias económicas, cada una es dependiente, es decir que una buena evaluación de campos y un buen desarrollo de estos mismos es fundamental para obtener la recuperación de hidrocarburos, esta última es asistida por una caracterización computarizada.

Una exploración eficaz podrá mostrar las zonas con alto potencial, actualmente se requiere de una combinación entre varias técnicas y modelados geológicos

que faciliten y cumplan con el cometido de encontrar nuevas reservas naturales, ya que éstas cada vez se encuentran en terrenos más difíciles de estudiar, como lo son las aguas profundas. Dentro de la exploración se realiza la evaluación de ese potencial, la evaluación permite dar información útil en el plano técnico e ingenieril, así como revelación de datos económicos, posteriormente viene el periodo de incorporación de reservas, que incluye estudios de prevención. La tercera etapa es la caracterización inicial y delimitación, esta última ya requiere perforaciones para ver hasta dónde llega un posible yacimiento. Después vienen sucesivamente las etapas de desarrollo y de producción, en ellas, como se mencionó anteriormente, se obtiene una recuperación económica y algunos lo consideran como el inicio del ciclo de vida de un yacimiento petrolero. Finalmente, la etapa de declinación y abandono, aquí es donde termina el ciclo de vida de un pozo.



PEP: Pemex Exploración y Producción.

Figura 2. Ciclo de vida (*PEP el petróleo de México la disputa del futuro 2010*). (4)

Es por ello que se requiere de conocimientos y tecnología avanzada, para la exploración. Una de las investigaciones más importantes en los últimos años, por ejemplo, es en fechas recientes cuando Pemex anuncia la celebración de un contrato por cinco años de 463.5 millones de dólares para realizar exploraciones de sísmica tridimensional en un área de 75 mil kilómetros cuadrados en el Golfo de México, con la empresa CGG Veritas Services de México". (2)

Estas inversiones tendrán que ser recuperadas en la producción y para que exista una producción se tienen que seguir los pasos del ciclo de vida del pozo; asimismo, para la parte de producción se sabe que para que comiencen a

producir se necesita inyectar fluidos que hagan que se acumule presión, para que así sea más fácil la extracción de estos hidrocarburos; la inyección de estos fluidos tendrá que ser en el lugar, tiempo y volumen correctos. Este es un ejemplo de muchos de la nueva ingeniería y técnica que se está aplicando para obtener hidrocarburos, en la figura 3 se puede apreciar como se ha ido desarrollando la ingeniería de extracción de hidrocarburos, cada vez a mayores profundidades.

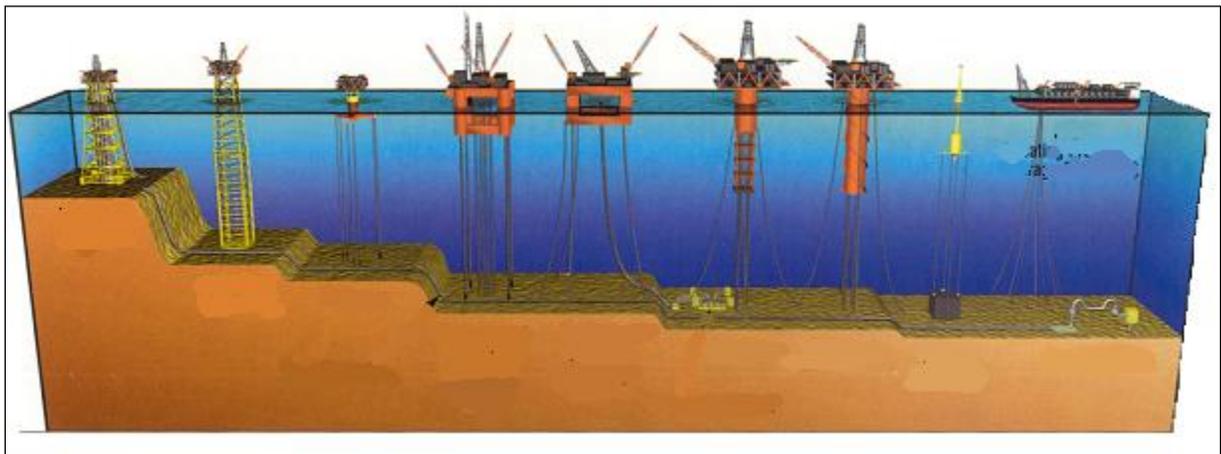


Figura 3. Avance tecnológico en la extracción de hidrocarburos a diferentes profundidades (*presentación, 2005*) ⁽³⁴⁾

La exploración y explotación a nivel mundial y nacional son de gran relevancia, existen inversiones de capital alto en el mundo; en el caso de México, también se han hecho inversiones, sobre todo en la extracción de éstos. Actualmente están enfocadas hacia la extracción de hidrocarburos en aguas profundas, por lo que se tiene contemplado que se dificultarán los procedimientos y como consecuencia, los precios por barril de petróleo se incrementarán. Por ejemplo, la extracción de petróleo que en tierra puede costar un promedio de entre tres y seis dólares por barril, en aguas profundas puede llegar hasta los 50 dólares y tal vez más. El siguiente punto muestra de una manera resumida la situación de México en aguas profundas.

1.1.1 Situación de México en aguas profundas (2, 4, 7, 35)

Se basan las esperanzas de activar la economía y de encontrar nuevas fuentes de hidrocarburos en los nuevos yacimientos petroleros en aguas profundas, las cuales, de acuerdo a PEMEX, se ubican a partir de los 500 metros de tirante de agua (línea roja) desde la superficie hasta el lecho marino; Después de los 1500 metros de profundidad son conocidas como aguas ultraprofundas, esta división se observa en la figura 4.

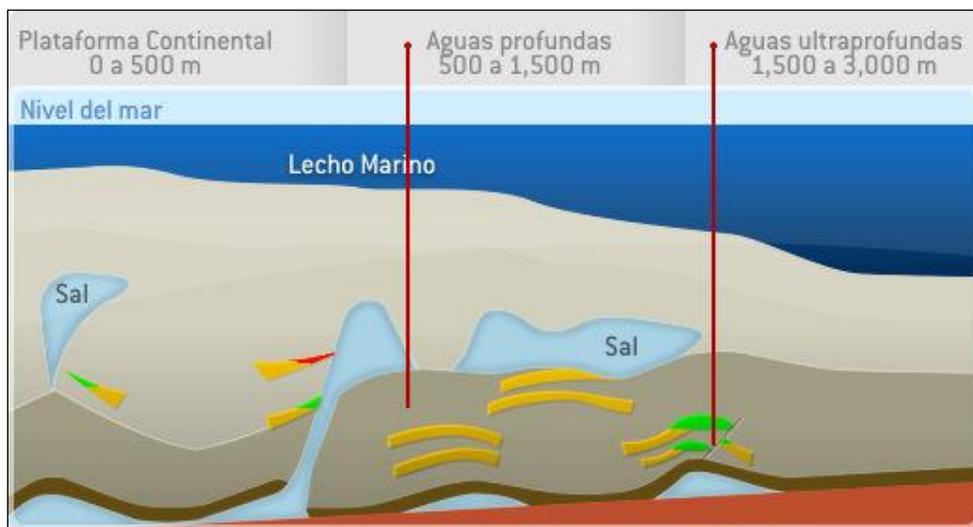


Figura 4. Tirante de agua entre la superficie y el lecho marino. (PEMEX, Aguas profundas, 2008) (35)

Ahora bien, el área marítima donde es probable que se encuentre la mayor cantidad de hidrocarburos para México es en el Golfo de México, cuya longitud es de 575,000 kilómetros cuadrados (Figura 5).

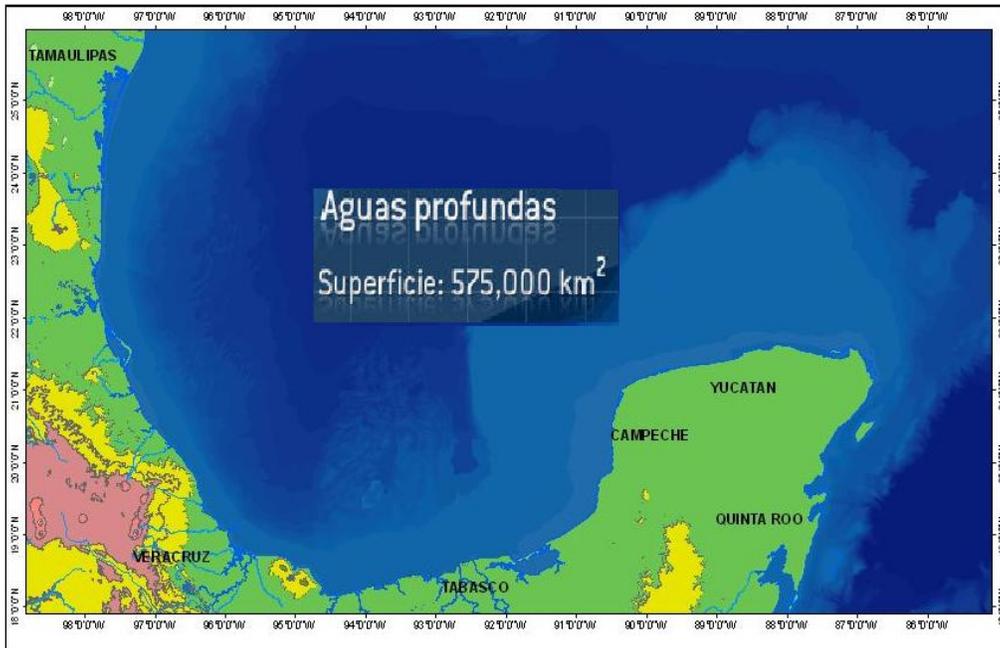


Figura 5. Área del Golfo de México (35,7)

En este lugar se cuenta con un territorio amplio, donde los recursos calculados en aguas profundas son de 30 mil millones de barriles, no obstante, una de las últimas noticias escritas por el investigador Fabio Barbosa de la UNAM, menciona que “PEMEX tiene identificados recursos prospectivos en aguas profundas del Golfo de México del orden de 29 mil 500 millones de barriles de petróleo crudo equivalente (pce). Entre 2004 y 2010 la paraestatal ha perforado 14 pozos exploratorios, con un porcentaje de éxito de 20 por ciento, y reservas por 500 millones de barriles de (pce).” (2)

Lo que indica un porcentaje de éxito pequeño, sin embargo, la experiencia que ha tenido estados Unidos, específicamente en la zona denominada Cinturón Plegado Perdido localizada al norte del Golfo de México, (colindante con aguas mexicanas), el porcentaje de éxito ha sido del 63%, de 19 pozos explorados, 12 tienen potencial de ser explotados.

México tiene cinco bloques detectados, ninguno en producción, ninguno en desarrollo; la mayoría de ellos se encuentra en la Zona profunda de Coatzacoalcos. En la tabla 3, se muestran datos sobre estos pozos, así como sus nombres y la profundidad a la cual se encuentran.

Tabla 3. Pozos explorados en aguas profundas. (PEMEX, Aguas profundas, 2008)⁽³⁵⁾

Año	2004	2004	2006	2007	2007	2008
Pozos	Chukta-201	Nab-1	Noxal-1	Lackach1	Lalall-1	Tamil- 1
Tirante (metros)	513	679	936	988	806	666
Profundidad (m)	4,901	4,050	3,640	3,813	3,815	-
Prueba de Producción	Improductivo	1,178BP D	9.5 MMPCD	25- 30MMPCD	18MM PCD	-
Reservas totales	-	32.6 MMBPCE	0.42 MMMM PC	1.3 MMMM PC	0.71 MMM M PC	-

BPD: Barriles por día; MMPCD: Millones de pies cúbicos al día; MMBPCE: Millones de petróleo crudo equivalente; MMMPC: Millones de millones de pies cúbicos.; MMMMPC: Billones de pies cúbicos; Tirante de agua: Superficie del mar que incluye desde la superficie marina hasta hacer contacto con el lecho marino, esto haciendo una línea imaginaria.

En la tabla anterior se observa que estos pozos se localizan en aguas profundas, variando aproximadamente de 500 m a 1000 m de tirante de agua a partir de la superficie, el pozo Tamil-1 estará terminado a principios del año 2012 y se espera que entre en operación este mismo año ⁽⁴⁾, pero por el momento PEMEX no tiene producción en aguas profundas.

Tal como lo propone el director de (PEP), Carlos Morales Gil, destacó que lo que se debe hacer es “diseñar un proyecto conjunto que incluya ingeniería, etapas de inversión, procesos de desarrollo de exploratorio y procesos de desarrollo de extracción” (2), para de esta manera obtener un buen desempeño en producción de aguas profundas. Carlos Morales Gil, también habla de la importancia de tratar los pozos transfronterizos entre México y Estados Unidos, estableciendo un tratado bilateral que defina un marco legal, y generando acuerdos para determinar todos los aspectos técnicos con base en este marco legal.

Por otro lado, las dificultades que implica perforar a grandes profundidades significan enfrentar bajas temperaturas que dificultan la extracción de hidrocarburos, enormes presiones y corrientes desconocidas, un ambiente donde la fatiga de estructuras y materiales por vibración y frío debe ser premisa fundamental para evitar accidentes. Por ello, se tiene que conocer las condiciones que existen en aguas profundas, las cuales a continuación se mencionan.

1.2 Descripción del medio ambiente oceánico. (6,8,9)

El océano comprende una gran parte de nuestro planeta; entre la atmósfera y el mar interviene transporte de masa, momentum y energía; cada uno de estos procesos es un sistema vasto y complejo que requiere de modelos, análisis numérico y de diversos investigadores y especialistas en ciencias del mar, con diversas ramas que se desprendan para la comprensión del océano.

La intención de este apartado es dar un panorama básico de las propiedades que poseen los océanos y la variabilidad natural de estas mismas, esto servirá, desde un punto de vista ingenieril, para el diseño del reactor y también la comprensión básica de cuál es el origen de la variabilidad natural y predecir a grandes rasgos el comportamiento ambiental, en caso de que fuera requerido,

en este caso, a profundidades diferentes en los océanos, que es y será de gran relevancia, sobre todo en la creación de infraestructuras submarinas y marinas.

1.2.1 Movimiento oceánico. (6,7,9,19)

El sistema oceánico consta de flujos continuos que varían dependiendo del tiempo y de las posiciones geográficas, cada cambio se ha estudiado e inclusive se puede pronosticar; estos flujos permiten el intercambio de masa, calor, sales y oxígeno. La principal fuente de energía es el Sol, al llegar a la atmósfera se producen cambios de temperatura y estos originan vientos, los cuales al deslizarse en la superficie marina originan corrientes, éstas sumadas a las corrientes existentes por cambio de densidad en el mar originan las corrientes marinas.

La circulación principalmente es resultado de la convección, es decir, que se produce por diferencias de densidad, en la que las masas más densas tienden a hundirse y las menos densas a ascender. La densidad depende de la temperatura y de la salinidad, si aumenta la temperatura, la densidad disminuye, y si aumenta la salinidad la densidad crece. Estos cambios dan lugar a un movimiento termohalina, es decir, el agua más densa tiende a descender provocando el afloramiento de agua más profunda y más fría, a esto metafóricamente hablando se le llama cinta transportadora oceánica (Figura 6).

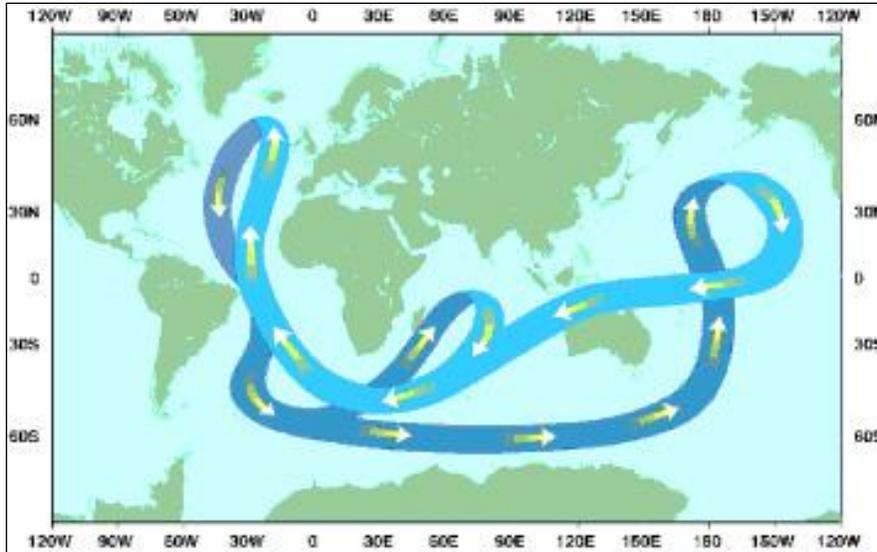


Figura 6. Circulación termohalina global (Tesis soluciones aguas profundas, 2009) (7)

Esta circulación tiene su origen en Groenlandia, donde el agua es fría y salada, esto hace que tienda a hundirse. Esta corriente circula el océano Atlántico de norte a sur, hasta que entra en contacto con las frías aguas del océano Antártico, donde asciende; parte de esta corriente regresa a su lugar de origen y la otra parte continúa su recorrido para volver a descender en el océano Índico, y de allí continúa hasta llegar al océano pacífico, donde definitivamente asciende debido a las condiciones de agua cálida.

En el Golfo de México (Figura 7), las corrientes marinas cálidas y salinas entran por el canal de Yucatán y finalmente salen a través del Estrecho de Florida, durante este transcurso tienden a formarse remolinos que se mueven en sentido de las manecillas del reloj, el resto del agua, antes de entrar al golfo, se mueve hacia el noreste de Florida, formando curvas cerradas con dirección norte sur de su eje, los remolinos o anillos que se forman alcanzan una profundidad de hasta 1200 m y llegan a velocidades de hasta 7.4 km/h.

La importancia de conocer las corrientes marinas puede ser útil en las instalaciones para la explotación de hidrocarburos, ya que éstas sin duda afectan el comportamiento de los materiales, asimismo es importante para comprender las variaciones de propiedades como la temperatura, oxígeno disuelto, salinidad y organismos biológicos, ya que éstas tienen dependencia directa con el movimiento oceánico y una comprensión de estos fenómenos será una herramienta útil para el diseño de estructuras submarinas y así evitar fallas de materiales en la extracción de hidrocarburos. Más adelante se presenta el efecto de las condiciones naturales al fenómeno de corrosión.

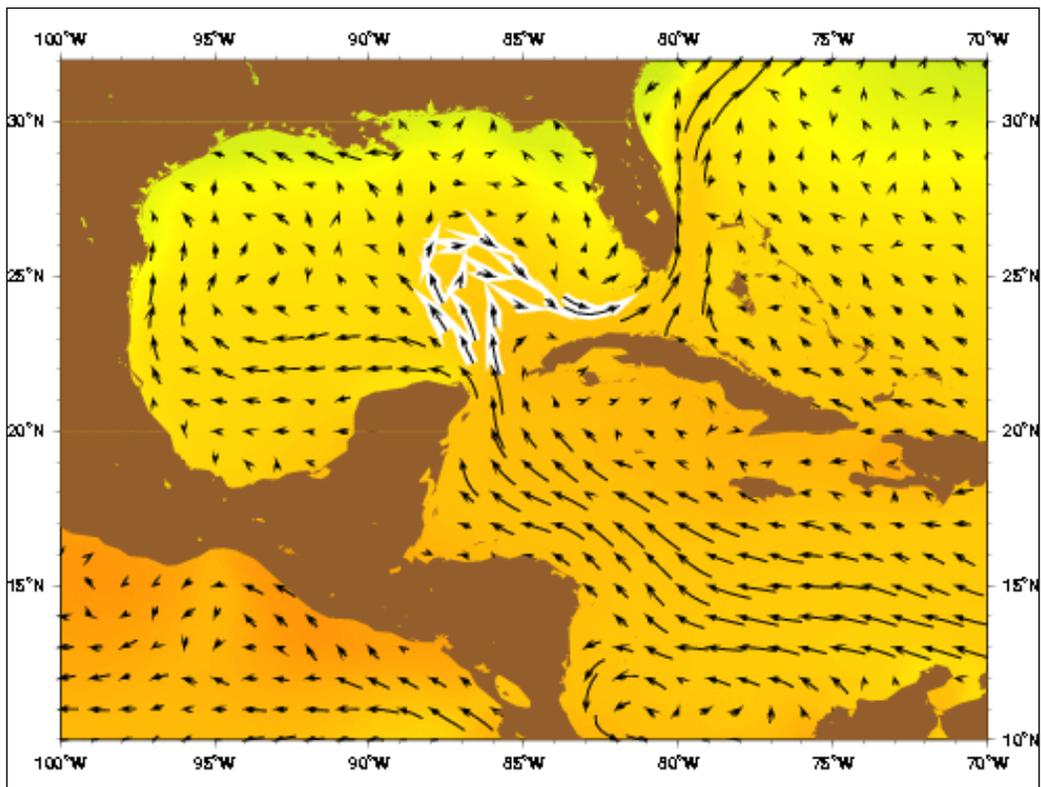


Figura 7. Corrientes Marinas en el Golfo de México (Tesis soluciones aguas profundas, 2009) (7)

1.2.2 Movimiento vertical de los constituyentes (Modelo simple de la doble capa para los océanos). (6,18)

Este modelo del océano lo considera como un sistema completo en estado estacionario, esto quiere decir que la concentración de disolventes en el océano no varía con el tiempo, como se señala en la ecuación 1.

$$\textit{Estado estacionario} = \frac{\text{masa total de sustancias disueltas en los oceanos}}{\text{velocidad de eliminación de las sustancias}} \quad (1)$$

Se considera que la conservación de los constituyentes en un punto determinado puede durar hasta 10^5 años. Así se entiende que las propiedades son independientes del tiempo, estado estacionario, (ecuación 1).

El modelo descrito en este punto servirá para simplificar el movimiento natural del mar de una manera vertical, por ello, se toman algunas consideraciones como son: los constituyentes disueltos solo se añaden de ríos y lagos, el único camino en que estos disolventes se remuevan del océano es por las partículas que caen en el piso del agua de mar y por la evaporación del ciclo natural. (18)

Sin duda el modelo simplifica la complejidad del océano, en cuanto a la movilidad de componentes de manera vertical. Toda la profundidad del océano se toma como un sistema de dos capas, una superior de mayor temperatura, que oscila entre los 100 y 200 metros de profundidad, y una inferior de menor temperatura y de mayor volumen, que oscila entre los 500 y 1000 metros. La figura 8 muestra un esquema del modelo de la doble capa.

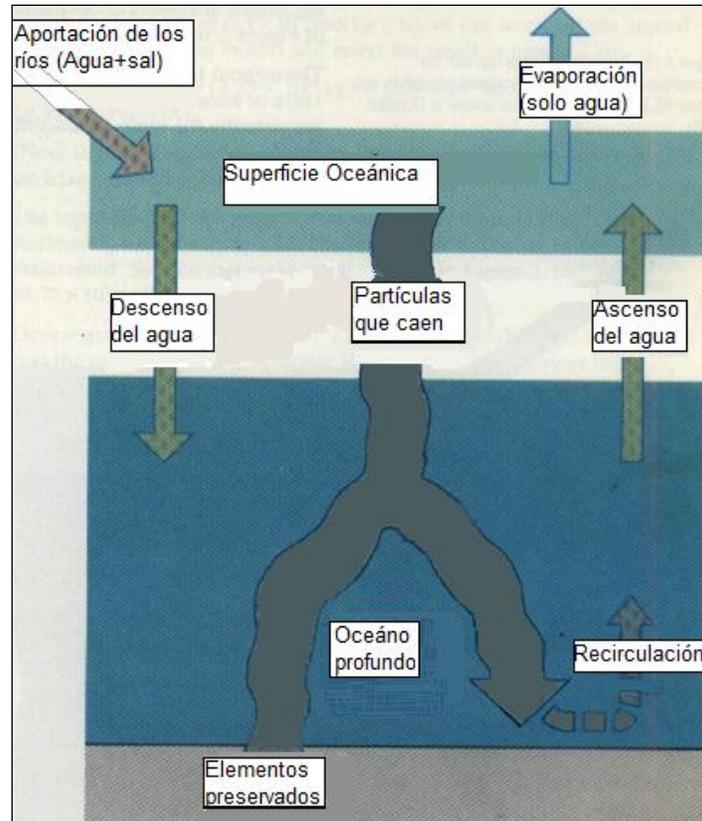


Figura 8. Esquema del movimiento vertical en agua de mar (*Ocean chemistry and deep sea sediments, 1994*)₍₁₈₎

En ella se observa un sistema, una entrada proveniente de ríos, la cual traslada consigo nuevos elementos. Como el océano permanece estable, una cantidad de agua igual a la que entra se evapora, también algunos de los elementos que transporta el agua se mezclan con los del océano y otra parte se aloja en los sedimentos, así el material de la superficie del océano empieza a caer por el efecto de la gravedad y las partículas llegan hasta el sedimento, tanto la caja inferior como la superior mantienen el mismo volumen de agua, esto se logra por la recirculación que existe, mientras el agua se mueve hacia abajo existe también agua y partículas que se mueven hacia la caja superior, estas líneas de flujo se encuentran en la figura 8; en general coexisten diversas concentraciones biológicas entre la parte superior e inferior, las cuales están en constante intercambio, debido a los múltiples flujos que se presentan.

Para calcular la entrada y salida de cualquier sal, se hace un balance entre la entrada de ríos, esto tiene que ser igual a lo que sale e igual a lo preservado en sedimentos para que se cumpla con el estado estacionario, por ejemplo, se tiene el siguiente dato de entrada $3.75 \cdot 10^{16}$ kg de agua de ríos y lagos, esto es igual a lo que se evapora, y para saber la cantidad de las sales disueltas, se tiene que la concentración de fosfato en ríos es aproximadamente $0.5 \cdot 10^{-6}$ mol PO_4^{3-} , para saber la entrada de esta sal se hace la siguiente operación: $(3.75 \cdot 10^{16} \text{ Kg}) \times (0.5 \cdot 10^{-6} \text{ mol PO}_4^{3-} \text{ Kg}^{-1}) = 18.75 \cdot 10^9 \text{ mol PO}_4^{3-}$, estos moles de fosfato tienen que ser igual en los sedimentos, sin embargo no son iguales en la superficie y en la profundidad del océano, ya que en la profundidad son mayores, se tienen los siguientes datos $0.1 \cdot 10^{-6}$ mol $\text{PO}_4^{3-} \text{ Kg}^{-1}$ y $2.5 \cdot 10^{-6}$ mol $\text{PO}_4^{3-} \text{ Kg}^{-1}$ respectivamente. Los flujos en descenso y ascenso de agua también son iguales.

Según los oceanógrafos, usando el método de carbono 14, se tiene que estos son 20 veces la entrada de ríos ($3.75 \cdot 10^{16}$ Kg), si se hace la operación correspondiente se tiene que son de $7.5 \cdot 10^{17}$ Kg de agua. La operación con las sales correspondientes de fosfato en el descenso de agua correspondería a lo siguiente: $(7.5 \cdot 10^{17} \text{ Kg}) \times (0.1 \cdot 10^{-6} \text{ mol PO}_4^{3-} \text{ Kg}^{-1}) = 75 \cdot 10^9 \text{ mol PO}_4^{3-}$ y en el ascenso se hace la misma operación, solo que con $2.5 \cdot 10^{-6}$ mol $\text{PO}_4^{3-} \text{ Kg}^{-1}$, de esta manera se obtiene un balance global de la sal y la cantidad cuantitativa que corresponde en cada flujo, en esto radica la importancia del modelo. Este es un ejemplo de cómo interactúan los flujos en el océano y cómo varían con la profundidad, en posteriores puntos se muestra esta movilidad de propiedades a diversas profundidades que serán útiles para el diseño del reactor y para simular las condiciones a diferentes profundidades.

1.2.3 Transferencia de gases y oxígeno disuelto. (9,18)

Los gases se transfieren por flux entre la fase de gas-agua por difusión molecular, básicamente la mayor solubilidad de los gases se da a mayor agitación y presión, y a menor temperatura. La presión, concentración y temperatura son propiedades intensivas, lo que quiere decir que no varían con la extensión del sistema y no son dependientes, sin embargo, la agitación es dependiente de la velocidad del viento, tormentas, huracanes, entre otras. Para una mejor comprensión de lo que ocurre, se tiene una ola, entre la interfaz aire-agua se pueden observar las burbujas que se forman, estos son los gases, principalmente: nitrógeno, oxígeno, argón y dióxido de carbono, que se encuentran en el aire en ese orden de predominancia, éstos entran en contacto con el agua de mar formando burbujas que se sumergen, y entre más se sumerjan, hay mayor presión hidrostática, lo que favorece la solubilidad, así que las burbujas desaparecerán disolviéndose en el medio.

La figura 9 muestra el comportamiento del oxígeno disuelto supersaturado en la superficie de los océanos, se presenta la curva de saturación del oxígeno (línea negra en ml/L) y la suma de las concentraciones del oxígeno disuelto en la superficie del océano (puntos azules).

La temperatura interviene en la concentración de oxígeno disuelto, como se puede observar: La tendencia que tiene es que a menor temperatura existe mayor oxígeno disuelto, principalmente el oxígeno proviene de la atmósfera y de la fotosíntesis del fitoplancton, esto hace que la concentración de oxígeno esté supersaturada. A mayor temperatura también existe mayor cantidad de plancton, sin embargo existe mayor número de respiraciones por unidad de tiempo que consumen el oxígeno por lo que la cantidad de oxígeno disuelto a temperaturas altas baja.

Para saber cómo varía el oxígeno verticalmente; se parte del conocimiento del modelo de la doble capa, presentado en el apartado anterior, las masas se transportan de la superficie al fondo y del fondo a la superficie, las masas de agua profunda formadas en la superficie en latitudes altas son más ricas en oxígeno disuelto por las condiciones de baja temperatura encontradas en la superficie, el oxígeno es usado en la descomposición y respiración de los organismos vivos y ésta alcanza un máximo aproximadamente a 1 km de profundidad, donde hay una concentración mínima de oxígeno, no obstante, incluso de las aguas más viejas del fondo, el oxígeno disuelto rara vez cae por debajo de 3 ml/L esto para aguas abiertas, pero en una zona geográfica cercana a la plataforma continental, en aguas poco profundas, alrededor de 200 m, se tiene un mínimo de oxígeno disuelto que se aproxima a cero, estas condiciones son importantes, ya que en plataformas continentales es de donde se extraen los hidrocarburos y gas natural.

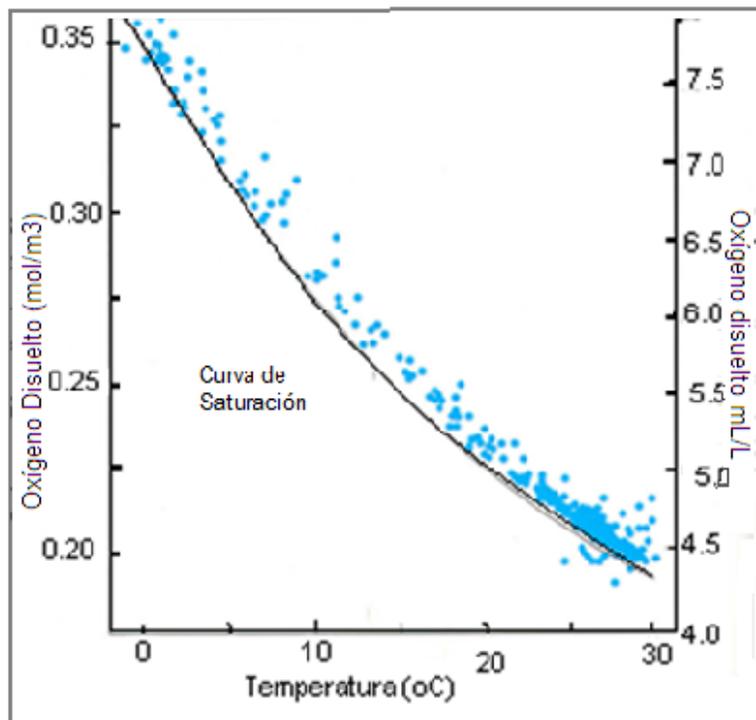


Figura 9. Curva de saturación de oxígeno disuelto vs temperatura (Ocean Chemistry and deep sea sediments, 1994) ⁽¹⁸⁾

En la figura 10 se aprecian los perfiles de oxígeno disuelto para tres localidades, dos zonas a diferentes latitudes en la zona oriental del Pacífico Tropical y una en el Antártico.

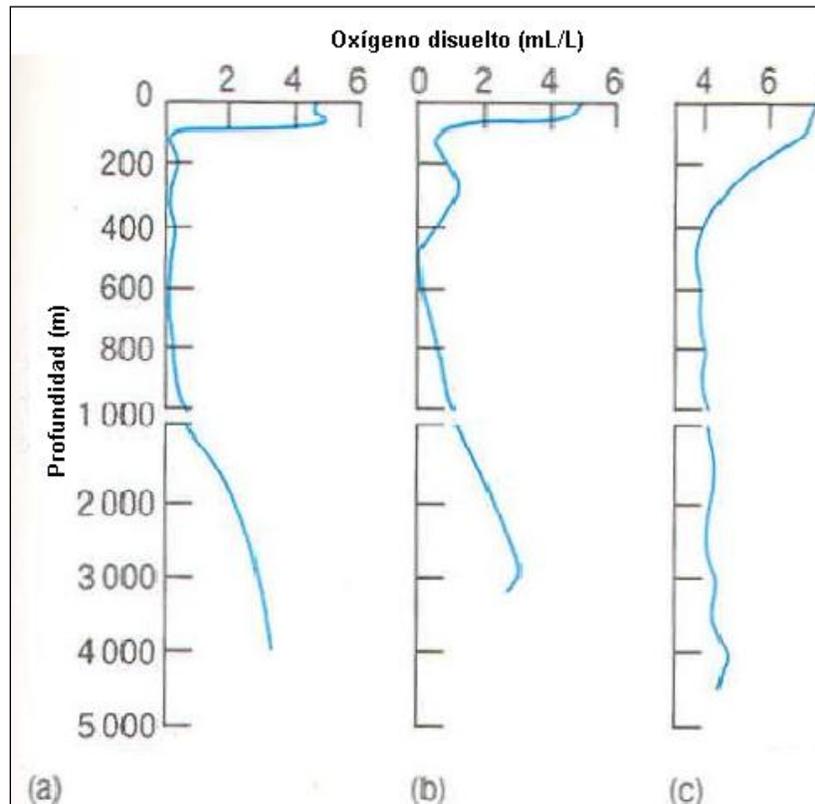


Figura 10. Perfiles en tres locaciones: a) zona oriental del Pacífico tropical ($11^{\circ}39'N$, $114^{\circ}15'O$); b) zona oriental del Pacífico tropical ($6^{\circ}21'N$, $103^{\circ}42'O$); c) Océano Antártico ($50^{\circ}08'S$, $35^{\circ}49'O$). (*Ocean chemistry and Deep sea sediments*, 1994) ⁽¹⁸⁾

En (a) y en (b) se han desarrollado condiciones sub-oxigenadas, las zonas de baja temperatura tienen mayor oxígeno disuelto en la superficie y se expande hasta aguas profundas, en zonas tropicales hay bajas concentraciones de O_2 y a partir de 200 m de profundidad se pueden considerar zonas de muy baja concentración de oxígeno.

1.3 Corrosión. (14-17, 23, 24, 27, 36)

Existe una gran variedad de bibliografía que describe el fenómeno de corrosión en diferentes ambientes, los diferentes tipos de corrosión, la importancia que tiene el estudio de la corrosión y los diversos efectos que tiene ésta en la actualidad, principalmente en la prevención de fallas y de pérdidas económicas. El propósito de este apartado es englobar los aspectos teóricos más importantes y por lo tanto invariables.

La corrosión puede ser visible o no, pero en todos los casos causa deterioros en las propiedades físicas, es un fenómeno natural que ha sido estudiado ampliamente desde hace tiempo. El científico británico Ulick R. Evans, considerado el padre del estudio de la corrosión, lo define como: “cualquier material o metal que pueda ser atacado por la acción química o electroquímica de un agente externo que dañe o deteriore el sustrato”. (23)

La corrosión se clasifica, según el medio, de dos formas:

a) Corrosión química: Son las reacciones que ocurren sin presencia de humedad o iones, también llamada corrosión seca.

b) Corrosión electroquímica: Ocurre en un medio acuoso (electrolito), por ejemplo: soluciones salinas, agua de mar, suelos y condiciones atmosféricas con humedad relativa. Para comprender la corrosión electroquímica, se observa desde un punto de vista atómico, se tiene un átomo de metal en equilibrio que consta de un núcleo compuesto de protones (carga positiva) y neutrones de (carga neutra), alrededor del núcleo giran electrones (carga negativa); el metal entra en contacto con el electrolito, que es el medio conductor de corriente donde ocurren reacciones de oxidación y de reducción, una vez que entra en contacto el metal pierde electrones formando un ion positivo, el cual se separa

del metal perdiendo masa para que vuelva el equilibrio, en ese momento ha comenzado la corrosión.

Si se desea conocer la posibilidad de que una reacción de corrosión ocurra espontáneamente bajo ciertas condiciones reales, se deben conocer los cambios energéticos asociados con la reacción, es decir, que para que exista un flujo de corriente debe existir una diferencia de potencial, cuanto mayor sea el cambio de energía, mayor será la tendencia a corroerse.

Un proceso de corrosión se puede representar por una celda galvánica, figura 11, resultado de la formación de una o más pilas galvánicas por la diferencia de potencial que se genera entre dos puntos del sistema, y consta de tres elementos: ánodo, cátodo y electrolito.

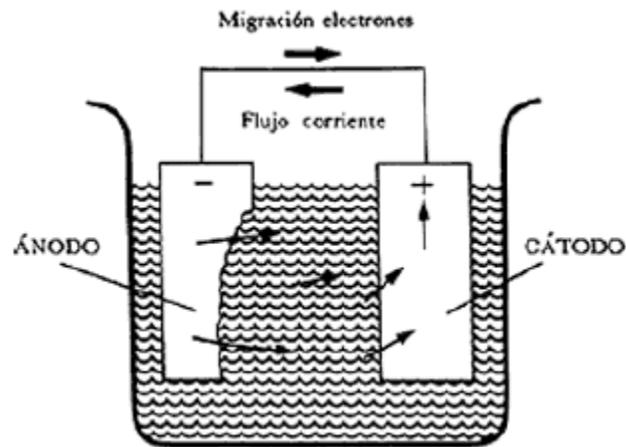


Figura 11. Flujo de corriente en una celda de corrosión. (36)

Los ánodos o zonas anódicas son aquellas superficies metálicas donde se llevan a cabo las reacciones de oxidación, poseen una carga menor con respecto al cátodo y estas zonas son las que pierden masa y se corroen, en el cátodo o zonas catódicas es el lugar de la superficie metálica donde se presenta la reacción de reducción necesaria para que produzca el proceso de corrosión. Los

electrones que son liberados en los ánodos viajan al cátodo, donde un agente oxidante los consume; a esta reacción se le llama reacción catódica y el electrolito es aquel medio que permite el flujo de electrones por la presencia de iones libres.

En los sistemas electroquímicos, las zonas catódicas y anódicas pueden estar en el mismo sustrato, como lo muestra la figura 12.

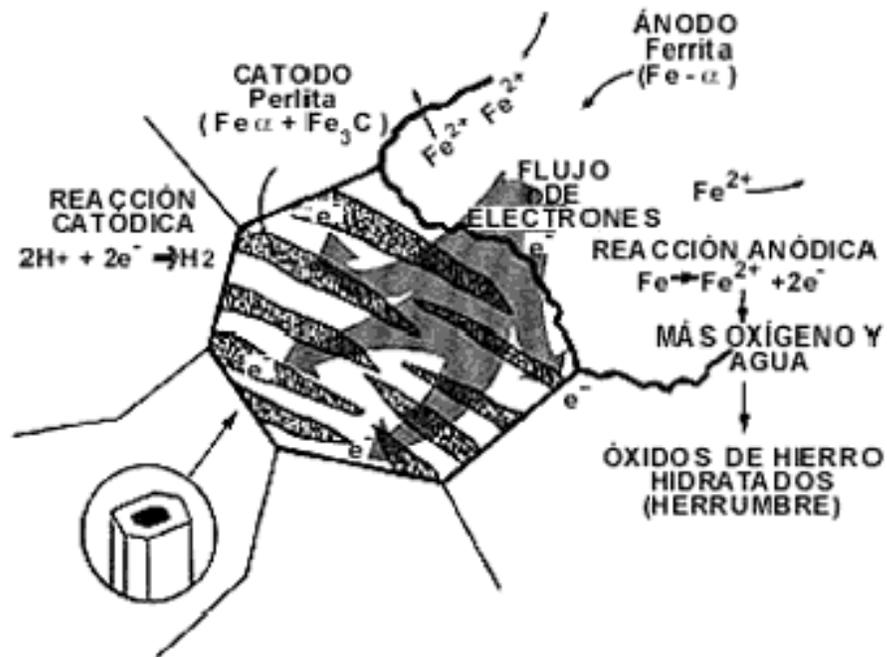


Figura 12. Celda de corrosión formada en un acero hipoeutectoide. (36)

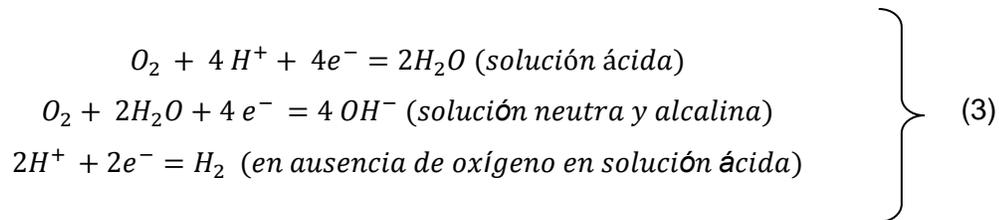
La celda de corrosión está basada en suponer un grano eutectoide, con diferentes microconstituyentes que presentan una diferencia de potencial, creando zonas anódicas y catódicas. En el caso del acero, las zonas ferríticas son las anódicas y las catódicas son las de mayor contenido de carbón, como la perlita.

Las siguientes reacciones electroquímicas son los principios generales que gobiernan el fenómeno de corrosión:

Anódica: Reacción de oxidación



Catódica: Reacción de reducción



1.3.1 Tipos de corrosión. (11, 14, 27)

Corrosión general o uniforme: Este caso se presenta cuando se exponen aleaciones de metales en donde la superficie es totalmente corroída y existe un desgaste total del metal, en un ambiente en el que hay un electrolito líquido (solución química, metal líquido), un electrolito gaseoso (aire, CO₂, SO₂⁻, etc.), o un electrodo híbrido (sólido y agua, organismos biológicos, etc.).

Corrosión atmosférica: Se puede considerar como una forma o tipo de corrosión que resulta de la interacción entre una atmósfera natural y un material metálico expuesto en la misma. Los factores que causan este tipo de corrosión son principalmente el oxígeno, la humedad relativa y la temperatura. Las características físicas más importantes en la atmósfera natural son estas dos últimas temperaturas que oscilan entre -20° C a 60° C y el grado de humedad relativa, HR, entre 20% y 100% generalmente.

Corrosión por picadura: Es un ataque fuerte y local que en el metal crea picaduras de diferentes dimensiones, profundidades y número. No importa si existe corrosión uniforme o no en el metal, se produce cuando un material forma

una película pasiva y esta se rompe en una solución acuosa, dando lugar a una disolución activa entre el metal y la solución, por ello se presenta la formación de pequeñas hendiduras distribuidas al azar.

Ataque intergranular: Este es un ataque preferencial que ocurre en los límites de grano de un metal, causada por tratamientos térmicos previos y relacionada con una química de aleaciones específicas.

Corrosión por fatiga: Es la iniciación y extensión de las grietas por la acción combinada entre esfuerzos y un ambiente corrosivo. En el caso de las aleaciones ferrosas si se introduce a un ambiente corrosivo, siempre se elimina el límite de fatiga creando una vida finita independientemente del nivel de esfuerzo.

Corrosión galvánica: Acelera la corrosión del metal menos noble cuando se combinan uno o más metales. Los metales más nobles son protegidos por la corrosión por medio de esta acción.

Corrosión asistida por esfuerzos: El inicio y propagación de las grietas se da por una combinación entre un esfuerzo tensil y un medio ambiente corrosivo. Generalmente la susceptibilidad de romperse se incrementa al aumentar la temperatura, no todas las aleaciones producen grietas por corrosión bajo tensión, sin embargo, el número de aleaciones que sí sufren este tipo de corrosión sigue en aumento.

1.3.2 Evaluación del fenómeno de corrosión, por pérdida de peso. (11-13)

El estudio del fenómeno de corrosión es de suma importancia debido a que permiten predecir el comportamiento y la vida útil de los materiales, la aplicación de técnicas gravimétricas permite medir la corrosión uniforme principalmente.

Además de contar con ventajas como el tratarse de un ensayo de bajo costo y de fácil reproducibilidad.

En lo que corresponde a la presente tesis, se eligió este ensayo en particular, debido a que en la mayoría de las investigaciones se parte de un conocimiento general para llegar a uno particular y el ensayo de pérdida de peso cuenta con esta característica, la cual es excelente para predecir la velocidad de corrosión de algún metal en milímetros por año.

Los métodos predominantes están descritos en la norma ASTM G1-90, "Practice for preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens", en ella se encuentran los estándares de esta prueba.

La prueba consiste básicamente, en preparar los compuestos metálicos, limpiarlos y pesarlos antes de exponerlos a un medio corrosivo, y después de ello volverlos a limpiar y pesar después de ser expuestos para, finalmente, medir la pérdida de peso del material.

La velocidad de corrosión se mide del peso perdido, convertida a volumen del material perdido, tomando en cuenta la densidad y, finalmente dividiendo el volumen por el área del material y el tiempo del ensayo como lo indica la ecuación 4. Por lo que respecta al tamaño del sustrato, no hay ventajas en manejar tamaños pequeños o grandes, por lo que se recomienda manejar sustratos grandes cuando la prueba dura mucho tiempo debido a que hay una mayor área de contacto, provocando que el resultado sea más exacto.

El equipo que contendrá el medio corrosivo varía de 500 mL a 5000 mL, asimismo, cabe señalar que las especificaciones que se le den al experimento dependen de qué es lo que se pretende obtener. La norma ASTM G31-90 es

más específica respecto a estos detalles, así como también con las precauciones que se deben de tener con los contaminantes hacia los sustratos.

En la parte que corresponde al procedimiento experimental se describen los pasos que se siguieron para esta tesis, los cuales fueron básicamente determinados de dos normas: la ASTM- G1-90 y la ASTM-G31-90.

Para fines prácticos en la tabla 4, se encuentran la resistencia relativa a la corrosión y un calificativo, el cual se le da dependiendo de la velocidad de corrosión que tengan, estos calificativos están basados en aleaciones ferrosas y de níquel como lo es el acero API-X52.

Tabla 4. Resistencia relativa a la corrosión contra la velocidad de corrosión en unidades de mm/año y $\mu\text{m/año}$. Basadas en aleaciones Ferrosas y de Níquel. ⁽²⁷⁾

Resistencia Relativa a la Corrosión	mm/año	$\mu\text{m/año}$
Sobresaliente	<0.02	<25
Excelente	0.02-0.1	25-100
Buena	0.1-0.5	100-500
Regular	0.5-1	500-1000
Pobre	1-5	1000-5000
Inaceptable	5 ⁺	5000 ⁺

Es importante tener en cuenta que velocidades de corrosión mayores a 0.5 mm/año, son inaceptables para aleaciones de alto costo, mientras velocidades de corrosión mayores a 5 mm/año en algunas ocasiones pueden llegar a ser aceptables para aleaciones de bajo costo. ⁽²⁶⁾

La velocidad de corrosión puede ser determinada como sigue:

$$Velocidad\ de\ corrosión = \frac{(K * W)}{(A * T * D)} \quad (4)$$

Donde:

K= constante = 87.6 para (mm/año)

T= tiempo de exposición, (h)

A= Área (cm²)

W = pérdida de peso, (g)

D= densidad, (g/cm³)

Para la velocidad de corrosión en mm/año la norma a la que se hace referencia es la ASTM G1-90, en ella también existe una detallada lista de las densidades de los materiales y para la mayoría de los aceros se usa una densidad 7.9 g/cm³.

El cálculo de la velocidad de corrosión también se puede realizar usando el siguiente algoritmo de cálculo de conversión basado en las leyes de Faraday, mismo que se muestra a partir de la pérdida de peso por unidad de área:

$$V_{corr} = \left(\frac{g}{s * cm^2} \right) * \left(\frac{1C}{0.0003292g} \right) * \left(\frac{1eq}{96500C} \right) * \left(\frac{1mol}{2eq} \right) * \left(\frac{55.8g}{1mol} \right) * \left(\frac{1cm^3}{7.8g} \right) * \left(\frac{10mm}{1cm} \right) * \left(\frac{3600s}{1hora} \right) * \left(\frac{24h}{1día} \right) * \left(\frac{365días}{1año} \right) = \left(\frac{mm}{año} \right) \quad (5)$$

1.3.3 Corrosión en ambientes marinos. (10,11)

El agua de mar es un medio natural muy agresivo para los metales ya que presenta iones que facilitan la conducción de corriente eléctrica, en el agua de mar la conductividad es muy alta por los iones presentes; de hecho hay dos procesos corrosivos que operan simultáneamente en los ambientes marinos:

1) La actividad del ion cloruro, la cual tiende a destruir la capa pasiva y 2) El oxígeno disuelto que actúa de tal manera que promueve una delgada capa pasiva formada de óxido de metal, la cual es destruida por los iones cloruro. (11)

El agua de mar es prácticamente irreproducible a nivel laboratorio, el agua sintética de mar incluye 3.5 % w/v de cloruro de sodio (NaCl) y substituye al agua oceánica según las especificaciones ASTM D1141 (11). Las ventajas que se obtienen de hacer pruebas a nivel laboratorio son: 1) Se pueden estudiar por separado los factores que afectan a la velocidad de corrosión en este medio, 2) Los parámetros pueden ser controlados y medidos, sin embargo, al hacer pruebas a nivel laboratorio se tienen que simplificar diversos factores que afectan al fenómeno de corrosión en condiciones naturales, por lo que lo ideal es tener una combinación de pruebas a nivel laboratorio y pruebas en un medio ambiente natural. En este trabajo es complicado realizar un estudio en ambientes naturales, por la lejanía de este y por el costo que implicarían estos traslados, por lo que se opta por pruebas a nivel laboratorio y aprovechar las ventajas anteriormente mencionadas.

1.3.4 Factores que afectan la corrosividad en el agua de mar. (10,11)

El agua de mar es muy compleja, es un balance sutil de muchas sales que también contiene materia viva, depósitos suspendidos, gases disueltos, materia orgánica que cae, entre otras. El comportamiento individual de cada uno de los factores que afectan el comportamiento de la corrosión no es fácil de ser

separado, no obstante, en la tabla 5 se observan los principales factores que afectan en mayor parte a la velocidad de corrosión, están divididos en químicos, físicos y biológicos.

Tabla 5. Principales factores que afectan la velocidad de corrosión, tomando como referencia el comportamiento del acero. (Sea water corrosion Handbook, 1979). (10)

Químicos	<p>Gases disueltos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Oxígeno. • Dióxido de Carbono.
Físicos	<p>Velocidad del agua:</p> <ul style="list-style-type: none"> • burbujas de aire (acción de las olas). • Sedimentos suspendidos. <p>Temperatura. Presión.</p>
Biológicos	<p>Crecimiento marino de organismos vivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capas duras: Sin movimiento y capas semi-móviles. <p>Vida marina:</p> <ul style="list-style-type: none"> • (Generación de oxígeno y consumo de dióxido de carbono). • Materia orgánica que cae.

I. Factores Químicos

a) **Oxígeno disuelto** (6,9,10,11)

Este factor aumenta la corrosividad en el agua de mar en un mayor grado. Para la mayoría de los metales como el cobre y otras aleaciones como lo es el acero, un alto contenido de oxígeno es acompañado por un incremento en la velocidad de ataque. Esto se debe a que la velocidad de corrosión en los ánodos locales es dependiente de la reacción catódica, y de la velocidad de flujo, en la que a mayor concentración de oxígeno el agua fluye a menor velocidad, por lo que al hacer contacto con una cierta superficie catódica se mueve lento por la superficie y hace reacción con el oxígeno.

La variación de la cantidad de oxígeno es una combinación entre el lugar geográfico y la profundidad a la cual se encuentre; la temperatura y la salinidad contribuyen con la variabilidad de oxígeno disuelto, como se observa en la tabla 6, entre menor sea la salinidad y temperatura, mayor será la cantidad de oxígeno disuelto. En la superficie la concentración de oxígeno disuelto es de 12 ppm en el océano Atlántico y de 6 ppm en los trópicos, donde la temperatura es mayor.

Tabla 6. Equilibrio de la concentración de oxígeno en agua de mar como función de la temperatura y la salinidad (*Corrosion test and standards ASTM Application and interpretation ,2005*). (11)

Temperatura (°C)	Salinidad (ppt)					
	0	8	16	24	31	36
Oxígeno Disuelto (ppm) a una salinidad específica						
0	14.6	13.9	13.1	12.4	11.8	11.4
5	12.5	11.9	11.3	10.7	10.2	9.9
10	10.9	10.4	9.8	9.4	8.9	8.7
15	9.5	9.1	8.7	8.2	7.9	7.7
20	8.5	8.1	7.7	7.3	7	6.8
25	7.6	7.2	6.9	6.6	6.3	6.2
30	6.8	6.5	6.2	6	5.7	5.6

La concentración de oxígeno en algunos materiales como los aceros inoxidables y en el aluminio favorecen el crecimiento de capas pasivas delgadas que retrasan la iniciación de picaduras, pero una vez que la picadura se forma, ésta tendrá una mayor propagación. En general, si se toma una temperatura constante y se incrementa la cantidad de oxígeno, la velocidad de corrosión aumentará linealmente conforme al aumento de oxígeno.

b) Salinidad, pH y carbonatos. (6,10,11)

La salinidad es definida como el peso total de sólidos disueltos en 1000 g de agua. Por ejemplo, 35 gramos de sólido disueltos en 1000 gramos de agua son 35 000 ppm.

La relación entre la clorinidad y la salinidad es directamente proporcional en el agua de mar y además la clorinidad se puede medir con exactitud con un simple análisis químico. La salinidad (S) puede redefinirse usando la clorinidad con la

siguiente ecuación, formulada por la UNESCO y otras organizaciones para aproximarse al valor real. ⁽⁶⁾

$$S = 1.80655 Cl \quad (6)$$

Donde S representa (salinidad) y Cl (clorinidad) y son medidas en partes por mil. La salinidad a mar abierto varía entre 32-37.5 %, siendo la media de 35%.

La variación de la salinidad puede afectar la velocidad de corrosión uniforme, por ejemplo, en áreas donde la temperatura es alta, esto provoca que se evapore el agua y que haya mayor salinidad, la salinidad también varía en las desembocaduras de los ríos, ya que hacen que ésta sea menor. Estos cambios afectan la corrosión localizada, ya que al incrementar la actividad de iones de cloruro puede resultar un incremento en la propagación de la corrosión por crevice.

La Tabla 7, muestra el contraste de la salinidad que se puede tener en el océano, las áreas con más baja salinidad, Golfo de Botnia, de 5 partes por mil y las de mayor salinidad, mar rojo con 225 partes por mil, así como el promedio en el océano de 35 partes por mil. En la tabla 8 se puede verificar la variación que se presenta a diferentes profundidades en cuanto a la temperatura y salinidad en el Golfo de México; en general entre mayor profundidad existe menor temperatura y menor salinidad.

Tabla 7. Variación de Salinidad dependiendo la zona geográfica. (El océano y sus recursos II, 1997) ⁽⁶⁾

	Localidad MAR	Salinidad (%)
Áreas con baja salinidad	Golfo de Botnia	5.0
	Báltico	1-10
Áreas con alta salinidad	Mar de los Sargazos	38
	Golfo pérsico	40
	Mar Rojo	225
Promedio General		34-35

Tabla 8. Relación temperatura, salinidad y profundidad en el Golfo de México.⁽⁶⁾

Profundidad en metros	Temperatura ° C	Salinidad
0	26.44	37.45
50	18.21	36.02
100	13.44	35.34
500	9.46	35.11
1 000	6.17	34.90
1 500	5.25	34.05

Por otra parte el pH no afecta al fenómeno de corrosión directamente; sin embargo, los cambios que se producen al variar el pH pueden influir en la formación de una capa protectora de escalas de compuestos de carbonato de calcio que pueden ser capaz de cambiar la velocidad de corrosión del sustrato. Los depósitos de calcio que se forman entre pH de 8 a 10 consisten principalmente en CaCO_3 , MgCO_3 y Mg(OH)_2 . Estos depósitos además de depender de los valores de pH dependen también de la materia orgánica y de la salinidad.

Los valores de pH varían dependiendo de la fotosíntesis, en la superficie oceánica dicha variación de los valores oscila entre 8 y 8.2. En aguas profundas

los valores de pH tienden a disminuir a 7.5 o 7.7, ya que termodinámicamente la presión hace que disminuyan estos valores, por lo que hay una menor tendencia a que se formen estas capas protectoras de carbonatos.

De esta manera se tiene que en la superficie existen mayor cantidad de carbonatos que inclusive están sobresaturados y en las zonas de alta profundidad existe menos probabilidad de que se formen estas capas protectoras en la superficie del metal. En estas zonas la precipitación y disolución de los depósitos de cal es controlada principalmente por el nivel de saturación del carbonato de calcio.

$$\Omega = \frac{[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]}{K_{sp}} \quad (7)$$

Donde $[\text{Ca}^{2+}]$, $[\text{CO}_3^{2-}]$ son las concentraciones de calcio y carbonato respectivamente, K_{sp} = solubilidad aparente del producto y Ω es el valor de la saturación del carbonato de calcio.

Los depósitos de cales formados por protección catódica estarán estables cuando el grado de saturación sea $\Omega > 0.6$ en aguas profundas de hasta 3000 m y en zonas de mayor profundidad $\Omega = 0.6$. La velocidad de dilución del carbonato de calcio es alrededor de 1 $\mu\text{m}/\text{año}$.

II. Factores Físicos

a) Velocidad del agua ^(10,11)

La velocidad de fluido desempeña un factor importante en la corrosión, principalmente en la corrosión localizada de crevice y por picadura; la velocidad de flujo puede incrementar la velocidad de corrosión, rompiendo las capas protectoras que se forman en la superficie del metal, e igualmente la puede

incrementar promoviendo la migración de especies que deterioran el metal; sin embargo, puede retardar la corrosión removiendo la concentración de iones agresivos o promoviendo la pasivación por el transporte de especies protectoras en la interfase metal-fluido.

Se tiene, por ejemplo, que en los aceros inoxidables 304L y 316L o aleaciones níquel-cromo-molibdeno, se presentan picaduras profundas a bajo flujo. En contraste a alto flujo la velocidad de corrosión es muy baja. En otras aleaciones de cobre y acero es inverso el fenómeno de corrosión, mientras más velocidad de flujo haya, se eliminan las capas protectoras de óxido y la corrosión se incrementa. ⁽¹¹⁾

En el transporte de hidrocarburos por tubería, la velocidad de fluido es muy importante, se toma en cuenta hasta qué velocidad el fluido es un flujo laminar y en cual un flujo turbulento, los valores de 1.8 m/s y menores se consideran flujo laminar, y en las mayores de 1.8 m/s se forma un flujo turbulento que causará erosión⁽¹¹⁾. Estos son factores importantes de considerar en el diseño de tuberías.

b) Temperatura ^(6,10,11,22)

La temperatura varía según la posición geográfica, por ejemplo, en el ártico es de -2° C, mientras que en los trópicos alcanza los 35° C. Generalmente, en los meses en los que la temperatura es mayor, los materiales de acero y aleaciones presentan mayor velocidad de corrosión en profundidades mayores, a comparación de otros meses en que la temperatura es menor. A presión atmosférica estos mismos materiales tienden a formar una capa protectora de óxido metálico que disminuye la velocidad de corrosión, esto se debe a que a mayor temperatura los gases disueltos y especialmente el oxígeno son menores

y se van hacia a la atmósfera. En el Golfo de México la temperatura disminuye a mayor profundidad, como se puede observar en la tabla 9.

En general, la velocidad de corrosión se incrementa cuando la temperatura aumenta; independientemente de los otros factores que también son afectados, como el oxígeno disuelto, que disminuye conforme la temperatura aumenta, mientras la actividad biológica se incrementa. También otro factor sería los depósitos de calcio, que al aumentar la temperatura favorece la formación de estos depósitos.

Tabla 9. Variación de la temperatura del mar con la profundidad en el Golfo de México. (PEMEX comité de normalización de petróleos mexicanos y organismos subsidiarios, 2007). ⁽²²⁾

Profundidad (m)	Temperatura (°C)
0	24
30	24
50	22
75	20
100	19
125	18
150	17
200	15
250	12
300	11
400	10
500	8
700	6
1000	4

c) **Presión hidrostática**._(21,23,37)

Cuando un cuerpo es sumergido en agua de mar, la presión hidrostática provoca una fuerza perpendicular a la superficie del objeto sumergido, sin importar la orientación que adopten las caras. Si se supone que es un fluido sin movimiento, la presión hidrostática (P) que ejerce el mar sobre un cuerpo depende de la densidad (δ), de la profundidad (h) en que está sumergido dicho cuerpo y de la presión atmosférica (P_{atm}). Entonces se tiene la ecuación 8:

$$P = \delta gh + P_{atm} \quad (8)$$

Donde:

P = Presión hidrostática (N/m^2).

δ = Densidad del mar (kg/m^3).

g = gravedad (m/s^2).

h = Profundidad (m).

Si solo se quiere saber cuál es la presión que ejerce el líquido, se tendría:

$$P = \delta gh \quad (9)$$

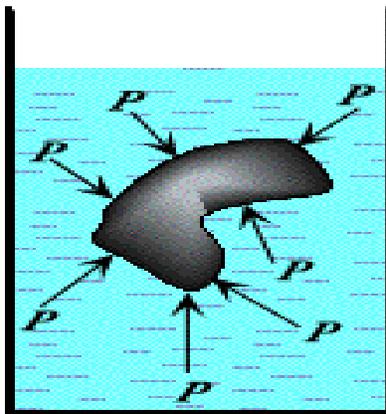


Figura 13. Presión ejercida de un líquido sobre una partícula irregular.₍₃₇₎

La densidad varía con la temperatura, por conveniencia para los cálculos se usa 4 °C de temperatura, ya que a esta temperatura la densidad del agua de mar es casi máxima de 1000 Kg/m³, la gravedad cambia dependiendo de la posición geográfica, asimismo se usa por conveniencia 9.80665 m/s². Obteniendo el siguiente valor de conversión 1m H₂O (4 °C) es equivalente a 9.806380 KPa, para fines prácticos 1 m de H₂O será igual a 10 KPa y a 0.1 atmósferas de presión, por lo que por cada 100 metros de profundidad equivalen a 10 atmosferas o (100 lb/in²) de presión. Para ver cómo afecta la presión a la velocidad de corrosión. En general si se quiere determinar el papel que tomaría en los océanos de manera experimental, sería muy complicado, puesto que los factores que se señalan en la tabla 5, afectan también a la velocidad de corrosión y la presión pasaría a segundo término. Por otro lado, si se quiere determinar cómo afecta solo la presión a la cinética de corrosión, se tendrán que hacer pruebas en laboratorios y aislar las demás variables.

III. Factores Biológicos.

a) Organismos biológicos. (10,11)

Los microorganismos (bacterias) y macroorganismos (algas), afectan el comportamiento de los materiales en ambientes marinos. Cuando algún metal o algún otro compuesto es inmerso en el océano, es expuesto a un ambiente donde existe una gran variedad de organismos vivos y en cuestión de horas se forma una capa de materia viva (biofilm) alrededor del metal, dependiendo del compuesto o los compuestos que existan en los organismos que hacen contacto con la interfase metal-agua de mar, es la respuesta que tiene el sustrato. Normalmente la velocidad de corrosión es afectada de diversas maneras, por ejemplo, puede influenciar la prevalencia de la reacción anódica o catódica en la formación o mantenimiento de una capa protectora, produciendo depósitos en la superficie del metal y creando un ambiente corrosivo.

Si se genera una capa de materia viva o biológica (biofilm), en términos generales son discontinuas y pueden crear concentraciones de oxígeno o de químicos que causan una aceleración en la corrosión localizada que con frecuencia es acompañada de corrosión por crevice. Los microorganismos que causan la corrosión normalmente son bacterias sulfato reductoras y al tipo de corrosión que causan se le conoce como corrosión microbiológica, en la que las bacterias tienen la capacidad de oxidar el sulfuro y sulfato, reducir los sulfatos, crear oxidantes de hierro, así como producir ácidos, amoníaco y acetato. Como se mencionó anteriormente, interfieren con las reacciones electroquímicas y causan corrosión.

Las bacterias presentan una gran resistencia a los medios y existe una gran variabilidad en la superficie, ya que se encuentran las bacterias dependientes de oxígeno llamadas aerobias y en las profundidades del océano las bacterias sulfatoreductoras que son dependientes del pH, la temperatura y el oxígeno disuelto. También es importante mencionar que es la principal razón por la cual en las estructuras marinas se utilizan aleaciones de acero y no polímeros o algún otro componente, ya que las bacterias dañan en mayor proporción a materiales no metálicos.

CAPÍTULO II. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

Definición de diseño.

En su etimología se entiende como delinear, trazar o planear, como acción de trabajo: concebir, invertir u ordenar. En Ingeniería así se designa al proceso de aplicar las diversas técnicas con el objetivo de definir un dispositivo.

Con el propósito de estudiar el fenómeno de corrosión de un acero API-X52 en condiciones de aguas profundas muy en especial, tomando como principal parámetro la presión hidrostática a diferentes profundidades, fue necesario diseñar y construir un recipiente a presión, de bajo costo.

2.1 Diseño del recipiente a presión. (20, 25, 26, 28-30)

El diseño del equipo o reactor surgió del concepto básico de la olla exprés utilizada comúnmente en la cocción de los alimentos; sin embargo, al ser un recipiente metálico, es evidente que intervendría de forma directa en los procesos de oxido-reducción. Además de que ninguna olla exprés está diseñada para soportar presiones mayores a tres atmosferas de presión hidrostática; por lo tanto, para la construcción del equipo se tuvo que contemplar otro tipo de material cuyas características fueran diferentes a un material metálico, con las propiedades adecuadas para soportar altas presiones y además cabe mencionar que el material adquirido fue de bajo costo.

Después de una amplia investigación en el mercado, se propuso el material Nylamid, que consta de propiedades adecuadas ya que es un material de maquinado sencillo, de alta resistencia al desgaste y suficiente resistencia a la

tracción. En el Apéndice (Tabla 17) se muestran valores; asimismo se investigó como diseñar el recipiente para que soportara presiones hidrostáticas superiores a las de la hipótesis de este trabajo de diez atmosferas.

2.1.1 Requerimientos generales para la fabricación de recipientes a presión.

De acuerdo al código de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME por sus siglas en inglés), en la sección 8 división 1 de dicho documento, regula la elaboración de un envase a presión. “Un código consiste en lograr un grado específico de seguridad, eficiencia y desempeño o calidad” ⁽²⁰⁾; en general este código está diseñado por reglas, por ejemplo la sub-sección A parte UG, señala los requerimientos generales para la fabricación de recipientes a presión, como tomar en cuenta sólo los esfuerzos máximos a manera de que el diseño este en la mayor seguridad posible, sin embargo, como lo menciona Shigley ⁽²⁰⁾ esto no implica seguridad absoluta.

I) Presión de operación (P_O).

Se trata de la presión dentro del recipiente en operación normal, para este trabajo se supone una presión máxima de 500 lb/pulg^2 ó 35.1617 Kg/cm^2 , aproximadamente 340 m de tirante de agua.

II) Presión de diseño (P_D).

La presión de diseño es la que va a tener el recipiente, la cual deberá ser mayor a la de operación por cuestiones de seguridad.

$$\begin{array}{ll}
 \text{Si } P_o > 300 \text{ lb/pulg}^2 & P_D = 1.1 P_o \\
 \text{Si } P_o \leq 300 \text{ lb/pulg}^2 & P_D = P_o + 30 \text{ lb/pulg}^2
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \\ \\ \end{array}} \right\} \quad (10)$$

Como la presión de operación P_o es mayor a 300 lb/pulg^2 , entonces la presión de diseño es igual a:

$$P_D = 1.1 * (500 \text{ lb/in}^2) = 550 \text{ lb/in}^2$$

III) Esfuerzo máximo permisible (S).

Se refiere al máximo esfuerzo unitario permitido para cualquier material específico. Éste se obtiene a partir de la ecuación (11); siendo igual a 127.5 kg/cm^2 . Donde el factor de seguridad se obtiene de la tabla 10, siendo 4 ya que el recipiente en cuestión soportará presiones internas.

$$S = \frac{\delta(\text{nylamid})}{\text{factor de seguridad}} = 127.5 \text{ kg/cm}^2 \quad (11)$$

Donde:

δ = esfuerzo último o límite elástico igual a 509.9 kg/cm^2 .

La tabla 17 del apéndice, marca el esfuerzo último o límite elástico para el Nylamid.

Tabla 10. Factores de seguridad. ⁽²⁸⁾

Tipo de recipiente (presión)	Factor de seguridad
Atmosférico	3
Presión interna	4
Presión externa	4

IV) Dimensiones internas del reactor

Las dimensiones internas del recipiente a presión se basaron en el espacio que se necesitó para hacer una celda electroquímica, que permitiera la realización de pruebas de pérdida de peso y electroquímicas. La celda electroquímica para este caso es constituida de tres electrodos de trabajo, un contraelectrodo y un electrodo de referencia.

Se midieron las longitudes o distancias necesarias entre cada electrodo, también se midieron los diámetros que serán necesarios maquinar, después se determino el espacio que necesitó tener el recipiente, se obtuvo experimentalmente un radio interno de 60 mm y una altura (h) de 94.5 mm, valores que si se sustituyen en la ecuación 12 se obtiene el volumen (V); siendo igual a 1.07 L.

$$V = \pi r^2 * h \quad (12)$$

V) Espesor de pared requerido (t). (25,29)

El espesor mínimo requerido para el diseño se calcula considerando el esfuerzo circunferencial y el longitudinal, (ec. 13 y 14). El valor de espesor mayor de estas dos ecuaciones se tomará como el espesor mínimo requerido para el diseño. Estas ecuaciones son tomadas directamente del código ASME y son determinadas para el diseño de cualquier recipiente a presión, siempre se tomará el espesor mayor que se obtenga de la sustitución de datos particulares conforme a cada diseño, ya que con esto se asegurará de no sufrir fallas.

Esfuerzo circunferencial. [1, Sección UG-27 (c)(2)]

$$t = \frac{Pr}{SE-0.6P} = 22.24 \text{ mm}_{(25,29)} \quad (13)$$

Esfuerzo longitudinal. [1, Sección UG-27 (c)(1); Sección 1-1(a)(1)]

$$t = \frac{Pr}{2SE+0.4P} = 8.57 \text{ mm}_{(25,29)} \quad (14)$$

Donde:

P = Presión interna (kg/cm^2).

r = Radio interno (cm).

S = Esfuerzo máximo permisible ó resistencia a la tensión (kg/cm^2).

E = Eficiencia de soldadura, como no existe soldadura en este equipo se toma el valor máximo de 1.

t = espesor mínimo requerido.

Sustituyendo los valores para este diseño, se obtiene que el espesor mayor será el circunferencial de 22.24 mm, es decir, un mínimo de 22.24 mm de espesor en las dimensiones finales. Esto es lógico porque el recipiente en forma de cilindro tiene mayor área de contacto del fluido y el recipiente en el área circunferencial con respecto al área del fondo y tapa.

VI) Espesor de tapa requerido (t_t).

Los tipos de tapas que se utilizan para recipientes a presión y su descripción se encuentran en la bibliografía. (25,26,28)

Parte importante en el diseño del recipiente a presión es el tipo de tapa a utilizar. Para este estudio se empleo una tapa plana circular del mismo material Nylamid que es utilizada para recipientes sujetos a presión atmosférica. Para obtener el espesor mínimo requerido de la tapa plana se parte de la ecuación 15, la cual se define como:

$$t_t = d\sqrt{0.13 * P/SE} = 23.83 \text{ mm.} \quad (26) \quad (15)$$

Las condiciones de validez de la ecuación anterior son:

- a) Que el diámetro interno no sobre pase los 508 mm de diámetro (d).
- b) El espesor de la tapa entre el diámetro no sea menor de 0.05 ni mayor de 0.25.
- c) El espesor de la tapa no sea menor al espesor del cuerpo del cilindro.

VII) Uniones.

La tapa y el recipiente se unieron por medio de conexiones, tornillos de acero inoxidable con un diámetro de 5/16” y con un largo de 1.5”, las propiedades mecánicas se encuentran en la tabla 18 del apéndice. Para determinar el número de tornillos (N) que permitieron soportar las cargas ejercidas por la presión interna en el recipiente, fue necesario determinar la rigidez del tornillo (Kb), la rigidez que se ejerce sobre el recipiente de Nylamid (Km), la constante de rigidez (C) y el factor de carga (n), cada uno de estos términos cuenta con ecuaciones predeterminadas tomadas del Shigley J, “*Diseño en ingeniería mecánica*”, (20) y se expresan de la ecuación 16 a 20.

En la figura 14 se observa un tornillo de perfil, en ella se localiza el diámetro mayor, diámetro de paso, el diámetro de raíz, que se utilizan para el cálculo, por ejemplo del área de esfuerzos de tensión (At), en donde se utiliza el diámetro de paso, mostrado en la tabla 11, los datos son para un tornillo de 5/16”. Según la

norma ANSI B1.1-1974 ⁽²⁰⁾. Los valores se sustituyen directamente en la resolución de las ecuaciones 16 y 17.

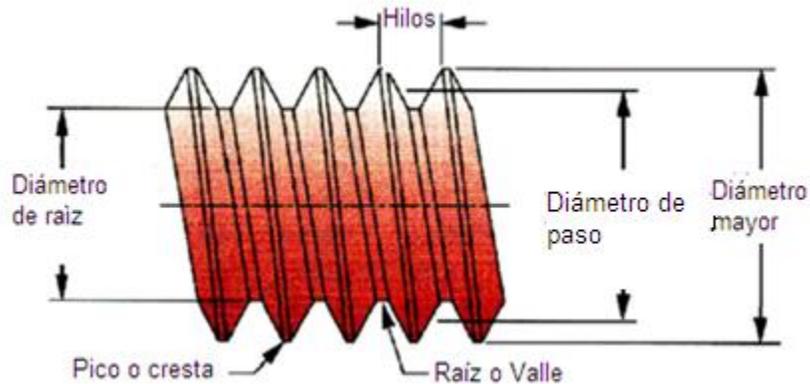


Figura 14. Nomenclatura del tornillo

Tabla 11. Medidas determinadas para un tornillo de 5/16 pulgadas. ⁽²⁰⁾

Designación de tamaño	Diámetro mayor nominal	Hilos o roscas por pulgada H	Área de esfuerzos de tensión (At)	Área de diámetro menor (Ar)
5/16 pulgadas	0.7938 cm (0.3125")	18	0.3381 mm ² (0.0524 in ²)	0.2929 mm ² (0.0454 in ²)

Para determinar la rigidez del tornillo (k_b) en la zona de sujeción se tiene la ecuación (16), ésta representa la rigidez efectiva que existe sobre el tornillo. ⁽²⁰⁾

$$k_b = \frac{A_d * A_t * E}{A_d * l_t + A_t * l_d} = 182.9543 \frac{kg}{cm} \quad (16)$$

Donde:

A_d = Área del diámetro mayor calculada con el diámetro mayor de la (tabla 10).

A_t = Área de esfuerzo de tensión (tabla 11).

l_t = Longitud roscada de tornillos (tabla 12).

ld =longitud de la parte útil sin roscar (tabla 12).

E = Eficiencia de la junta, para este caso es 1, ya que no hay soldaduras.

Kb= Rigidez del sujetador, en este caso la del tornillo.

Para determinar la rigidez que existe sobre el Nylamid (km) se utiliza la siguiente ecuación. (20)

$$Km = \frac{0.5774\pi Ed}{2 \ln \left(5 * \frac{0.5774l + 0.5d}{0.5774l + 2.5d} \right)} = 311.7947 \frac{Kg}{cm} \quad (17)$$

Donde:

Km = Rigidez de los elementos de la zona de contacto.

La constante de rigidez de la unión (C) está dada por la siguiente ecuación.

$$C = \frac{kb}{kb + km} = 0.3698 \quad (18)$$

Se tiene una constante de rigidez (C) de 0.36, continuando con la resolución para el número mínimo de tornillos (N), el factor de carga (n) se podrá calcular de la ecuación (19), sin embargo, se necesita tener el número de tornillos para su cálculo y como es esto lo que se va a calcular se supone un valor de n =2 ya que cualquier valor de n > 1 asegura que el esfuerzo en el perno es menor que la resistencia de prueba.

$$n = \frac{SpAt - Fi}{C \left(\frac{P}{N} \right)} \quad (19)$$

Para prevenir errores y despejando N de la ecuación (19) se obtiene el número mínimo de pernos para un factor de carga (n) = 2.

$$N = \frac{CnP}{SpAt - Fi} = 6.66 \quad (20)$$

Tabla 12. Características finales del envase a presión.

Símbolo	Nombre	Resultados y ecuaciones
P _O	Presión de operación	35.1617 kg/cm^2 (34 atm), Ec. (8).
P _D	Presión de diseño	38.67 kg/cm^2 (37.4 atm), Ec. (8).
S	Esfuerzo del material Nylamid	127.5 kg/cm^2 Ec. (9)
E	Eficiencia de la junta	1 (sin soldadura)
r	Radio interior	60 mm
t	Espesor de la pared	22.24mm y 8.57 mm, Ec. (11 y 12)
t	Espesor de la tapa y fondo	23.82 mm, Ec. (13)
At	Área de esfuerzo de tensión	0.3381 cm^2 , Tabla (9).
L	Longitud de los tornillos	1 $\frac{1}{2}$ pulgada 3.81 cm
lt	Longitud roscada de tornillos	$lt = 2 * d + 1/4 in = 2.813 cm$
ld	Longitud de la parte útil sin roscar	$ld = L - Lt = 1.588 cm$
l	Longitud de la parte roscada	4.4 cm
d	Diámetro nominal mayor	0.7938 cm, Tabla (9).
Ad	Área del diámetro mayor	$A_d = \frac{\pi d^2}{4} = 0.4949 cm^2$
kb	Rigidez del sujetador	182.9543 kg/cm^2
km	Rigidez de los elementos de la zona de contacto	311.7997 kg/cm^2
C	Constante de rigidez	0.3698
S _p	Resistencia a la tensión mínima de prueba	Para aceros forjados 75000 lb/in ² , 5273 Kg/cm^2
F _i	Precarga recomendada	$Fi = 0.75 * Fp = 1337.101 kg$
F _p	Carga de prueba	$Fp = At * Sp = 1782.8013 kg$
P	Fuerza de separación	$P = PoA = 4014.9554 kg$
n	Factor de carga	2
N	Número mínimo de tornillos	8

Por geometría es necesario colocar los tornillos en números pares con la finalidad de distribuir los esfuerzos en la tapa en partes iguales. Por lo tanto si N es igual a 6.66 de la ecuación 20, el número par mayor siguiente es ocho. El diseño final se presenta en la figura 15 en donde se aprecia los ocho orificios alrededor de la brida, mismo que en ellos se colocaran los ocho tornillos de 5/16" para unir la brida con el cuerpo.

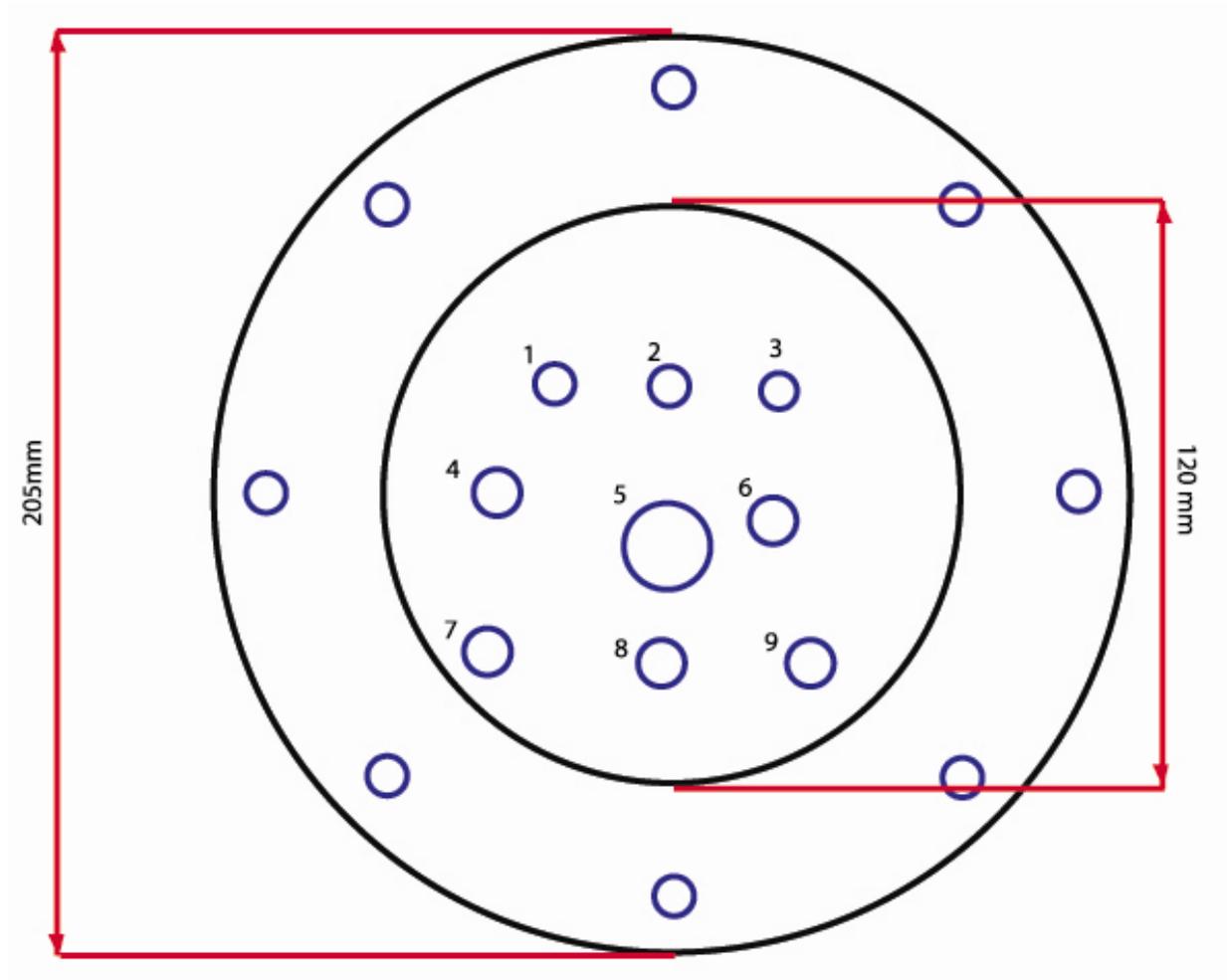


Figura 15. Diseño de la brida vista inferior. (1,2,3) electrodos de trabajo; (4) termómetro (5) electrodo de referencia; (6) contra electrodo, (7) manómetro, (8) válvula de entrada, (9) válvula de salida.

En la misma figura se presenta en el centro las entradas para los electrodos de trabajo, para el caso de gravimetría se diseñaron tres entradas para asegurarse que el ensayo se lleve a cabo por triplicado, el diámetro de diseño fue de $1/8 \text{ in o } 3.175 \text{ mm}$. Para la entrada del electrodo de referencia se partió de las dimensiones de un electrodo comercial de Calomel, se diseñó un enchaquetamiento de teflón con la finalidad de protegerlo y que soportará altas presiones. Las dimensiones finales para este orificio fue de un diámetro de $1/2 \text{ in o } 12.7 \text{ mm}$. Para contraelectrodo, válvula de entrada, válvula de salida, medidor de presión y temperatura, se procuró que todos tuvieran las mismas dimensiones, por lo que se encargó una medida muy comercial $1/4 \text{ in o } 6.35 \text{ mm}$, finalmente se logró el cometido y se maquinaron de $1/4 \text{ in o } 6.35 \text{ mm}$.

El diseño final del recipiente a presión que permite soportar presiones máximas de los 500 lb/in^2 se presenta en la figura 16.

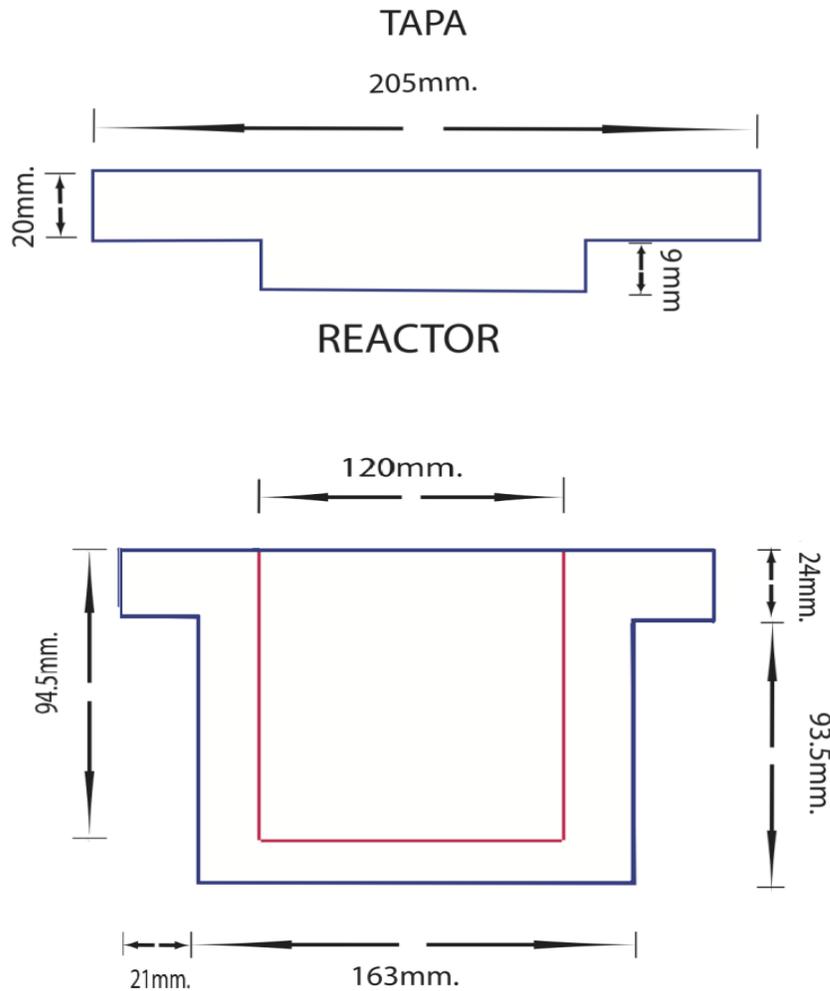


Figura 16. Dimensiones finales de la tapa y cuerpo del recipiente a presión.

2.1.2 Diseño del sistema para operar el recipiente de alta presión.

Una vez obtenido el diseño del reactor, fue necesario el diseño del sistema que permitirá suministrar la presión al recipiente, para ello se tomó en cuenta el diseño propuesto por Tao Zhang, "A stochastic analysis of the effect of hydrostatic pressure on pit corrosion of Fe-20Cr alloy". (21)

Las consideraciones que se tomaron en cuenta en primer lugar fue diseñar la forma de poner las conexiones entre bomba y recipiente de alta presión y bomba y tanque de almacenamiento del electrolito. Por otro lado se pensó en la

alimentación del nitrógeno y en el recipiente que mantendría al reactor a una temperatura constante de $6 \pm 1^\circ\text{C}$. Se siguió con la misma idea de utilizar material de bajo costo, como la compra del medidor de presión y temperatura, así como las válvulas de salida y entrada. Finalmente el diseño quedó como se presenta en la figura 17.

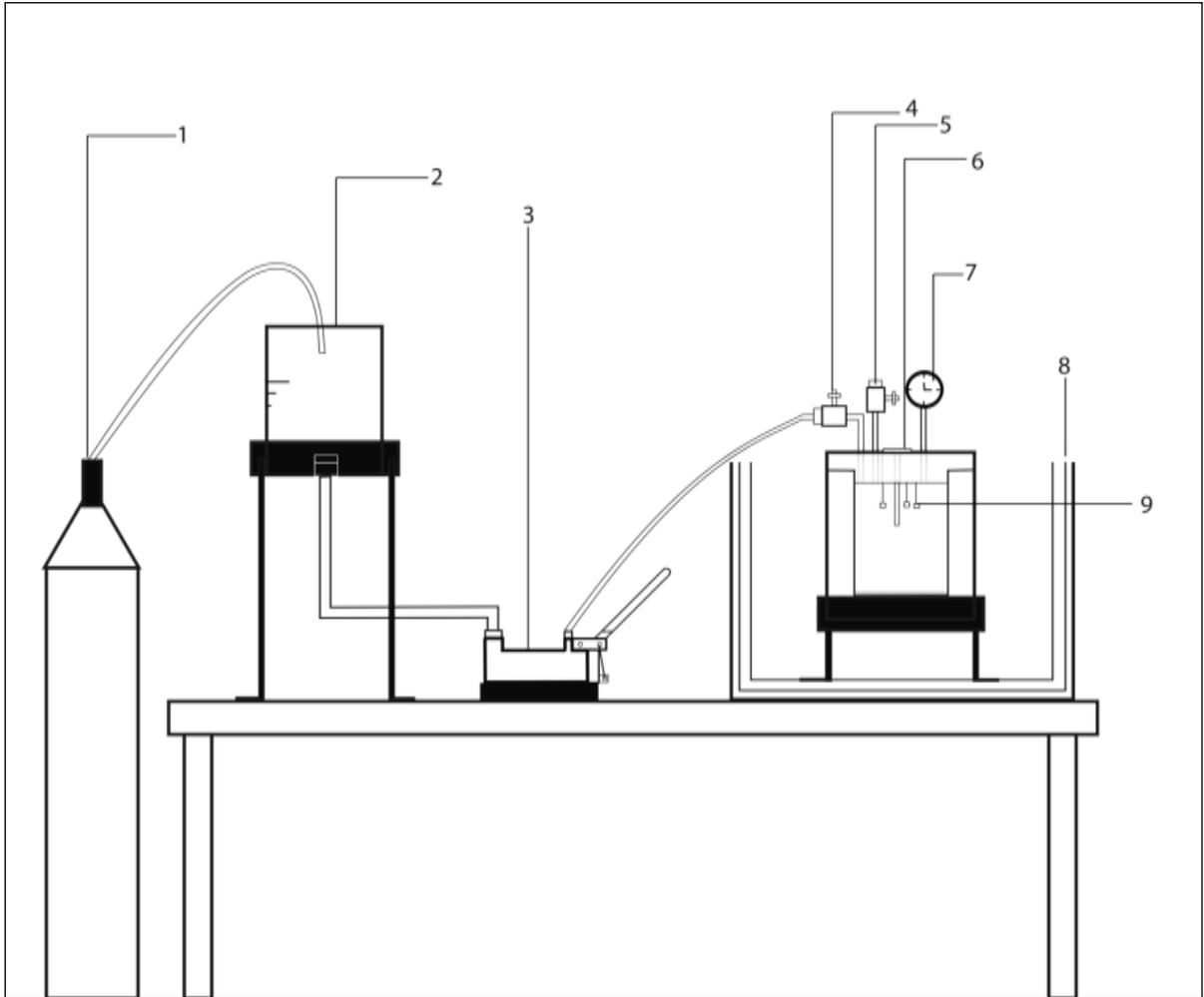


Figura 17. Esquema de equipo de alta presión (1) Tanque de Nitrógeno, (2) Tanque de alimentación, (3) Bomba manual para pruebas hidrostáticas, (4) Válvula de entrada, (5) Válvula de salida, (6) Termómetro, (7) Manómetro, (8) Recipiente "adiabático" y (9) electrodos de trabajo.

2.2 Proceso de fabricación del recipiente a presión.

El maquinado del recipiente a presión se realizó en el taller mecánico del departamento de Ingeniería Metalúrgica, de la Facultad de Química, con el apoyo de los responsables del mismo.

Cabe mencionar que la experiencia de los técnicos fue de suma importancia para llevar a cabo el maquinado del recipiente a presión, tal y como se diseñó previamente.

El maquinado del cuerpo del recipiente a presión y la brida, se realizó a partir de un tocho de Nylamid en forma de cilindro de 225 mm de diámetro x 150 mm de altura, Figura 18. Se cortó de forma horizontal con la finalidad de tener por un lado el cuerpo del recipiente y por el otro la brida. Las dimensiones iniciales del cuerpo fueron de 225 mm de diámetro X 120 mm de altura y las de la brida fue el mismo diámetro por 30 mm de altura.

El material necesario para la construcción del recipiente a presión se presenta en la tabla 13.

Tabla 13. Lista de material para la construcción del envase a presión

1 Cilindro Nylamid de 200 mm de diámetro x 180 mm de altura
8 Tornillos de 5/16" 18H x 1 1/2 " de Acero inoxidable y cabeza avellanada
O Ring
2 Válvulas de Acero inoxidable roscada a 1/4 " de aguja hembra
3 Niples de acero inoxidable 1/4 " de diámetro x 2" de largo
1 Manómetro de 0 a 3000 lb/pulg ² con entrada tubo de 1/4" macho
1 Termómetro análogo con entrada de 1/4 " longitud de 0°C a 100°C
1 Manguera para alta presión NPT 3/8 " 1.76 metros
3 Niples de acero inoxidable 1/8" x 1"
1 Tapón hembra de acero inoxidable 1/4 "
1 Tapón macho de acero 1/2 "
Cinta teflón
1 Maneral 1-64"
1 Machuelo 1-64"
1 Cople de 1/4" acero inoxidable
1 Base de hierro de cuatro patas pintadas

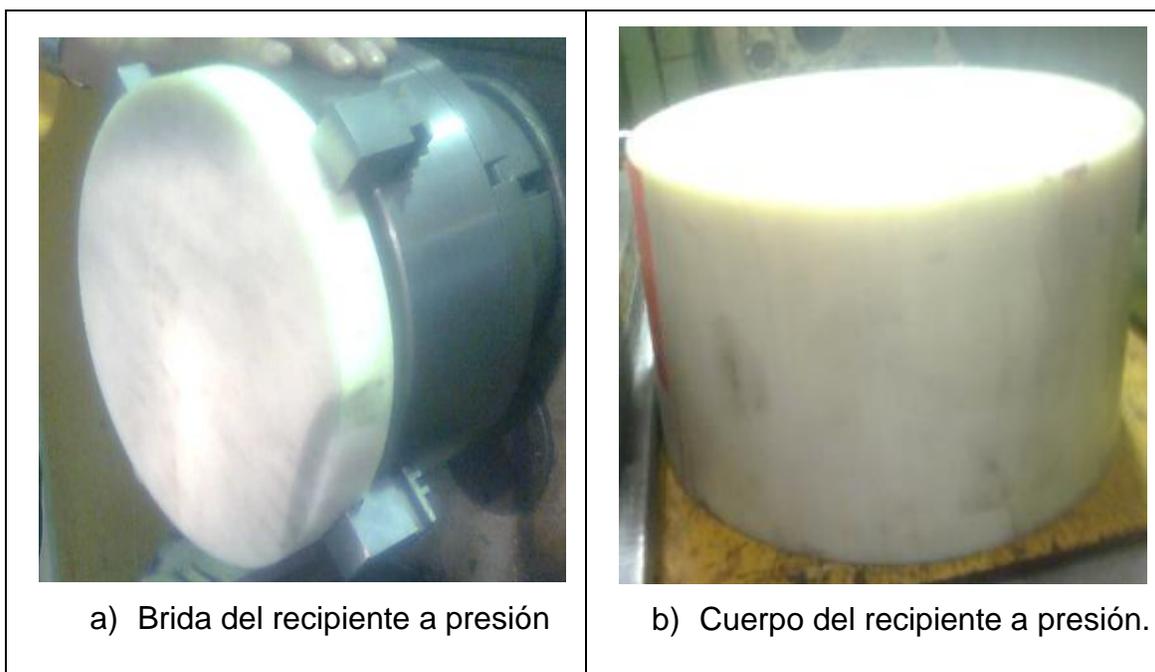


Figura 18. División del tocho de Nylamid para obtener la brida y el recipiente.

2.2.1 Maquinado del cuerpo del recipiente a presión.

El equipo que se utilizó para el maquinado del cuerpo fue un torno en paralelo, usando diferentes herramientas de corte. El procedimiento se describe en los siguientes párrafos.

Ubicación del centro del recipiente. Se marca el centro sujetando el tocho de Nylamid con las pinzas de sujeción, asegurándose que quede perfectamente centrado y se procede a hacer una pequeña marca, (Figura 19 inciso a), ésta servirá para poder ubicar el centro inferior del recipiente facilitando su maquinado del recipiente.

Acabado final del exterior del recipiente. Se utilizó una cuchilla para cilindrar, se acerca el tocho de Nylamid al torno hasta que haga un mínimo contacto con el diámetro exterior, al encenderse el torno el tocho comienza a girar, antes de esto se verificó que las dimensiones fueran acordes al diseño de la figura 16, una vez que se prende, este mínimo contacto hace que el diámetro vaya disminuyendo. La cuchilla se va acercando en dirección “x” y el tocho se mueve en dirección “z”, estos movimientos permiten moldear de una manera uniforme el diámetro exterior hasta obtener el de diseño (figura 19 inciso b).

Homogenización de la superficie. Debe estar perfectamente lisa, motivo por el cual, se cambia a una cuchilla de corte, trabajando con él hasta que la parte superior quede perfectamente lisa y uniforme, como se observa en la figura 19, inciso c).

Obtención del diámetro interno (Mandrilado). Aquí se hace un orificio justo en el centro del equipo, pero sin perforarlo totalmente, dejando un espesor en la parte inferior. Se vuelve a cambiar la herramienta de corte a una cuchilla para cilindrar interiores y se procede a incrementar el diámetro del orificio hasta obtener las medidas del diseño previo; en la figura 19, inciso d), se aprecia este procedimiento.



a) Marca central del reactor



b) Tocho de Nylamid maquinado en forma de hoya.



c) homogenización de la superficie.



d) Mandrilado.

Figura 19. Construcción del cuerpo del recipiente a presión.

2.2.2 Maquinado de la brida.

El procedimiento para el maquinado de la brida fue similar al que se realizó para la obtención del recipiente a presión. Este procedimiento se realiza a partir de las medidas de diseño previo (figura 16), quedando con un diámetro de 205 mm x 20 mm de altura en la parte exterior de la brida y en la parte que quedará dentro del reactor se tiene una altura de 9 mm y un diámetro de 120 mm.

A partir del diseño de la brida (Figura 15), se procedió a realizar todos los orificios que permitan la entrada de los aparatos de control y los electrodos, para realizar pruebas de gravimetría y electroquímicas.

Para ello se pinta la tapa de violeta, lo que favorece marcar las posiciones de estos de acuerdo al diseño. Se dividió la tapa en 8 partes iguales, partiendo desde el centro con ayuda de una regla (como se observa en la figura 20, inciso a), en el centro de cada una de las líneas se maquina un orificio utilizando la fresadora, esto es para colocar los ocho tornillos de 5/16"-18H X $1\frac{1}{2}$ ". Asimismo se marcan los orificios que se apoyarán en el diseño previo (figura 15) y también se maquina con ayuda de la fresadora.

Para que la unión de la brida y el recipiente no presente ninguna fuga y queden perfectamente cerrados, se marca con una línea vertical en el recipiente y otra en la tapa, siempre deberán coincidir para asegurar que esté correctamente cerrado. (Figura 20 inciso b).

Posteriormente se comenzó con el maquinado de los orificios de la brida, como se menciono, se utilizó una fresadora utilizando brocas de diferente diámetro, (Figura 20 inciso b). A cada uno se le hace cuerda con un machuelo de diferentes medidas, para que fuera posible ensamblar el equipo.



a) Preparación de la tapa



b) Fresado y marca de tapa



c) brida maquinada del diseño previo.



d) Envase de presión con aditamentos.

Figura 20. Maquinado de la brida para colocar los aditamentos del equipo.

2.2.3 Maquinado de los soportes para electrodos de trabajo.

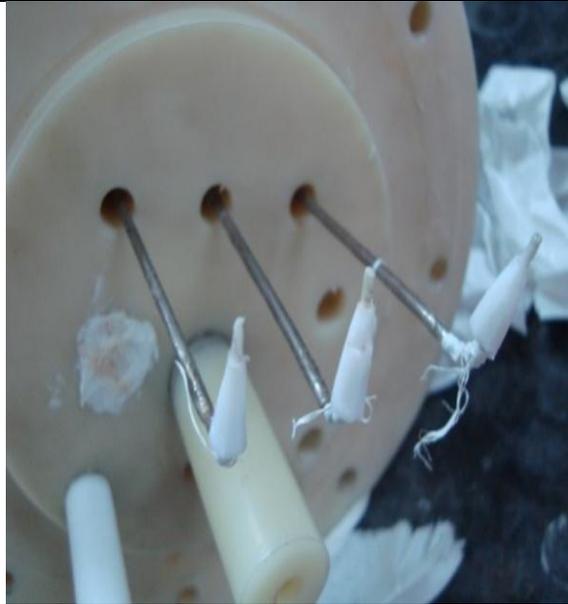
Soportes para electrodos de trabajo. En el diseño se contemplan tres entradas para los electrodos de trabajo, necesarios para realizar pruebas de gravimetría y de ruido electroquímico. Para soportar estas muestras se requiere de tres rayos de acero inoxidable de 85 mm de longitud y un diámetro de 5 mm. Para unir el rayo con la muestra, se le maquinó cuerda con un maneral de 1-64" y se le hizo un dobles de 45°. Como el diámetro del rayo es diferente al diámetro de entrada, se utilizaron niples de acero inoxidable de 1/8" para sellar la entrada en la tapa de cada electrodo de trabajo.

Como los rayos de acero inoxidable podrían intervenir en el proceso de corrosión, ya que se puede formar un par galvánico que acelera la velocidad de corrosión; se les aplica una capa de resina serie 11000 polyform.

La resina se preparó mezclando tres partes de resina por una parte de catalizador polyform, se dejó reposar durante 15 minutos y después se aplicó con un pincel. Pasando 8 horas el recubrimiento estaba completamente endurecido.

El área de las cuerdas de los rayos de acero inoxidable queda en contacto directo con las probetas de acero API-X52, para evitar este contacto, se utilizaron pequeñas partes de teflón que se adicionaron a la cuerda, quedando éstas como se observa en la figura 21, inciso a.

Finalmente se colocaron los electrodos de trabajo como se observa en la figura 21, inciso b.



a) Rayos maquinados junto con las cuerdas de teflón



b) los electrodos de trabajo de acero API X52.

Figura 21. Soportes para electrodos de referencia (muestras de gravimetría).

2.2.4 Instalación de los aditamentos del sistema.

Una vez que se tiene el recipiente a presión terminado, se procedió a la instalación del sistema, utilizando una serie de aditamentos (tabla 14).

Tabla 14. Material necesario para la instalación del sistema

1 Caja de acrílico (50cm * 30cm) aproximadamente
1 Bomba manual tipo pistón para pruebas hidrostáticas (RC) (0-2000 lb/in ²)
1 Adaptador hembra / macho 1 ½ '' x 3/8''
1 Conector macho hidráulico PVC 19 mm
1 Conector macho hidráulico PVC 25 mm
1 Reducción Bushing hidráulico PVC
1 Metro de tubo PVC hidráulico 13 mm
2 codos hidráulicos PVC 90X 13 mm
1 Envase de acrílico diámetro 15.6 cm X 19.6 cm altura
Base de tres patas
3 Rayos de acero inoxidable
1 Tanque de Nitrógeno

Para mantener la temperatura de $6^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$, se utilizó un recipiente de acrílico de 50 cm x 30 cm, forrado interiormente de unicel con la finalidad de mantener constante la temperatura.

Se fijó el recipiente de alta presión mediante el diseño y construcción de una base metálica de hierro gris con tres soportes. Esta base se fijó al recipiente, contenedor de hielo.

La bomba manual hidrostática se probó y se utilizaron conexiones para que quedara lista para usarse, ésta se conectó a la válvula de entrada del equipo por medio de una manguera de alta presión de 1.6 m de longitud.

Para introducir presión hidrostática fue necesario un alimentador, éste fue un recipiente de acrílico con un agujero en la parte de abajo, para aprovechar la fuerza de gravedad y que el líquido fluya, se conectó por medio de tubos PVC hacia la bomba.

Al alimentador también se le construyó una base de hierro gris pintado con una medida de 30 cm de altura, que quedó por encima de la bomba manual hidrostática (figura 22).

Para pruebas electroquímicas posteriores, se tomaron medidas del electrodo de referencia calomel, y se maquina con Nylamid un tubo hueco ajustado a sus medidas para protección del electrodo de calomel y que éste pueda soportar presiones altas.

Una vez que se cuente con todos los aditamentos necesarios para el correcto y buen funcionamiento del equipo, se unen como se mencionó: El alimentador se conecta a la bomba manual hidrostática y ésta a su vez se conecta con el recipiente; en la figura 17 se muestra el diseño, y en la figura 22 en la parte de resultados se puede observar el equipo en funcionamiento, con todos los aditamentos y el reactor conectados.



Figura 22. Sistema en funcionamiento.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Una vez que se llevo a cabo el diseño y maquinado del equipo, se realizaron pruebas preliminares, con la finalidad de verificar que el recipiente soportara la presión de diseño de 500 lb/in².

A partir de estas pruebas, se eligieron dos presiones de trabajo, la primera la presión máxima que soporta el equipo 25 atm (370 lb/in²), la segunda una presión intermedia de 14.2 atm (210 lb/in²) y una última presión que se eligió de 0.77 atm (11.3 lb/in²), condiciones de la ciudad de México.

Una vez que se definieron las condiciones de presión se llevaron a cabo la determinación de la velocidad de corrosión del acero API-X52 a través de la técnica de pérdida de peso (técnica de gravimetría).

3.1 Pruebas preliminares del recipiente a presión para determinar las condiciones experimentales

El equipo se conectó de acuerdo al diseño presentado en la figura 17. La primera prueba presentó fugas en las conexiones de la válvula de salida con el niple y en el contraelectodo a partir de 5 atm (74 lb/in²) de presión, por lo que se optó por utilizar en primera instancia el teflón cinta y después se selló con silicón.

Una vez solucionado el problema se realizó la siguiente prueba en donde el equipo llegó a una presión de 14.2 atmósferas (210 lb/in²) misma que se mantuvo durante 24 horas y posteriormente se aumentó la presión a 25 atmosferas (370 lb/in²), manteniéndose por otras 24 horas siendo un total de 48 horas.

Finalmente se intentó aumentar la presión hasta llegar a la correspondiente presión de diseño de 500 lb/in², sin embargo el equipo presentó una ligera deformación en la brida a una presión de 27.2 atmosferas (400 lb/in²), por lo que se decidió trabajar como presión máxima la de 25 atmosferas (370 lb/in²), ya que a esta presión el equipo no presentaba ninguna deformación y por lo tanto no había riesgo de que el equipo llegará a fallar.

Por lo tanto las condiciones de presión fueron: como presión máxima 25 atmósferas equivalente a 250 m de profundidad y con la finalidad de tener un punto intermedio se eligió la presión de 14.2 atmosferas equivalente a una profundidad de 142 m y finalmente la presión de la ciudad de México 0.77 atmósferas (11.3 lb/in²).

Por otro lado, como el propósito de este trabajo era simular las condiciones más cercanas a aguas profundas, la temperatura que se eligió fue de 6° C correspondiente a profundidades mayores de 500 m.

Para mantener esta temperatura constante se colocó el reactor dentro de una caja de acrílico previamente forrada con unicel, depositando hielo. La solución se enfrió previamente a una temperatura de 5° C y con el cambio continuo de hielo se logró mantener la temperatura con una variación de $\pm 1^\circ$ C durante un periodo de 24 horas.

3.2 Maquinado de las muestras de acero API X52.

A partir de una muestra de tubería de un acero API-X52, se maquinaron 12 cubos de 1X1X0.4 cm, de los cuales 9 se utilizaron para realizar la evaluación por gravimetría, uno se utilizó para hacerle una metalografía y los restantes quedaron de repuesto. Así mismo se maquino un cubo de mayor tamaño de 2X2X1 cm, el cual se usó para realizar un análisis de composición química.

3.3 Caracterización metalúrgica del sustrato.

Se hace un análisis de composición química mediante espectrometría de chispa, método usado en piezas metálicas, la prueba consiste en crear un arco eléctrico que hace contacto con el material y excita los átomos, los cuales a su vez emiten diversas longitudes de onda que son captadas y arrojan una cierta composición química. El equipo se tomó del laboratorio de arenas del departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química, denominado spectro lab M8; esta prueba permite conocer la composición química real del material.

Se realizó una metalografía con la finalidad de observar los constituyentes del acero API-X52 y así comprender sus propiedades. El acabado superficial de la muestra se logró con papel de carburo de silicio grado 240, 320, 400 y 600 paso a paso, hasta dejar la superficie homogénea, después se pulió en paño grueso y fino con alúmina de 1 y 0.3 respectivamente; se limpió la muestra a chorro de agua, se le hizo un ataque químico con nital 3, por inmersión de 10 segundos. El ataque mencionado se detuvo con agua a chorro y se secó con flujo de aire caliente.

3.4 Técnica de pérdida de peso (gravimetría).

Con el propósito de evaluar el efecto de la velocidad de corrosión a diferentes presiones, se utilizó la técnica de gravimetría, el procedimiento experimental se basó en las normas ASTM G1-90 y ASTM G31-90.

A las muestras de acero API-X52 de dimensiones de 1X1X0.4 cm se les realizó un orificio pequeño de 1/16" de diámetro y en seguida se les hizo cuerda con un machuelo de 1-64", para que pudieran ser soportadas a través de los rayos de acero inoxidable.

Posteriormente se procedió a realizarles un acabado superficial a todas las caras con papel carburo de silicio de 240, 320, 400 y 600. Se limpiaron con agua de la llave, después con agua destilada y finalmente se secaron con aire caliente y acetona. Durante todo el procedimiento se utilizaron guantes a fin de evitar engrasarlas.

Una vez que las muestras estuvieron secas, se pesaron cada una de ellas por triplicado en una balanza analítica (figura 23, inciso a). Se calculó un promedio final de cada muestra registrándolo como peso inicial promedio.

Por otro lado, se preparó una solución 3.5% w/v de NaCl y se colocó en el refrigerador hasta alcanzar una temperatura de 6° C.

El contenedor de pared adiabática se llenó de hielo y se introdujo el envase de alta presión junto con el soporte. El hielo se comprimió manualmente y al final se roció sal de mesa en la parte superior para retardar la disolución natural del hielo.

Una vez que el recipiente estuvo fijo, se agregó la solución de NaCl al 3.5% y a una temperatura de 6° C. Al mismo tiempo se llenó el tanque de alimentación con la misma solución. Después se burbujeó nitrógeno por la válvula de entrada durante una hora. Fue complicado controlarlo y medirlo dentro del reactor durante las distintas pruebas. La medición del oxígeno disuelto se tuvo que hacer con el reactor completamente abierto, esta acción permitió que durante este tiempo pudiera introducirse oxígeno del ambiente y provocar de esta forma que la variabilidad de oxígeno en cada prueba fuera diferente; a pesar de que después de medir el oxígeno disuelto, se burbujeará durante media hora más dando un total de hora y media.

Posterior a ello se montaron las tres muestras tal y como se aprecian en la figura 23 inciso b) y c). El soporte de cada probeta de acero inoxidable se cubrió con cinta teflón y con teflón sólido para evitar el par galvánico entre éste y la muestra.

Antes de cerrar la brida, se hizo una lectura de oxígeno disuelto con el equipo (Orion star and star plus meter). Después se cerró la brida con los ocho tornillos de acero inoxidable.

Nuevamente se burbujeo nitrógeno durante 30 minutos, de esta manera se aseguro el desplazamiento del oxígeno disuelto en el equipo.

Se dejó de burbujear e inmediatamente se cierra la válvula de entrada y de salida, posteriormente se midió la temperatura y se burbujeó también el tanque de alimentación durante una hora y media.

Consecutivamente, se procedió a verificar que todas las conexiones entre equipo, recipientes y bomba estuvieran bien para entonces comenzar a bombear hasta alcanzar la presión requerida.

La presión se mantuvo durante 93 horas, haciendo revisiones periódicas cada 6 u 8 horas y se registraron temperatura y presión obtenida en cada una de ellas, de ser necesario se reemplaza el hielo derretido que se encuentra en el recipiente adiabático.

.

Para las condiciones de presión a condiciones de la ciudad de México 0.77 atmosferas (11.3 lb/in^2), no fue necesario utilizar la bomba manual hidrostática.

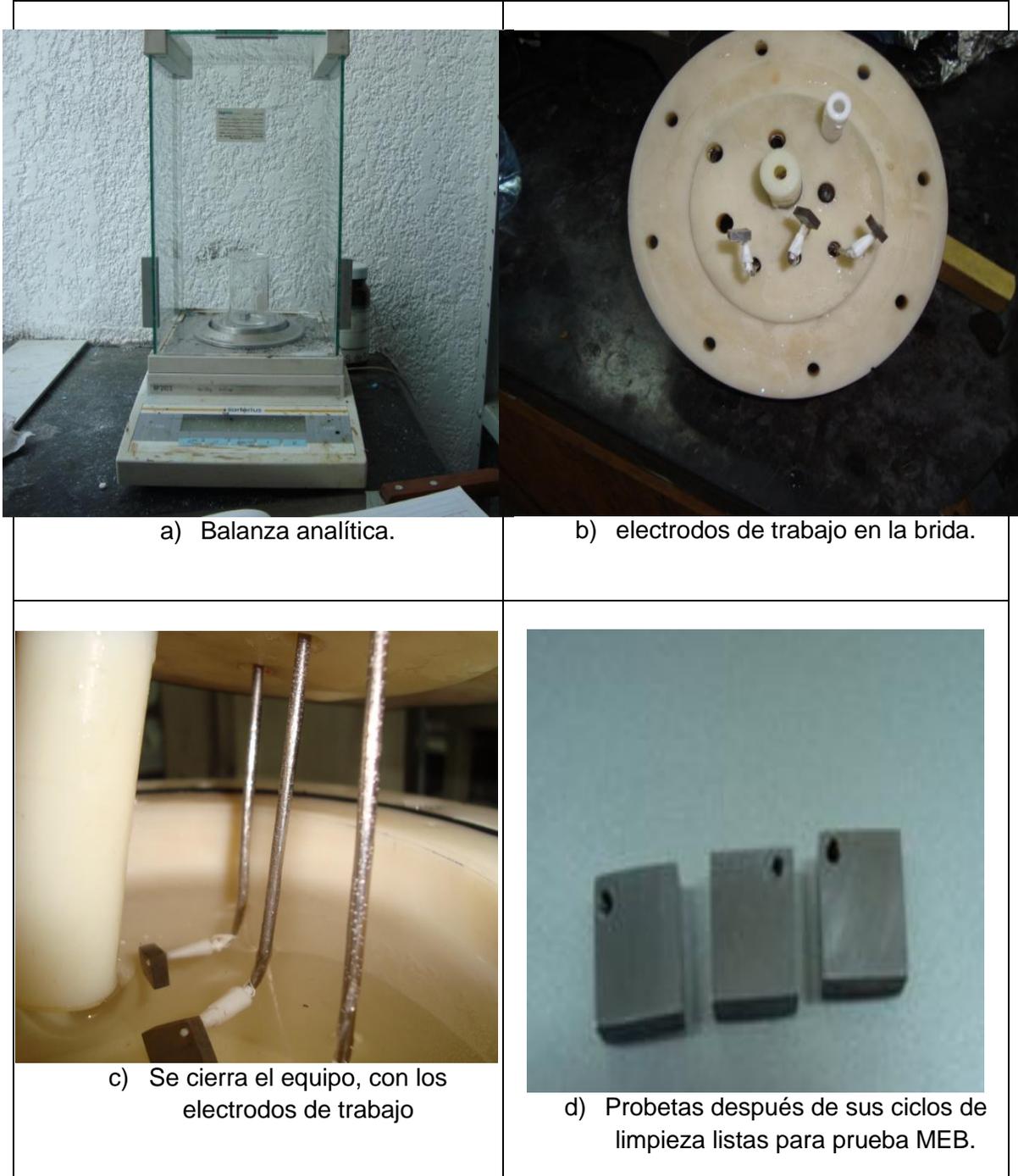


Figura 23. Montaje de los electrodos de trabajo

Al terminó de la prueba, se desconectó la manguera de alta presión de la válvula de entrada, la válvula de salida se abrió para liberar la presión hidrostática en caso de que exista alguna, se retiraron los tornillos de la brida cuidando de no

dañar el o ring. Las probetas se quitaron con sumo cuidado (esta acción se debe realizar con las manos cubiertas por un par de guantes).

Una vez desmontadas las muestras de acero API-X52 se sometieron a un proceso de limpieza en primer lugar lavándolas a chorro de agua, agua destilada y utilizando una solución decapante de HCl y hexametilentetramina, 500 mL HCl concentrado, diluidos en 500 mL de agua destilada, más 3.5 g de hexametilentetramina, que actúa como inhibidor. El tiempo de decapado fue de 30 a 60 segundos.

Al termino de ello, se enjuagaron a chorro de agua, agua destilada y finalmente se secaron con acetona y se envolvieron en sanitas. Cada muestra se peso por triplicado registro un peso promedio final. Nuevamente se volvieron a someter las muestras al decapado y a enjuagar con agua, agua destilada y secar con acetona y registrar el peso. A esta serie de pasos se le llama ciclo de limpieza, y concluye hasta que la variación de peso del último con el penúltimo ciclo sea despreciable.

Resumiendo, al final de todo este procedimiento se obtuvo el peso final de cada muestra y con el peso inicial registrado previamente, se calculó la pérdida de peso del material que experimento durante 93 horas de exposición en el sistema. A partir de ello se calculó la velocidad de corrosión.

3.5 Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).

Sabiendo que la técnica de gravimetría supone que la corrosión es de tipo uniforme, es decir que se presenta a lo largo de toda la superficie expuesta, se realizó un análisis de Microscopía Electrónica de Barrido de las probetas con el fin de identificar otro tipo de corrosión que pudiera haber sufrido durante la realización de la prueba experimental. Este análisis consta de lo siguiente: las

muestras se trasladaron a la compañía MICRA, donde se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido marca VEGA 3 TESCAN. Para realizar dichas pruebas, las probetas fueron colocadas de tres en tres en el porta muestras del microscopio electrónico de barrido, cuya superficie máxima que acepta es de 1 cm², por lo que a las muestras no se les hizo ninguna modificación dimensional, de hecho solo se aseguró de que estén sin humedad y se colocaron directamente en el porta muestras; primero se instalaron las muestras a 0.77 atmósferas, enseguida se introdujeron a la cámara de vacío del microscopio electrónico de barrido y se esperó hasta que se encontraran en condiciones óptimas de vacío (aproximadamente 5 minutos), posteriormente se recurrió a el microscopio para observar la muestra a diferentes aumentos; una vez finalizado el análisis con las primeras muestras, se colocaron las éstas a 14.3 atmósferas (210 lb/in²), siguiendo de las muestras a 25 atmósferas (370 lb/in²), cada muestra se examinó y se le tomó una fotografía en diferentes posiciones y a diferentes aumentos.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Uno de los objetivos principales de este proyecto fue diseñar un recipiente de bajo costo que soportara altas presiones y así poder realizar tanto pruebas de gravimetría como técnicas electroquímicas. Los resultados de las pruebas previas que se realizaron al recipiente, no fueron como en el diseño se había planteado, sin embargo, se llegó a presiones de aproximadamente 25 atm y estos son resultados satisfactorios que en principio sirven para realizar trabajos de investigación como el que compete a este trabajo.

Los resultados finales de estas pruebas preliminares indicaron que la presión máxima que soporta el recipiente es de 370 lb/in² (25 atm), lo que equivaldría a un estudio con profundidades de 250 m. A partir de este dato se logró determinar los parámetros de presión que se contemplaron en este estudio, como la presión máxima de 25 atm y una presión intermedia de 14.2 atm aprox. Aunque ciertamente no equivale a aguas profundas, el equipo da para estudiar el comportamiento del metal a profundidades de hasta 250 m, es decir aguas poco profundas.

Por otro lado las propiedades térmicas del material Nylamid, logra mantener constante la temperatura en este caso de 6° C \pm 1° C. Logrando finalmente realizar pruebas de gravimetría bajo condiciones de aguas profundas tal como se planteó en un inicio.

El Oxígeno disuelto en el medio fue de 4.1 mg/L para la presión hidrostática de 25 atm, para la presión de 0.77 atm fue de 4.1 mg/L mientras que en la presión intermedia 14.2 atm fue la menor de 3.9 mg/L, sin embargo, esta concentración fue una aproximación y no representa datos contundentes.

4.1 Caracterización metalúrgica del material de prueba API-X52.

La composición química del acero API-X52 se determinó utilizando la técnica de espectroscopia de emisión atómica por chispa. Los resultados se presentan en la tabla 15.

Tabla 15. Composición Química de la muestra de acero API-X52 en % peso.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0.1305	0.2617	1.524	.0116	0.0026	0.0230	0.0368	0.0845
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%Pb	%Fe
0.0469	0.0044	0.0913	0.0481	0.0189	0.0705	0.0049	97.6

Como se aprecia en la misma tabla, la composición del acero API-X52 presenta un contenido de carbono de 0.13 %C, asimismo destaca que tiene relativamente grandes cantidades de elementos aleantes, que sin duda modifican la microestructura de los aceros en general y por lo tanto sus propiedades. El contenido de Mn determina el tipo de matriz que tendrá la pieza, en este caso favorece una matriz perlítica, al momento de que el acero API X52 solidifica cada uno de los elementos aleantes interfiere de manera distinta, por lo cual se emplea un término llamado *carbono equivalente*, que permite visualizar la interacción de los elementos aleantes en un diagrama binario Fe-C grafito, sin necesidad de elaborar un diagrama cuaternario Fe-C-Si-Mn o algún otro que sea semejante; dicho término según PEMEX, “Acero estructural para plataformas marinas”⁽²²⁾, se define como:

$$\%CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{(\%Cr + \%Mo + \%V)}{5} + \frac{(\%Ni + \%Cu)}{15} \quad (21)$$

Donde: C, Mn, Cr, Mo, V, Ni y Cu son elementos químicos en porcentaje de peso del acero.

Si se sustituyen los valores de la tabla 15, en la ecuación 21, se obtiene el porcentaje de carbón equivalente, este es un valor de suma utilidad pues servirá para describir el proceso de solidificación del acero API X52, así como la comprensión de la microestructura metalográfica; realizando la sustitución se tiene la siguiente ecuación.

$$\%CE = 0.1305 + \frac{1.524}{6} + \frac{(0.0230 + 0.0368 + 0.0705)}{5} + \frac{(0.0845 + 0.0913)}{15}$$
$$\%CE = 0.4228$$

De acuerdo al contenido de carbón equivalente, corresponde a un acero dulce (bajo contenido de carbono) hipo eutectoide, en la figura 24 se muestra el diagrama Fe-Fe₃C, en el que la línea marcada corresponde al resultado de carbono equivalente que se obtuvo, dicha línea indica la trayectoria de solidificación del acero.

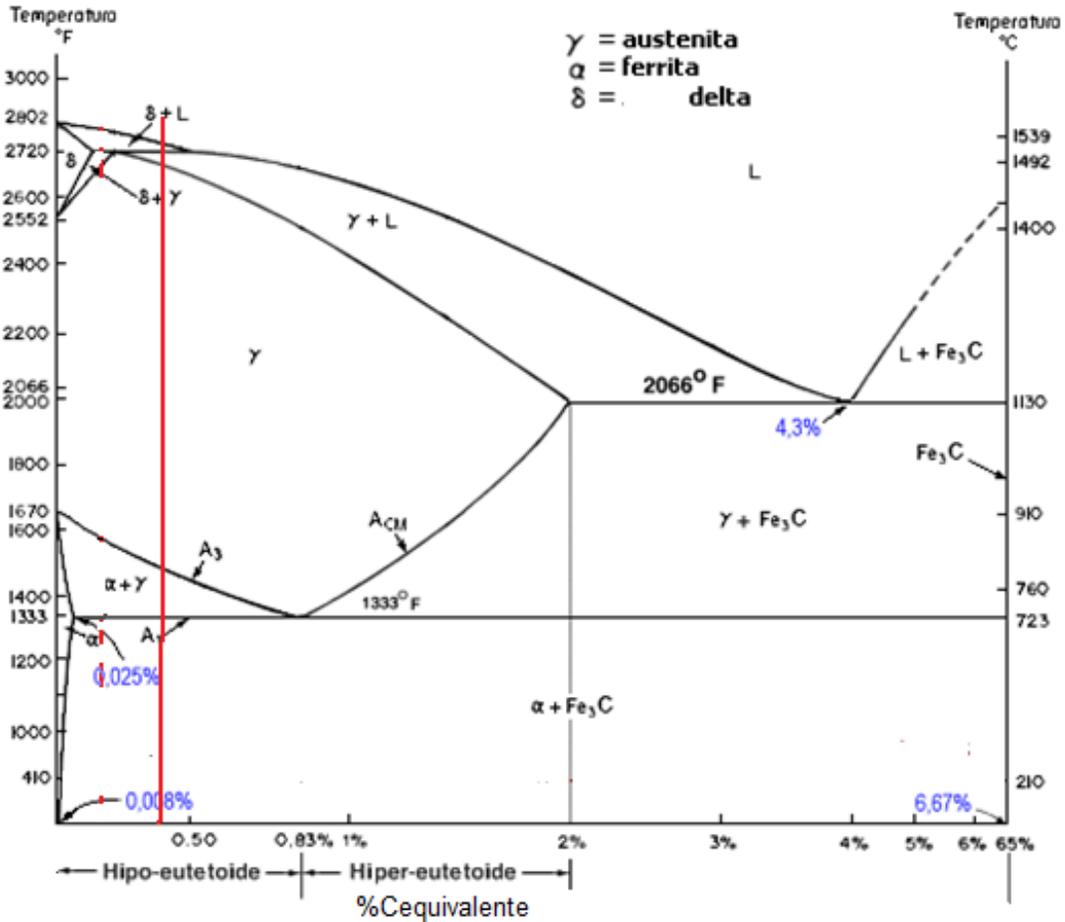


Figura 24. Diagrama Fe-Fe₃C

El proceso de solidificación en un acero es importante para comprender la microestructura y por ende sus propiedades; éste depende de varios factores como la composición, la velocidad de enfriamiento, tipo de maquinado, tratamientos de temple y revenido; entre otros. En este caso, se puede observar las líneas de solidificación en la figura 24 y los cambios de fase que este material ha experimentado durante su fabricación, los cuales son los siguientes para el %C equivalente [($\delta+L$), (γ), ($\alpha+\gamma$) y ($\alpha+\text{Fe}_3\text{C}$)].⁽³¹⁾; este tipo de acero es laminado en caliente mientras presenta la fase austenítica (γ), subsecuentemente la estructura cristalina sufre un cambio al tener un enfriamiento relativamente rápido y comienza a tener fases de ferrita

proeutectoide (α), el remanente de la fase (γ) perlita al solidificar por completo a los 723 °C. Las fases principales son la perlita y ferrita.

Si se toma en cuenta solo la composición química de carbono equivalente de 0.42% en el diagrama y se hace la regla de la palanca para predecir la microestructura, se obtendría aproximadamente una microestructura de 50% proeutectoide (α) y 50% perlita, lo que hace un material con alta resistencia a la fractura; precisamente para corroborar esta información, se hicieron metalografías figura 25 a dos diferentes aumentos (50x y 100x). A 50x se puede dar un panorama más amplio de la microestructura, al aumentar a 100x se puede observar dos fases sólidas, una rica en ferrita de color claro y perlita en color oscuro, formada por capas o láminas de (α y cementita), visualmente hay un mayor porcentaje de Ferrita (aproximadamente un 70%), mientras de perlita es alrededor del 30%.

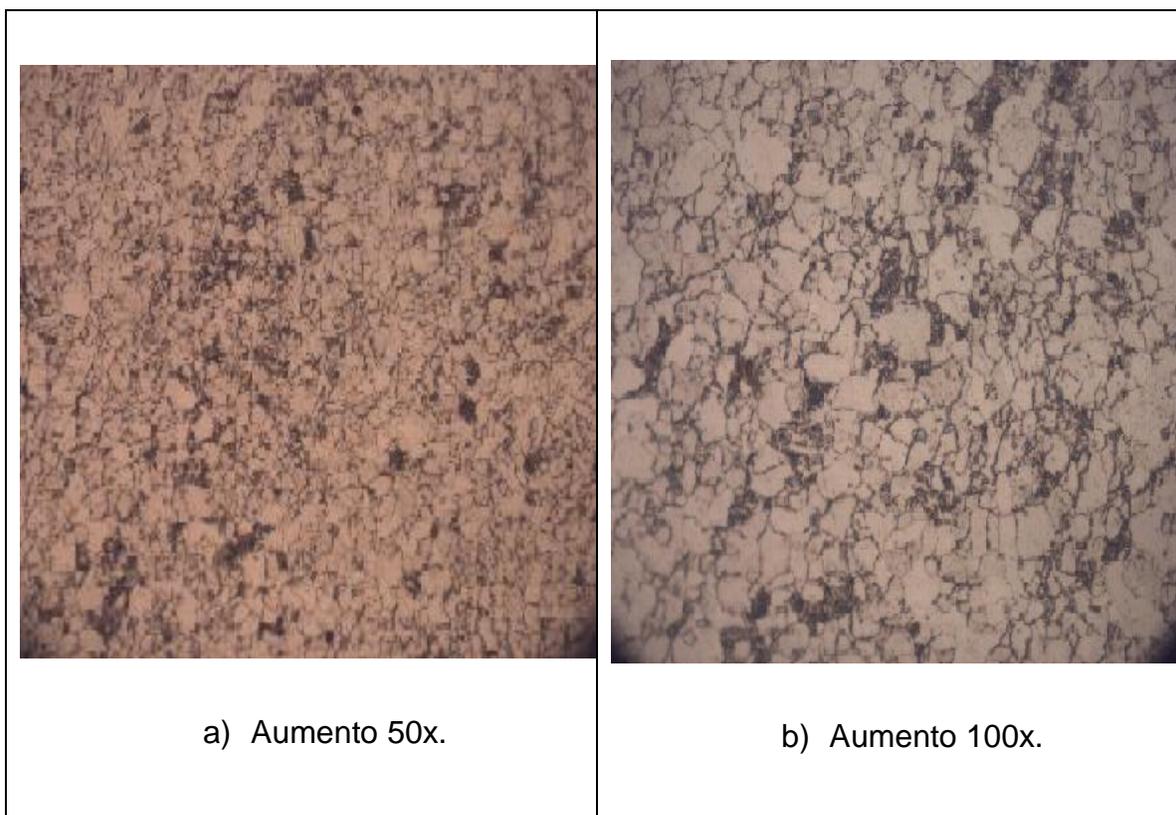


Figura 25. Metalografía del acero API X52.

Asimismo, se observa en la misma metalografía que los límites de grano son oscuros, esto se debe a que los carburos precipitan en los límites de grano debido a la velocidad de enfriamiento y a el contenido de Mn que favorece ese comportamiento, las diferencias entre los porcentajes calculados y los que visualmente se aprecian se debe principalmente al algoritmo de cálculo de carbono equivalente, es complicado establecer una relación directa en cómo afectan los elementos aleantes al contenido de carbono equivalente, la ecuación 21 es una aproximación.

4.2 Técnica de pérdida de peso.

Se utilizó esta técnica para determinar el efecto de la presión en el proceso de la velocidad de corrosión del acero API-X52 a temperatura constante $6^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$. Las velocidades de corrosión que se obtuvieron se presentan en la tabla 15, en donde la velocidad para 0.77 atm es igual a 0.0530 mm/año, para 14.2 atm es igual a 0.0212 mm/año y finalmente la velocidad de corrosión a 25 atm es igual a 0.0954 mm/año.

La velocidad de corrosión se calculó utilizando las leyes de Faraday, a partir de la pérdida de peso que sufrió el material por unidad de área. Enseguida se presenta un ejemplo de cálculo de la velocidad de corrosión promedio:

$$V_{corr} = \left(\frac{0.0005}{334800s * cm^2} \right) * \left(\frac{1C}{0.0003292g} \right) * \left(\frac{1eq}{96500C} \right) * \left(\frac{1mol}{2eq} \right) * \left(\frac{55.8g}{1mol} \right) * \left(\frac{1cm^3}{7.8g} \right) * \left(\frac{10mm}{1cm} \right) * \left(\frac{3600s}{1hora} \right) * \left(\frac{24h}{1día} \right) * \left(\frac{365días}{1año} \right) = \left(0.05303 \frac{mm}{año} \right)$$

Tabla 16. Resultados obtenidos de la prueba de inmersión (pérdida de peso) de acero API-X52

Presión (atm)	Probeta	Peso inicial (g)	Peso final (g)	ΔP promedio (g)	Área promedio (cm ²)	Velocidad de corrosión promedio (mm/año)
0.77	A ₁	2.9455	2.9432	0.0008	2.98	0.0530
	A ₂	2.8805	2.8791	0.0005		
	A ₃	2.9884	2.9874	0.0003		
	Promedio A	2.9381	2.9365	0.0005		
14.2	B ₁	2.9020	2.9018	0.0002	2.98	0.0212
	B ₂	2.8973	2.8972	0.0001		
	B ₃	2.8527	2.8525	0.0002		
	Promedio B	2.8840	2.8838	0.0002		
25	C ₁	2.9763	2.9755	0.0008	2.98	0.0954
	C ₂	2.9339	2.9330	0.0009		
	C ₃	2.9729	2.9720	0.0009		
	Promedio C	2.9610	2.9610	0.0009		

La figura 26, muestra la gráfica de la tabla anterior, las velocidades de corrosión en función de las diferentes presiones hidrostáticas.

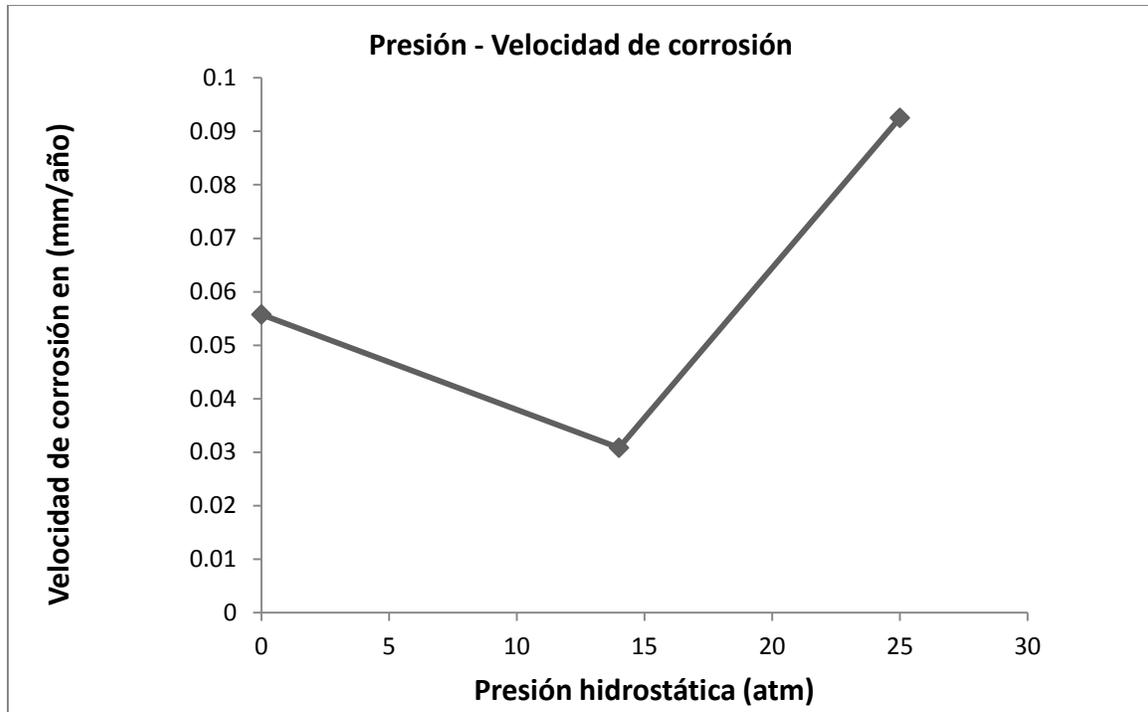


Figura 26. Gráfica del promedio de la velocidad de corrosión a 0.77 atm, 14.2 atm y 25 atm.

Los resultados de la velocidad de corrosión que se obtuvieron experimentalmente son pequeños y no tienen una variación tan amplia, al parecer no hay relación directa entre el aumento de la presión y la velocidad de corrosión. Autores como Takako Kuroda ⁽²⁵⁾ afirman que la presión hidrostática no influye en la velocidad de corrosión.

Por otro lado, en la tabla 4 del capítulo I, se muestra la resistencia relativa a la corrosión y para el acero API-X52 se puede calificar de sobresaliente a excelente. Eso quiere decir que si se utilizaran tuberías de acero API X52 podrán perdurar por un tiempo largo sin perder sus propiedades mecánicas.

Sin embargo esto no es del todo cierto debido a que gravimetría solo logra caracterizar corrosión uniforme sin considerar la corrosión localizada que en muchos casos es mucho más severa a pesar de presentarse en una zona

específica, a diferencia de la uniforme que se lleva a lo largo de la superficie del material.

Al retirar las probetas del sistema se observó la presencia precisamente de corrosión localizada por picaduras, es por ello que se recurrió al Microscopio electrónico de Barrido para corroborar la información.

4.3 Microscopio electrónico de barrido.

En la figura 27, se pueden observar las fotografías del acero API-X52 obtenidas con el Microscopio Electrónico de barrido VEGA 3 TESCAN, cada fotografía se tomó de las muestras que aparentemente desde una vista macroscópico, presentaban corrosión localizada. Estas imágenes presentan las picaduras de mayor tamaño y su diámetro aproximado que se encontraron a lo largo de la superficie en cada muestra para las tres diferentes presiones.

Las muestras que estuvieron sometidas a 0.77 atm de presión (figura 27), a simple vista no se observaba ninguna marca, pero desde 3000X aumentos se pueden apreciar pequeñas picaduras de 4 μm a 11 μm .

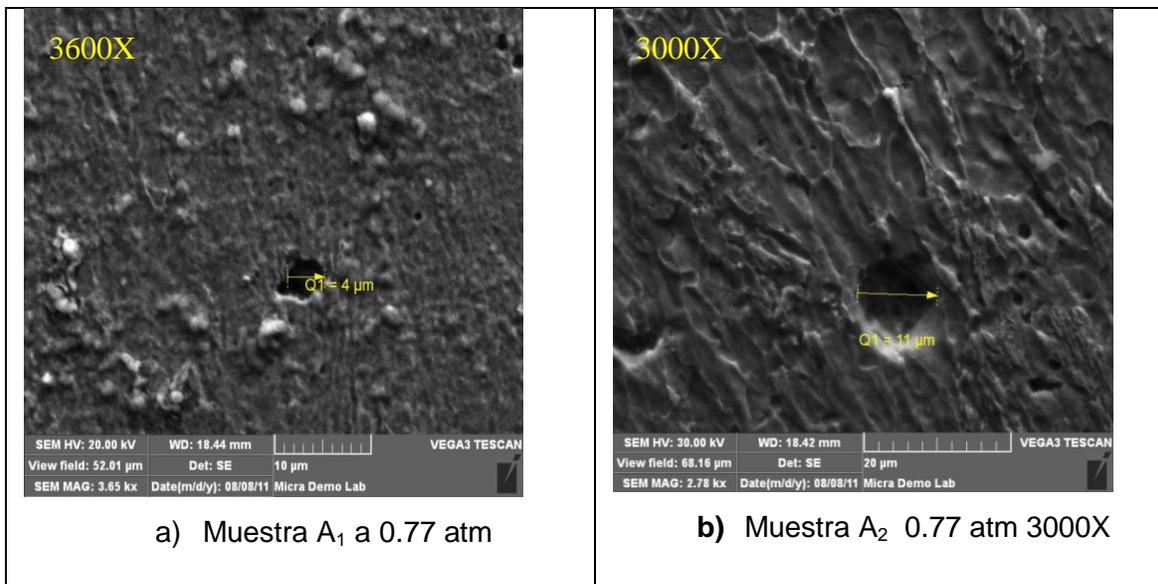


Figura 27. Imágenes tomadas con el microscopio electrónico de barrido Vega 3 TESCAN a diferentes aumentos.

Para condiciones de 14.2 atm (figura 28, inciso a), se observó alrededor de la picadura una marca aún mayor que rodea a ésta y misma que también se toma en cuenta para medir el diámetro de la picadura, cabe mencionar que esta picadura fue la más grande que se encontró de todas las muestras, su diámetro fue de 130 μm . La

corrosión alrededor de la picadura según su morfología podría ser corrosión por crevice, una vez formada la hendidura de la corrosión por picadura es más probable que comience este tipo de corrosión, en donde la parte de la hendidura actuara como ánodo y la parte de alrededor de la hendidura actúa como cátodo desgastando cada vez más el material. Cuando se desprecia el posible comportamiento por crevice, el diámetro de la picadura es igual a 24 μm .

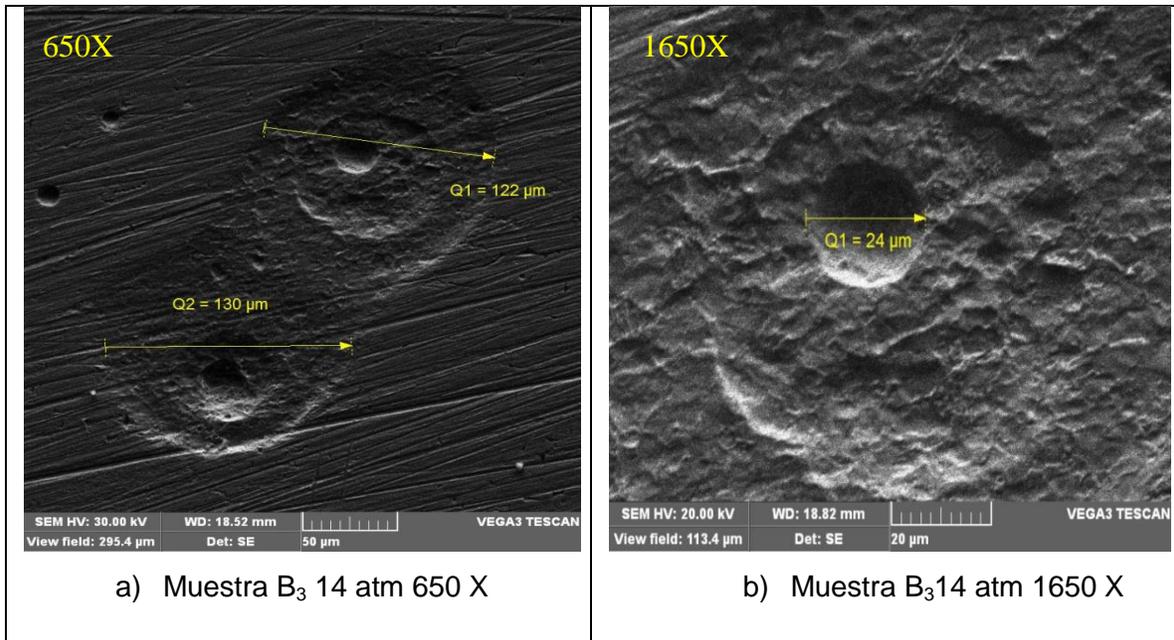


Figura 28. Imágenes tomadas con el microscopio electrónico de barrido Vega 3 TESCAN a diferentes aumentos.

A 25 atm se aprecia en primer lugar un mayor número de picaduras muy similar a la condiciones de 14.3 atm. Los diámetros de las picaduras se encuentra entre valores de 21 μm a 33 μm cómo máximo (figura 29 inciso a). También a estas condiciones se encontraron picaduras como la que se presenta en la figura 29 inciso b, en donde se obtiene un diámetro de 89 μm que es probable que también haya sido causada por el tipo de corrosión por crevice.

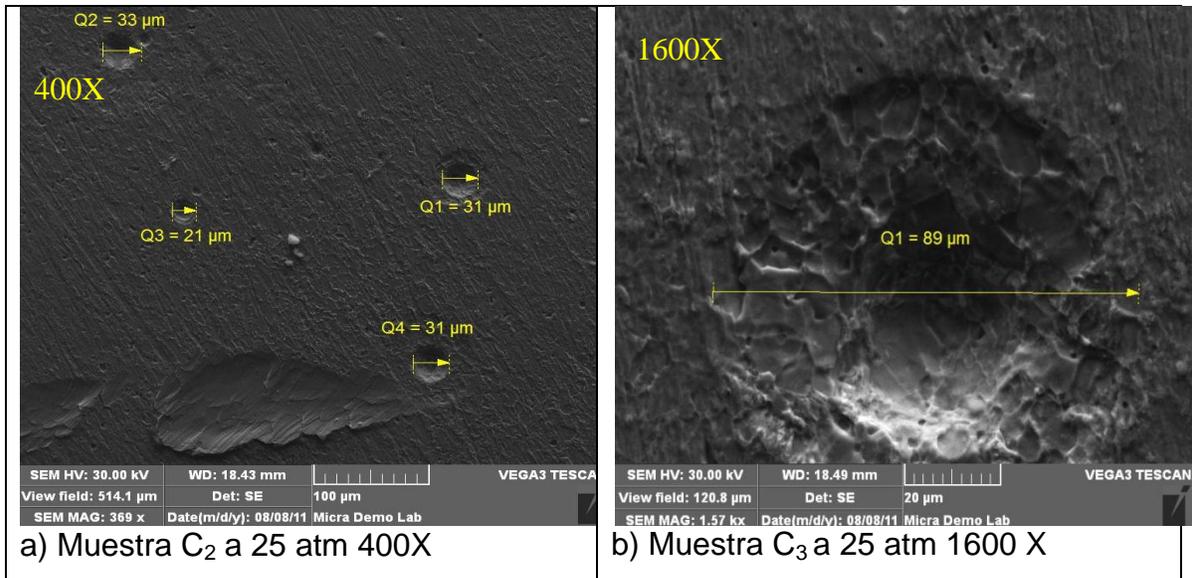


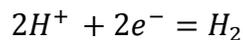
Figura 29. Imágenes tomadas con el microscopio electrónico de barrido Vega 3 TESCAN a diferentes aumentos.

Como se ha comentado en las imágenes anteriores se observan picaduras y estas ocasionan la corrosión por crevice sin embargo si no existieran picaduras tampoco habría corrosión por crevice. El mecanismo de reacción de la picadura se genera por la falta de convección del O_2 hacia la picadura, aumenta la concentración en este caso de Fe^{2+} , creando así un campo eléctrico, resultado esto en una migración de iones Cl^- hacia la picadura, si se incrementa la actividad de iones cloruro la susceptibilidad de picadura se incrementa también. La alta concentración de estos forma $FeCl_3$ llevando a una reacción de hidrólisis aumentando localmente el grado de acidez, lo que ocasiona que la picadura crezca en el sentido de la gravedad. Las reacciones que ocurren en el acero API-X52 son las siguientes.

Reacción anódica



Reacción catódica



Resumiendo, se observa que los diámetros de las picaduras a 0.77 atmósferas (11.3 lb/in²), son menores comparados con las muestras que fueron sometidas a 14.3 y 25 atm de presión. Al incrementar la presión de 0.77 atm a 14.3 atm se observa un aumento considerable de picaduras, sin embargo entre la presión de 14.3 y 25 atm la presencia de picaduras, es muy similar, pudiera decirse que al aumentar la presión de 14.3 a 25 atm el proceso de corrosión localizado, picaduras, no influye. Tao Zhang ⁽²¹⁾, demostró que al variar la presión hidrostática facilita el rompimiento de la capa pasiva de óxido provocando la formación de los sitios de picadura.

Finalmente, la presencia de corrosión localizada, hace que la técnica de gravimetría no logre determinar la verdadera relación que existe entre la velocidad de corrosión y la presión hidrostática. Un ejemplo de ello es que a condiciones de 14.2 atm, se obtuvo la menor velocidad de corrosión, sin embargo viendo las imágenes del Microscopio Electrónico de Barrido a esas condiciones fueron donde se encontraron las picaduras de mayor diámetro.

CONCLUSIONES.

- El equipo diseñado y construido en el laboratorio simuló condiciones de presión hidrostática máxima de 25 atm, equivalentes a las condiciones que ejerce el mar en condiciones naturales a 250 m de tirante de agua.
- La aplicación de técnicas de gravimetría no logró distinguir el efecto de la presión hidrostática sobre la velocidad de corrosión.
- Gracias al análisis visual del MEB, se pudo observar que es muy probable que exista una relación entre mayor presión, mayor número de picaduras y mayor tamaño de la picadura.
- Es necesario hacer pruebas que determinen la corrosión localizada a través de técnicas electroquímicas y comprender la influencia o relación del efecto de la presión hidrostática en la velocidad de corrosión.

RECOMENDACIONES.

El equipo está diseñado para hacer pruebas electroquímicas, las cuales se podrán hacer con las mismas variabilidades de presión máxima de 25 atm (370 lb/in²), muy posible, las curvas de polarización conseguirán determinar el efecto de la presión hidrostática en la corrosión localizada, verificando si cambia el potencial crítico conforme a la variabilidad de presión.

Por otra parte considerando la parte de mecánica de materiales, se puede hacer un análisis de esfuerzos por método finito con algún programa como ANSYS, para verificar con exactitud la presión de operación que puede soportar el equipo.

Con un mayor presupuesto y tomando como referencia este tipo de trabajo se podría diseñar un equipo que soporte presiones mayores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Instituto Mexicano del Petróleo, "Prospectivas de la investigación y el desarrollo tecnológico del sector petrolero al año 2025", Programa editorial Dr. Anaya René, México, 2001, pp 43-62.
2. SALAZAR Urdapilleta, A. "Aguas profundas la última frontera", Petroquímica la revista de la industria petrolera, Julio-Agosto de 2009, pp 62-72.
3. Pemex Exploración y Producción. Disponible en http://www.ri.pemex.com/files/dcpe/inf02_pep.pdf. (Consultado 18 de Marzo 2011).
4. GERSHENSEN. A, "El petróleo de México la disputa del futuro", primera edición, Debate, México, 2010, pp 23-27,89-93,154.
5. La cumbre de México 2010. "Exploración en aguas profundas del golfo de México". Disponible en http://www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/report/2010/9/fs_petroleo-aguas-profundas.pdf (Consultado 23 de Marzo 2011).
6. CIFUENTES L, Juan L, Torres García, y Fías M., "El océano y sus recursos II. Las ciencias del mar: Oceanografía física, matemáticas e ingeniería". Segunda edición, La ciencia para todos, México, 1997, Capitulo XII.

7. AVALOS GARCÍA, M, Contreras Estrella, J. M. "Solución de producción para campos en aguas profundas". Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2008, pp 1-42.
8. STEWART, Robert H. "Introduction to Physical Oceanography", edición, editorial, EUA, 2002, pp 1,7,19,24
9. CIFUENTES Lemus, J.L, Torres García, y Fías M., "El océano y sus recursos III. Las ciencias del mar: Oceanografía física, matemáticas e ingeniería". Tercera reimpresión, La ciencia para todos, México, 1995, Capítulo VII.
10. SCHUMACHER M., "Sea water corrosion handbook", Noyes data corporation, Nueva York, 1979, pp 1-10.
11. BABOIN Robert, *Corrosion test and standards ASTM* "Application and interpretation" , Segunda reimpresión, ASTM international, EUA, 2006, pp.49, 206-208, 362-372.
12. Norma ASTM G1-03(2003), "Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens", ASTM book of standards, Vol. 3.02, EUA, 2006.
13. Norma ASTM G31-72(2004), "Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals", ASTM book of standards, Vol 3.02, EUA, 2006.

14. RODRÍGUEZ M , Liboria, Llongueras G, Chavarin J, Hernández L, "Corrosividad atmosférica" (MICAT-México), Plaza Valdez, México, 1999, pp 6-12.
15. GALVELE, José R, "Corrosión", Eva V Chesneau, Madrid, España 1979,
16. KAMACHI Mudali U, Raj Baldej, "Corrosion science and technology: Mechanism mitigation and monitoring", Narosa, 2009, pag 103.
17. PEREZ NESTOR, "Electrochemistry and corrosion science", Kluwer Academic Publishers, USA, 2004, pp 1-6.
18. BEARMAN G, "The Oceanography Course Team: Ocean chemistry and deep-sea sediments", Oxford, The open university, 1989, pp 18-56
19. VELASCO GABINO. "Posibles causas del accidente de la plataforma Deepwater Horizon" Disponible en <http://www.petrotecnica.com.ar/diciembre2010/pdf/36-47sp.pdf> (Consultado el 23 de Abril del 2011)
20. SHIGLEY J, "Diseño en ingeniería mecánica", octava edición, McGraw-Hill 2008, Capitulo 8.
21. TAO ZHANG, Yange Yang, Yawei Shao, "a stochastic analysis of effect of hydrostatic pressure on pit corrosion of fe-20cr alloy", Electrochimica Acta 54 ,2009.

22. PEMEX, "Acero estructural para plataformas marinas". Comité de normalización de Petróleos Mexicanos. Norma NRF-175-PEMEX, 2007
23. TAKAKO KURODA, Ryuzo Takai, Yuki Kobayashi, "Corrosion rate of shipwerck structural steels under the sea, oceans'08", japan.
24. KRUGER, J. "Electrochemistry of corrosión", Electrochemistry Encyclopedia, EUA, 2001, Disponible en <http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-c02-corrosion.htm>, (Consultado 22 de Abril 2011).
25. CHURSE, R, "Pressure Vessel, the A.S.M.E code simplified", 5a Edición, Mc Graw-Hill, EUA.
26. MEGYESY Eugene F., "Manual de recipientes a presión Diseño y cálculo", Limusa, México, 1992, pp13, 26,281.
27. QUEVEDO REYES, M C, "Evaluación electroquímica de una aleación de Al-5.5% at Zn 6.5% at. Mg en solución acuosa de NaCl ", Tesis de Maestría en Ingeniería.-ingeniería Química corrosión, 2007,
28. RIOS MORALES, D, "Dimensionamiento y evaluación de costo de un recipiente para el almacenamiento de hidrógeno a presión", Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM, 2000, pp 66-70 ; 84-86.
29. R. MOSS Dennis, "Pressure vessel design manual", Elsevier, U.S.A, 2004, pp 1-9, 16.

30. NADREAU, Robert, “ El torno y la fresadora “, Gustavo Gili, 2ª Edición, Barcelona, 1972.
31. WANG J.Q, Atrens A, Cousens D.R, Ninaev. N, “Microestructure of X52 and X65 pipeline steels”, Journal of material science Vol.34, 1999, 1721-1728.
32. PEMEX, Nomenclatura, disponible en <http://www.ri.pemex.com/files/content/ACFVSA0aaat.pdf>, (consultado el 27 de Abril del 2011).
33. BARBOSA Fabio, “Situación Actual de Pemex en las aguas profundas del Golfo de México”, disponible en <http://www.ejournal.unam.mx/ecu/ecunam15/ECU001500505.pdf>, (consultado el Agosto 2011).
34. Presentación Mercier Richar S, Director OTRC “Deepwater Gulf of Mexico Technology Challenges”, 8 Abril 2005.
35. PEMEX, Aguas profundas, disponible en <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content§ionid=145&catid=14223>, (consultado 2010).
36. Ávila Javier, Genescá J, “más allá de la herrumbre i”, Colección la ciencia para todos, México, Capitulo I,II yII.
37. “Hydrostatic pressure in a liquid”, disponible en <http://faculty.wvu.edu/vawter/PhysicsNet/Topics/Pressure/HydroStatic.html>, consultado (11 Octubre ,2011).
38. UDIATEM, “Curso de Corrosión”, UNAM, México, 1995, pp 3.16-3.18.

APÉNDICE

I. Propiedades del cuerpo y tapa del equipo:

Tabla 17. Propiedades del Nylamid

Propiedades Generales.	
Densidad lb/ft ³ ; (g/cm³)	69.92 a 71.17 (1.12 a 1.14)
Precio USD/lb	1.449 a 1.619
Propiedades Mecánicas.	
Módulo de Young ksi; (kg/cm²)	380 a 464.1 (26720 a 26700)
Límite elástico ksi; (kg/cm²)	7.252 a 13.75 (509.9 a 966.7)
Resistencia a la tracción ksi; (kg/cm²)	13.05 a 23.93 (917.5 a 1682)
Resistencia a la compresión ksi; (kg/cm²)	7.972 a 15.12 (560.8 a 1063)
Resistencia a la fatiga 10 ⁷ ciclos ksi; (kg/cm²)	5.221 a 9.572 (367.1 a 673)
Propiedades térmicas	
Temperatura máxima °F; (°C)	230 a 284 (110 a 140)
Temperatura mínima °F; (°C)	-189.7—99.6 (-123 a 137.5)

II. Propiedades Mecánicas de los tornillos

Según la Norma ASTM sección 1-1987 para aceros inoxidable que son forjados se tienen los siguientes datos:

Tabla 18. Propiedades mecánicas de los tornillos

Resistencia a la tracción ksi (kg/cm²)	75 (5273)
Límite elástico ksi (kg/cm²)	30 (2109)