



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LOPÉZ MATEOS
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN.

**“Estudio del comportamiento del acero AISI 410 sometido al fenómeno de
abrasión húmeda-Corrosión”**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

Presenta:

Ing. Gerardo Alejandro Rodríguez Bravo

Directores:

Dr. Manuel Vite Torres
Dr. Cesar Sedano de la Rosa

05/12/2017

Resumen

En este trabajo se presenta el análisis de los resultados obtenidos durante los ensayos de ‘abrasión húmeda-corrosión’ realizados sobre el acero inoxidable AISI 410, así como el desarrollo de un banco de pruebas y una metodología que permitan la reproducción de estos experimentos en diferentes materiales metálicos para trabajos futuros.

Como marco teórico se explican los conceptos fundamentales para entender la metodología planteada en este trabajo, conceptos como: tribología, tribocorrosión, erosión y corrosión; también se explican algunas técnicas de análisis de los fenómenos antes mencionados. Continuando con el desarrollo experimental, primero se presenta de manera general el proceso de construcción del banco de pruebas usado para realizar la experimentación, después se dan detalles sobre la planeación de la experimentación y se mencionan las técnicas utilizadas para realizar la medición de los efectos tanto electroquímicos como mecánicos. Para las pruebas se eligió utilizar agua de mar sintética como medio ambiente agresivo para producir corrosión y partículas de arena sílica (SiO_2) para generar un desgaste abrasivo. Todo ello sirve para emular de cierta manera, las condiciones a las que se encuentran sometidos los aceros utilizados en aplicaciones como la fabricación de ductos para el transporte de crudo y varias aplicaciones marinas.

Para finalizar se muestran los gráficos con los resultados que muestran una disminución del efecto de la corrosión debido al efecto de las partículas de arena y se dan conclusiones al respecto.

Abstract

This work shows an analysis of the results obtained during the ‘abrasion-corrosion’ tests performed to the AISI 410 stainless steel, also shows the develop of an experimental methodology and the construction of a test rig that will permit the future reproduction of the experiments but in other metallic materials.

As theoretical framework tribocorrosion is explained also the way in which these kinds of phenomena are being studied around the world. The mechanisms of passivation of metallic materials are also explained and the way in which mechanical work affects them, deriving this in ways of determining the synergy of process where there is tribocorrosion.

For the tests, synthetic sea water was chosen as aggressive media to produce corrosion, and silica sand particles were used to generate mechanical damage due to abrasion. These conditions were chosen to reproduce in a certain way the conditions of work on underwater ground.

Agradecimientos

Quiero agradecer al Dr. Manuel Vite Torres y al Dr. Ezequiel Gallardo Hernández del grupo de tribología de la SEPI ESIME Zacatenco por la confianza depositada en mí para la realización de este trabajo, también por sus enseñanzas y guía para introducirme en el mundo de la investigación. Al Dr. Jesús Gilberto Godínez de la SEPI ESQUIE Zacatenco por todo el apoyo para la realización de los experimentos necesarios para concluir este trabajo. A todos mis compañeros en el cubo, pues su dedicación y excelente forma de trabajo son una motivación para esforzarme más cada día. A Cesar Pérez del taller de pesados porque sin su ayuda no habría podido concluir este trabajo.

Pero principalmente agradezco a mis padres Ada Alicia Bravo López y Guillermo Gerardo Rodríguez Zepeda por apoyarme incondicionalmente en cualquier decisión que he tomado a lo largo de mi vida.

Lista de Contenidos

Objetivo general.....	1
Objetivos particulares	1
Justificación.....	2
Introducción.....	3
Capítulo 1 Marco Teórico.....	4
1.1 Tribología	4
1.2 Desgaste	6
1.2.1 Tipos de desgaste.....	7
1.3 Abrasión.....	8
1.4 Corrosión.....	9
1.4.1 Tasa de corrosión.....	11
1.4.2 Electroquímica de la corrosión.....	12
1.4.3 Formas de corrosión.....	14
1.5 Técnicas experimentales de corrosión	16
1.5.1 Resistencia a la polarización.....	18
1.5.2 Polarización anódica potenciodinámica.....	19
Capítulo 2 Planteamiento del problema.....	20
Capítulo 3 Desarrollo experimental.....	22
3.1 Diseño y construcción del banco de pruebas.....	22
3.1.1 Configuración del banco de pruebas.....	24
3.2 Diseño de la metodología experimental.....	25
3.2.1 Medio ambiente.....	25
3.2.2 Partículas abrasivas.....	27
3.2.3 Caracterización de material y fabricación de probetas.....	28
3.3 Planeación experimental	29
Capítulo 4 Resultados y discusión.....	34
4.1 Resultados de la caracterización del material	34
4.2 Resultados de la abrasión pura.....	35
4.3 Medición de potencial a circuito abierto.....	37
4.4 Resultados de las pruebas de resistencia a la polarización	38
Conclusiones.....	41
Trabajos futuros.....	42
Lista de Referencias.....	43

Lista de tablas

viii

Tabla 1. Nombre y descripción de las principales formas de desgaste.....	7
Tabla 2. Reacciones catódicas más comunes (reducción).	13
Tabla 3. Reacciones catódicas más comunes (reducción).	14
Tabla 4. Selección de medio ambiente..	26
Tabla 5. Concentración de los compuestos químicos en el agua de mar sintética.....	26
Tabla 6. Dureza de las partículas abrasivas obtenida con el nanoidentador.	27
Tabla 7. Composición química del acero inoxidable AISI 410.	28
Tabla 8. Configuraciones de probetas propuestas.....	29
Tabla 9. Parámetros de la primera prueba de la metodología experimental.	30
Tabla 10. Parámetros de la segunda prueba de la metodología experimental.	31
Tabla 11. Parámetros de la tercera prueba de la metodología experimental.	31
Tabla 12. Parámetros de la cuarta prueba de la metodología experimental.....	32
Tabla 13. Parámetros de la quinta prueba de la metodología experimental.	33
Tabla 14. Parámetros de la sexta prueba de la metodología experimental.	33
Tabla 15. Concentración de elementos según análisis de EDS.	34
Tabla 16. Diferencia en las velocidades de corrosión.....	39

Figura 1. Objetivos prácticos de la tribología.....	5
Figura 2. Mecanismos de desgaste abrasivo.....	9
Figura 3. Abrasión de dos y tres cuerpos.....	9
Figura 4. Factores involucrados en la resistencia a la corrosión de un material.....	10
Figura 5. Diagrama esquemático de un metal ‘M’, liberando en una solución un ion metálico ‘M ²⁺ ’ y hacia dentro los electrones metálicos, ‘e ⁻ ’, que son consumidos por la reducción de ‘H ⁺ ’ a ‘H ₂ ’.....	13
Figura 6. Configuración de dispositivo para medir E _{corr} de un metal en una solución...	16
Figura 7. Potenciostato-galvanostato para mediciones electroquímicas.....	17
Figura 8. Gráfico típico de una prueba de resistencia a la polarización.....	18
Figura 9. Gráfico típico de una prueba de polarización anódica potenciodinámica.....	19
Figura 10. Abrasión-corrosión en una pieza y en la cabeza de un vástago.....	20
Figura 11. Etapas del desarrollo experimental.....	22
Figura 12. Configuración del banco de pruebas para la reproducción del fenómeno de abrasión húmeda-corrosión.....	24
Figura 13. Vista en el microscopio electrónico de barrido de las partículas de arena sílica (SiO ₂), tamaño promedio 176µm.....	27
Figura 14. Celda plana utilizada para las pruebas de corrosión pura.....	32
Figura 15. Espectro de la muestra de acero AISI 410 en análisis de EDS.....	34
Figura 16. Pérdida de masa por abrasión generada con el banco de pruebas.....	35
Figura 17. Huellas de desgaste en abrasión pura.....	36
Figura 18. Más huellas de desgaste en abrasión pura.....	36
Figura 19. Medición a circuito abierto de la E _{corr} , en condición de corrosión pura y de abrasión húmeda-corrosión.....	37
Figura 20. Gráfico de resistencia a la polarización sin partículas abrasivas.....	38
Figura 21. Gráfico de resistencia a la polarización con partículas abrasivas y carga en el banco de pruebas.....	39
Figura 22. Vista del exterior de una picadura generada por corrosión en el acero AISI 410.....	40
Figura 23. Vista del interior de una picadura generada por corrosión en el acero AISI 410.....	40

Objetivo general

Desarrollar un banco de pruebas y una metodología experimental con los cuales se pueda analizar el comportamiento tribológico y electroquímico de una muestra de acero inoxidable AISI 410 sometido al fenómeno de abrasión húmeda-corrosión.

Objetivos particulares

*Diseñar y construir de un banco de pruebas para reproducir el fenómeno de abrasión húmeda-Corrosión.

*Someter el acero AISI 410 al fenómeno de abrasión húmeda y establecer parámetros de experimentación.

*Someter el acero AISI 410 al fenómeno de Corrosión y establecer parámetros de experimentación.

*Someter el acero AISI 410 al fenómeno de abrasión húmeda-Corrosión y establecer parámetros de experimentación.

*Comparar los cambios en el comportamiento del Acero AISI 410 cuando es sometido a los fenómenos antes mencionados.

*Identificar los mecanismos de desgaste en el fenómeno de abrasión húmeda-corrosión en el acero inoxidable AISI 410.

*Determinar las velocidades de corrosión

Justificación

En cierta medida todos los materiales están siendo corroídos por el medio que los rodea en todo momento; por ejemplo en los países del primer mundo se estima que la pérdida anual debida a la corrosión se aproxima al 4 % del PIB [1]. Existen diversos métodos, entre los que se encuentran la polarización potenciodinámica o las pruebas de inmersión, para determinar la velocidad en la que la corrosión se está presentando y esto ayuda a proponer soluciones (correctivas o preventivas), pero a veces existen factores mecánicos que pueden acelerar o reducir este proceso de degradación electroquímica. La forma en que los procesos mecánicos intervienen en la corrosión aun no es del todo comprendida y es necesaria la construcción de máquinas o dispositivos experimentales que permitan simular este tipo de desgaste, siendo posible controlar los diferentes parámetros que intervienen en el fenómeno. El desarrollo de este tipo de tecnología y métodos permite adquirir datos que sirven para proponer soluciones como: Generación de nuevos materiales más resistentes, desarrollo de nuevos recubrimientos, implementación de técnicas de diseño, entre otras.

Conocer las propiedades del acero inoxidable AISI 410 frente a la tribocorrosión servirá como guía para encontrar nuevas aplicaciones o restringir su uso y plantea de igual forma una base metodológica para el análisis de otros materiales metálicos.

Introducción

La tribocorrosión es definida como la acción conjunta del desgaste tribológico (daño mecánico) y la corrosión (disolución electroquímica), es un campo de estudio relativamente nuevo en México y no existen aquí equipos para simular este fenómeno. La tribocorrosión se divide en dos principales mecanismos que son: “erosión-corrosión” y “abrasión-corrosión”. Un ejemplo de esta forma de desgaste combinado es el que se presenta en las herramientas de perforación de suelo marino, pues estas se sumergen en un medio agresivo que es el agua de mar y también se exponen a un daño mecánico al perforar piedras y arena.

Este trabajo se enfoca en estudiar los cambios en el comportamiento electroquímico de un acero durante la medición de su velocidad de corrosión al ser sometido al proceso tribocorrosivo de “abrasión húmeda-corrosión”, para la cual se ha elegido un acero inoxidable (AISI 410) que tiene la propiedad de generar una capa de óxido pasiva que evita hasta cierto punto su deterioro en ambientes ligeramente agresivos.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1 Tribología

Según Bhushan [1] la tribología se define alternativamente entre la ciencia de la fricción y el desgaste y la ciencia de la lubricación, para ser más específicos, esta ciencia puede definirse como: “la ciencia y la tecnología de las superficies interactuando y que presentan un movimiento relativo entre ellas y los temas y prácticas derivados de ello”.

Se tienen datos que indican la preocupación de la humanidad por reducir la fricción y el desgaste en procesos que realizaban desde hace más de cinco mil años, por lo cual, solo el término ‘tribología’ puede ser considerado como nuevo, pues fue utilizado por primera vez en el año de 1966 por el británico Peter Jost, ‘cuando presentó a la Reina Isabel II un informe sobre el estado a esa fecha de la investigación y educación sobre la lubricación en Reino Unido. En ese reporte se estimaron ahorros posibles cercanos los 5 billones de libras esterlinas por año en Reino Unido mediante un manejo adecuado de fricción en sistemas mecánicos. Como un impacto directo de ese informe se inició en Reino Unido, Estados Unidos y Alemania el estudio de la tribología en varios centros de investigación’ [2].

Según Jost el estudio de la fricción, desgaste y lubricación, podría ayudar a reducir gastos que rebasan el 1 % del producto interno bruto de los países desarrollados, ya que estos fenómenos se presentan en casi todos los aspectos de la vida cotidiana y también en todos los procesos industriales (industrias de: extracción, transformación y manufactura por igual). Entender por completo todos los procesos tribológicos sirve también para

encontrar nuevas aplicaciones de materiales, nuevos procesos de manufactura, etc. En pocas palabras la tribología forma parte del día a día de la sociedad actual.

La siguiente imagen (ver figura 1) [3] nos muestra una clasificación con ejemplificaciones de las principales aplicaciones prácticas de esta ciencia.

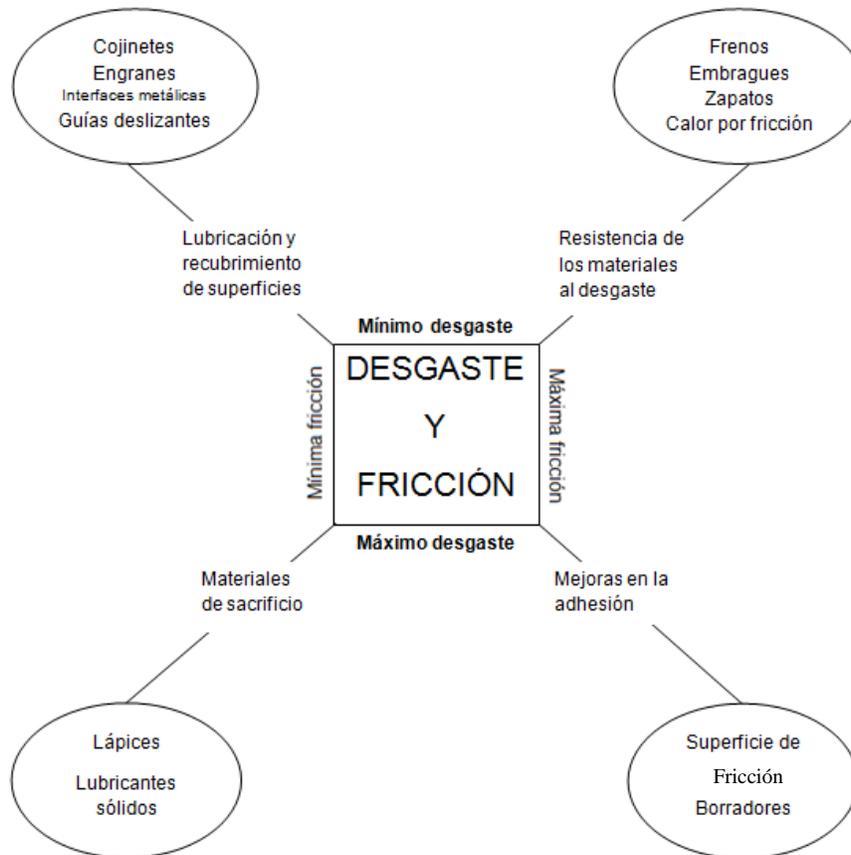


Figura 1. Objetivos prácticos de la tribología.

En el siguiente apartado se trata la definición de desgaste, que es el principal tema de estudio de la tribología. De igual forma se ahonda en definir y explicar los mecanismos de abrasión y corrosión para poder entender el tema principal de este trabajo.

1.2 Desgaste

A pesar de que el desgaste se considera un concepto básico que se presenta cotidianamente en una gran diversidad de procesos, este es definido de diferentes maneras dependiendo el campo de estudio. Algunos autores con enfoque mecánico lo definen como una respuesta a la interacción de superficies debida al movimiento relativo entre ellas, pudiendo existir remoción de material y por consiguiente pérdida de masa, pero también pudiendo solo existir una deformación de la superficie que pueda considerarse como un daño. Este enfoque no considera los procesos electroquímicos destructivos que están ocurriendo constantemente entre un material y el medio ambiente en el que se encuentra [3], pero estos generan una transferencia de material a nivel atómico que puede llegar a generar daños severos y también deberían ser considerados (más allá del enfoque que tenga el autor) en una definición general de lo que es el desgaste.

Las diferentes definiciones del desgaste llegan a un acuerdo al mencionar que existe un desplazamiento de materia sólida que genera un cambio en la configuración original del cuerpo que lo está sufriendo. No todo el desgaste debe ser considerado como “malo”, pues hay ocasiones en el que se busca generarlo de manera intencional y controlada para aprovechar las propiedades de los productos resultantes de este fenómeno. A continuación se mencionan las formas por las cuales puede presentarse el desgaste en un material.

1.2.1 Tipos de desgaste

Diferentes autores (Burwell, 1957/1958; Kragelski, 1965; Engel, 1976; Eyre, 1976; Rigney y Glaeser, 1978; Scott, 1979; Peterson y Winer, 1980; Suh y Saka, 1980; Buckley, 1981; Rigney, 1981; Bhushan *et al.*, 1985a, 1985b; Loomis, 1985; Suh, 1986; Zum Gahr, 1987; Blau, 1992; Hutchings, 1992; Bayer, 1994; Rabinowicz, 1995; Bhushan, 1996, 2001a, 2001b, 2011; Shipley and Becker, 2002) [1], han identificado seis tipos principales de desgaste en los que se consideran procesos mecánicos y químicos. La siguiente tabla (ver tabla 1) muestra y describe a estos.

Tabla 1. Nombre y descripción de las principales formas de desgaste.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
Adhesión	Cuando dos cuerpos sólidos se encuentran en contacto deslizando sea lubricado o no y las asperezas de uno de ellos son cortadas debido a ese deslizamiento. El material desprendido de un cuerpo entonces se acopla a la otra superficie.
Abrasión	Ocurre cuando las asperezas de una superficie dura o alguna partícula se deslizan en una superficie más suave, generando un daño (plástico o de fractura) en la interfaz de contacto.
Fatiga	Está se genera debido a la aplicación cíclica de cargas que pueden promover la formación de sub-superficies o grietas, que después de un número dado de ciclos provocarán la falla del material. Pueden ser cientos, miles e incluso millones de ciclos los necesarios para provocar la falla.
Erosión	Se presenta cuando un material es impactado por alguna partícula solida suspendida en un fluido o en su defecto por el fluido mismo en movimiento, este comportamiento se puede considerar un tipo de abrasión.

Químico o corrosión	Es un proceso de degradación electroquímica del material propiciado por la interacción de este con el medio ambiente en el que se encuentra. También puede ser llamado oxidación.
Eléctrico	Se da cuando se crea un arco eléctrico debido a un alto potencial entre materiales separados por una película delgada de aire. Este arco genera un calentamiento sobre la zona afectada generando desgaste.

En los siguientes apartados se profundiza en las dos formas de desgaste de interés para el desarrollo de este trabajo: la abrasión y la corrosión. Es necesario entender las bases de estos fenómenos individualmente para poder explicar su acción al ser combinados en el proceso de ‘abrasión-corrosión’.

1.3 Abrasión

La abrasión se da cuando una superficie sólida presenta una carga y movimiento relativo respecto a una superficie rugosa o partícula que tenga una igual o mayor dureza. Esta forma de desgaste puede presentarse por diferentes mecanismos [ver figura x] en los que el cuerpo duro actúa sobre el blando. La abrasión puede dividirse entonces en dos formas principales: abrasión de dos cuerpos y abrasión de tres cuerpos (ver figura x) y estas formas se pueden dar en condición húmeda (lubricada) o seca. Las siguientes imágenes ilustran lo antes explicado respecto a mecanismos presentes en la abrasión y la diferencia entre abrasión de dos y tres cuerpos.

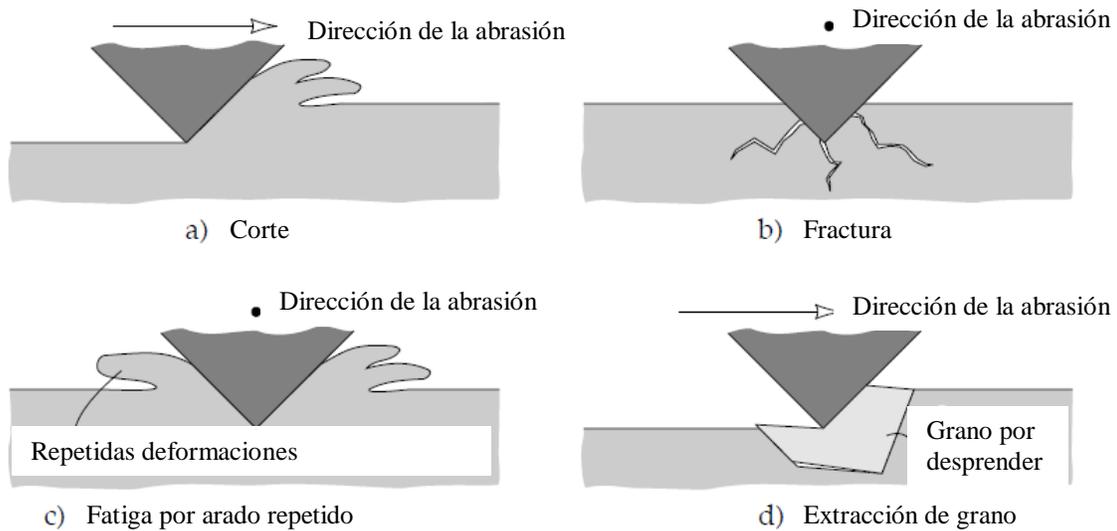


Figura 2. Mecanismos de desgaste abrasivo: a) corte, b) fractura, c) fatiga, d) extracción de grano. [x]

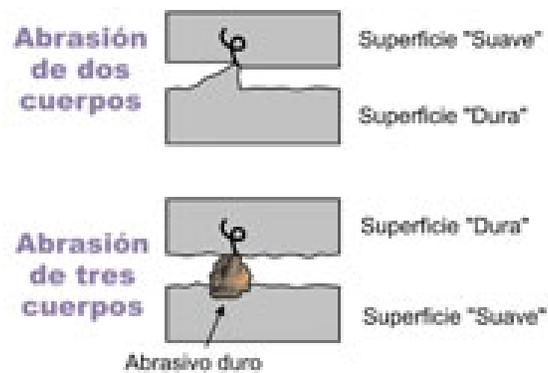


Figura 3. Abrasión de dos y de tres cuerpos.

1.4 Corrosión

La corrosión como se mencionó anteriormente es una de las seis formas principales en las que se produce el desgaste. Esta puede definirse según Fontana [7] como la destrucción o deterioro de un material a causa de su reacción con el medio ambiente.

Muchos proponen que esta definición solo debe aplicar a los metales, pero la realidad es que diferentes tipos de materiales no metálicos (polímeros, cerámicos, etc.) deben ser considerados si es que se quiere encontrar una solución real a diferentes problemas.

Según datos de la NACE [4], las pérdidas a nivel global debidas a la corrosión se aproximan al 4 % del producto interno bruto de los países desarrollados, esto se debe a que prácticamente todos los ambientes son corrosivos hasta cierto grado.

La ingeniería de corrosión es la encargada de solucionar los problemas relacionados con este tipo de desgaste, y uno de los puntos más importantes para prevenir o corregir un problema de corrosión es la selección de materiales. Para poder seleccionar adecuadamente un material es necesario conocer sus propiedades de resistencia a la corrosión, esta resistencia se ve afectada por diferentes factores (ver figura x.) que para ser entendidos requieren del conocimiento de diversos campos de estudio. La figura presentada a continuación nos muestra los enfoques a considerar para determinar la resistencia a la corrosión de un material.

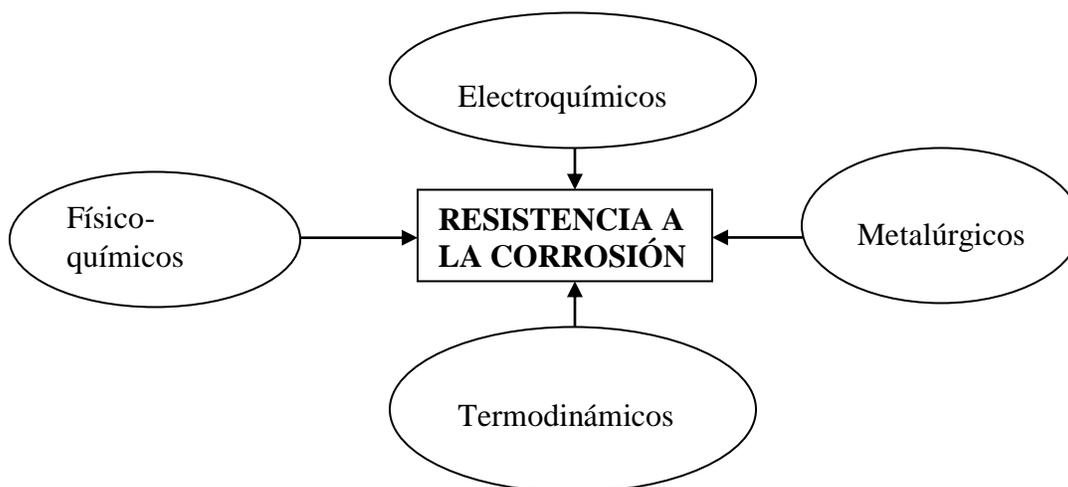


Figura 4. Factores involucrados en la resistencia a la corrosión de un material.

La electroquímica es importante para poder entender y controlar la corrosión, la termodinámica estudia y calcula la velocidad y dirección de las reacciones existentes, la metalurgia se enfoca en crear aleaciones con estructuras resistentes a ataques corrosivos y la físico-química es más útil para estudiar los mecanismos de desgaste y las propiedades de las superficies de los materiales. Como se puede observar el estudio de la corrosión conlleva el entendimiento de diversas disciplinas.

1.4.1 Tasa de corrosión

La tasa de corrosión se expresa comúnmente en '*mils per year*' o mili pulgadas por año y esto se refiere al cálculo de la pérdida de masa de un material durante una prueba de corrosión. Puede describirse con la siguiente fórmula:

$$mpy = \frac{534W}{DAT}$$

En donde:

mpy= mili pulgadas por año

W= pérdida de masa (mg)

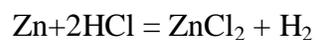
D= densidad del material (mg/cm³)

A= área de la superficie del espécimen expuesta (Plg²)

T= tiempo de exposición (hrs)

1.4.2 Electroquímica de la corrosión

El ejemplo que se aplica comúnmente para explicar la electroquímica de la corrosión es el del Zinc siendo atacado por ácido clorhídrico, pues en este ocurre una reacción muy notable. Se libera hidrógeno en forma de gas y el zinc se disuelve formando una solución de cloruro de zinc. La reacción es la siguiente:



Se puede ver que el zinc reacciona con los iones de hidrogeno de la solución acida para formar iones de zinc (oxidación) y gas de hidrógeno (reducción). Una oxidación o también llamada reacción anódica, es indicada por un incremento en la valencia o una producción de electrones. Por otro lado una reducción en la valencia o un consumo de electrones se refieren a una reacción catódica o de reducción. El siguiente diagrama (ver figura 5) muestra la forma en que ocurren estos procesos de óxido-reducción cuando un metal se sumerge en una solución ácida.

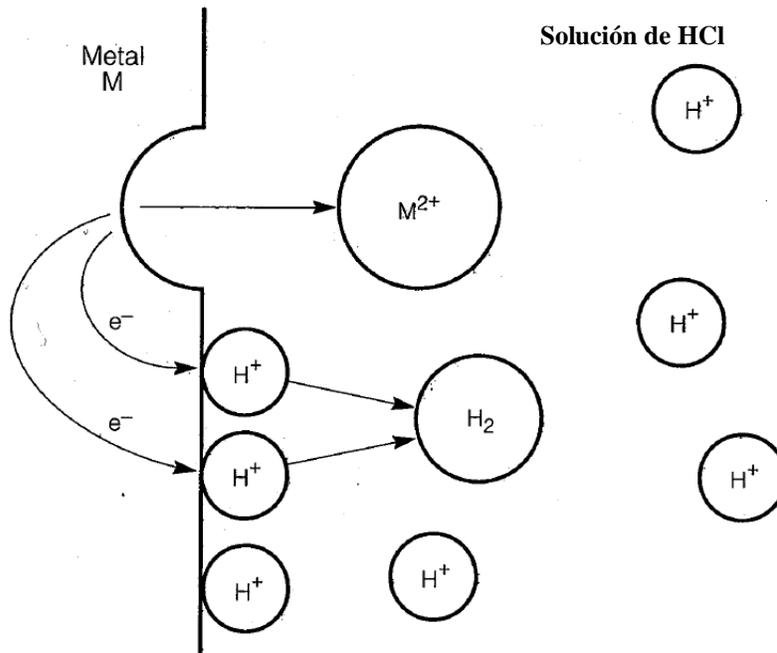


Figura 5. Diagrama esquemático de un metal 'M', liberando en una solución un ion metálico ' M^{2+} ' y hacia dentro los electrones metálicos, ' e^- ', que son consumidos por la reducción de ' H^+ ' a ' H_2 ' [].

Entonces para el caso del ácido clorhídrico como medio, las reacciones anódicas pueden ser expresadas de la siguiente forma:



El número de electrones producidos es igual al número de valencia del electrón. En el caso de las reacciones catódicas hay un sinnúmero de ellas que pueden ser encontradas en la corrosión metálica, a continuación se ejemplifican algunas de las más comunes de ellas:

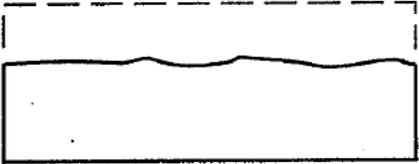
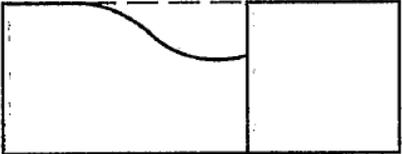
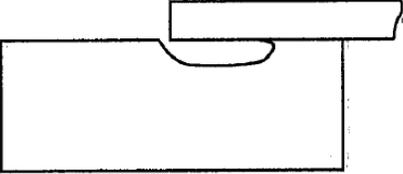
Tabla 2. Reacciones catódicas más comunes (reducción).

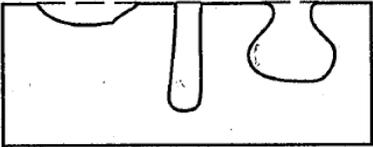
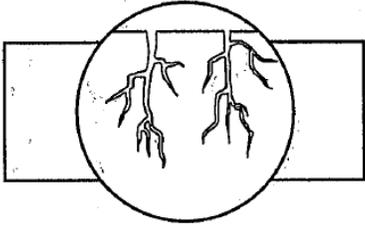
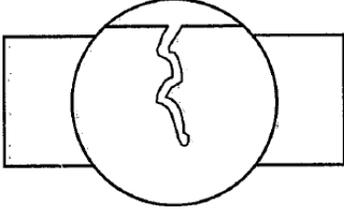
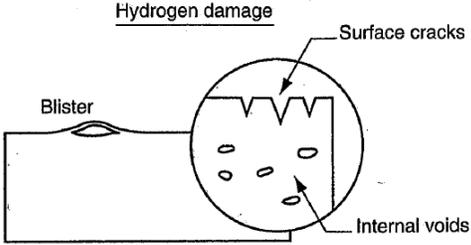
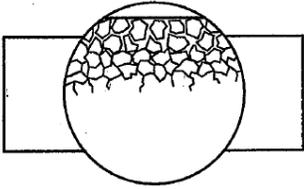
Evolución del hidrogeno.	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
Reducción del oxígeno (soluciones acidas).	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
Reducción del oxígeno (soluciones neutras o básicas).	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
Reducción de iones metálicos	$M^3 + e^- \rightarrow M^{2+}$

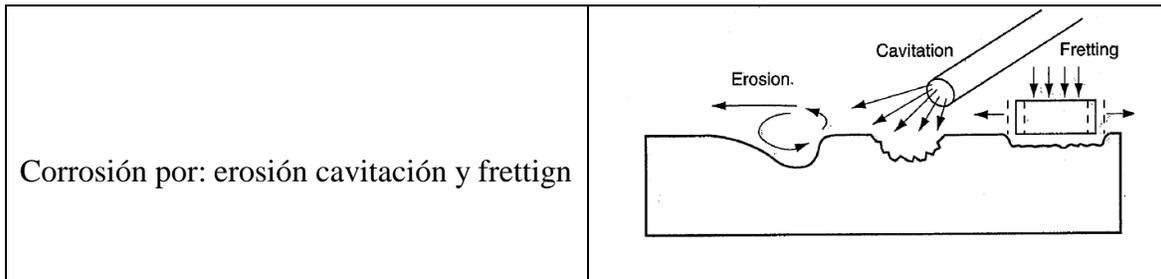
1.4.3 Formas de corrosión

La siguiente tabla (ver tabla 3) nos enlista las diferentes formas en las que se puede presentar la corrosión en un material, mostrando un esquema representativo de cómo luciría el daño característico [].

Tabla 3. Formas de corrosión

Forma de corrosión	Diagrama ilustrativo
Corrosión uniforme	<p style="text-align: center;">Uniform</p> 
Corrosión galvánica	<p style="text-align: center;">Galvanic</p>  <p style="text-align: center;">Active Noble</p>
Corrosión por hendidura (crevice)	<p style="text-align: center;">Crevice</p> 

Corrosión por picadura (pitting)	<p style="text-align: center;">Pitting:</p> 
Corrosión por estrés	<p style="text-align: center;">Stress-corrosion</p> 
Corrosión por fatiga	<p style="text-align: center;">Corrosion fatigue</p> 
Daño por hidrogeno	<p style="text-align: center;">Hydrogen damage</p> 
Corrosión intergranular	<p style="text-align: center;">Intergranular</p> 



1.5 Técnicas experimentales de corrosión

[11] ‘Cuando un metal está inmerso en una solución, ocurren reacciones electroquímicas características que producen corrosión. Estas reacciones crean un potencial electroquímico conocido como potencial de corrosión o potencial a circuito abierto (E_{corr}) que se mide en Volts, este potencial es propio de la reacción ocurrida en la interfaz metal-solución dada. Todos los equipos existentes para medir voltaje lo hacen indirectamente usando una diferencia de potenciales con respecto a un potencial de referencia. La siguiente imagen (ver figura x) muestra la configuración básica para medir un potencial de corrosión.

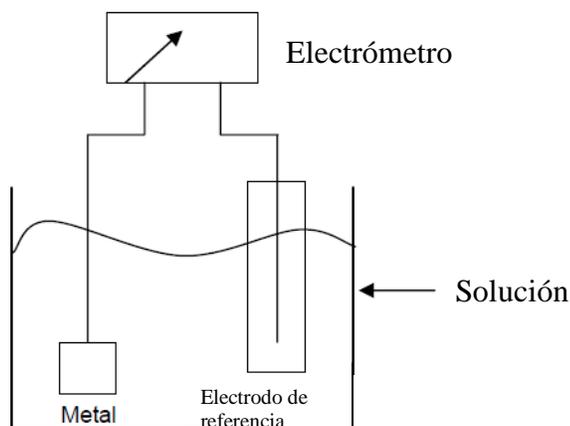


Figura 6. Configuración de un dispositivo para medir el E_{corr} de un metal en una solución [1].

Un dispositivo como el potencióstato (ver figura x) tiene la capacidad para medir el E_{corr} de un material sumergido en alguna solución, pero si es necesario la medición también podría ser tomada con un multímetro común.



Figura 7. Potenciostato- Galvanostato para mediciones electroquímicas.

El potencial y la corriente eléctricos son fundamentales para realizar mediciones electroquímicas, ya que la mayoría de experimentos dependen de controlar estas variables.

Los siguientes apartados describen las técnicas electroquímicas para la medición de la velocidad de corrosión más utilizadas. Estas entran en la clasificación de técnicas de corriente directa y son las técnicas que se proponen para medir la corrosión en la etapa experimental del presente trabajo.

1.5.1 Resistencia a la polarización

La resistencia a la polarización es definida como la resistencia a la oxidación durante la aplicación de un potencial eléctrico externo. Está relacionada directamente con la tasa de corrosión y esta puede ser calculada directamente al aplicar esta técnica.

El procedimiento experimental para realizarla consiste en hacer un barrido de potencial, utilizando el potenciostato, en un rango de $\pm 20\text{mV}$ a partir del potencial de corrosión medido anteriormente.

El gráfico característico que resulta de aplicar este procedimiento nos presenta el E_{corr} vs I (densidad de corriente A/cm^2).

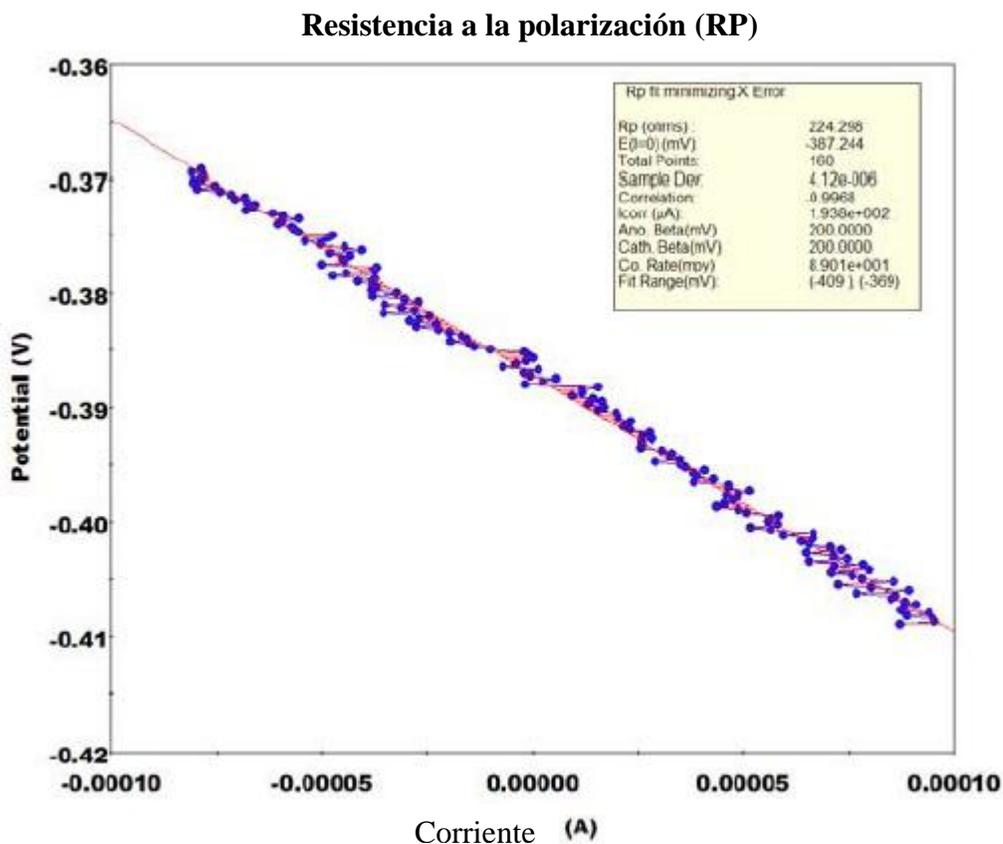


Figura 8. Gráfico típico de una prueba de resistencia a la polarización.

1.5.2 Polarización anódica potenciodinámica

Esta técnica consiste en realizar un barrido de potencial en dirección positiva, a partir del potencial de corrosión detectado, comúnmente de entre +1600 mV a +1800mV para poder detectar las zonas pasivas y activas del material. El gráfico obtenido de la aplicación de este procedimiento nos muestra el potencial eléctrico contra el logaritmo de la corriente medida. El gráfico típico de esta técnica se muestra a continuación.

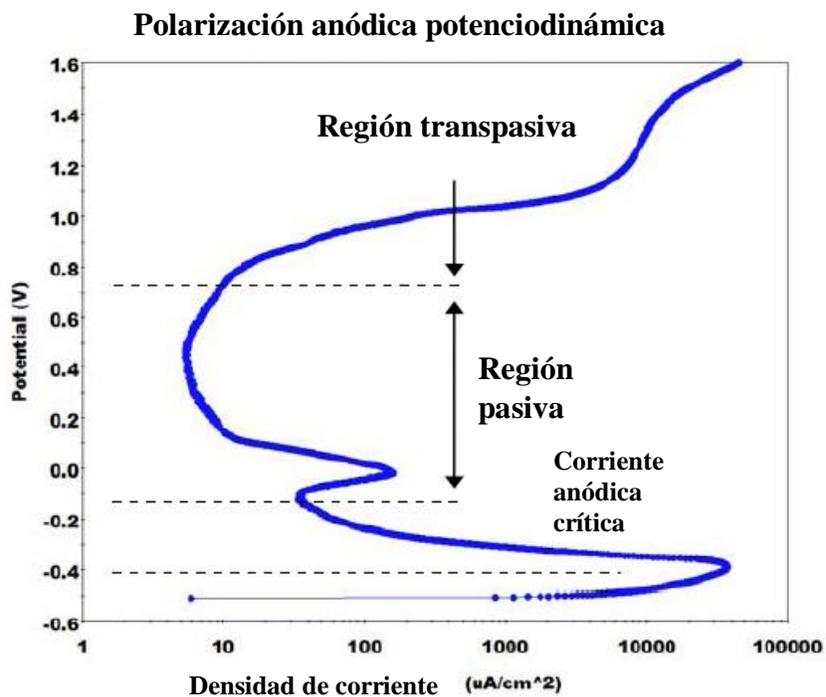


Figura 9. Gráfico típico de una prueba de polarización anódica potenciodinámica.

Capítulo 2

Planteamiento del problema

En diversas industrias como la marítima o la de extracción y transporte de hidrocarburos, las herramientas y equipos de operación se encuentran expuestos a desgaste por la realización de trabajos mecánicos mientras se encuentran sumergidos en ambientes agresivos. Un claro ejemplo de esto son las herramientas que se utilizan para trabajos submarinos ya que el agua de mar debido a su alto contenido de sales les produce corrosión y abrasión junto con las partículas de arena del suelo submarino [8]. Otro claro ejemplo de aplicaciones en las que puede ocurrir esta forma de tribocorrosión es en los implantes médicos [9].

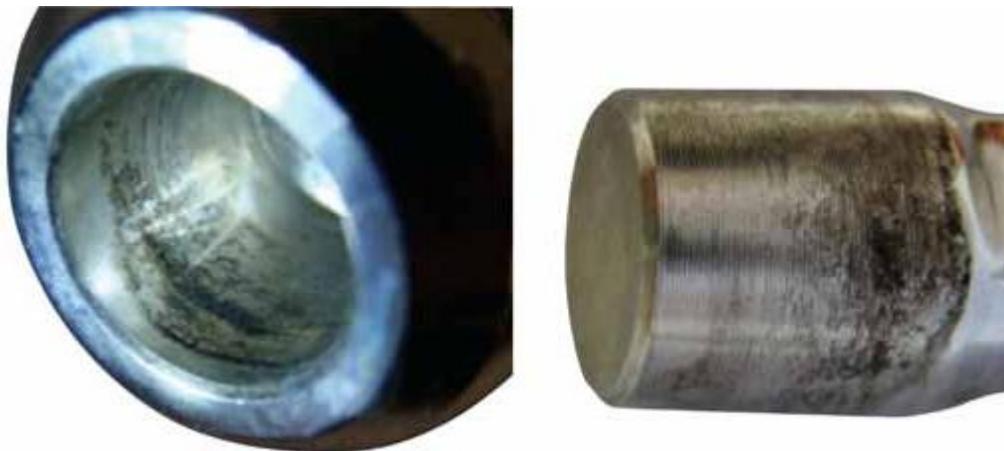


Figura 10. abrasión-corrosión en una pieza (Mo, Cr, Co) y en la cabeza de un vástago (aleación de Ti) [9]

Se sabe que el desgaste por abrasión puede afectar de alguna manera la degradación electroquímica de un material en su medio ambiente, ya sea promoviendo o inhibiendo este efecto. Existen dispositivos experimentales para recrear la tribocorrosión, pero aún no hay pruebas estandarizadas que permitan la caracterización de las propiedades de los

metales ante esta forma de desgaste, es necesario desarrollar y probar nuevas técnicas que nos permitan hacer esto.

El acero AISI 410 según sus fabricantes [10] es un acero que presenta una buena resistencia a la corrosión en ambientes ligeramente agresivos y también una buena resistencia mecánica. Por sus propiedades este acero tiene usos muy variados como por ejemplo fabricación de válvulas, ejes de bombas, alabes de turbinas de vapor y de gas. Es probable que este acero sea el más representativo dentro de su clasificación (inoxidables martensíticos) y también uno de los más comunes. Es por estas razones (propiedades, aplicaciones, disponibilidad, etc.) que se tomó este material como el ideal para realizar los ensayos de arranque en el banco de pruebas para abrasión húmeda-corrosión y así poder diseñar una metodología adecuada para aplicarse en otros materiales en trabajos futuros.

Con las pruebas de abrasión húmeda-corrosión aplicadas correctamente, se podrían encontrar nuevos usos para este acero o en su defecto dar propuestas para restringir su utilización en aplicaciones en las que la respuesta resulte ser perjudicial.

Capítulo 3

Desarrollo experimental

Para poder cumplir el objetivo de este trabajo se planteó el desarrollo de una metodología, que puede resumirse en las cinco etapas que muestra la siguiente figura:

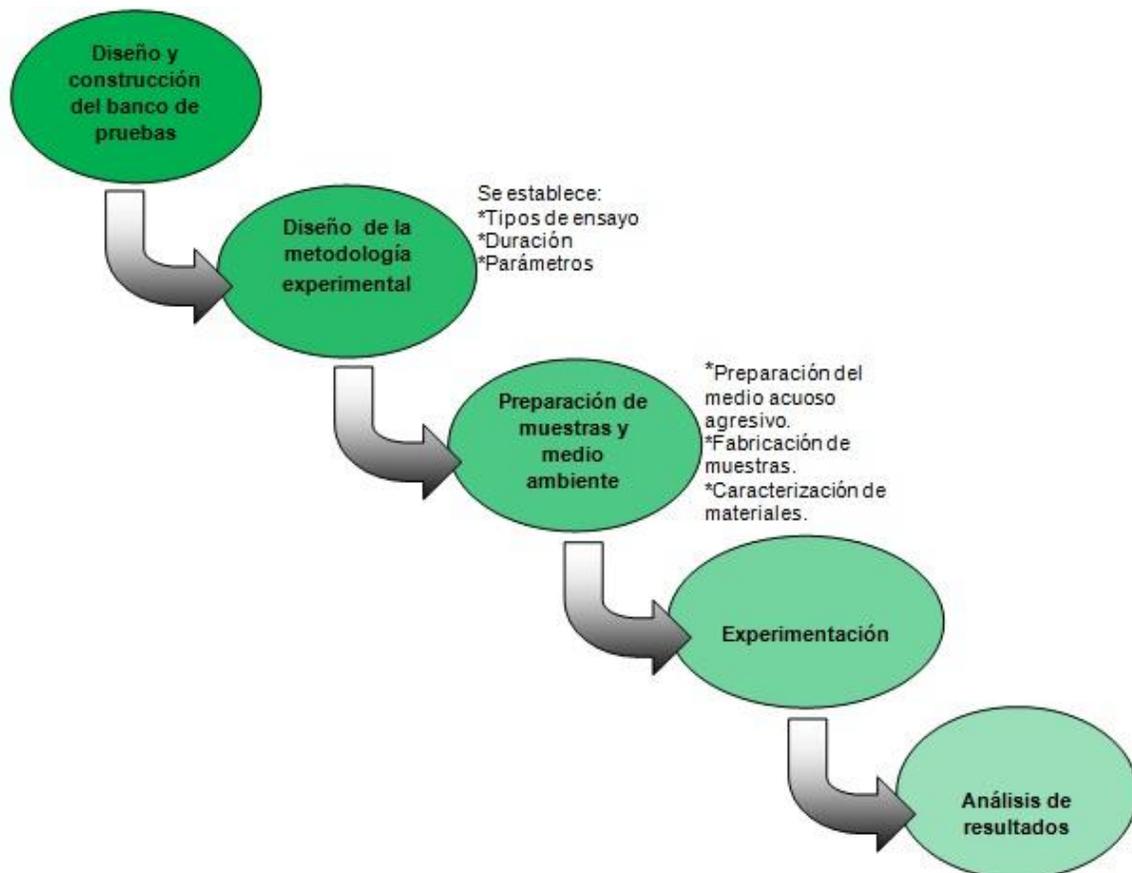


Figura 11. Etapas del desarrollo experimental

3.1. Diseño y construcción del banco de pruebas

El diseño de este dispositivo tiene un objetivo primario: generar *abrasión húmeda de tres cuerpos* sobre una muestra de acero mientras a esta se le practica un ensayo para

medir la velocidad de corrosión usando la técnica de resistencia a la polarización potenciodinámica mediante un potencióstato-galvanostato.

Al proyectar el prototipo se consideraron las siguientes características que permiten un óptimo funcionamiento de este:

- **Tamaño:** La máquina es lo más compacta posible, con el fin de poderla transportar fácilmente y montarla debajo de las campanas de extracción de vapores que se utilizan en los laboratorios.
- **Costo y accesibilidad de materiales:** Se buscó que los materiales utilizados para la construcción del equipó fueran comunes y económicos para reducir los costos de fabricación. Las piezas son fácilmente reemplazables y los materiales pueden adquirirse en cualquier ferretería.

Para poder lograr esto, el prototipo necesita contar con los siguientes elementos:

- **Celda electroquímica:** un recipiente resistente a la corrosión en la cual se crea el ambiente acuoso agresivo.
- **Sistema de sellado:** dispositivo para evitar la fuga de líquido a través del eje rotor del contracuerpo.
- **Contracuerpo:** disco metálico que servirá como cuerpo deslizante para generar *abrasión de tres cuerpos* controlada en la muestra.
- **Brazo de palanca y portamuestras:** sistema con el cual se mantiene sumergida, aislada y bien sujeta la muestra metálica, también es el elemento a través del cual se varía la carga aplicada entre la muestra y el contracuerpo.

- **Pesas:** elementos cilíndricos metálicos maquinados con masa específica, para generar una carga a través del brazo de palanca.
- **Agitador:** hélices rotatorias sumergidas, para evitar la precipitación de las partículas abrasivas hacia el fondo de la celda.

3.1.1 Configuración del banco de pruebas

Una vez definidos los componentes necesarios para que el dispositivo pueda reproducir de manera satisfactoria el fenómeno estudiado, se eligió una configuración de máquina que permitió una fácil manufactura de la misma.

A continuación se muestra un diagrama de la configuración general del dispositivo propuesto, en el cual se enumeran los componentes principales.

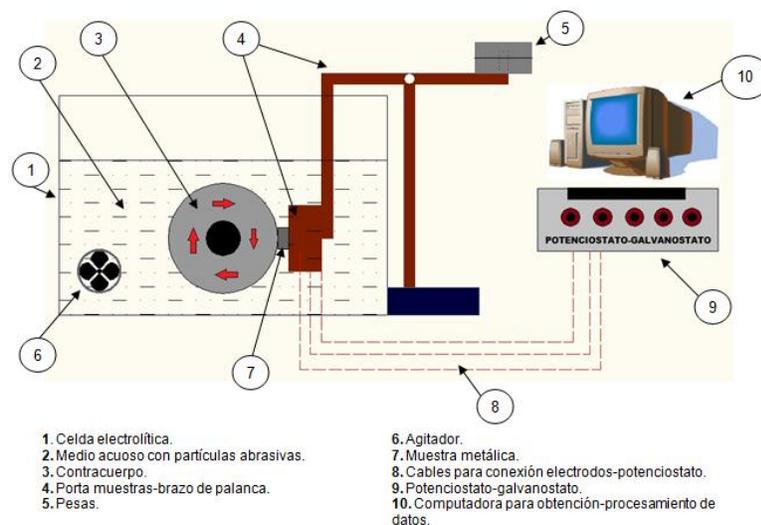


Figura 12. Configuración del banco de pruebas para la reproducción del fenómeno de abrasión húmeda-corrosión.

El diseño y manufactura del equipo tribológico se llevó a cabo en el laboratorio de Tribología de la SEPI ESIME Zacatenco, IPN.

3.2 Diseño de la metodología experimental

Una vez fabricado el banco de pruebas, son necesarios principalmente dos elementos para poder reproducir el fenómeno de abrasión húmeda-corrosión dentro de este: el medio acuoso y las partículas abrasivas que se encontrarán en suspensión, de igual forma se tienen que plantear la secuencia y características de los experimentos a realizar. En este apartado se describe la preparación de los medios en los que se realizarán los ensayos al igual que se indican los parámetros y orden de las pruebas propuestas. Todo esto con la finalidad de comprobar el comportamiento del acero inoxidable AISI 410 en tres condiciones diferentes: corrosión, abrasión y abrasión-corrosión.

3.2.1 Preparación del medio ambiente

Son necesarios dos ambientes diferentes para poder reproducir las tres condiciones propuestas en esta metodología: un medio ambiente corrosivo que en este caso será el sustituto de agua de mar, y un medio que no promueva la corrosión en el acero inoxidable, según la literatura en estos casos se usa el agua destilada [14, 15].

A continuación se muestran en la tabla x, los nombres de las sustancias elegidas como medio ambiente junto con una breve descripción de ellas. De igual forma se menciona la nomenclatura que se utiliza para nombrarlas en la planeación experimental.

Tabla 4. Selección de medio ambiente

Concepto	Elemento seleccionado	Características
Medio acuoso 1	Agua de mar sintética	Solución con contenido de sales inorgánicas en proporciones y concentraciones representativas del agua de mar, su preparación está normalizada por la ASTM [13].
Medio acuoso 2	Agua destilada	Es agua que ha sido sometida a un proceso de destilación que permitió limpiarla y purificarla . Esto hace, en teoría, que el agua destilada sea agua potable , ya que es una sustancia pura que solo contiene un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno (H₂O)

Para preparar el agua de mar sintética se utilizó la norma correspondiente de la ASTM [13], presentando las concentraciones de compuestos que se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 5. Concentración de los compuestos químicos en el agua de mar sintética.

COMPUESTOS	CONCENTRACIÓN gr/l
NaCl	24.53
MgCl ₂	5.20
Na ₂ SO ₄	4.09
CaCl ₂	1.16
KCl	0.695
NaHCO ₃	0.201
KBr	0.101
H ₃ BO ₃	0.027
SrCl ₂	0.025
NaF	0.003

El agua de mar sintética tiene un Ph de 8.2 al ser preparada de acuerdo a la norma para controlar de manera eficaz la agresividad del medio ambiente.

3.2.2 Partículas abrasivas

Como partícula abrasiva se utilizó arena sílica (SiO_2) caracterizada previamente [] del *stock* del grupo de tribología de la SEPI ESIME Zacatenco. Para determinar el tamaño promedio de las partículas y su distribución se utilizaron el microscopio electrónico de barrido y un analizador laser de partículas respectivamente. Para determinar la dureza se hizo un análisis utilizando un nanoindentador que entregó una medición en escala vickers. La dureza obtenida se expresa en la siguiente tabla.

Tabla 6. Dureza de las partículas abrasivas obtenida con el nanoindentador.

MUESTRA	DUREZA VICKERS
Arena Sílica (SiO_2) 176 μm .	789.53

La siguiente imagen nos muestra la geometría de las partículas, las cuales presentaron una forma aguda que facilitará la incrustación en el metal y promoverá el efecto abrasivo [12].

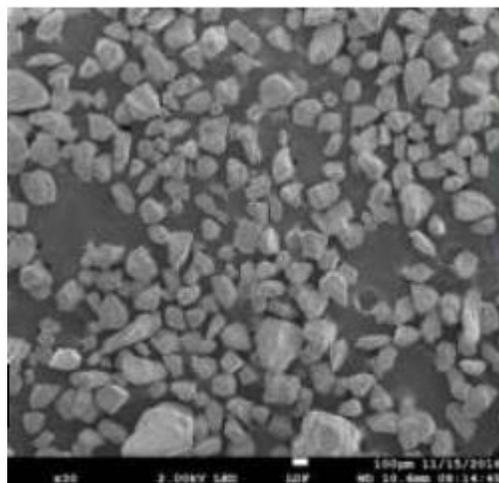


Figura 13. Vista en el microscopio electrónico de barrido de las partículas de arena sílica (SiO_2), tamaño promedio 176 μm .

3.2.3 Caracterización de material y fabricación de probetas

Para la caracterización del material se realizó un análisis de espectrometría por difracción de electrones (EDS) utilizando el microscopio electrónico de barrido, para obtener un gráfico con la composición química real y así compararla con la composición química propuesta por los fabricantes en sus fichas técnicas. La siguiente tabla nos muestra la composición química del acero inoxidable AISI 410 según la ficha técnica.

Tabla 7. Composición química del acero inoxidable AISI 410.

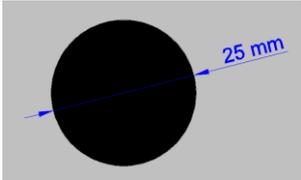
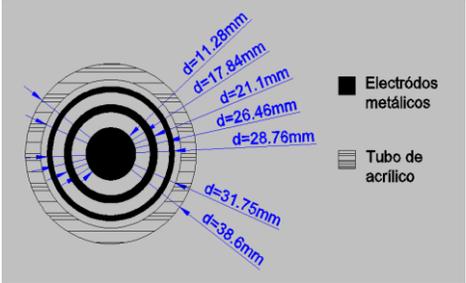
Elemento	% máximo
C	0.08 – 0.15
Mn	1.0
S	.030
P	.040
Si	1.0
Cr	11.5 – 13.5
Ni	0.75

Los resultados de la prueba de EDS se pueden observar en el capítulo 4 de resultados y discusión.

Una vez caracterizado el material se procede con a la fabricación de las muestras para su posterior montaje en las celdas de trabajo. Se diseñaron dos geometrías de probetas para poder realizar la experimentación en dos celdas electroquímicas diferentes: la celda plana para análisis de corrosión pura y el banco de pruebas para los análisis de abrasión

pura y abrasión-corrosión. La siguiente tabla (ver tabla 8) nos muestra las características de las configuraciones propuestas.

Tabla 8. Configuraciones de probetas propuestas.

Probetas	Medidas
<p>Probeta para la celda plana</p>	 <p>El espesor de la muestra redonda es de 3mm</p>
<p>Juego de electrodos para el banco de pruebas de abrasión-corrosión</p>	 <p>El espesor de los tres electrodos utilizados para el banco de pruebas es de 9mm</p>
<p>Nota: todas las probetas son del mismo material: acero inoxidable AISI 410</p>	

3.3 Planeación experimental

Como se mencionó al inicio del capítulo tres, se necesitan plantear experimentos que permitan observar la reacción del material en las condiciones de corrosión, abrasión y abrasión-corrosión. Los experimentos están planteados de tal forma y orden para que se puedan obtener los siguientes datos:

- Potencial de corrosión (E_{corr}) del acero AISI 410 en agua de mar sintética (en mV).

- Velocidad de corrosión (V_{corr1}) del acero en el medio propuesto (sin abrasión) (en mpy).
- Identificación de la zona pasiva, zona transpasiva y potencial de picaduras (sin abrasión).
- Tasa de desgaste del acero sometido al fenómeno de abrasión húmeda (sin corrosión).
- Velocidad de corrosión (V_{corr2}) del acero en el medio propuesto (con abrasión) (en mpy).
- Identificación de la zona pasiva, zona transpasiva y potencial de picaduras (con abrasión).

Las primeras tres pruebas son para analizar el material sumergido en agua de mar sintética, estas pruebas son para analizar el fenómeno de corrosión pura, durante estas prueba no se produce daño abrasivo por lo cual se utiliza una celda plana para pruebas electroquímicas (ver figura 14). En las siguientes tablas se muestran los experimentos enumerados respecto a su orden de realización, mostrando los parámetros dentro de los cuales se llevaron a cabo junto con una descripción de su objetivo.

Tabla 9. Parámetros de la primera prueba de la metodología experimental.

PRUEBA 1: Medición de potencial a circuito abierto		
Parámetros	Muestra	Descripción del ensayo
Medio: Agua de mar sintética. Abrasivo: N/A Temperatura: Ambiental. Velocidad deslizamiento: N/A Carga: N/A	Acero inoxidable AISI 410. Dimensiones: 1cm ² .	Medición de potencial a circuito abierto utilizando el potencióstato.
Celda utilizada ▶	Celda plana	
Duración ▶	1 hr	
Objetivos de la prueba ▶	Obtención de datos primarios del material: potencial de corrosión.	

Tabla 10. Parámetros de la segunda prueba de la metodología.

PRUEBA 2: Resistencia a la polarización (sin abrasión)		
Parámetros	Muestra	Descripción del ensayo
Medio: Agua de mar sintética. Abrasivo: N/A Temperatura: Ambiental. Velocidad deslizamiento: N/A Carga: N/A	Acero inoxidable AISI 410. Dimensiones: 1cm ² .	Se realiza un barrido de potencial de ± 20 mV a partir del E _{corr} a una velocidad de 0.1mV/s. Esta prueba se realiza tres veces para comprobar repetibilidad [].
Celda utilizada ▶	Celda plana	
Duración ▶	1 hora	
Objetivos de la prueba ▶	Obtención de datos para el cálculo de la velocidad de corrosión.	

Tabla 11. Parámetros de la tercera prueba de la metodología.

PRUEBA 3: Polarización anódica potenciodinámica (sin abrasión)		
Parámetros	Muestra	Descripción del ensayo
Medio: Agua de mar sintética. Abrasivo: N/A Temperatura: Ambiental. Velocidad deslizamiento: N/A Carga: N/A	Acero inoxidable AISI 410. Dimensiones: 1cm ² .	Se realiza un barrido de potencial hasta los +1600mV a partir del E _{corr} a una velocidad de 0.67mV/s.
Celda utilizada ▶	Celda plana	
Duración ▶	3 hrs	
Objetivos de la prueba ▶	Obtener velocidad de corrosión, zona pasiva y transpasiva del material y potencial de picaduras.	

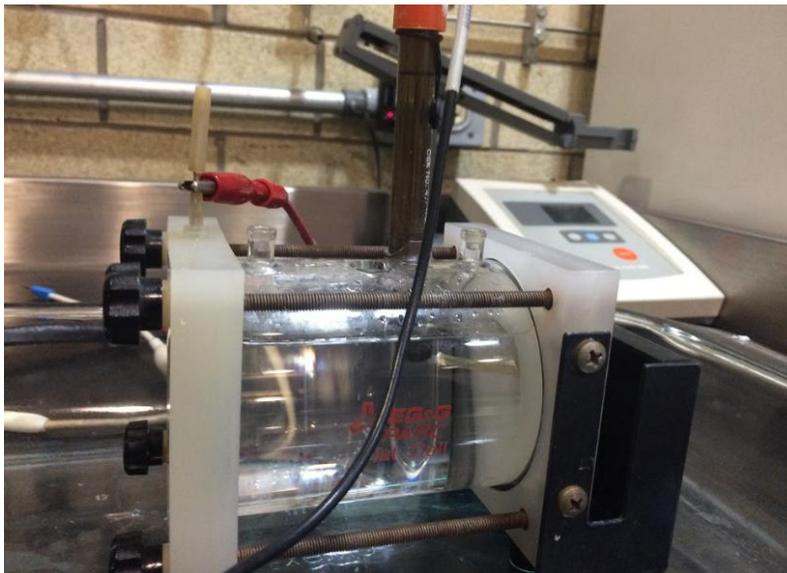


Figura 14. Celda plana utilizada para las pruebas de corrosión pura.

Para el fenómeno de abrasión pura se propuso la realización de una prueba prolongada con duración de dos horas en la cual se mide la pérdida de masa de la probeta cada quince minutos. Esta prueba se propuso con el único objetivo de comprobar que la abrasión que genera el banco de pruebas es constante y así poder verificar los cambios en el comportamiento electroquímico que ocasiona esta. Los parámetros de la prueba son los siguientes:

Tabla 12. Parámetros de la cuarta prueba de la metodología.

PRUEBA 4: Abrasión pura (sin corrosión)		
Parámetros	Muestra	Descripción del ensayo
Medio: Agua destilada. Abrasivo: 150 gr de SiO ₂ Temperatura: Ambiental. Velocidad deslizamiento: 200 rpm Carga: 2.5 N	Acero inoxidable AISI 410. Dimensiones: 1cm ² .	Se le provoca abrasión a la muestra durante dos horas midiendo la pérdida de masa cada quince minutos. No se realizan mediciones electroquímicas.
Celda utilizada ▶	Banco de pruebas de abrasión-corrosión	
Duración ▶	2 hrs	
Objetivos de la prueba ▶	Comprobar que el banco de pruebas genera abrasión de forma controlada.	

Los experimentos 5 y 6 son repetición de los experimentos 1 y 2 pero realizados en el banco de pruebas para poder generar la abrasión controlada. Los parámetros de las pruebas son los siguientes:

Tabla 13. Parámetros de la quinta prueba de la metodología experimental.

PRUEBA 5: Medición de potencial a circuito abierto con abrasión		
Parámetros	Muestra	Descripción del ensayo
Medio: Agua de mar sintética. Abrasivo: 150 gr SiO ₂ Temperatura: Ambiental. Velocidad deslizamiento: 200rpm Carga: 2.5N	Acero inoxidable AISI 410. Dimensiones: 1cm ² .	Medición de potencial a circuito abierto utilizando el potenciómetro y al mismo tiempo generando abrasión con el banco de pruebas funcionando.
Celda utilizada ▶	Banco de pruebas de abrasión-corrosión	
Duración ▶	1 hr	
Objetivos de la prueba ▶	Obtención de datos primarios del material: potencial de corrosión en estado de abrasión-corrosión.	

Tabla 14. Parámetros de la sexta prueba de la metodología experimental.

PRUEBA 6: Resistencia a la polarización (con abrasión)		
Parámetros	Muestra	Descripción del ensayo
Medio: Agua de mar sintética. Abrasivo: 150 gr SiO ₂ Temperatura: Ambiental. Velocidad deslizamiento: 200rpm Carga: 2.5N	Acero inoxidable AISI 410. Dimensiones: 1cm ² .	Medición de la velocidad de corrosión mientras se genera abrasión controlada con el banco de pruebas.
Celda utilizada ▶	Banco de pruebas de abrasión-corrosión	
Duración ▶	1 hr	
Objetivos de la prueba ▶	Obtención de la velocidad de corrosión en estado de abrasión húmeda-corrosión.	

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1 Resultados de la caracterización del material

Como se indicó anteriormente se realizó un análisis de EDS para comprobar la composición química del material con respecto a su ficha técnica. El siguiente gráfico y tabla muestran los resultados del análisis.

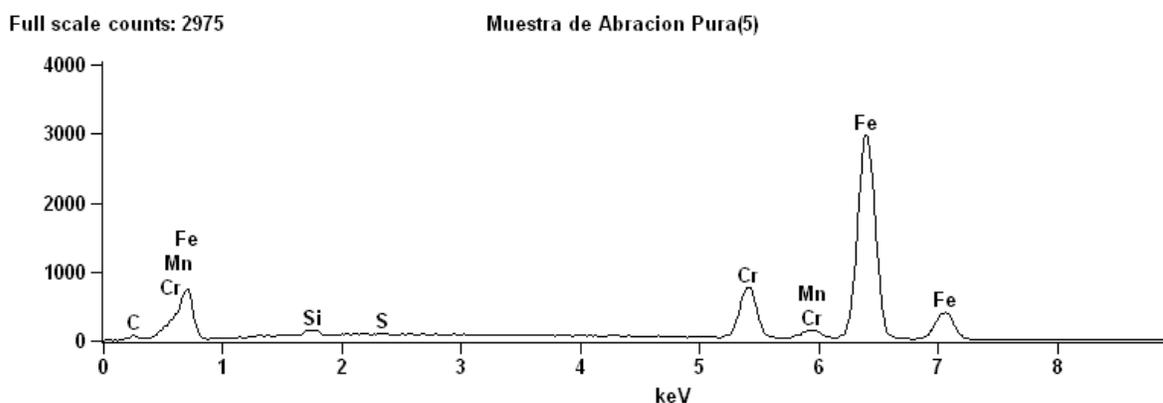


Figura 15. Espectro de la muestra de acero AISI 410 en análisis de EDS.

Tabla 15. Concentración de elementos según análisis de EDS

<i>Elemento</i>	<i>Peso %</i>	<i>Atom %</i>
<i>Si K</i>	0.49	0.96
<i>S K</i>	0.03	0.12
<i>Cr K</i>	12.10	12.81
<i>Mn K</i>	0.39	0.39
<i>Fe K</i>	86.95	85.71
<i>Total</i>	100.00	100.00

Los resultados de esta prueba indican que el material cumple con los parámetros para ser considerado acero inoxidable AISI 410.

4.2 Resultados de la abrasión pura

El ensayo de abrasión se realizó durante dos horas midiendo pérdida de masa cada quince minutos obteniendo el siguiente gráfico:

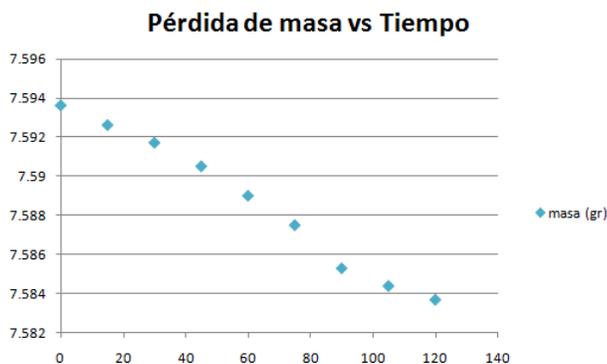


Figura 16. Pérdida de masa por abrasión generada con el banco de pruebas.

Analizando la pérdida de masa se puede decir que la abrasión que genera el banco de pruebas tiene un comportamiento uniforme y esto comprueba que el proceso está siendo controlado. De igual forma se analizaron las huellas de desgaste (ver figuras x, x, x.) generadas en el proceso para comprobar los mecanismos involucrados en la abrasión pura.

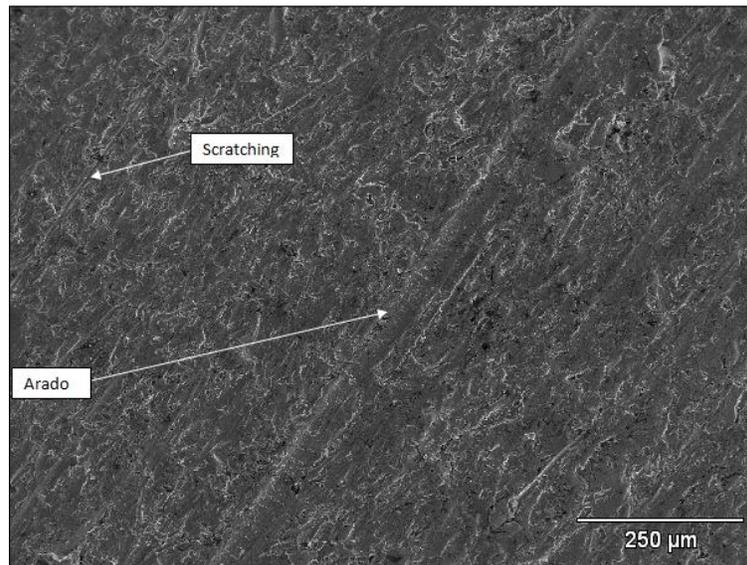


Figura 17. Huellas de desgaste en abrasión pura

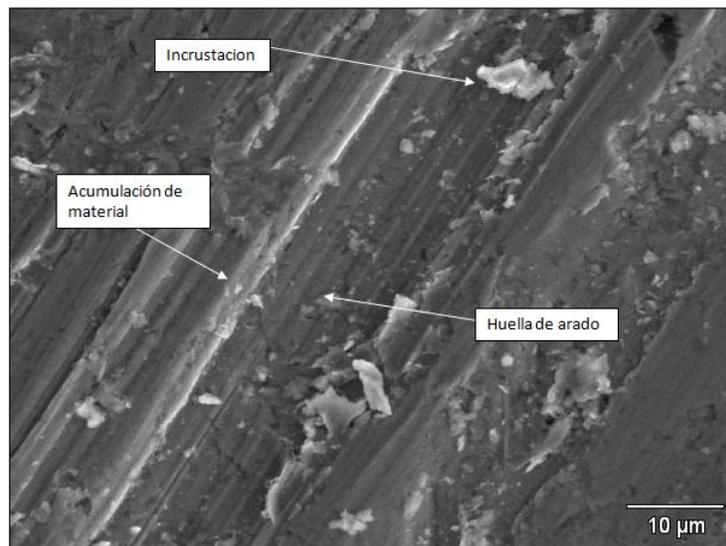


Figura 18. Más Huellas de desgaste en abrasión pura

Con base en este resultado se procede a generar abrasión en las muestras mientras se realizan las mediciones electroquímicas necesarias para calcular el E_{corr} y la V_{corr} .

4.3 Medición del potencial de corrosión a circuito abierto

En el siguiente gráfico se puede apreciar el comportamiento del acero mientras se realiza una medición de potencial a circuito abierto, este potencial es el que se usa como referencia para realizar los barridos de potencial para obtener las velocidades de corrosión en las dos condiciones

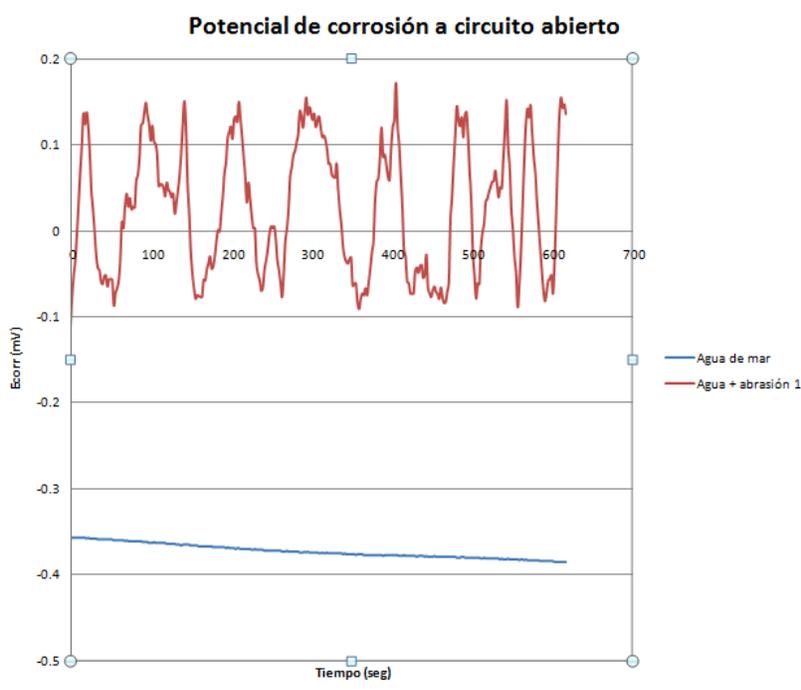


Figura 19. Medición a circuito abierto de la E_{corr} , en condición de corrosión pura y de abrasión húmeda-corrosión.

El material sumergido en agua de mar sintética sin abrasión se estabilizó alrededor de los -400 mV, en este estado se considera que el material está haciendo reacción anódica con el medio y se está oxidando. Por otro lado como se observa en el gráfico la medición en

condición de abrasión húmeda-corrosión no se estabilizaba y daba saltos oscilando entre -100mV y +150mV. Analizando estos resultados se puede observar que el proceso de abrasión con la arena sílica está inhibiendo la reactividad del material en el medio.

4.4 Resultados de las pruebas de resistencia a la polarización

A continuación se muestra el gráfico (ver figura 18) con los resultados de las pruebas de resistencia a la polarización realizadas y se indica cual es la velocidad de corrosión calculada para el metal sumergido en agua de mar sintética sin ser sometido a abrasión. Cabe mencionar que se realizaron tres repeticiones de cada prueba de resistencia a la polarización y se obtuvo un promedio de los resultados que se establece como la velocidad de corrosión aproximada. Para este trabajo se presentan los gráficos que tienen el comportamiento más cercano a la velocidad de corrosión calculada.

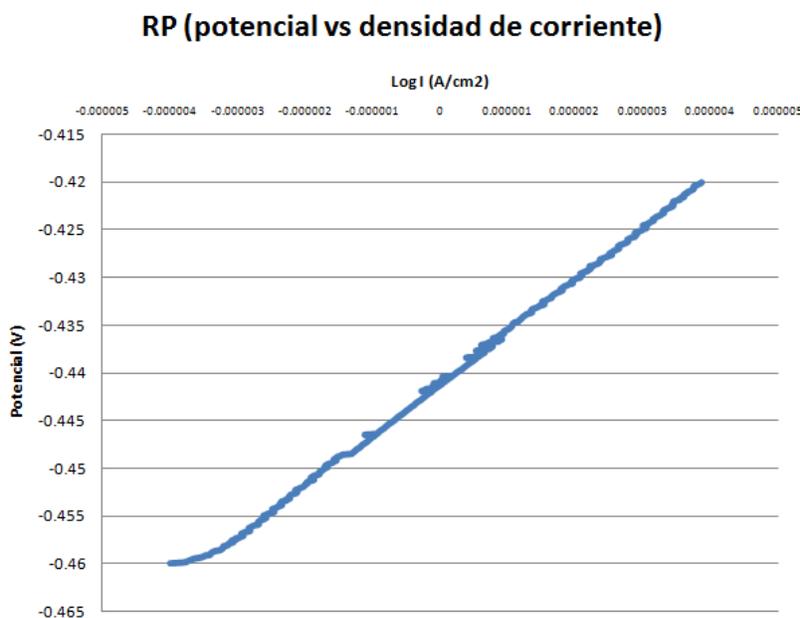


Figura 20. Gráfico de resistencia a la polarización sin partículas abrasivas.

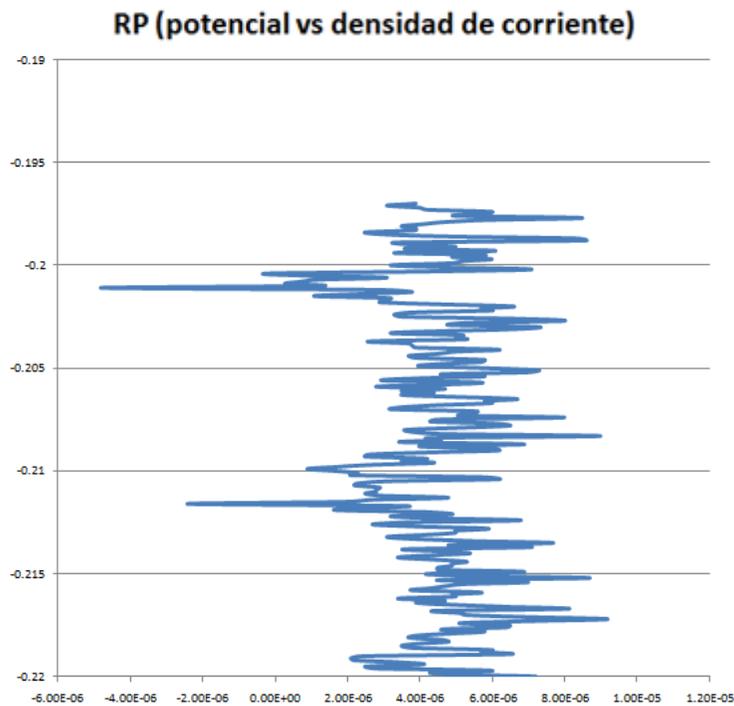


Figura 21. Gráfico de resistencia a la polarización con partículas abrasivas y carga en el banco de pruebas.

Las velocidades de corrosión obtenidas se muestran en la siguiente tabla para las dos condiciones:

Tabla 16. Diferencia en las velocidades de corrosión.

Condición	Velocidad de corrosión
Corrosión pura	1.03 mpy
Abrasión húmeda- Corrosión	.144 mpy

. Se puede observar que con el efecto de las partículas abrasivas disueltas en el agua de mar se inhibe casi por completo la corrosión, por otra parte en las pruebas de corrosión pura se causó un daño al material que puede ser observado en las siguientes imágenes obtenidas con ayuda del microscopio electrónico de barrido.

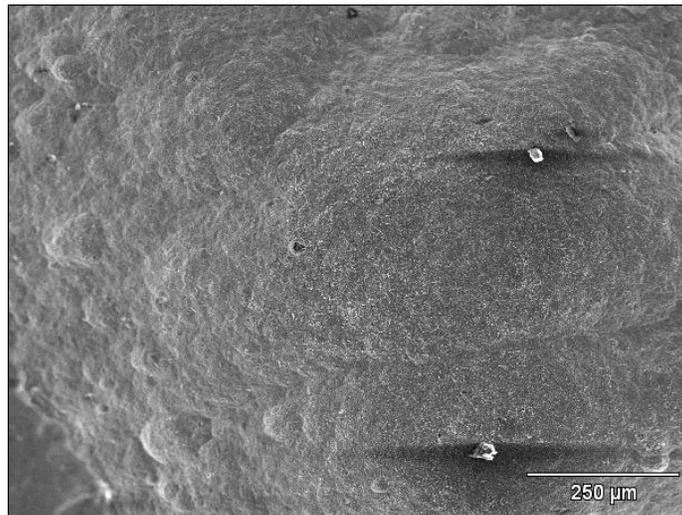


Figura 22. Vista del exterior de una picadura generada por corrosión en el acero AISI 410.

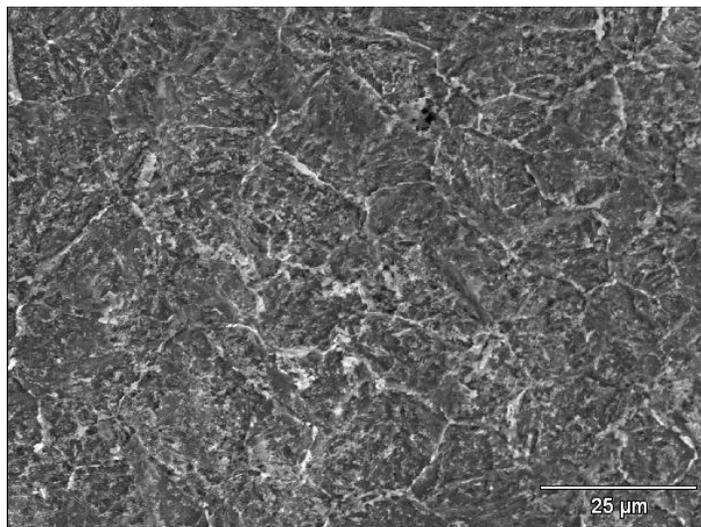


Figura 23. Vista del interior de una picadura generada por corrosión en el acero AISI 410

Conclusiones

- ◆ El acero AISI 410 no presenta una buena resistencia a la corrosión en un ambiente agresivo como lo es el agua de mar, por lo cual no se recomienda su uso en estas condiciones.
- ◆ El acero no presentó una zona de pasivación en los gráficos analizados, pero el medio mezclado con el abrasivo inhibo el efecto de la corrosión.
- ◆ Cuando el acero inoxidable AISI 410 es sometido al fenómeno de 'abrasión húmeda-corrosión', usando como medio el agua de mar sintética y como partícula abrasiva el SiO_2 , predomina el desgaste mecánico.
- ◆ El Banco de pruebas logra producir abrasión de manera controlada.
- ◆ Se vuelve prioridad implementar pruebas químicas para la identificación de productos de corrosión a la metodología propuesta para complementar los análisis.

Trabajos futuros

- ◆ Optimización del banco de pruebas para controlar de manera más eficiente los parámetros involucrados en el proceso (aplicación de carga, flujo del abrasivo, agitación, montaje de muestras, etc.).
- ◆ Comprobar la repetibilidad de los experimentos realizados.
- ◆ Validación de resultados en dispositivos similares.
- ◆ Análisis de pérdida de masa en las pruebas de corrosión para su comparación con el proceso de tribocorrosión.
- ◆ Cálculo de la sinergia de procesos.

Lista de referencias

- [1] Bhushan, Bharat, (2013), *Introduction to tribology*, West Sussex, United Kingdom, Editorial Wiley.
- [2] J. Santa Marín, A. toro. (2015). Tribología: pasado, presente y futuro. *Tecno lógicas*. Vol. 18, No. 35.
- [3] G. Stachiowak, A. Batchelor. (1993), *Engineering tribology*, Oxford, United Kingdom, Editorial Butterworth-Heinemann.
- [4] NACE International (2017). Assessment of the global cost of corrosion. Houston, Texas, UE. Recuperado de <http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>
- [5] Noria Latin America (2013). El desgaste abrasivo causa una reacción en cadena. Recuperado de <http://noria.mx/lublearn/el-desgaste-abrasivo-causa-una-reaccion-en-cadena-2/>
- [6] Denny, Jones, (1996), *Principles and prevention of corrosion*, Reno, United States, Editorial Prentice Hall.
- [7] Mars, Fontana, (1987), *Corrosion Engineering*, Ohio, United States, Editorial McGraw Hill.
- [8] POLYCORP LTD (2017). Corrosión en tuberías y equipos producida por agua de mar. Canadá. Recuperado de <http://www.poly-corp.com/assets/file/resource/Polycorp-Protective-Linings---Corrosion-From-Seawater-Spanish.pdf>
- [9] T. McTighe, D. Brazil, I. Clarke, L. Keppler, J. Keggi, T. Tkach, E. Mcpherson. (2015). Metallic Modular Taper Junctions in total Hip Arthroplasty. *Reconstructive review*. Vol. 5. No. 2.
- [10] SIMETAL (2017). Aplicaciones de los aceros inoxidables. Burgos. España. Recuperado de <http://www.simetal.es>
- [11] Princeton Applied Research Center. (2017) Electrochemistry and Corrosion: Overview and Techniques. TN. USA. Recuperado de www.princetonappliedresearch.com
- [12] Hurtado Mayen, A. (2017). “Estudio del coeficiente de fricción en asfalto con presencia de hielo y arena empleando el péndulo deslizante” (tesis de maestría). Instituto politécnico nacional SEPI ESIME Zacatenco, Ciudad de México.
- [13] Norm ASTM D1141, 2003, standar practice for the preparation of substitute ocean water, ASTM international, West Conshohocken, PA, USA.

- [14] M.B. Santos, W.S.Labiapari, M.A.N.Ardila, W.M.daSilvaJr y J.D.B.deMello. (2015). Abrasion-corrosion: New insights from force measurments. *Wear*. 332-333, 1206-1214.
- [15] Grazyna B. Stachowiaka, Mobin Salasia, William D.A. Rickardb y Gwidon W. Stachowiak. (2016). Effects of particle angularity in abrasion-corrosion. *Corrosion science*. 111. 690-702.
- [16] Arena Sílica MX (2017). “¿Qué es la arena sílica?”. Estado de México, México. Recuperado de <http://www.arenasilica.mx/>