



UNIVERSIDAD
MICHOACANA DE SAN
NICOLAS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

“EFECTO DE LA VARIACION DEL POTENCIAL DE HIDROGENO (pH) DE LA LLUVIA ACIDA EN LA CORROSION ELECTROQUIMICA DE UN ACERO DE ALTA RESISTENCIA Y BAJA ALEACION”.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERIA QUIMICA

PRESENTA:

CINTYA ARROYO ARROYO

ASESOR: DR. RAFAEL HUIRACHE ACUÑA (FIQ, U.M.S.N.H.)

CO- ASESOR: DR. LUIS BEJAR GOMEZ (FIM, U.M.S.N.H.)

MORELIA, MICHOACAN DICIEMBRE DEL 2016

AGRADECIMIENTOS

Primero, quiero agradecer a MI FAMILIA por su paciencia, apoyo emocional y sobretodo el apoyo económico; sin ellos ésto no sería posible.

También quiero agradecer al Dr. Rafael Huirache Acuña, por haber confiado en mí para este proyecto y apoyarme al realizarlo.

Al Dr. Luis Béjar Gómez por su apoyo durante la realización del proyecto al prestarme las instalaciones del laboratorio de materiales y facilitarme cualquier equipo que necesitara.

Para el Dr. Engelbert Huape Padilla por su paciencia al enseñarme y explicarme acerca de cualquier duda que se generara en el proyecto.

Sin dejar de agradecer al Ing. Max Pérez por su apoyo en el manejo de los equipos del laboratorio de materiales.

Agradezco a mis sinodales, la M.C. María del Rosario Gallardo Reyes y M.C. Ma de la Salud Laura García Salinas; por su tiempo y dedicación al revisar la tesis y por escucharme al momento de exponer.

Por último y no menos importante a todos los que fueron mis profesores durante mi periodo de estudiante.

Para todos, **¡MUCHAS GRACIAS!**

INDICE

GLOSARIO.....	6
RELACIÓN DE TABLAS Y FIGURAS	8
RESUMEN.....	10

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVOS.....	13
JUSTIFICACIÓN.....	14
HIPÓTESIS.....	14

CAPITULO II

GENERALIDADES

2.1- ACEROS MICROALEADOS (HSLA).....	15
2.1.1.- DEFINICIÓN.....	15
2.1.2.- ANTECEDENTES HISTORICOS DE ACEROS MICROALEADOS...	16
2.1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS, USOS Y APLICACIONES DE LOS ACEROS HSLA.....	16
2.2- CORROSIÓN.....	17
2.2.1.- DEFINICIÓN.....	17
2.2.2.- CORROSIÓN ELECTROQUIMICA.....	19
2.3 ASPECTOS CINETICOS DE LA CORROSIÓN.....	21
2.3.1 POLARIZACIÓN.....	21
2.3.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN MEDIANTE CORRIENTE CONTINUA.....	23
2.4.- LLUVIA ÁCIDA.....	25
2.4.1.- DEFINICIÓN.....	25

2.4.2.- CONSECUENCIAS DE LA LLUVIA ÁCIDA.....	26
-----------------------------------------------	----

CAPITULO III

DESARROLLO

3.1.- ANÁLISIS QUÍMICO.....	27
3.2.- ANÁLISIS METALOGRAFICO.....	27
3.2.1.- CORTE DE LA PROBETA.....	27
3.2.2.- DESBASTE DE LA PROBETA.....	28
3.2.3.- PULIDO.....	30
3.2.4.- ATAQUE QUÍMICO.....	31
3.2.5.- METALOGRAFÍA.....	32
3.3.- PRUEBAS DE CORROSIÓN.....	33
3.3.1.- POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICA.....	35
3.3.2.- RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN (LPR).....	36
3.4.- MICROSCOPIA DE BARRIDO.....	36

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	38
4.1.- ANÁLISIS QUÍMICO.....	38
4.2.- METALOGRAFIA.....	39
4.3.- PRUEBAS DE CORROSIÓN.....	41
4.3.1 VELOCIDAD DE CORROSIÓN.....	41
4.4.- MICROSCOPIA DE BARRIDO.....	49

CAPITULO V

CONCLUSIONES.....	57
RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS.....	58
ANEXOS.....	59
BIBLIOGRAFIA.....	64

GLOSARIO

Acero.- El acero es una aleación de hierro con pequeñas cantidades de otros elementos, es decir, hierro combinado con un 1% aproximadamente de carbono.

Aleación.- Una aleación es una mezcla homogénea, que está compuesta de dos o más elementos, de los cuales, al menos uno es un metal.

Aleante.- Es el elemento con el cual se mezcla el elemento principal para poder tener una aleación.

Ánodo.- El ánodo es el electrodo en el cual, o a través del cual, la corriente positiva pasa hacia el electrolito.

Cátodo.- El cátodo es el electrodo en el cual entra la corriente positiva proveniente del electrolito.

Corrosión.- Es la pérdida o deterioro de las propiedades físicas y/o químicas de un metal, sobre todo el hierro, al interactuar con su medio. Sucede naturalmente, transformándose el metal en un óxido, (reacción anódica, donde ocurre la disolución del metal) que es un compuesto más estable, por el cual el metal vuelve a su estado anterior u original, que es el que tenía antes del proceso metalúrgico.

Corrosión electroquímica.- La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica (la que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, y es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y cátodos, para que este tipo de corrosión pueda tener lugar.

Electrolito.- Puede definirse al electrolito como el solvente que se disuelve en agua para generar una solución capaz de conducir la corriente.

Metalografía.- Puede definirse la Metalografía como la técnica que revela la organización espacial de fases y compuestos que conforman un material metálico.

Microscopio electrónico de barrido.- El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscopy), utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto.

Polarización.- La polarización es la variación de potencial por el paso de una densidad de corriente.

Potencial de hidrogeno (pH).- El pH es una unidad de medida que sirve para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia. Se expresa como el logaritmo negativo de base de 10 en la actividad de iones de hidrógeno.

Potenciostato.- Un potenciostato es el dispositivo electrónico requerido para controlar una celda de tres electrodos y ejecutar la mayoría de los experimentos electroanalíticos.

Velocidad de corrosión.- Es la relación del desgaste del material metálico con respecto al tiempo, en mm/año.

RELACIÓN DE TABLAS Y FIGURAS

CAPITULO II

Figura 2.1. Representación del proceso de obtención y corrosión de un metal.....	17
Figura 2.2. Representación de una pila electrolítica.....	19
Figura 2.3 Representación de un diagrama de Evans.....	21
Figura 2. 4 Curva de polarización catódica con control de activación.....	22
Figura 2.5 Curva de polarización catódica con control de concentración.....	23
Figura 2.6 Imagen representativa de la formación de lluvia ácida.....	25

CAPITULO III

Figura 3.1 Fotografía de la cortadora utilizada.....	28
Figura 3.2 Desbaste de probetas.....	29
Figura 3.3 Pulidora utilizada para acabado espejo.....	30
Figura 3.4 Microscopio óptico para metalografía.....	32
Figura 3.5 Esquema de la celda electroquímica.....	34
TABLA 3.1 Concentraciones de la solución simulada de lluvia ácida.....	35
Figura 3.6 Fotografía del microscopio electrónico de barrido utilizado.....	37

CAPITULO IV

Tabla 4.1 Resultado de análisis químico realizado.....	38
Figura 4.1 Metalografía del acero a 100x y con escala.....	39
Figura 4.2 Metalografía a 200x con escala.....	40
Figura 4.3 Metalografía a 500x y con escala.....	40
TABLA 4.2 Cálculo del peso equivalente y densidad de la muestra.....	41

Tabla 4.3	Ejemplo del cálculo de la velocidad de corrosión.....	42
Gráfica 4.1	Velocidad de corrosión vs Tiempo.....	44
Gráfica 4.2	Potencial vs Tiempo.....	45
Gráfica 4.3	Potencial vs Densidad de corriente (curva de polarización).....	46
Figura 4.4	Imagen a 500x de la muestra corroída por la solución a pH 2.....	47
Figura 4.5	Imagen a 300x de la muestra corroída por la solución a pH 5.....	47
Figura 4.6	Imagen a 300x de la muestra corroída por la solución a pH 8.....	48
Figura 4.7	Foto zona 1 de productos de corrosión del acero microaleado sometido a una solución de pH 2.....	49
Figura 4.8	Resultados de análisis químico de la figura 4.7.....	49
Figura 4.9	Mapeo zona 1 de la muestra 1.....	50
Figura 4.10	Resultados de un EDS puntual de la muestra 1 zona 2.....	51
Figura 4.11	Mapeo de la muestra 1 zona 2.....	52
Figura 4.12	Foto de los productos de corrosión de la muestra 2, visto desde 60x (lado izquierdo) hasta 1500x (lado derecho).....	53
Figura 4.13	Imagen representativa de un EDS puntual de la muestra 2.....	53
Figura 4.14	Foto de productos de corrosión de la muestra 3 (pH 8), visto desde una escala de 300x (izquierda), 500x (derecha) y 1500x (abajo).....	54
Figura 4.15	Mapeo de muestra 3 a 300x.....	55
Figura 4.16	Mapeo de la muestra 3 a 500x.....	55
Figura 4.17	Mapeo de la muestra 3 a 1500x.....	56

RESUMEN

En esta investigación se realizó un estudio sobre el tema de la corrosión electroquímica de un acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA), de bajo contenido de carbono. El acero microaleado que se estudió fue fabricado en el Instituto de Metalurgia de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; cuya composición química es: %C= 0.052, %Si=0.051, %Mn=1.325, %P= 0.011, %S= 0.022, %Cr=0.675, %Mo= 0.0077, %Ni=0.005, %Cu= 0.058, %Al=0.068, %V= 0.061. Se realizó caracterización mediante microscopía electrónica de barrido de los productos de la corrosión electroquímica del acero, utilizando un medio de lluvia ácida simulada a temperatura ambiente con variaciones de pH= 2, pH= 5 y pH= 8. Dentro del proyecto se planteó obtener la velocidad de corrosión del acero microaleado sometido a estas condiciones.

ABSTRACT

In this research was made a study about of electrochemical corrosion of steel high-strength low-alloy (HSLA), low carbon content is held. The microalloyed steel to be studied was made at the Institute of Metallurgy of the Michoacana University of San Nicholas de Hidalgo; whose chemical composition is: %C= 0.052, %Si= 0.051, %Mn= 1.325, %P= 0.011, % S=0.022, %Cr= 0.675, %Mo= 0.0077, %Ni= 0.005, %Cu= 0.058, %Al= 0.068, %V= 0.061. Also was made a caracteritation by scanning electron microscopy of the products of the electrochemical corrosion of steel, using a medium of simulated acid rain at room temperature with varying pH = 2, pH = 5 and pH = 8. Within the project it raised obtain the corrosion rate of microalloyed steel under these conditions.

Palabras clave: ingeniería química corrosion lluvia ácida

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Los aceros empleados en la actualidad requieren de valores menores al 0.10% de carbono y son aleados con elementos como niobio, vanadio y titanio, que además de la incorporación de cromo mejoran significativamente las propiedades de corrosión y desgaste. En nuestro país se emplean grandes cantidades de acero en la construcción de oleoductos y gasoductos que transportan la mayor parte de los hidrocarburos producidos en PEMEX, así mismo en otros países como Venezuela, Brasil, Argentina, Chile. [21]

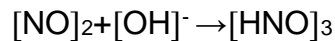
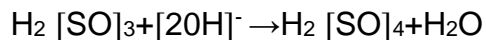
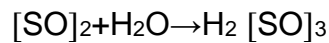
Los aceros de alta resistencia como los aceros microaleados, son producto de una tecnología en la que se adicionan elementos de micro aleación y se procesa termo mecánicamente el acero dando como resultado un material con mejores propiedades, dado que se controla la microestructura del acero. Los elementos de micro aleación se requieren en pequeñas concentraciones y son formadores de carburos y carbonitruros, dado que reaccionan con elementos como el carbono, el nitrógeno y el azufre, que siempre están presentes en el acero. Aun a relativamente bajas temperaturas su afinidad induce a la precipitación de fases. A temperaturas elevadas, es decir, en el rango austenítico, los compuestos tienden a disolverse parcial o totalmente en la matriz del acero. La microestructura final que resulta es de pequeños granos ferríticos y favorecen la mejoría de las propiedades del acero como son resistencia a la tensión o al impacto. [21]

Con los avances tecnológicos, la vida del ser humano se ha visto beneficiada en muchos aspectos, comunicación, transporte, salud, etc. Todos estos avances y beneficios, también han permitido el incremento en el uso de combustibles tales como el carbón mineral y el petróleo, indispensables para el funcionamiento de maquinarias, y que al consumirse emiten grandes cantidades de contaminantes a la atmósfera. El problema de la contaminación del aire, es ya una constante en muchas ciudades industriales de todo el mundo lo que ha causado problemas serios de salud

a la población. Los casos más graves son la famosa niebla tóxica londinense de 1952, el deterioro de los bosques europeos por la “lluvia ácida” en los años cincuenta y sesenta, y la grave situación de la calidad del aire en la Ciudad de México, Tokio y Sao Paulo durante las últimas décadas. [6]

El fenómeno de la lluvia ácida comienza cuando el azufre y el nitrógeno presentes en los combustibles fósiles son liberados a la atmósfera mediante procesos de combustión, como SO_x y NO_x que son transportados, reaccionan, se precipitan y se depositan. [37]

Las reacciones que desencadenan la formación de la lluvia ácida son:



La exposición al medio ambiente de muchos materiales, ha obligado al estudio de su degradación en presencia de la lluvia ácida. Por ejemplo, en aleaciones comerciales de aluminio 2024-T3, aleaciones de magnesio, cobre, bronce, zinc, así como en cemento. Los aceros microaleados de bajos contenidos de carbono y con diferentes aleaciones de vanadio, niobio y titanio, también entran en el estudio.

En este trabajo se propone el estudio de un acero microaleado fabricado en la UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO con la finalidad de conocer el comportamiento de la corrosión de dicho acero en presencia de lluvia ácida simulada con variaciones en el pH, con valores de 2, 5 y 8.

OBJETIVOS

1.- OBJETIVO GENERAL

Estudiar el efecto de la variación del pH (2 a 8) de la lluvia acida en el comportamiento a la corrosión electroquímica de un acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA), de bajo contenido de carbono (0.052 %en peso) y microaleado con vanadio (0.061% en peso).

2.- OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Caracterización microestructural del acero microaleado con vanadio, mediante microscopia óptica con la finalidad de conocer la microestructura del acero.
2. Definir los componentes y concentraciones de la lluvia ácida y ajustar el pH a diferentes valores.
3. Realizar las pruebas electroquímicas con las técnicas de polarización potenciodinámica, resistencia a la polarización lineal (LPR) con la finalidad de calcular la velocidad de corrosión del acero a los diferentes pH's trabajados.
4. Analizar los productos de corrosión obtenidos por medio de microscopía electrónica de barrido para obtener la información de lo que se formó durante la corrosión.

JUSTIFICACIÓN

El empleo de aceros en la transportación de hidrocarburos y materiales derivados del petróleo a nivel nacional e internacional es de suma importancia, así mismo en la mayoría de los equipos empleados en la industria nuclear, ya que cada vez se requieren de mejores propiedades mecánicas en los aceros como resistencia, corrosión, desgaste y dureza. De aquí la necesidad de conocer las propiedades del acero microaleado fabricado en las instalaciones de la UMSNH y como las empresas dedicadas al manejo de estos productos se encuentran en regiones con altas concentraciones de NO_x y SO_x en la aire, generando la acides en la lluvia a la que están expuestos; se hacen las pruebas de corrosión para así conocer el comportamiento de dicho acero.

Generando ese conocimiento se podrán prevenir desgastes o pronto reemplazos de piezas y esto a su vez evitará gastos.

HIPÓTESIS

Entre más bajo el pH de la lluvia ácida (pH=2, el más bajo en este trabajo), más alta será la velocidad de corrosión del acero HSLA fabricado en las instalaciones de la UMSNH.

CAPITULO II

GENERALIDADES (MARCO TEORICO)

2.1- ACEROS MICROALEADOS (HSLA)

2.1.1.- DEFINICIÓN:

Los aceros microaleados, también conocidos como aceros de baja aleación y alto límite elástico (HSLA), son aceros de bajo o medio contenido en carbono con pequeñas cantidades de elementos de aleación. Se caracterizan por poseer una elevada ductilidad, estructura de grano fino y bajo contenido en carbono, además de combinar unas excelentes propiedades mecánicas con una buena conformabilidad y soldabilidad. Los elementos que, en forma de microaleación, se emplean más para la fabricación de estos aceros son Cr, Ni, Mo, V, Zr, Cu, Ti, Nb, N y P. La función principal de estos microaleantes es contribuir al endurecimiento de la ferrita, por medio del afino de grano, endurecimiento por precipitación y endurecimiento por formación de solución sólida. [36]

El Instituto Americano del Hierro y el Acero, (AISI), define los aceros HSLA como:

“Los aceros HSLA conforman un grupo específico de aceros con composición química especialmente diseñada para impartir altas propiedades mecánicas y en algunos aceros tienen una resistencia a la corrosión atmosférica mayor que los aceros convencionales al carbono. Los aceros HSLA se diseñan pensando más que en nada en las propiedades mecánicas, sin importar los límites en composición química. Los aceros HSLA no se consideran como aceros aleados, aun cuando la composición química pudiera ser alta”. [13]

2.1.2.- ANTECEDENTES HISTORICOS DE ACEROS MICROALEADOS

Los aceros microaleados se han venido desarrollando desde alrededor de 1970, aunque los primeros aceros microaleados comenzaron a utilizarse desde 1950 y eran más que nada los grados x52, x55 y x60; utilizados en gasoductos. Se debía considerar que tuvieran un alto límite elástico pero a la vez soportar bajísimas temperaturas (de hasta -50°C), sin que se fragilizaran. También se buscó tener la soldabilidad para poder fabricar los tubos de gran diámetro así como unir un tubo con otro. [4]

En un principio los aceros se clasificaban únicamente por su contenido de carbono, pero esto cambió al comenzar a usar aleantes como el cromo y el níquel, con lo que empezaron a usarse términos como aceros de alta aleación, de media aleación y baja aleación. [4]

Estos aceros fueron aceptados rápidamente en todo el mundo debido a su excelente combinación de resistencia a la tensión, alta ductilidad, magnífica tenacidad a impacto, gran formabilidad y soldabilidad; todo ello a un costo relativamente bajo. [4]

2.1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS, USOS Y APLICACIONES DE LOS ACEROS HSLA.

El acero HSLA, de alta resistencia y baja aleación, es una familia de aceros con composición relativamente simple. Esto lo hace ideal para la soldadura. Su bajo costo en comparación con otros tipos especializados de acero hace que sea ideal como material estructural, donde la resistencia a la corrosión, la fuerza y la dureza extrema no son necesarias. [37]

PROPIEDADES MECÁNICAS: Los aceros HSLA tienen límites elásticos hasta 80.000 psi. En comparación, otros aceros estructurales normalmente poseen límites elásticos de menos de la mitad de ese valor. Sin embargo, el límite elástico aumentado reduce la ductilidad hasta en un 40 % en comparación con otros aceros estructurales. [37]

USOS Y APLICACIONES: se utiliza en la industria del automóvil y en la producción de equipos pesados, donde su mayor resistencia permite partes más delgadas y ligeras.

Algunos de los elementos fabricados con estos aceros son: estructuras, barcos, grúas y equipo pesado; así como tuberías para oleoductos. [37]

2.2- CORROSIÓN

Debido a que el proyecto se sitúa en el contexto de la corrosión electroquímica es importante definir algunos conceptos.

2.2.1.- DEFINICIÓN

La corrosión es el proceso de reacción de los metales con el medio ambiente para volver a su estado combinado, que es el termodinámicamente más estable. [23]

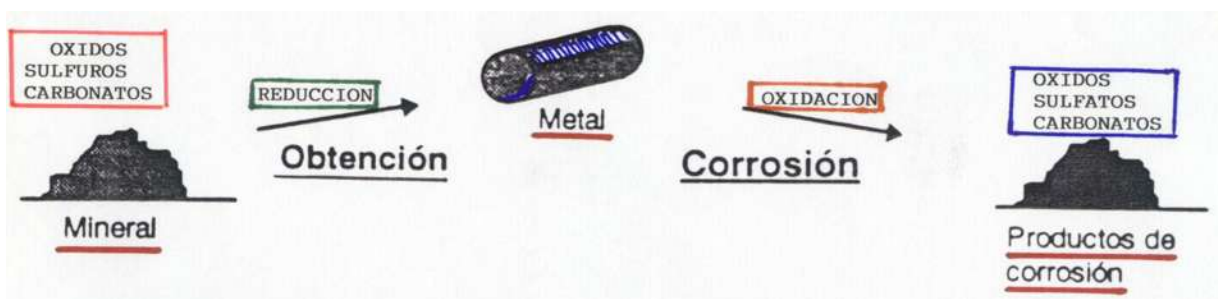


Figura 2.1. Representación del proceso de obtención y corrosión de un metal. [23]

Corrosión es la reacción química o electroquímica entre un material, generalmente un metal, y su medio ambiente que produce un deterioro del metal y sus propiedades, misma que es causada por una reacción de óxido-reducción. [34]

La corrosión puede definirse como el deterioro de un material producido por el ataque químico de su ambiente. Puesto que la corrosión es una reacción química, la velocidad a la cual ocurre dependerá hasta cierto punto de la temperatura y de la concentración de los reactivos y productos. Otros factores como el esfuerzo mecánico y la erosión también pueden contribuir a la corrosión.

Cuando se habla de corrosión, es usual referirse al proceso del ataque químico sobre los metales. Éstos son susceptibles a este ataque debido a que tienen electrones libres y pueden establecer celdas electroquímicas dentro de su estructura. La mayoría de los metales son corroídos hasta cierto grado por el agua y la atmósfera. [34]

Los metales también pueden ser corroídos por el ataque químico directo de las soluciones químicas e inclusive de metales líquidos. También es posible considerar a la corrosión de los metales en algunas formas como metalurgia extractiva inversa. Casi todos los metales existen en la naturaleza en el estado combinado, por ejemplo, como óxidos, sulfuros, carbonatos o silicatos. [34]

En estos estados combinados las energías de los metales son menores. En el estado metálico las energías de los metales son más altas y, por ello, hay una tendencia espontánea a que los metales reaccionen químicamente para formar compuestos. Por ejemplo, los óxidos de hierro existen comúnmente en la naturaleza y son reducidos a hierro con energía térmica, el cual se encuentra en un estado de energía más alto. Por lo tanto, existe una tendencia para que el hierro metálico regrese de manera espontánea a óxido de hierro mediante la corrosión (oxidándose), de manera que pueda existir en un estado de energía inferior. [34]

La corrosión de los metales se puede producir de dos formas según el medio:

- Oxidación química, que se da cuando un metal se combina con el oxígeno (pierde electrones), transformándose en un óxido.
- Corrosión electroquímica, que se produce por la aparición de una pila electroquímica, en la cual el metal actúa como ánodo y, por tanto, se disuelve.

En este trabajo sólo mencionaremos la corrosión electroquímica. [39]

2.2.2.- CORROSIÓN ELECTROQUIMICA

La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica (la que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, y es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y cátodos, para que este tipo de corrosión pueda tener lugar. [40]

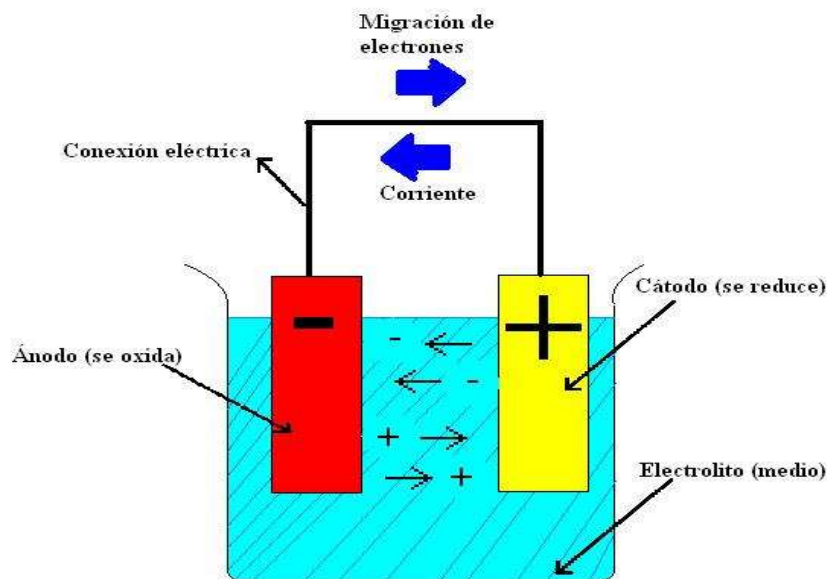


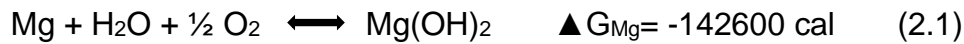
Figura 2.2. Representación de una pila electroquímica. [41]

La figura 2.2 es una clara representación del proceso de corrosión electroquímica, ya que se cumplen los parámetros necesarios como son: el ánodo, cátodo y electrolito.

El principio de la pila galvánica, de Luigi Galvani, es convertir la energía química en eléctrica mediante este tipo de proceso. Un ejemplo es si tenemos un recipiente con una solución acuosa (electrolito) bañando dos electrodos de diferentes metales, podemos suponer Mg y Cu, estos electrodos unidos por un conductor eléctrico

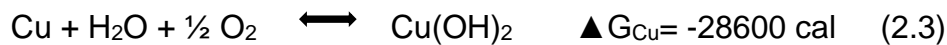
conectado a un voltmetro. Un flujo de electrones circula por el conductor desde el Mg al Cu, lo que significa una corriente eléctrica desde el Cu al Mg. El voltmetro se encarga de medir el paso de esta corriente.

El Mg se corroe pasando a hidróxido de magnesio según la reacción:



El Mg viene siendo el ánodo, que es donde se lleva a cabo la degradación del metal.

El Cu representa al cátodo, pues tiende a presentar menor energía libre de formación. Un principio general es que las transformaciones espontáneas lo hacen en sentido de disminuir la energía libre.



Ahora definiremos los procesos de las reacciones oxidoreducción:

- **REACCIÓN DE OXIDACIÓN.** La reacción de oxidación por la cual los metales forman iones que pasan a solución acuosa recibe el nombre de reacción anódica, y las regiones locales en la superficie de los metales donde la reacción de oxidación tiene lugar recibe el nombre de ánodos locales. En ésta se producen electrones, los cuales permanecen en el metal, y los átomos del metal forman cationes.
- **REACCIÓN DE REDUCCIÓN.** La reacción de reducción en la cual un metal o un no metal ve reducida su carga de valencia recibe el nombre de reacción catódica. Las regiones locales en la superficie del metal donde los iones metálicos ven reducida su carga de valencia reciben el nombre de cátodos locales. En la reacción catódica hay un consumo de electrones.

En la corrosión electroquímica se llevan a cabo ambas reacciones y deben de ocurrir al mismo tiempo y velocidad para evitar una concentración de carga eléctrica en el metal. [42]

2.3 ASPECTOS CINÉTICOS DE LA CORROSIÓN

2.3.1 POLARIZACIÓN

La polarización es la variación de potencial por el paso de una densidad de corriente (i).

Una curva de polarización es la representación del potencial (E) frente al logaritmo de la densidad de corriente ($\log(i)$).

La diferencia de potencial de polarización entre el ánodo y cátodo es la fuerza electromotriz (FEM) de la pila de corrosión.

La corriente en el potencial de corrosión (E_{corr}), se define como corriente de corrosión (I_{corr}) del sistema. [35]

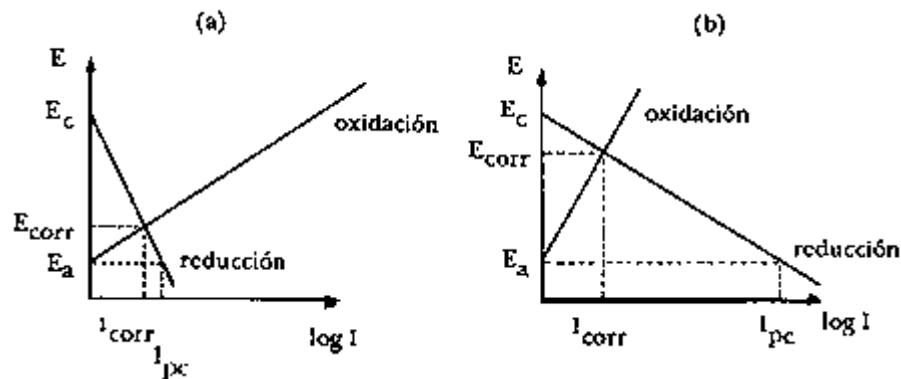


Figura 2.3 Representación de un diagrama de Evans.

En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de un diagrama de Evans el cual nos muestra donde se localizan los puntos E_{corr} , I_{corr} ; cual es la zona cátodica (reducción) y la anódica (oxidación). Los potenciales en circuito abierto (E_a y E_c) son los potenciales del ánodo y cátodo. El único flujo de corriente es la corriente de intercambio (i_0). La i_0

es la cantidad de cargas que llegan o abandonan la superficie del electrodo, cuando éste alcanza el equilibrio dinámico.

Polarización de resistencia: (η_{RE}) (V), también llamada polarización óhmica, se origina en cualquier caída óhmica (IR) en la inmediata vecindad del electrodo, por la formación de capas de precipitados sobre la superficie del electrodo, que impiden el paso de la corriente.

Polarización de activación: (η_{AC})(V) se relaciona con la energía de activación necesaria para que la reacción de electrodo se verifique a una velocidad dada y es el resultado de la barrera de energía en la interfase metal/electrólito. El fenómeno plantea una relación E vs i no lineal, de tipo semilogaritmico, E vs log(i), descrito por Tafel, en 1906, ec. 2.4:

$$\eta_{AC} = \pm \beta \log(i) \quad (2.4)$$

donde β es la pendiente de Tafel (mV) ($+\beta$ es la pendiente anódica y $-\beta$ es la pendiente cátodica), e i es la densidad de corriente (A/cm^2). La β es positiva cuando el sentido de la corriente es del electrodo al electrólito y la negativa cuando el sentido de la corriente es del electrólito al electrodo. El valor de la pendiente de Tafel depende de la reacción electroquímica, de la superficie del electrodo y del electrólito.

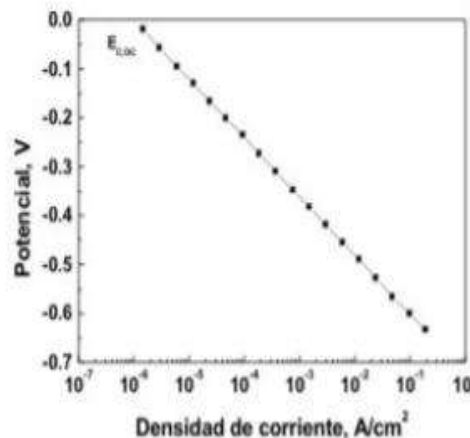


Figura 2. 4 Curva de polarización catódica con control de activación.

Polarización de concentración: (η_{co})(V) es la variación del potencial de un electrodo debido a cambios de concentración en la inmediata vecindad del electrodo,

motivados por el flujo de corriente. La variación del potencial, así originada, se deduce de la ecuación de Nernst, ec. 2.5:

$$\eta_{CO} = 2,303 \left(\frac{RT}{nF} \right) \log \left(\frac{C_i}{C_0} \right) \quad (2.5)$$

Donde R es la constante de los gases ideales (8,314 J/kmol), T es la temperatura absoluta (K), n es el número de electrones que intervienen en la reacción, F es la constante de Faraday (9,649 x 10⁴ C/mol), C_i y C₀ son las concentraciones efectivas de las especies que participan en la reacción en la inmediata vecindad del electrodo y del electrólito.

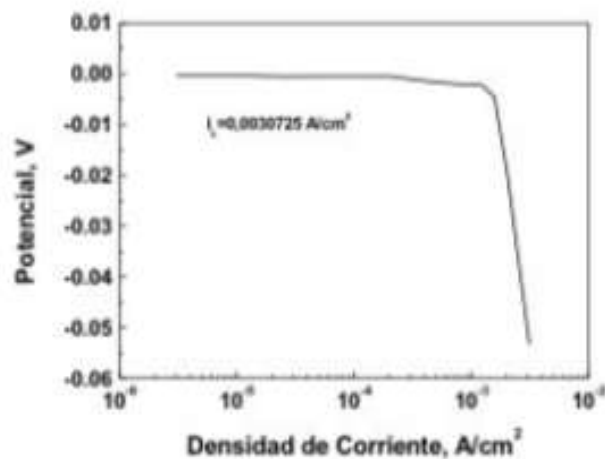


Figura 2.5 Curva de polarización catódica con control de concentración. [35]

2.3.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN MEDIANTE CORRIENTE CONTINUA.

La determinación de la velocidad de corrosión, como densidad de corriente de corrosión, se puede realizar de dos formas distintas:

1. Mediante el trazado de las curvas de polarización y definir la intersección, por extrapolación de las pendientes anódica y catódica, en la zona correspondiente a la polarización de activación (η_{AC}).

2. Mediante la medida de la pendiente de la curva de polarización en las proximidades del potencial de corrosión (E_{corr}), término conocido como resistencia de polarización lineal (R_p), definido por la ec. 2.6:

$$\frac{1}{R_p} = \left(\frac{di}{dE} \right)_{E \rightarrow 0} \quad (2.6)$$

La inversa de R_p (la conductancia) se puede utilizar directamente como parámetro estimativo de la densidad de corrosión o bien como medio para calcular el valor de i_{corr} a partir de la ec. 2.7:

$$i_{corr} = \left(\frac{di}{dE} \right)_{E \rightarrow 0} \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \quad (2.7)$$

Donde β_a y β_c son las pendientes anódica y catódica.

La ley de Faraday puede ser utilizada para calcular la velocidad de corrosión, ya sea en términos de penetración (CR) o la tasa de pérdida de masa (MR):

$$CR = K_1 \frac{i_{cor}}{\rho} EW \quad (2.8)$$

$$MR = K_2 i_{cor} EW \quad (2.9)$$

Donde:

K_1 , es 3.27×10^{-3} mm gr/ μ A cm yr

K_2 , es 8.954×10^{-3} gr cm²/ μ A m² d

EW, es el peso equivalente.

i_{cor} , es la densidad de corriente en μ A/ cm²

ρ , es la densidad de la muestra; gr/ cm³. [29]

CR, mm/yr y MR, gr/m² d

2.4.- LLUVIA ÁCIDA

2.4.1.- DEFINICIÓN

En regiones con aire limpio el agua de lluvia alcanza valores de pH de 5,6 unidades, es decir levemente ácida, debido a la formación de ácido carbónico (H_2CO_2) en el ambiente, un compuesto que resulta de la reacción del dióxido de carbono (CO_2), producido por las plantas y otros organismos, con la humedad (H_2O). En estas condiciones la acidez del agua de lluvia se considera natural y no daña al ambiente, incluso se considera indispensable para conservar el equilibrio ecológico

El concepto de lluvia ácida engloba cualquier forma de precipitación que presente elevadas concentraciones de ácido sulfúrico y nítrico. También puede mostrarse en forma de nieve, niebla y partículas de material seco que se posan sobre la Tierra.

La capa vegetal en descomposición y los volcanes en erupción liberan algunos químicos a la atmósfera que pueden originar lluvia ácida, pero la mayor parte de estas precipitaciones son el resultado de la acción humana. El mayor culpable de este fenómeno es la quema de combustibles fósiles procedentes de plantas de carbón generadoras de electricidad, las fábricas y los escapes de automóviles.

Cuando el ser humano quema combustibles fósiles, libera dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) a la atmósfera. Estos gases químicos reaccionan con el agua, el oxígeno y otras sustancias para formar soluciones diluidas de ácido nítrico y sulfúrico. Los vientos propagan estas soluciones ácidas en la atmósfera a través de cientos de kilómetros.

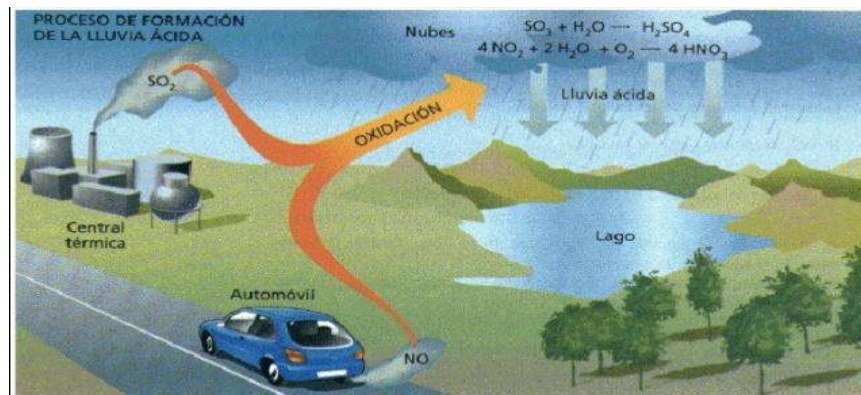


Figura 2.6 Imagen representativa de la formación de lluvia ácida.

2.4.2.- CONSECUENCIAS DE LA LLUVIA ÁCIDA

Son varias las consecuencias de la lluvia ácida, como son:

- Alteración del pH de los suelos, originando cambios en la composición de los mismos, produciéndose la lixiviación de importantes nutrientes para las plantas (como el calcio).
- Aumenta acidez en ríos y lagos, produciendo trastornos en la vida acuática. Algunas especies de plantas y animales logran adaptarse al cambio de acidez, pero otras no.
- La vegetación sufre no sólo las consecuencias del deterioro del suelo, sino también un daño directo por contacto que puede llegar a ocasionar en algunos casos la muerte de la especie.
- Los materiales metálicos se corroen a mayor velocidad, ocasionando daños en construcciones, tuberías, etc.

En este trabajo enfocaremos el estudio al daño ocasionado en los materiales metálicos, principalmente aceros microaleados. Ya que algunos de los usos de los aceros microaleados son la fabricación de tuberías para oleoductos, éstas se encuentran bajo tierra (suelo); al ser el suelo afectado por la lluvia ácida, cambia su pH, provocando la corrosión de dicha tubería.

CAPITULO III

DESARROLLO

El acero microaleado a trabajar, fue fabricado en el instituto de metalurgia de la UMSNH.

Se entregó en forma de lingotes de aproximadamente 10 x 20 x 3 cm, de uno de éstos se tomaron muestras para realizar este trabajo de tesis.

3.1.- ANÁLISIS QUÍMICO

Con la finalidad de realizar un análisis químico, la muestra se envió a la empresa “FUNDIDORA MORELIA”, donde por el método de espectrometría por emisión óptica, se obtuvo la composición del acero tipo HSLA.

3.2.- ANÁLISIS METALOGRAFICO

3.2.1.- CORTE DE LA PROBETA

Probeta: Es el nombre que se le da a la muestra tomada del acero microaleado a trabajar.

El corte es un proceso en el que se produce calor, por fricción, y se raya el metal. Si el corte es muy agresivo, no veremos el metal que queremos estudiar; por lo tanto, se debe cortar a bajas revoluciones y poca presión sobre la probeta.

La cortadora que se utilizó fue:

Struers, Discotom-60 con un disco de corte de alta calidad 40A25.

En la figura 3.1 se ve la foto de la cortadora utilizada.



Figura 3.1 Fotografía de la cortadora utilizada.

3.2.2.- DESBASTE DE LA PROBETA

El desbaste se refiere al hecho de eliminar las rayaduras que se produjeron durante el corte de la pieza, esto se hizo con papel lija de varias medidas de grano, empezando por la más áspera para terminar con la más fina.

Dependiendo de cómo quedó la probeta al momento del corte se escoge la primera lija a usar, ésta puede ser desde 80 (si tiene rayas muy profundas); si no es así se puede comenzar con una lija de 180.

El desbaste se realizó con una lija de 180, lo primero que se hace es observar las rayas de corte, ya que las del desbaste se comienza 90° a como se encuentran las rayas del corte. Esto es para que se pueda observar realmente que las líneas de han eliminado.

El desbaste se realiza con movimientos verticales (de arriba hacia abajo) como se muestra en la figura 3.2, con presión muy suave de la probeta, en una estructura poco inclinada y bajo agua; para no ser tan agresivos con el acero.



Figura 3.2 Desbaste de probetas.

3.2.3.- PULIDO

El pulido, es el paso de la metalografía en el que queremos eliminar por completo cualquier marca en la probeta, no debe de quedar ninguna línea, para que cuando la llevemos al microscopio no se confundan las líneas de corte con las líneas que delimitan los granos del acero.

Se realiza en una pulidora, con discos intercambiables, cada disco tiene paños especiales; los paños se eligen dependiendo el metal que estés trabajando. Éstos pueden ser con pelo (pana, terciopelo, lanas) y sin pelo (seda natural). Además de una pasta que ayuda a llegar al acabado espejo, esta pasta también depende del metal. Las pastas pueden ser polvo de diamante o alúmina.

Ya que se eligió el paño y la pasta, se procedió al pulido. Se pone muy poca pasta en el paño previamente humectado con alcohol. Se debe cuidar que la humedad del paño sea la adecuada, es decir, si la humedad es excesiva la acción abrasiva se retardará demasiado y si es escasa la probeta tiende a mancharse. El sentido en el que se colocó la probeta en el paño fue perpendicular a las líneas finales del desbaste. La probeta se debe sostener con mucho cuidado, no debe de estar muy presionada hacia el paño; apenas si la debe de tocar. La pasta que se utilizó fue la de diamante de 3 micras y fue un paño con pelo. La pulidora utilizada fue Mo Pao Grinder polisher modelo MOPA01000 que se muestra en la figura 3.3.



Figura 3.3 Pulidora utilizada para acabado espejo

3.2.4.- ATAQUE QUÍMICO

El ataque químico de la cara que se observará tiene por objetivo poner en evidencia, mediante un ataque selectivo, las características estructurales de la muestra. Al aplicar el reactivo sobre la superficie a observar, las características de la estructura son reveladas como consecuencia de un ataque selectivo de la superficie. Esto se debe a que las distintas fases así como los planos cristalográficos diferentemente orientados poseen diferencias en la susceptibilidad al ataque. En general aquellas regiones de la estructura donde la energía libre del sistema es mayor, como por ejemplo los límites de fases, bordes de grano, etc., son atacadas más rápidamente que las regiones monofásicas o íntergranulares.

Los reactivos de ataque por lo general son ácidos orgánicos disueltos en agua, alcohol, glicerina, etc. El grado de ataque de una probeta es función de la composición, temperatura y tiempo de ataque. Para que el ataque sea apropiado es necesario elegir el reactivo de acuerdo a la composición de la probeta.

Para las muestras de este proyecto, el reactivo adecuado es el nital al 2% (ácido nítrico con alcohol).

Antes de realizar el ataque se debe limpiar y desengrasar con alcohol la cara de la muestra a atacar y luego se debe secar con aire caliente. Los modos de ataque principalmente son dos: uno sumergiendo la probeta en el reactivo con la cara que se observará y el otro es mojando un algodón con el reactivo y frotar la cara de la probeta. Transcurrido el tiempo de ataque se debe tomar la probeta y lavar con agua o alcohol e inmediatamente se debe secar con aire caliente. En el caso que se lave con agua es conveniente enjuagar rápidamente la probeta con alcohol y luego secarla con aire, esto previene la formación de manchas de óxido. La muestra se debe manipular en todo momento con pinzas por dos razones fundamentales: para no tener inconvenientes con el reactivo y para no tocar la muestra con las manos ya que esto manchará la superficie de la misma.

El tiempo del ataque es muy corto, primero se realizó por 15 segundos y posteriormente se trasladó al microscopio para observar si ya se había realizado el

ataque, como aún no se revelaban los granos, se repitió el proceso por 10 segundos. Con esto fue suficiente para que ya se pudiera observar la estructura de la probeta.

3.2.5.- METALOGRAFÍA

El último paso de la metalografía es llevarlo al microscopio para poder observar la estructura de nuestro acero. El microscopio usado fue un Olympus modelo GX41F que se muestra en la figura 3.4.

El microscopio metalográfico se diferencia del ordinario, fundamentalmente, en su sistema de iluminación. La luz no puede atravesar el metal y por tanto la luz entra en el objetivo después de ser reflejada en la probeta metálica.

Los microscopios metalográficos suelen llevar un acoplador para montar una cámara fotográfica o de video ya que, para poder estudiar mejor la estructura del metal, se obtienen microfotografías.

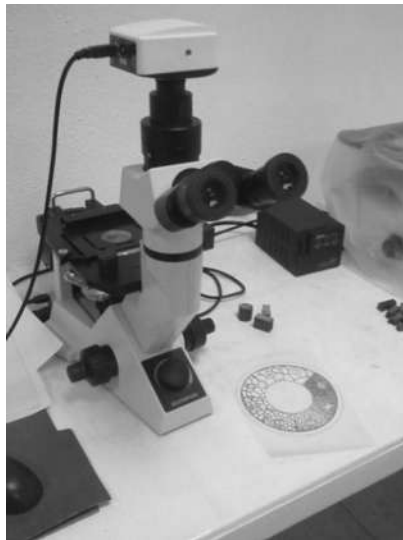


Figura 3.4 Microscopio óptico para metalografía.

3.3.- PRUEBAS DE CORROSIÓN

El tipo de corrosión a la que se sometió el acero HSLA, fue una corrosión electroquímica. Mediante pruebas electroquímicas de corriente directa como son; polarización potenciodinámica y resistencia a la polarización (LPR).

Estas pruebas se realizaron en un potencióstato controlado por una computadora, que es un instrumento electrónico que permite imponer a una muestra metálica colocada en un medio líquido y conductor, un potencial constante o variable, positivo o negativo, con respecto a un electrodo de referencia.

Las pruebas de polarización se llevan a cabo en una celda electroquímica, que consta de las siguientes partes, como se muestra en la figura 3.5:

- Electrodo de trabajo: Las reacciones electroquímicas suceden en este electrodo, se trata del material en estudio. Que en este caso sería el acero HSLA.
- Electrodo de referencia: Este electrodo se utiliza para la medición del potencial del electrodo de trabajo. Este tiene un potencial electroquímico constante. El electrodo de referencia no forma parte del circuito de electrólisis y, por el mismo no circula corriente alguna. Su presencia se debe exclusivamente a que sirve de referencia para poner a prueba en todo momento el potencial de la probeta metálica que se está ensayando. Se utilizó un electrodo de calomel saturado (SCE).
- Electrodo auxiliar: Este es un material conductor que completa el circuito y en general se trata de un material inerte como el grafito.
Para cerrar el circuito de electrólisis se utiliza un tercer electrodo, por lo general de un material inatacable por el medio en que se realiza el ensayo.

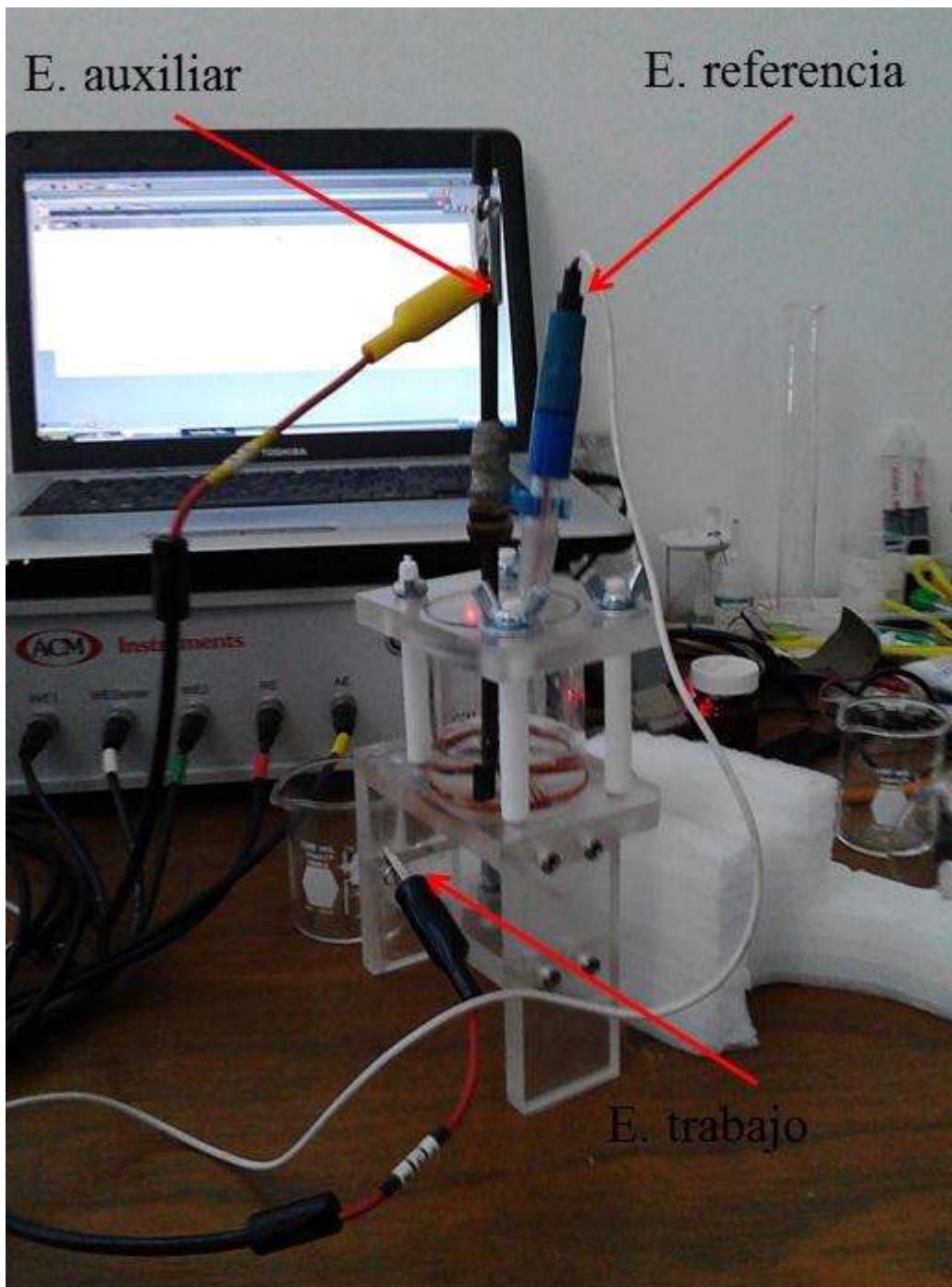


Figura 3.5 Esquema de la celda electroquímica

El electrolito utilizado fue la simulación de lluvia ácida, empezando con un pH de 2; después disminuyendo la acidez a un pH de 5. Finalizando con una solución de lluvia básica con pH de 8. En la tabla 3.1 se muestran las concentraciones de la solución simulada de lluvia ácida. Esta solución fue preparada con agua destilada y reactivos de grado analítico. Se agregaron 60 ml de solución electrolítica a la celda a temperatura ambiente.

COMPONENTE	CONCENTRACIÓN
ACIDO SULFURICO	0.06 ml/L
ACIDO NITRICO	0.02 ml/L
NITRATO DE SODIO	0.0265 g/L
SULFATO DE AMONIO	0.0462 g/L
SULFATO DE SODIO	0.0345 g/L
CLORURO DE SODIO	0.0875 g/L

TABLA 3.1 Concentraciones de la solución simulada de lluvia ácida. [9]

Las probetas que se utilizaron tienen una dimensión de aproximadamente 1.2 a 1.8 cm, con un espesor que va desde 5 a 6.5 mm.

3.3.1.- POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICA

La técnica de polarización se emplea para determinar las características activas/pasivas de un sistema, obtener el potencial de corrosión que indica tendencia termodinámica a producir el fenómeno de corrosión y, mediante la técnica de extrapolación de Tafel es posible obtener la corriente de corrosión, que es proporcional a la velocidad de corrosión.

Las pruebas se hicieron con un barrido de -500 mV hasta 1500 mV y la velocidad de escaneo de 1.0 mV/s. Con una medición a los 30 min, 12 y 24 horas de inmersión, previa estabilización de 15 a 20 min del equipo.

3.3.2.- RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN (LPR)

Polarización por resistencia lineal (LPR): es una técnica muy empleada, la resistencia a la polarización de un material es definida como la pendiente de la curva de potencial vs densidad de corriente en una zona cercana al potencial de corrosión (± 50 mV), esta pendiente está relacionada con la resistencia a la transferencia de carga.

Las pruebas se hicieron con un barrido de ± 15 mV a circuito abierto con una velocidad de escaneo de 1 mV/s cada 15 min durante 24 horas. Dejando estabilizar el potencióstato durante 15 min.

3.4.- MICROSCOPIA DE BARRIDO

El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscopy), utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra.

El microscopio electrónico de barrido está equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: el detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis semicuantitativo y de distribución de elementos en superficies.

La preparación de las muestras es relativamente sencilla las principales características son: muestra sólida, conductora. Caso contrario, la muestra es

recubierta con una capa de carbón o una capa delgada de un metal como el oro para darle propiedades conductoras a la muestra. De lo contrario, las muestras no conductoras se trabajan en bajo vacío.



Figura 3.6 Fotografía del microscopio electrónico de barrido utilizado

En la figura 3.6 se muestra la imagen del equipo SEM utilizado, este equipo se encuentra en la UNAM campus Morelia.

El equipo es marca JEOL, JSM-IT300LV. Con un sistema de microanálisis de energía dispersiva de rayos x marca OXFORD modelo 51XMX1181.

Como las muestras analizadas son conductores no fue necesario hacerles algún recubrimiento. Simplemente se pusieron en el porta muestras y se introducen al equipo.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1.- ANÁLISIS QUÍMICO

ELEMENTO	PORCENTAJE
CARBONO	0.052
SILICIO	0.051
MANGANESO	1.325
FOSFORO	0.011
AZUFRE	0.022
CROMO	0.675
MOLIBDENO	0.0077
NIQUEL	0.0050
COBRE	0.058
ALUMINIO	0.068
VANADIO	0.061
NITROGENO	0.016

Tabla 4.1 Resultado de análisis químico realizado

En la tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos del análisis químico realizado por los técnicos de “Fundidora Morelia”.

4.2.- METALOGRAFIA

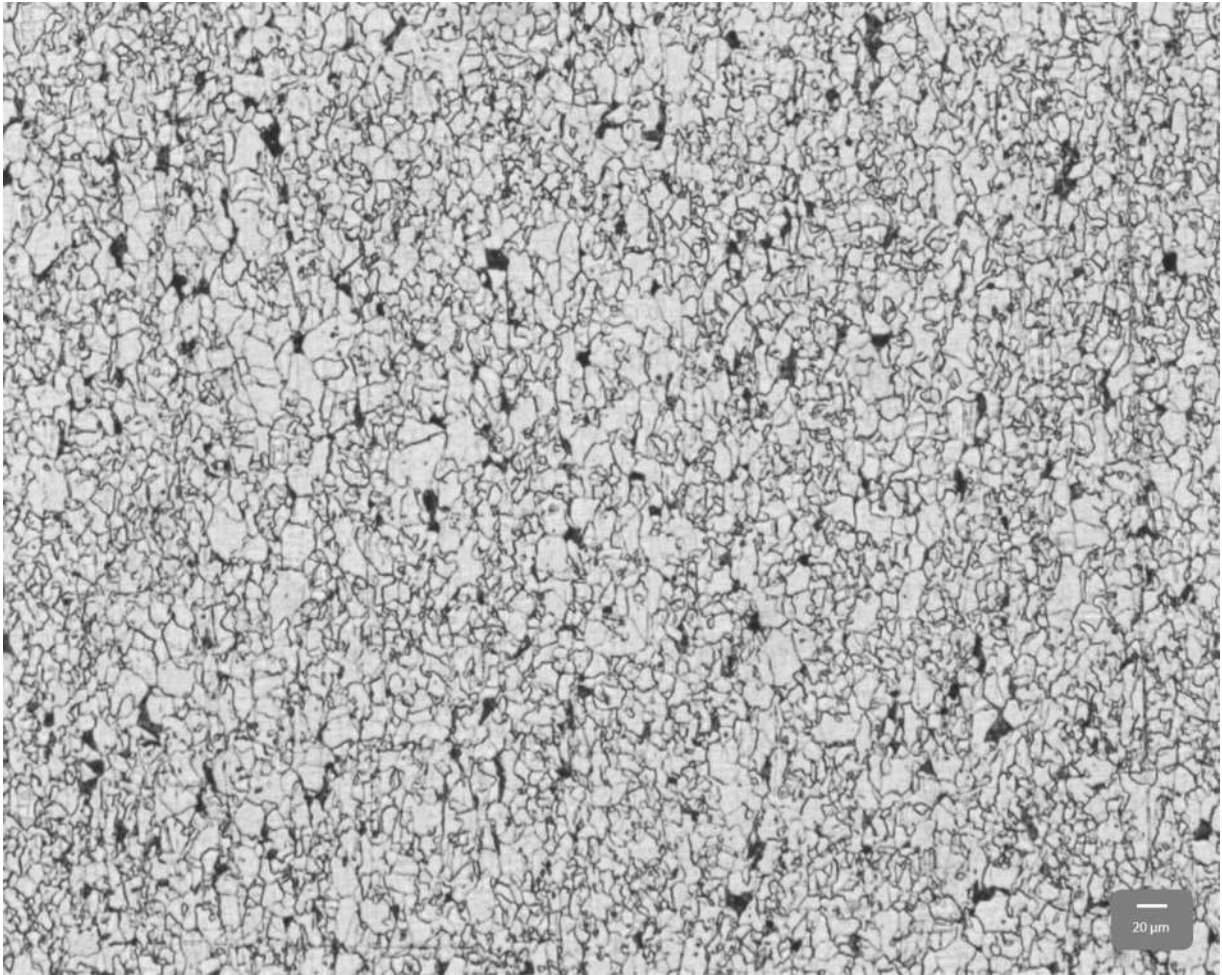


Figura 4.1 Metalografía del acero a 100x y con escala

Figura 4.2 Metalografía a 200x con escala.

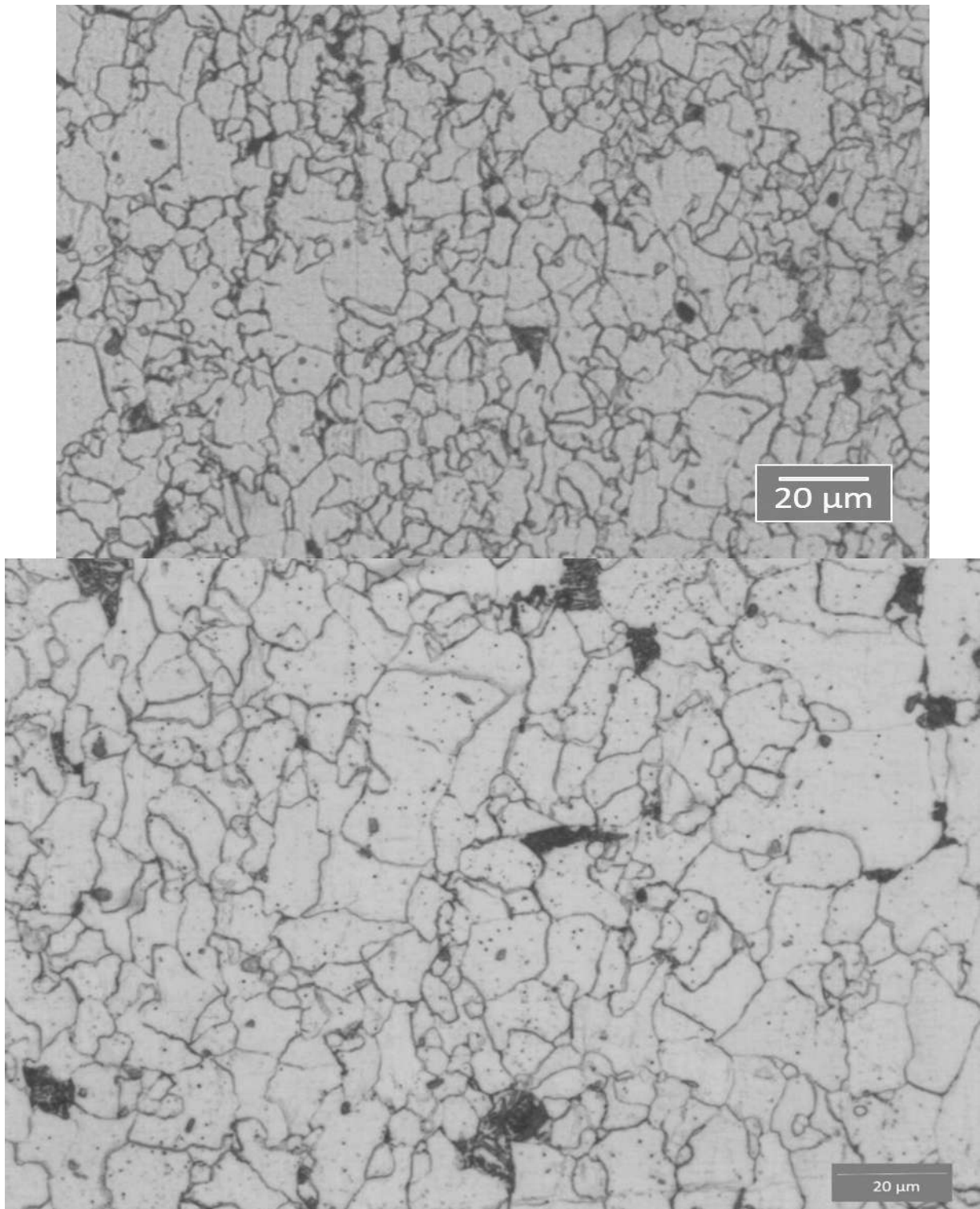


Figura 4.3 Metalografía a 500x y con escala.

En las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se muestran las metalografías del acero microaleado trabajado, visto en 100x, 200x y 500x; se puede apreciar el tamaño de grano el cual

presenta valores aproximados de 5µm, 10µm o hasta pasan los 20µm (en el caso de la ferrita) y para la perlita si acaso llegan a los 5µm. Otras de las cosas que podemos apreciar es que hay más ferrita (granos claros) que perlita (granos oscuros).

4.3.- PRUEBAS DE CORROSIÓN

4.3.1 VELOCIDAD DE CORROSIÓN

ELEMENTO	% MASA (fi)	VALENCIA (ni)	PM	Q ((fi*ni)/PM)	DENSIDAD (kg/m³)	DENSIDAD M
C	0.0520	4	12	0.017333	2260	117.52
Si	0.0510	4	28.1	0.007260	2330	118.83
Mn	1.3250	2	54.94	0.048234	7470	9897.75
P	0.0110	3	30.97	0.001066	1823	20.053
S	0.0220	2	32.06	0.001372	1960	43.12
Cr	0.6750	3	51.99	0.038950	7140	4819.5
Mo	0.0077	4	95.95	0.000321	10280	79.156
Ni	0.0050	2	58.69	0.000170	8908	44.54
Cu	0.0580	2	63.54	0.001826	8920	517.36
Al	0.0680	3	26.98	0.007561	2700	183.6
V	0.0610	5	50.94	0.005987	6110	372.71
N	0.0160	3	14	0.003429	1.251	0.020016
Fe	97.6483	2	55.84	3.497432	7874	768882.7142
			SUMA	3.630941	SUMA	785096.8732
			PESO EQ.	27.541067	DM (g/cm³)	7.850968732

TABLA 4.2 Cálculo del peso equivalente y densidad de la muestra

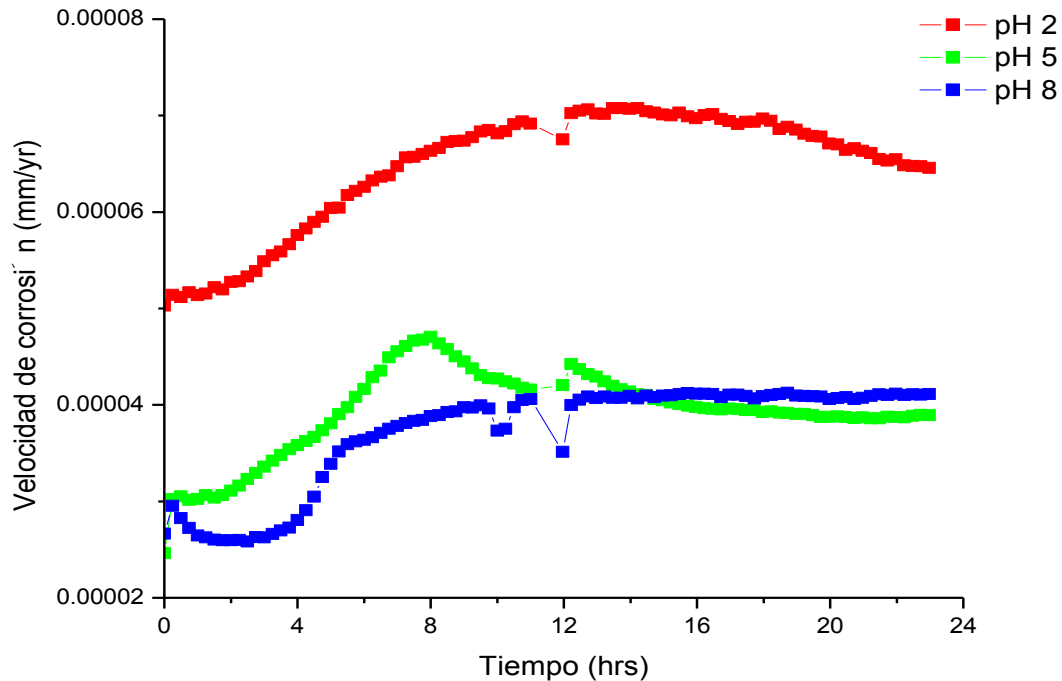
La tabla 4.2 nos ayuda para saber cuál es el valor del peso equivalente y la densidad de nuestra muestra, ya que estos datos los tenemos que saber para poder hacer el cálculo de nuestra velocidad de corrosión.

pH 2							
TIEMPO (hrs)	LPR(ohm/cm ²)	B	i _{cor} (B/LRP)	K	DENSIDAD	P. EQ	Vc (K*(i _{cor} /D)*P.EQ)
0.0000	4773.3	20.93	0.0044	3.27E-03	7.8509	27.54	5.02876E-05
0.2501	4668.6	20.93	0.0045	3.27E-03	7.8509	27.54	5.14154E-05
0.5002	4689.1	20.93	0.0045	3.27E-03	7.8509	27.54	5.11906E-05
0.7502	4645	20.93	0.0045	3.27E-03	7.8509	27.54	5.16766E-05
1.0003	4672.9	20.93	0.0045	3.27E-03	7.8509	27.54	5.13681E-05
1.2504	4656.1	20.93	0.0045	3.27E-03	7.8509	27.54	5.15534E-05
1.5005	4599.3	20.93	0.0045	3.27E-03	7.8509	27.54	5.21901E-05
1.7505	4617.8	20.93	0.0045	3.27E-03	7.8509	27.54	5.1981E-05
2.0006	4550.3	20.93	0.0046	3.27E-03	7.8509	27.54	5.27521E-05
2.2506	4544.4	20.93	0.0046	3.27E-03	7.8509	27.54	5.28206E-05
2.5006	4501.7	20.93	0.0046	3.27E-03	7.8509	27.54	5.33216E-05
2.7506	4455.5	20.93	0.0047	3.27E-03	7.8509	27.54	5.38745E-05
3.0006	4374.5	20.93	0.0048	3.27E-03	7.8509	27.54	5.48721E-05
3.2506	4325.3	20.93	0.0048	3.27E-03	7.8509	27.54	5.54963E-05
3.5008	4293.3	20.93	0.0049	3.27E-03	7.8509	27.54	5.59099E-05
3.7508	4237.6	20.93	0.0049	3.27E-03	7.8509	27.54	5.66448E-05
4.0008	4168	20.93	0.0050	3.27E-03	7.8509	27.54	5.75907E-05
4.2508	4119	20.93	0.0051	3.27E-03	7.8509	27.54	5.82758E-05
4.5011	4070.2	20.93	0.0051	3.27E-03	7.8509	27.54	5.89745E-05
4.7511	4034.5	20.93	0.0052	3.27E-03	7.8509	27.54	5.94963E-05
5.0011	3973.9	20.93	0.0053	3.27E-03	7.8509	27.54	6.04036E-05
5.2511	3970	20.93	0.0053	3.27E-03	7.8509	27.54	6.0463E-05
5.5011	3887.3	20.93	0.0054	3.27E-03	7.8509	27.54	6.17493E-05
5.7511	3860	20.93	0.0054	3.27E-03	7.8509	27.54	6.2186E-05
6.0011	3833.2	20.93	0.0055	3.27E-03	7.8509	27.54	6.26208E-05
6.2514	3794.4	20.93	0.0055	3.27E-03	7.8509	27.54	6.32611E-05
6.5014	3770	20.93	0.0056	3.27E-03	7.8509	27.54	6.36706E-05
6.7514	3763.1	20.93	0.0056	3.27E-03	7.8509	27.54	6.37873E-05
7.0014	3707.9	20.93	0.0056	3.27E-03	7.8509	27.54	6.47369E-05
7.2514	3655.5	20.93	0.0057	3.27E-03	7.8509	27.54	6.56649E-05
7.5014	3651.9	20.93	0.0057	3.27E-03	7.8509	27.54	6.57296E-05
7.7514	3636.8	20.93	0.0058	3.27E-03	7.8509	27.54	6.60025E-05
8.0017	3617.8	20.93	0.0058	3.27E-03	7.8509	27.54	6.63492E-05
8.2517	3601.5	20.93	0.0058	3.27E-03	7.8509	27.54	6.66494E-05
8.5017	3568.3	20.93	0.0059	3.27E-03	7.8509	27.54	6.72696E-05
8.7517	3563.4	20.93	0.0059	3.27E-03	7.8509	27.54	6.73621E-05
9.0017	3561.4	20.93	0.0059	3.27E-03	7.8509	27.54	6.73999E-05
9.2519	3543.3	20.93	0.0059	3.27E-03	7.8509	27.54	6.77442E-05
9.5019	3513.1	20.93	0.0060	3.27E-03	7.8509	27.54	6.83265E-05
9.7519	3504.8	20.93	0.0060	3.27E-03	7.8509	27.54	6.84884E-05
10.0019	3521.7	20.93	0.0059	3.27E-03	7.8509	27.54	6.81597E-05
10.2519	3510.3	20.93	0.0060	3.27E-03	7.8509	27.54	6.8381E-05
10.5019	3474.4	20.93	0.0060	3.27E-03	7.8509	27.54	6.90876E-05
10.7522	3458.6	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	6.94032E-05
11.0022	3471.5	20.93	0.0060	3.27E-03	7.8509	27.54	6.91453E-05
11.9706	3554.7	20.93	0.0059	3.27E-03	7.8509	27.54	6.75269E-05
12.2206	3416.6	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	7.02564E-05
12.4706	3404.9	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	7.04978E-05
12.7206	3398	20.93	0.0062	3.27E-03	7.8509	27.54	7.0641E-05
12.9706	3419.7	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	7.01927E-05
13.2206	3420.4	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	7.01783E-05
13.4706	3392.4	20.93	0.0062	3.27E-03	7.8509	27.54	7.07576E-05
13.7208	3392.4	20.93	0.0062	3.27E-03	7.8509	27.54	7.07576E-05
13.9708	3395	20.93	0.0062	3.27E-03	7.8509	27.54	7.07034E-05
14.2208	3392.4	20.93	0.0062	3.27E-03	7.8509	27.54	7.07576E-05
14.4708	3407.9	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	7.04357E-05
14.7208	3414.6	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	7.02975E-05
14.9708	3423.9	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	7.01066E-05
15.2208	3429.2	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	6.99982E-05
15.4711	3414.3	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	7.03037E-05
15.7211	3433.8	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	6.99045E-05

15.9711	3442.3	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	6.97319E-05
16.2211	3427.1	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	7.00411E-05
16.4711	3422.7	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	7.01312E-05
16.7214	3446.1	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	6.9655E-05
16.9714	3457.5	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	6.94253E-05
17.2214	3473.1	20.93	0.0060	3.27E-03	7.8509	27.54	6.91135E-05
17.4714	3461.7	20.93	0.0060	3.27E-03	7.8509	27.54	6.93411E-05
17.7214	3461.4	20.93	0.0060	3.27E-03	7.8509	27.54	6.93471E-05
17.9714	3444.6	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	6.96853E-05
18.2214	3456	20.93	0.0061	3.27E-03	7.8509	27.54	6.94554E-05
18.4717	3498.6	20.93	0.0060	3.27E-03	7.8509	27.54	6.86097E-05
18.7217	3487.9	20.93	0.0060	3.27E-03	7.8509	27.54	6.88202E-05
18.9717	3502.2	20.93	0.0060	3.27E-03	7.8509	27.54	6.85392E-05
19.2217	3524.9	20.93	0.0059	3.27E-03	7.8509	27.54	6.80978E-05
19.4719	3535.7	20.93	0.0059	3.27E-03	7.8509	27.54	6.78898E-05
19.7219	3538.9	20.93	0.0059	3.27E-03	7.8509	27.54	6.78284E-05
19.9719	3577.2	20.93	0.0058	3.27E-03	7.8509	27.54	6.71022E-05
20.2219	3582.1	20.93	0.0058	3.27E-03	7.8509	27.54	6.70104E-05
20.4719	3612.3	20.93	0.0058	3.27E-03	7.8509	27.54	6.64502E-05
20.7219	3603.7	20.93	0.0058	3.27E-03	7.8509	27.54	6.66088E-05
20.9722	3617.8	20.93	0.0058	3.27E-03	7.8509	27.54	6.63492E-05
21.2222	3630.5	20.93	0.0058	3.27E-03	7.8509	27.54	6.61171E-05
21.4722	3665.2	20.93	0.0057	3.27E-03	7.8509	27.54	6.54911E-05
21.7222	3674.7	20.93	0.0057	3.27E-03	7.8509	27.54	6.53218E-05
21.9722	3667.9	20.93	0.0057	3.27E-03	7.8509	27.54	6.54429E-05
22.2222	3701.3	20.93	0.0057	3.27E-03	7.8509	27.54	6.48523E-05
22.4725	3705.2	20.93	0.0056	3.27E-03	7.8509	27.54	6.47841E-05
22.7225	3707	20.93	0.0056	3.27E-03	7.8509	27.54	6.47526E-05
22.9728	3718	20.93	0.0056	3.27E-03	7.8509	27.54	6.4561E-05

Tabla 4.3 Ejemplo del cálculo de la velocidad de corrosión

De acuerdo a la norma ASTM-G102 se hizo el cálculo de la velocidad de corrosión, tanto la tabla 4.2 y 4.3 siguen la norma. En la tabla 4.3 se puede observar la aplicación de las ecuaciones que están involucradas, se hizo en Excel para facilitar los cálculos. Esta tabla solo indica los cálculos de las pruebas con un pH 2, para cada prueba es una tabla similar. Posterior a la obtención de las velocidades de corrosión, se hace una gráfica que compara la velocidad de corrosión contra el tiempo (las 24 hrs que duró la prueba). Es la gráfica 4.1

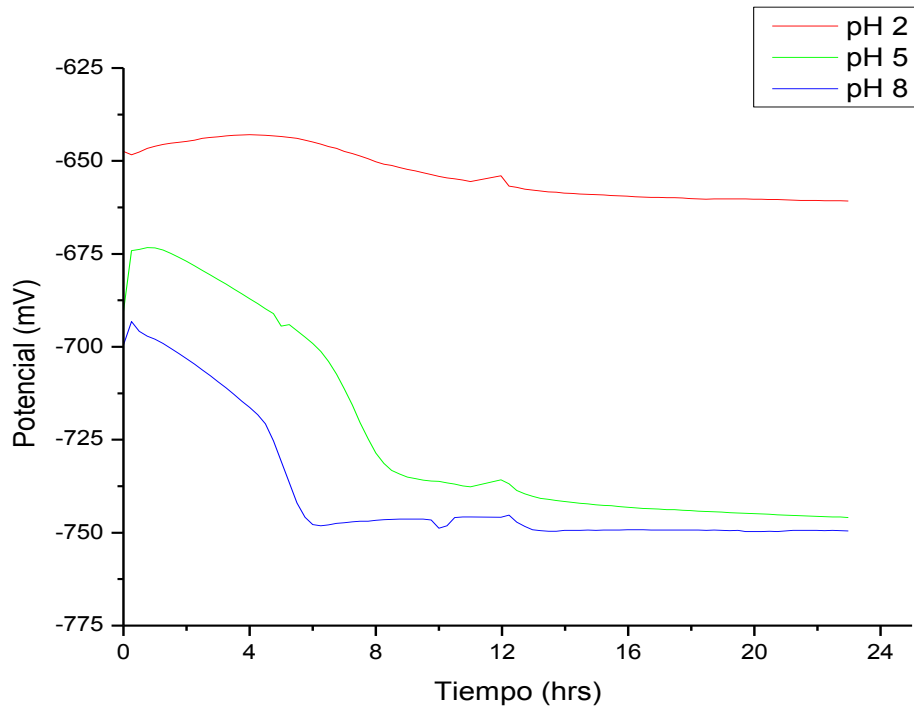


Gráfica 4.1 Velocidad de corrosión vs Tiempo

En esta gráfica podemos comparar el comportamiento de las velocidades de corrosión a los 3 pHs analizados, el pH 2 se muestra con velocidades más altas que sus contrapartes; lo cual nos dice que el material se está degradando más rápido con la solución de pH 2.

Otra de las cosas que podemos observar es que el material después de las 12 hrs de exposición con la solución pH 2 empieza a disminuir. El comportamiento de la curva pH 5 va en aumento muy notorio hasta un tiempo aproximado de 8 hrs, esto puede decirnos que el material está muy expuesto, después de ese tiempo disminuye en picada; la velocidad sigue disminuyendo conforme pasa el tiempo pero sigue un comportamiento constante. La curva pH 8 al principio su velocidad disminuye, un par de hrs después va en aumento significativo; hasta que pasa las 12 hrs tiene un comportamiento constante pero sigue en aumento.

A un tiempo de 12 hrs se aprecia un pequeño brinco en las tres líneas, esto es por una falla del equipo.



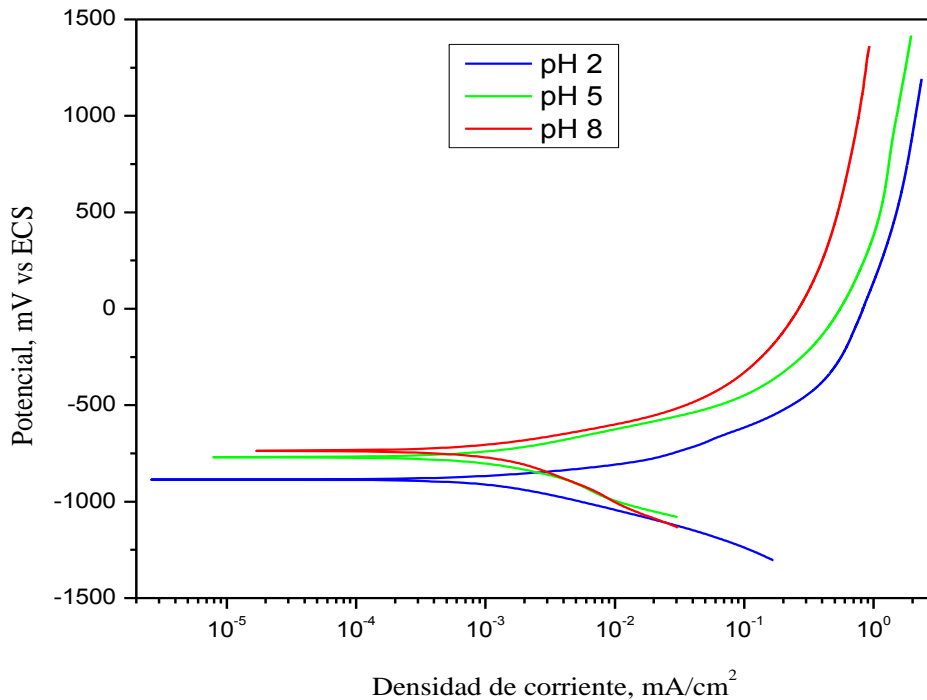
Gráfica 4.2 Potencial vs Tiempo

En la gráfica 4.2 se ve la diferencia del comportamiento de los potenciales obtenidos en las pruebas de corrosión con las tres soluciones contra tiempo.

El comportamiento de los potenciales respecto al tiempo de las soluciones con pH 5 y pH 8 son similares, en las primeras horas el potencial disminuye en picada, después se mantiene un poco más constante. Aunque el de pH 5 sigue disminuyendo y el de pH 8 va aumentando.

En cambio con pH 2 primero se aumenta el potencial, pero después de las 6 hrs empieza a disminuir y así continúa; esto indica que está pasando de un potencial activo a uno menos activo.

El comportamiento de la gráfica 4.2 se puede relacionar con las figuras 4.4, 4.5 y 4.6; observando que para un pH 2 obtiene un potencial más activo en la gráfica por lo tanto se presenta una corrosión más localizada en sitios preferenciales. Con pH 5 y pH 8 se observa una disolución general al igual que en la gráfica el comportamiento es muy similar para estos pHs.



Gráfica 4.3 Potencial vs Densidad de corriente (curva de polarización)

La gráfica 4.3 es la representación del comportamiento del potencial contra la densidad de corriente de las tres muestras analizadas, es una gráfica semilogarítmica.

Lo que se puede observar en esta gráfica es que para pH 2 se lleva a cabo una polarización por activación, como normalmente pasa en la corrosión con ácidos fuertes. Mientras que en las otras dos se da una polarización mixta, se observa que la curva sigue una tendencia de polarización por concentración pero casi al final cambia a polarización por activación. Todo esto es en las curvas catódicas.

Lo que se puede ver en las curvas de polarización anódica es que en las 3 se lleva a cabo una disolución general del material, aunque en la muestra sometida a la solución con un pH 2 se encuentran algunas picaduras, como se muestra en la imagen de la figura 4.4.

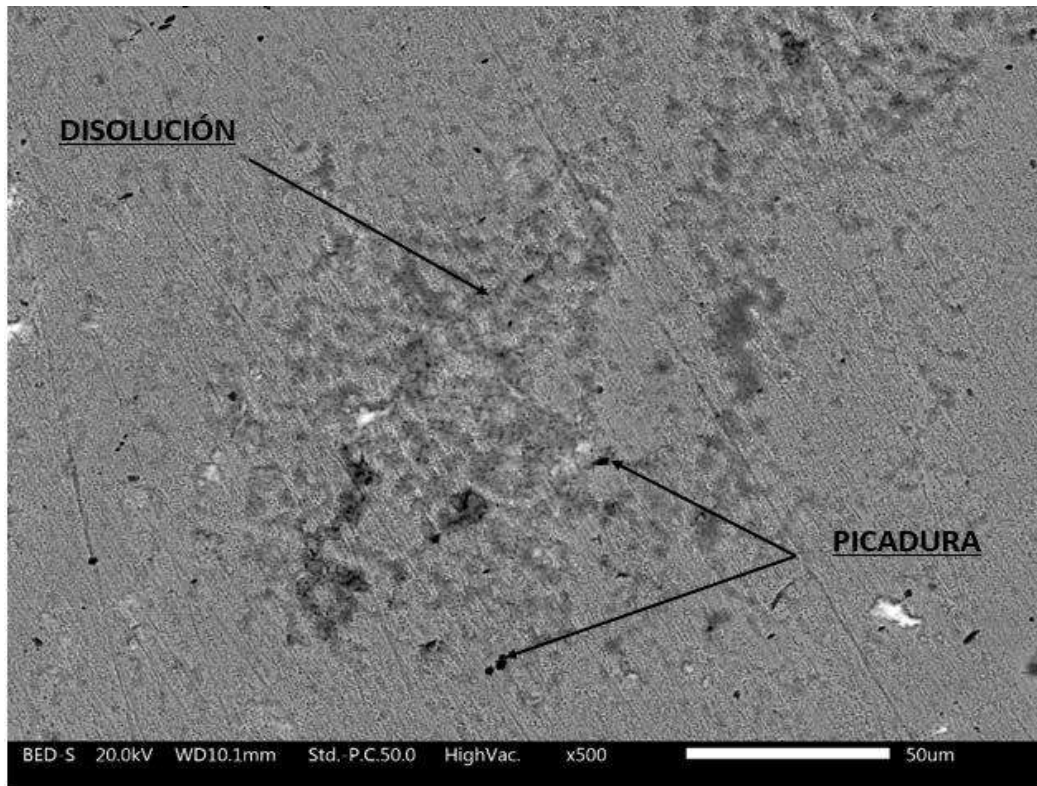


Figura 4.4 Imagen a 500x de la muestra corroída por la solución a pH 2

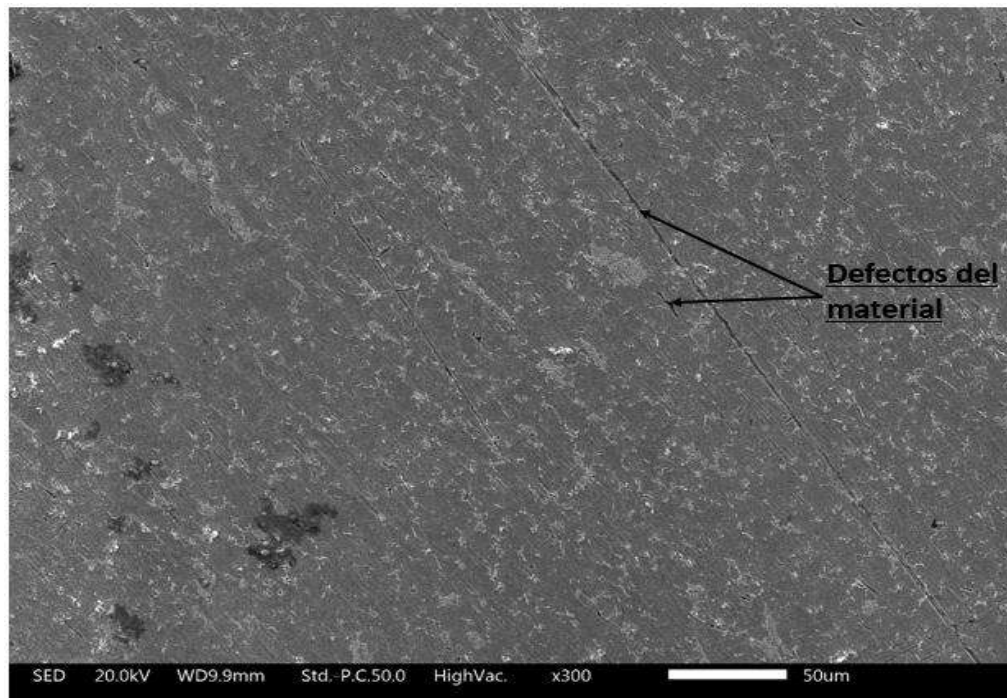


Figura 4.5 Imagen a 300x de la muestra corroída por la solución a pH 5

En la imagen 4.5 en comparación con la 4.4 muestra una disolución en toda el área analizada, es una disolución del material más uniforme y no se encuentran picaduras. También en ésta empiezan a formarse productos como lo son los óxidos (gracias a los mapeos de las pruebas de barrido que se realizaron se llegó a la conclusión de que los productos formados son óxidos).

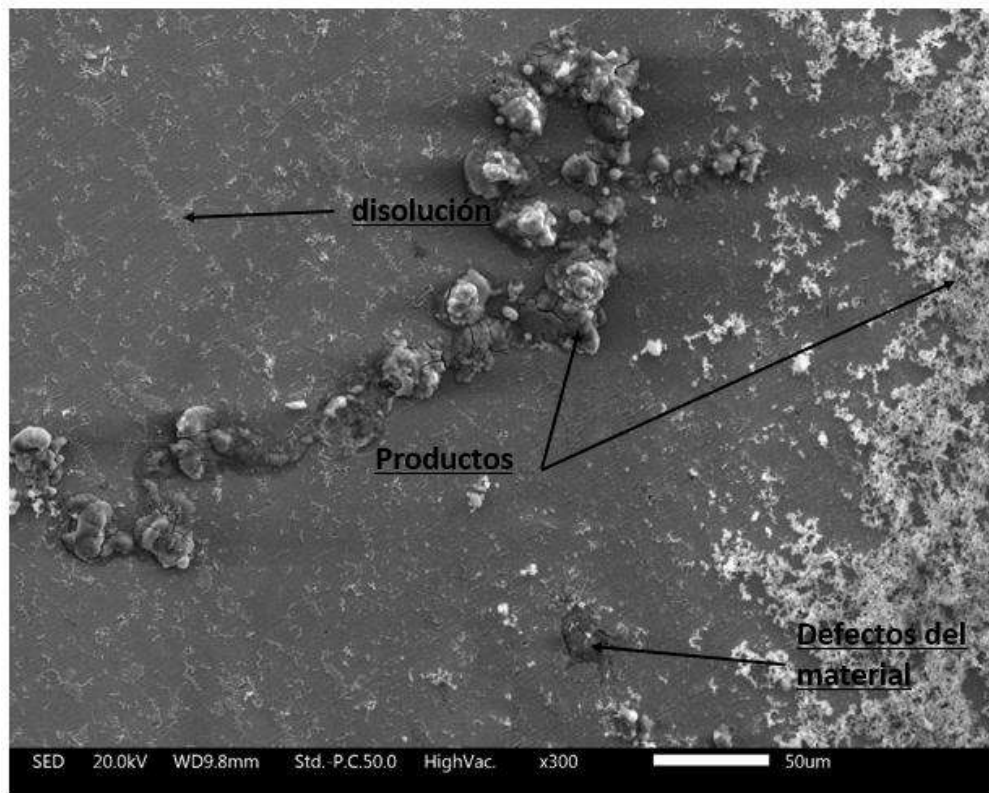


Figura 4.6 Imagen a 300x de la muestra corroída por la solución a pH 8

En la figura 4.6 observamos que también hay disolución general del material, además se presentó mayor formación de productos que en las otras 2 muestras. Los productos de corrosión en algunos casos sirven como protección del material, pero en este caso no están ayudando a tal fin ya que de acuerdo a la gráfica 4.1 la velocidad de corrosión sigue en aumento.

4.4.- MICROSCOPIA DE BARRIDO

MUESTRA 1 (pH = 2)

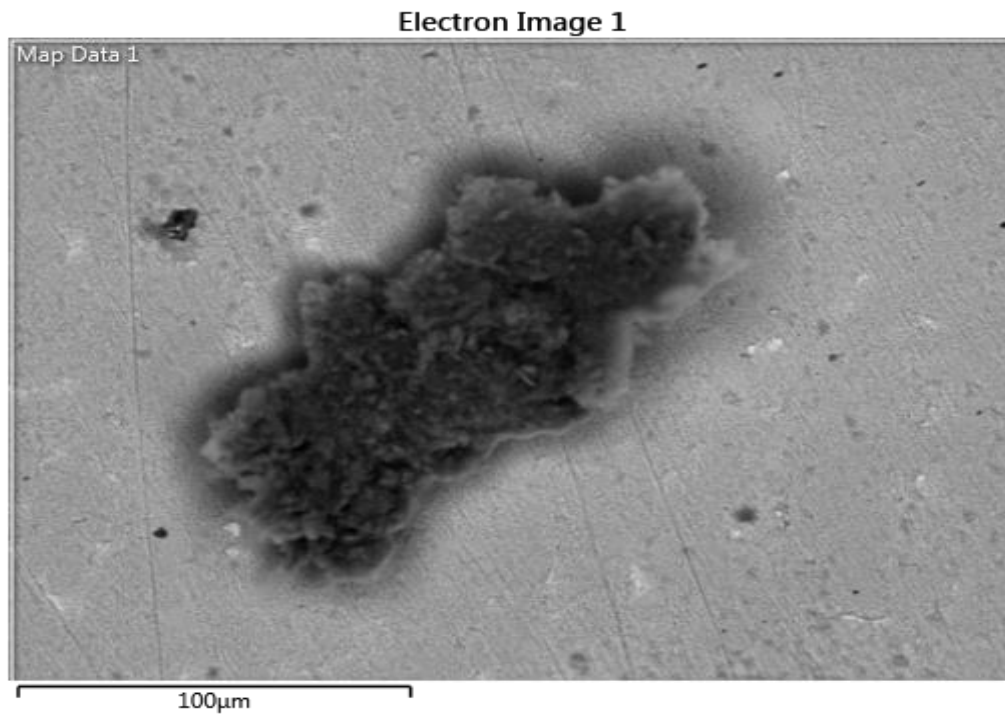


Figura 4.7 Foto zona 1 de productos de corrosión del acero microaleado sometido a una solución de pH 2.

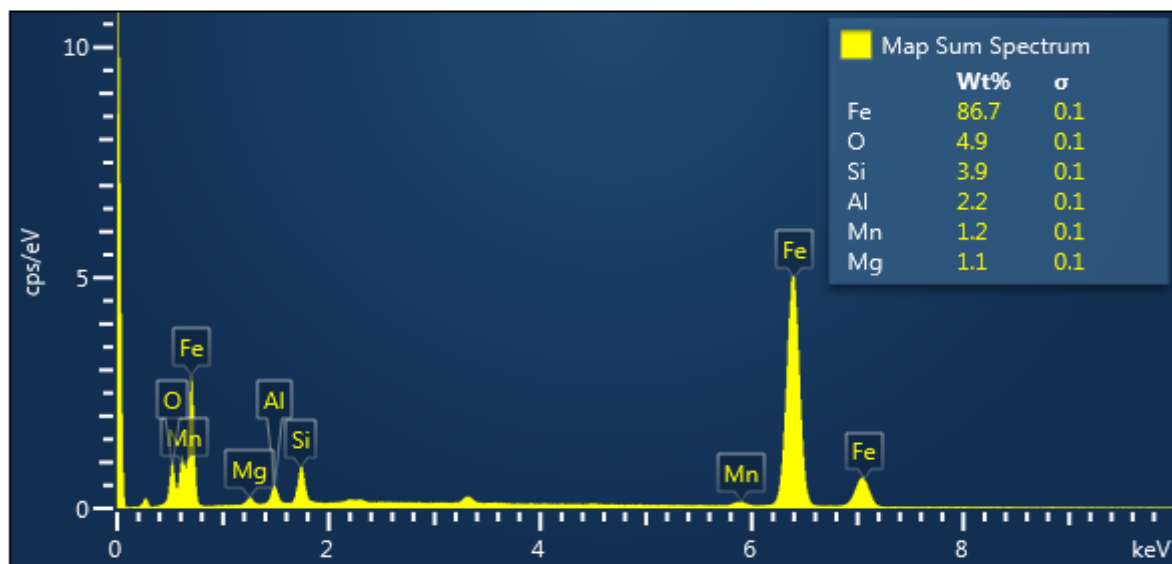


Figura 4.8 Resultados de análisis químico de la figura 4.7

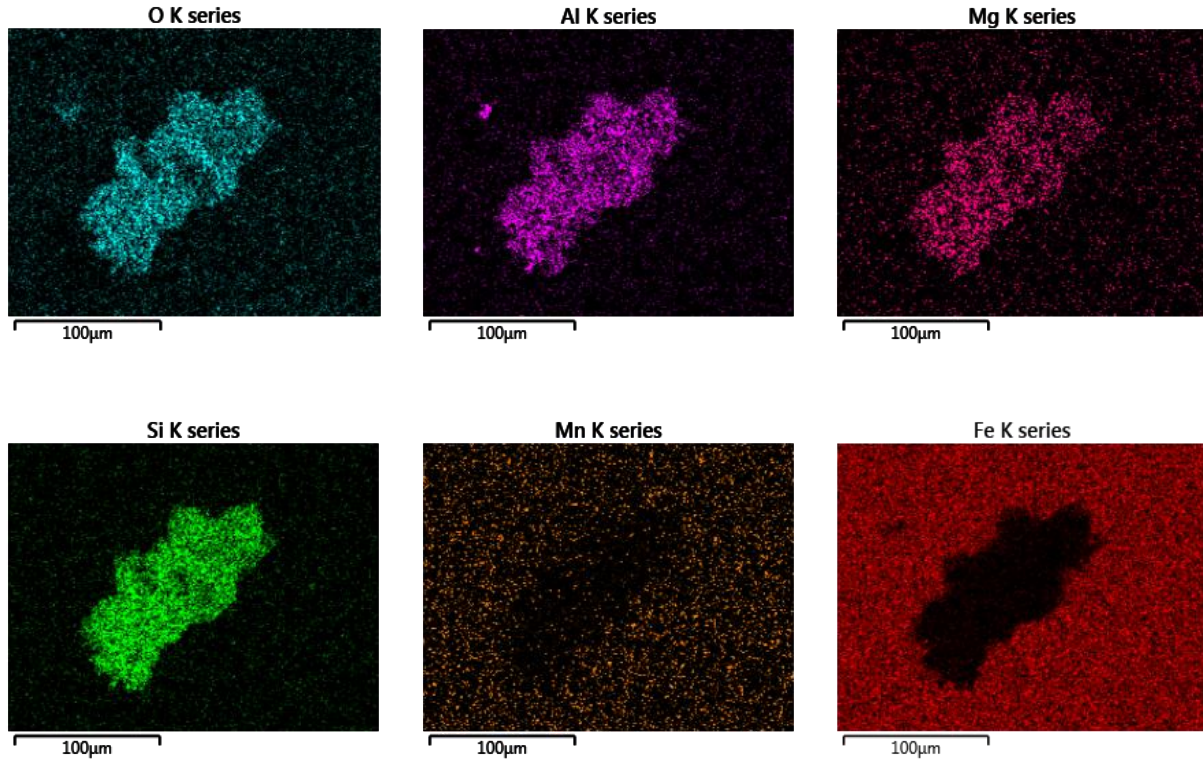


Figura 4.9 Mapeo zona 1 de la muestra 1

En las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de barrido de la muestra 1 (pH 2) zona 1; el cual nos indica que los elementos que participan en esa zona son O, Si, Al, Mn, Mg y Fe. Los productos probables formados por la corrosión se muestran en el mapeo, figura 4.9; éstos son: Al_2O_3 , SiO_2 , Mn y Fe.

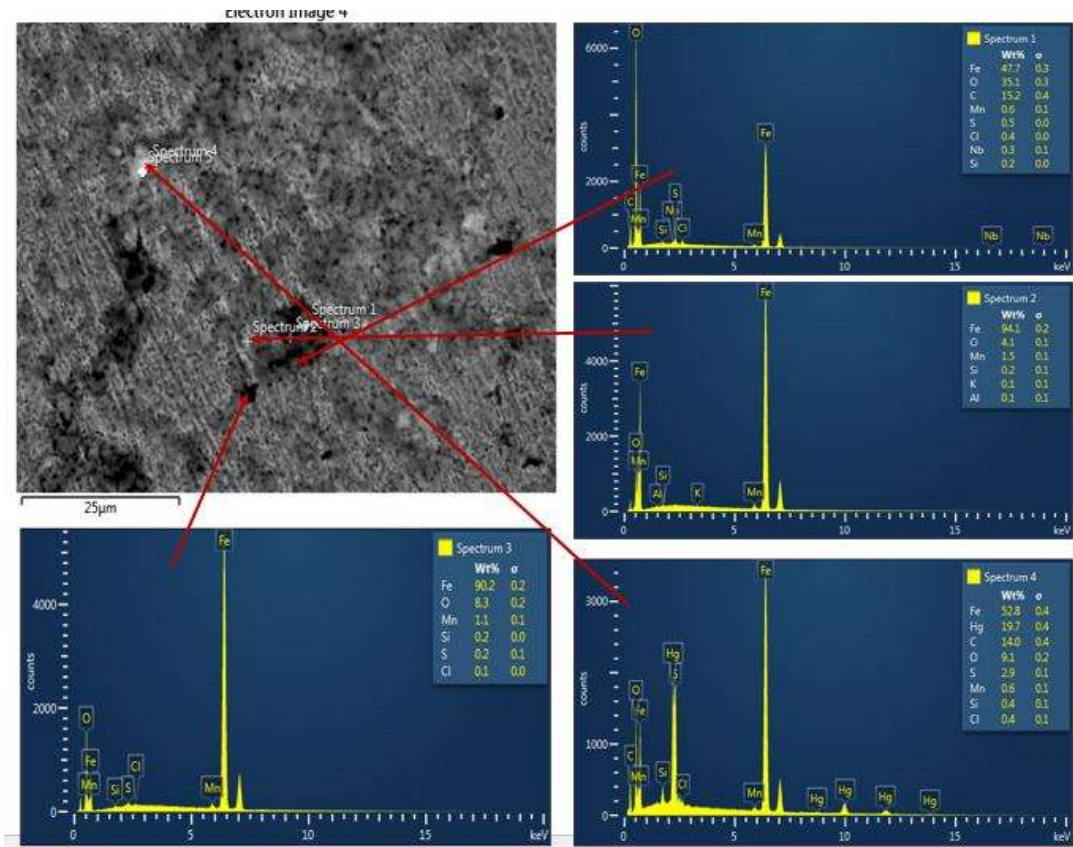


Figura 4.10 Resultados de un EDS puntual de la muestra 1 zona 2

En ésta figura se ven los resultados obtenidos de un EDS puntual de la muestra 1 (pH 2) zona 2; el cual nos muestra el análisis elemental de cada punto analizado. Para cada espectro hay una gráfica con la cantidad de cada elemento analizado; existen elementos en la tabla que no concuerdan con el contenido inicial de la muestra, estos elementos pueden indicar que la muestra se contaminó o mostrarse debido a fluorescencia. Esta zona se observan las picaduras, que son el espectro 3, aunque el espectro 1 y 2 también son parte del área de la picadura (degradación del material).

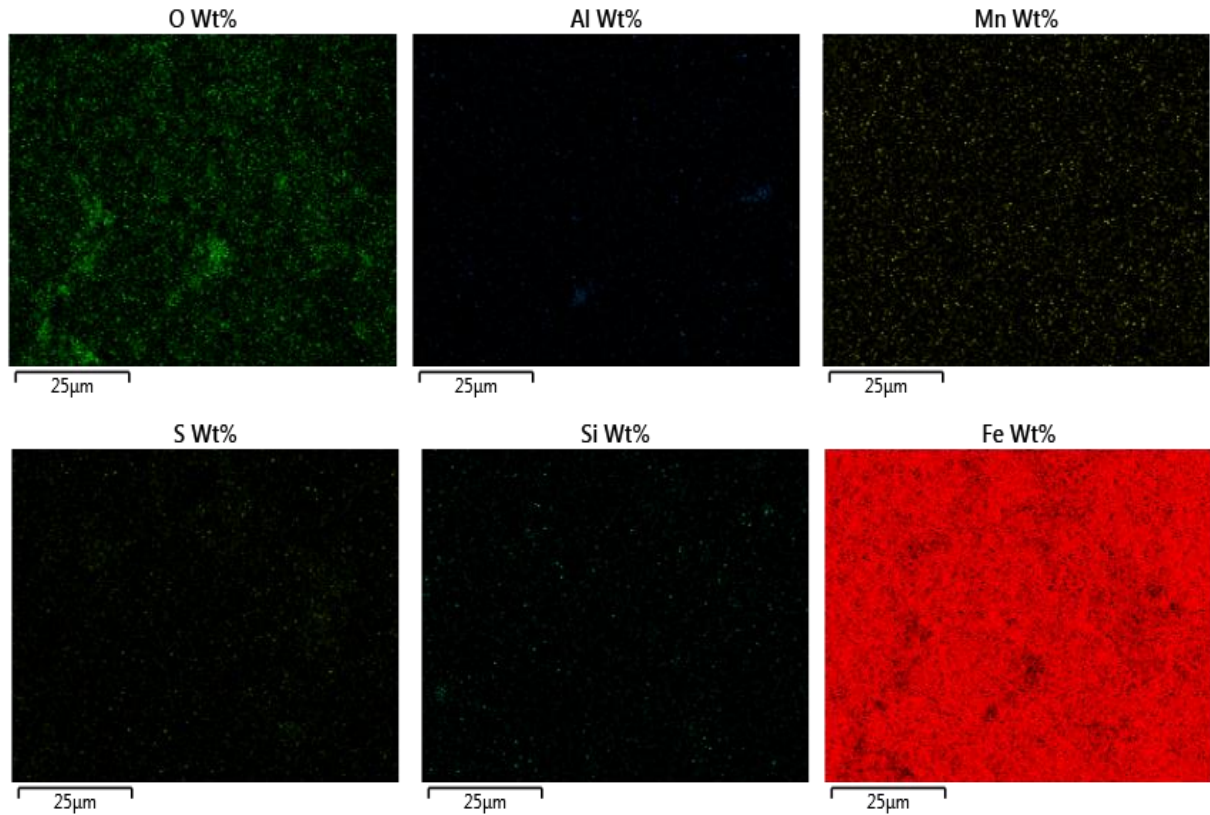


Figura 4.11 Mapeo de la muestra 1 zona 2

En la figura 4.11 podemos observar los resultados del mapeo de la muestra 1 zona 2, esta imagen nos muestra los posibles productos de corrosión, los cuales serían, Al_2O_3 y SiO_2 . Los demás elementos están presentes sin reaccionar, son parte del material base.

MUESTRA 2 (Ph= 5)

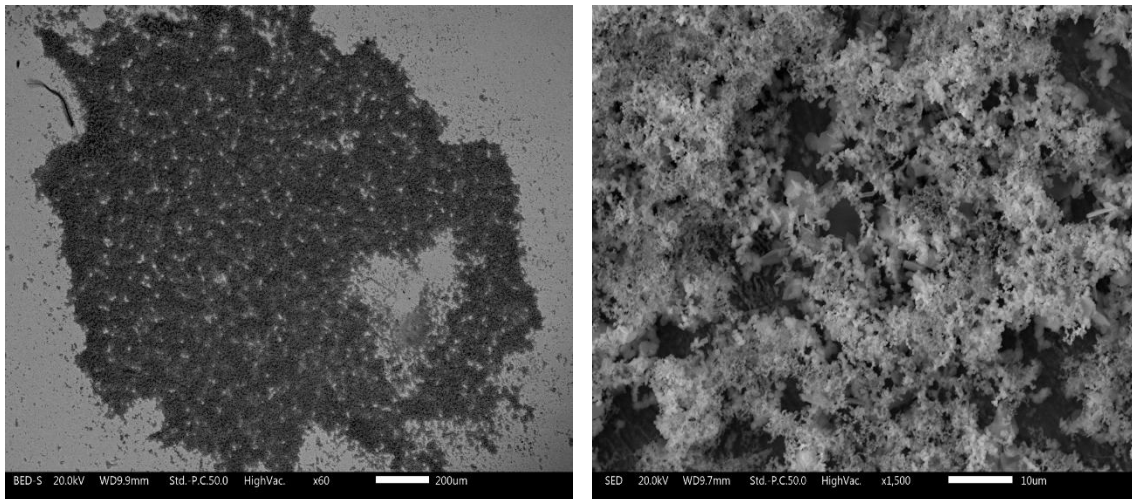


Figura 4.12 Foto de los productos de corrosión de la muestra 2 (pH 5), visto desde 60x (lado izquierdo) hasta 1500x (lado derecho)

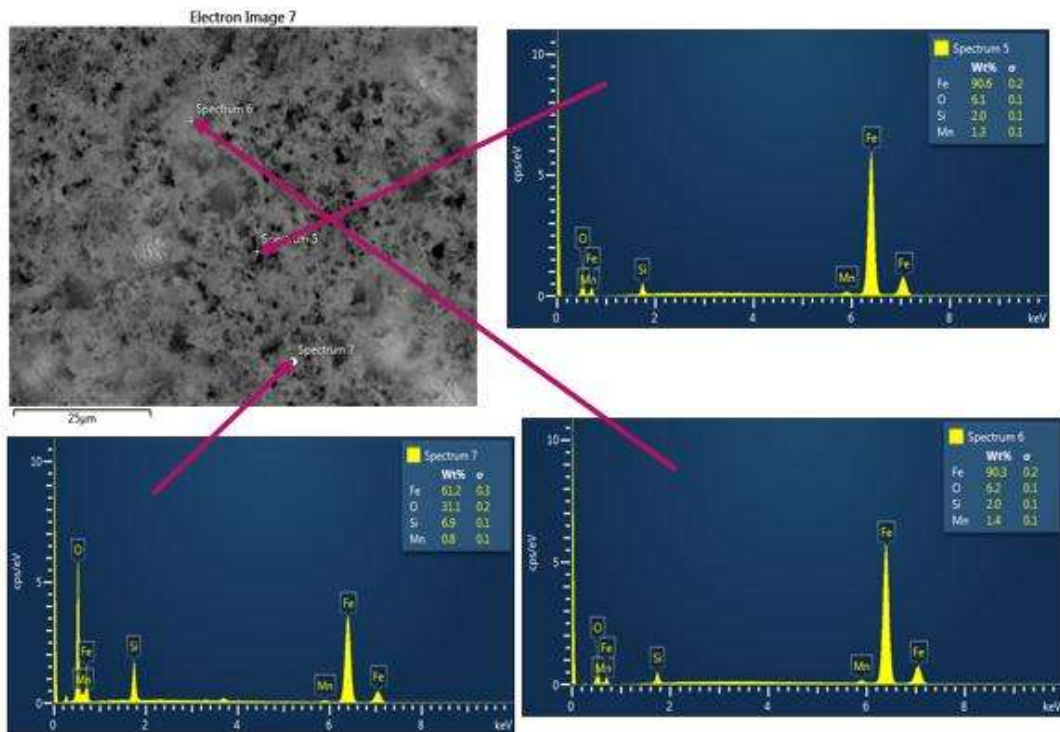


Figura 4.13 Imagen representativa de un EDS puntual de la muestra 2

En ésta imagen vemos el EDS puntual de la muestra 2, aquí observamos las gráficas con los resultados de las composiciones químicas de cada muestra y los elementos contenidos en el producto de la corrosión.

MUESTRA 3 (pH= 8)

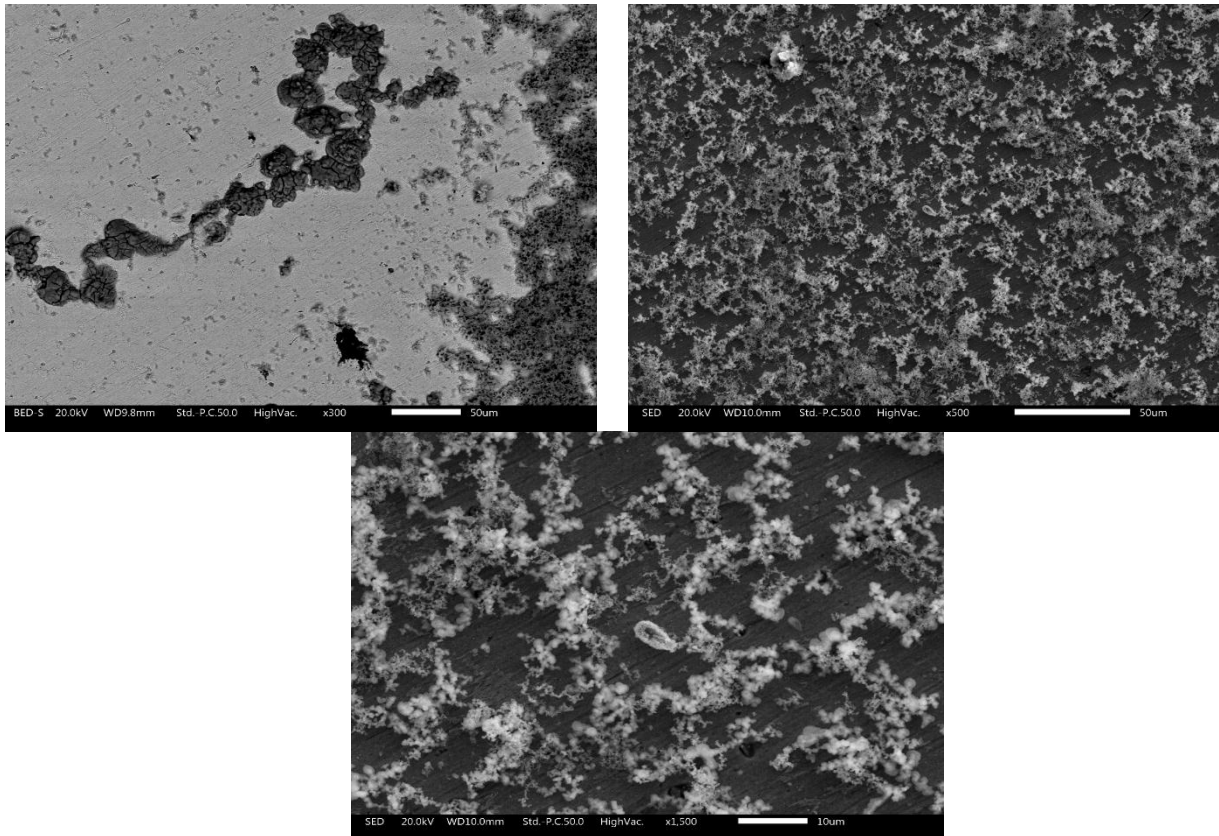


Figura 4.14 Foto de productos de corrosión de la muestra 3 (pH 8), visto desde una escala de 300x (izquierda), 500x (derecha) y 1500x (abajo)

En la figura 4.14 se puede ver el producto de corrosión de la muestra 3 desde diferentes escalas.

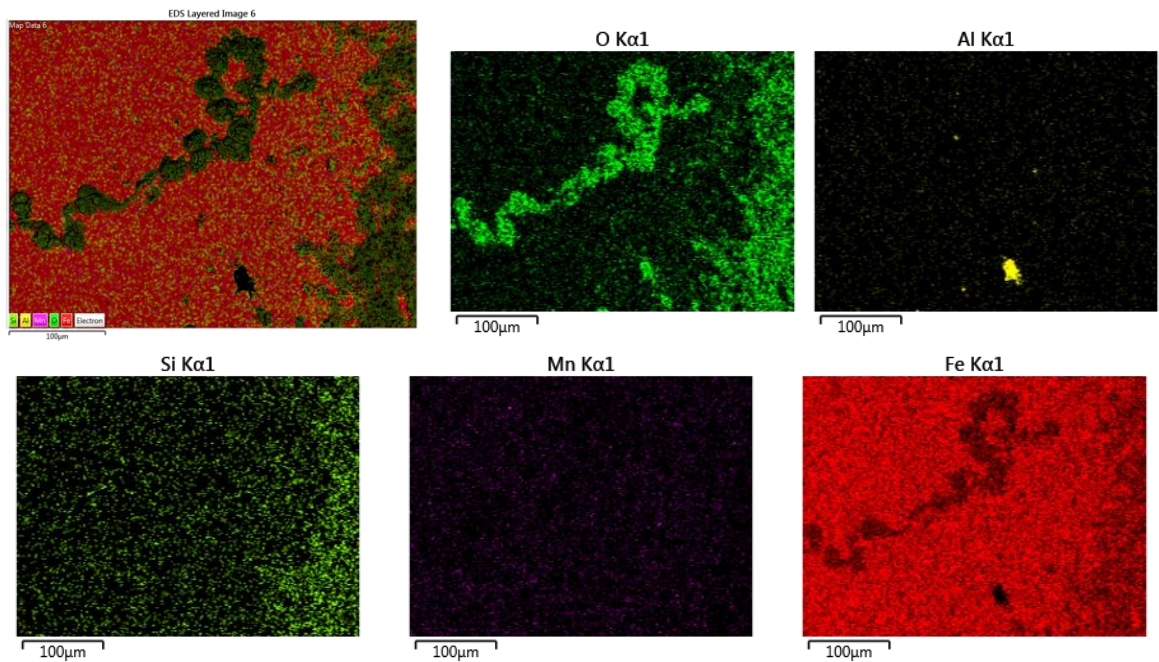


Figura 4.15 Mapeo de muestra 3 a 300x

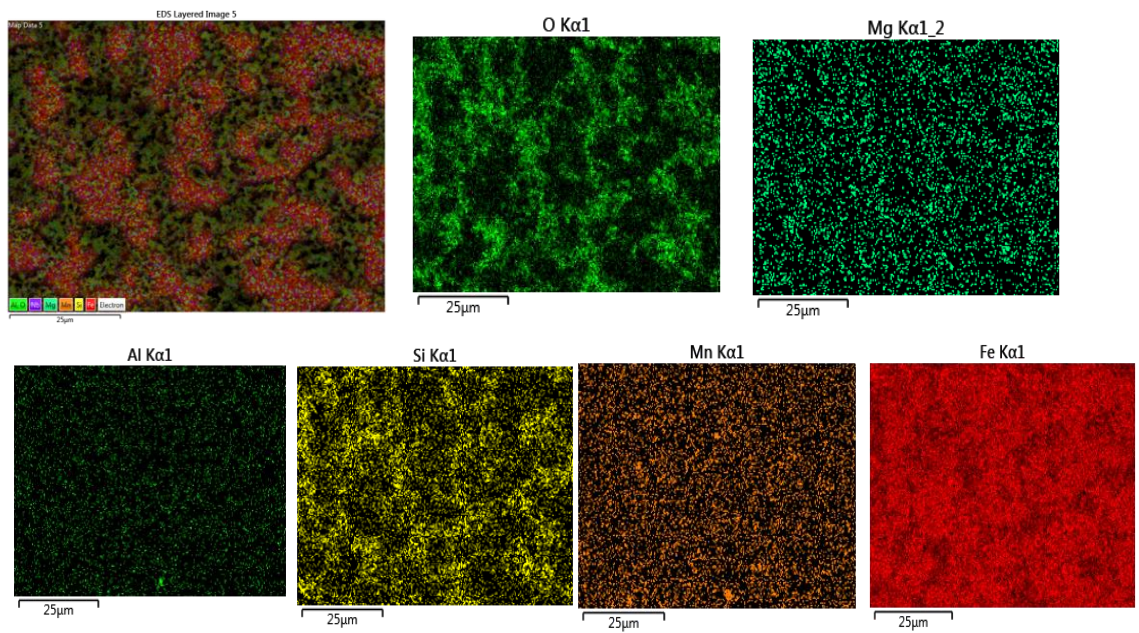


Figura 4.16 Mapeo de la muestra 3 a 1500x

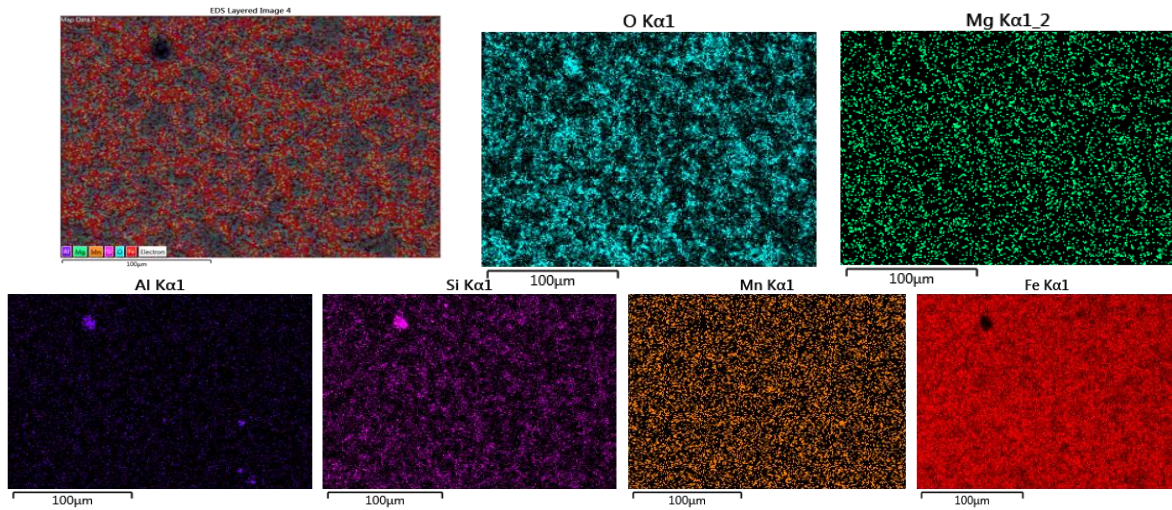


Figura 4.17 Mapeo de la muestra 3 a 1500x

En las figuras 4.15, 4.16 y 4.17 se pueden observar los mapeos de la muestra 3 pero a diferentes escalas, los productos de corrosión para esta muestra también son Al_2O_3 y SiO_2 ; el Mg presente en las escalas 500x y 1500x puede ser contaminación o fluorescencia ya que ese no es un producto inicial de la muestra.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

Ya conociendo al acero HSLA se pasó a las pruebas de corrosión, arrojando resultados para calcular la velocidad de corrosión; la cual nos dice que a menor pH (pH 2) mayor velocidad de corrosión. Lo anterior se debe al medio más corrosivo o agresivo para nuestro material; también lo podemos notar en las pruebas de barrido que se les hicieron, donde vemos que el material sometido a la solución de pH 2 empieza a tener picaduras y éstas no se encontraron en las otras muestras. Por otro lado, en las muestras a mayor pH (pH 8) se observó más formación de productos, estos productos son óxidos, resultado arrojado por los mapeos realizados. Se observó un comportamiento similar en cuanto a la disolución general del material en las 3 muestras, eso se pudo observar en la gráfica 4.2 y 4.3 en base al comportamiento anódico.

Se puede concluir que se cumplió nuestra hipótesis y los objetivos establecidos, así que ya conocemos como se va a comportar el acero HSLA, en cuanto a velocidad de corrosión y formación de productos, cuando sea sometido a diferentes medios corrosivos, al menos a lluvias ácidas con diferentes pHs o en medios básicos.

RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS

1. Hacer análisis químico al acero para conocer realmente su composición, si es que no es un acero comercial.
2. Cuando llevas a cabo la preparación de la probeta para metalografía, tener cuidado al hacer el desbaste, no es necesario ejercerle presión a la probeta porque esto la raya y un buen trabajo de preparación debe de no tener ni la mínima línea, tiene que quedar como espejo.
3. Lavar bien el paño antes de pulir la probeta para evitar que tenga partículas que puedan rayarla.
4. Al momento de hacer las pruebas potenciodinámicas, necesitamos dejar que el potencióstato se mantenga estable, con 20 min es suficiente, esto para no arrojar datos erróneos.
5. Cuidar de retirar tu probeta justo a las 24 hrs de la prueba, ya que si lo dejamos más puede seguir dañando el material y no concordarán los resultados con los resultados de las pruebas de barrido.
6. Mantener aisladas las probetas para que no se sigan dañando o contaminando.
7. También asegurarnos de que se le dé buen manejo a las probetas cuando se llevaran a cabo las pruebas de barrido, que el técnico no las contamine o que esté limpio el equipo.
8. Tener mucho cuidado al ponerle las escalas a las fotografías resultantes de la metalografía, ya que para cada lente hay una escala.
9. Revisar todos los cálculos a la hora de obtener las velocidades de corrosión.

ANEXOS

1. Fotocopia del análisis químico



FUNDIDORA MORELIA, S.A. DE C.V.

CERTIFICADO DE ANÁLISIS QUÍMICO CHEMICAL ANALYSIS CERTIFICATE

CERTIFICADO No.: Q O.S 988-1

CERTIFICATE No.:

FECHA: 15 / DICIEMBRE / 15

DATE:

CLIENTE: UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

CLIENT:

DESCRIPCIÓN: ENSAYO DE ANALISIS QUIMICO (C4)

DESCRIPTION:

PEDIDO: N/A

O. DE S.: 988

MATERIAL: N/A

PURCHASE ORDER:

JOB ORDER: 2 5 2

MATERIAL:

DIBUJO: N/A

MODELO: N/A

No. PARTE: N/A

DRAWING:

PATTERN:

PART No.:

ANÁLISIS QUÍMICO / CHEMICAL ANALYSIS

% C: 0.052 / %Si: 0.051 / %Mn: 1.325 / %P: 0.011 / %S: 0.022 / %Cr: 0.675 / %Mo: 0.0077 / %Ni: 0.0050 / %Cu: 0.058 / %Al: 0.068 / %V: 0.061 / %N: 0.016

POR MEDIO DEL PRESENTE CERTIFICAMOS QUE LOS RESULTADOS INDICADOS SON LOS OBTENIDOS DE LA(S) MUESTRA(S) PROPORCIONADA(S) POR USTEDES.

FUNDIDORA MORELIA CERTIFIES THAT THE RESULTS INDICATED IN THIS DOCUMENT ARE THE GOTTEN FROM YOUR ESPECIMENS

2. Tablas de cálculo de las velocidades de corrosión

pH 5								
TIEMPO(s)	TIEMPO (hrs)	LPR(ohm/cm ²)	B (mV)	i _{cor} (B/LRP)	K	DENSIDAD	P. EQ	Vc (K*(i _{cor} /D)*P.EQ)
0	0	13532	29.038067	0.002145881	3.27E-03	7.8509	27.54	2.46149E-05
900.37	0.250102778	11019	29.038067	0.002635272	3.27E-03	7.8509	27.54	3.02286E-05
1800.7	0.500194444	10921	29.038067	0.00265892	3.27E-03	7.8509	27.54	3.04998E-05
2701.1	0.750305556	11050	29.038067	0.002627879	3.27E-03	7.8509	27.54	3.01438E-05
3601.2	1.000333333	11008	29.038067	0.002637906	3.27E-03	7.8509	27.54	3.02588E-05
4501.3	1.250361111	10865	29.038067	0.002672625	3.27E-03	7.8509	27.54	3.0657E-05
5401.8	1.5005	10959	29.038067	0.0026497	3.27E-03	7.8509	27.54	3.03941E-05
6302	1.750555556	10868	29.038067	0.002671887	3.27E-03	7.8509	27.54	3.06486E-05
7202.1	2.000583333	10708	29.038067	0.002711811	3.27E-03	7.8509	27.54	3.11065E-05
8102.2	2.250611111	10534	29.038067	0.002756604	3.27E-03	7.8509	27.54	3.16203E-05
9002.2	2.500611111	10306	29.038067	0.002817588	3.27E-03	7.8509	27.54	3.23199E-05
9902.4	2.750666667	10112	29.038067	0.002871644	3.27E-03	7.8509	27.54	3.29399E-05
10802	3.000555556	9912	29.038067	0.002929587	3.27E-03	7.8509	27.54	3.36046E-05
11702	3.250555556	9731.3	29.038067	0.002983986	3.27E-03	7.8509	27.54	3.42286E-05
12602	3.500555556	9574.3	29.038067	0.003032918	3.27E-03	7.8509	27.54	3.47899E-05
13503	3.750833333	9408	29.038067	0.003086529	3.27E-03	7.8509	27.54	3.54048E-05
14403	4.000833333	9297.7	29.038067	0.003123145	3.27E-03	7.8509	27.54	3.58249E-05
15303	4.250833333	9191.4	29.038067	0.003159265	3.27E-03	7.8509	27.54	3.62392E-05
16203	4.500833333	9081.8	29.038067	0.003197391	3.27E-03	7.8509	27.54	3.66765E-05
17103	4.750833333	8915.4	29.038067	0.003257068	3.27E-03	7.8509	27.54	3.73611E-05
18003	5.000833333	8744	29.038067	0.003320913	3.27E-03	7.8509	27.54	3.80934E-05
18903	5.250833333	8537.5	29.038067	0.003401238	3.27E-03	7.8509	27.54	3.90148E-05
19804	5.501111111	8381.9	29.038067	0.003464378	3.27E-03	7.8509	27.54	3.9739E-05
20704	5.751111111	8158	29.038067	0.003559459	3.27E-03	7.8509	27.54	4.08297E-05
21604	6.001111111	8000.3	29.038067	0.003629622	3.27E-03	7.8509	27.54	4.16345E-05
22504	6.251111111	7770.9	29.038067	0.00373677	3.27E-03	7.8509	27.54	4.28636E-05
23404	6.501111111	7647.3	29.038067	0.003797166	3.27E-03	7.8509	27.54	4.35564E-05
24305	6.751388889	7413.9	29.038067	0.003916706	3.27E-03	7.8509	27.54	4.49276E-05
25205	7.001388889	7313.3	29.038067	0.003970583	3.27E-03	7.8509	27.54	4.55456E-05
26105	7.251388889	7226.8	29.038067	0.004018109	3.27E-03	7.8509	27.54	4.60908E-05
27006	7.501666667	7138.2	29.038067	0.004067982	3.27E-03	7.8509	27.54	4.66628E-05
27906	7.751666667	7122	29.038067	0.004077235	3.27E-03	7.8509	27.54	4.6769E-05
28806	8.001666667	7079.4	29.038067	0.00410177	3.27E-03	7.8509	27.54	4.70504E-05
29707	8.251944444	7185.7	29.038067	0.004041091	3.27E-03	7.8509	27.54	4.63544E-05
30607	8.501944444	7279	29.038067	0.003989293	3.27E-03	7.8509	27.54	4.57602E-05
31507	8.751944444	7396.8	29.038067	0.003925761	3.27E-03	7.8509	27.54	4.50315E-05
32408	9.002222222	7483	29.038067	0.003880538	3.27E-03	7.8509	27.54	4.45127E-05
33308	9.252222222	7610.1	29.038067	0.003815727	3.27E-03	7.8509	27.54	4.37693E-05
34209	9.5025	7728.5	29.038067	0.003757271	3.27E-03	7.8509	27.54	4.30988E-05
35109	9.7525	7791.5	29.038067	0.00372689	3.27E-03	7.8509	27.54	4.27503E-05
36009	10.0025	7796	29.038067	0.003724739	3.27E-03	7.8509	27.54	4.27256E-05
36909	10.2525	7849.6	29.038067	0.003699305	3.27E-03	7.8509	27.54	4.24338E-05
37809	10.5025	7890.8	29.038067	0.00367999	3.27E-03	7.8509	27.54	4.22123E-05
38709	10.7525	7971.5	29.038067	0.003642736	3.27E-03	7.8509	27.54	4.1785E-05
39609	11.0025	8011.2	29.038067	0.003624684	3.27E-03	7.8509	27.54	4.15779E-05
43095	11.970833333	7925.3	29.038067	0.003663971	3.27E-03	7.8509	27.54	4.20285E-05
43995	12.220833333	7527.2	29.038067	0.003857751	3.27E-03	7.8509	27.54	4.42513E-05
44895	12.470833333	7618.7	29.038067	0.00381142	3.27E-03	7.8509	27.54	4.37199E-05
45795	12.720833333	7714.1	29.038067	0.003764284	3.27E-03	7.8509	27.54	4.31792E-05
46695	12.970833333	7761.2	29.038067	0.00374144	3.27E-03	7.8509	27.54	4.29172E-05
47596	13.221111111	7851.3	29.038067	0.003698504	3.27E-03	7.8509	27.54	4.24247E-05
48496	13.471111111	7933.2	29.038067	0.003660322	3.27E-03	7.8509	27.54	4.19867E-05
49396	13.721111111	8005.5	29.038067	0.003627265	3.27E-03	7.8509	27.54	4.16075E-05
50296	13.971111111	8049.4	29.038067	0.003607482	3.27E-03	7.8509	27.54	4.13806E-05
51197	14.221388889	8108.9	29.038067	0.003581012	3.27E-03	7.8509	27.54	4.10769E-05

52097	14.47138889	8119.6	29.038067	0.003576293	3.27E-03	7.8509	27.54	4.10228E-05
52997	14.72138889	8203.5	29.038067	0.003539717	3.27E-03	7.8509	27.54	4.06032E-05
53897	14.97138889	8230.2	29.038067	0.003528233	3.27E-03	7.8509	27.54	4.04715E-05
54797	15.22138889	8277.1	29.038067	0.003508242	3.27E-03	7.8509	27.54	4.02422E-05
55697	15.47138889	8311.9	29.038067	0.003493553	3.27E-03	7.8509	27.54	4.00737E-05
56597	15.72138889	8343.9	29.038067	0.003480155	3.27E-03	7.8509	27.54	3.992E-05
57498	15.97166667	8372.3	29.038067	0.00346835	3.27E-03	7.8509	27.54	3.97846E-05
58398	16.22166667	8403.6	29.038067	0.003455432	3.27E-03	7.8509	27.54	3.96364E-05
59298	16.47166667	8416	29.038067	0.003450341	3.27E-03	7.8509	27.54	3.9578E-05
60198	16.72166667	8425.4	29.038067	0.003446491	3.27E-03	7.8509	27.54	3.95339E-05
61098	16.97166667	8410.4	29.038067	0.003452638	3.27E-03	7.8509	27.54	3.96044E-05
61998	17.22166667	8423.2	29.038067	0.003447391	3.27E-03	7.8509	27.54	3.95442E-05
62898	17.47166667	8441	29.038067	0.003440122	3.27E-03	7.8509	27.54	3.94608E-05
63799	17.72194444	8441.5	29.038067	0.003439918	3.27E-03	7.8509	27.54	3.94585E-05
64699	17.97194444	8483.2	29.038067	0.003423009	3.27E-03	7.8509	27.54	3.92645E-05
65599	18.22194444	8472.1	29.038067	0.003427493	3.27E-03	7.8509	27.54	3.9316E-05
66499	18.47194444	8499.2	29.038067	0.003416565	3.27E-03	7.8509	27.54	3.91906E-05
67399	18.72194444	8509.4	29.038067	0.003412469	3.27E-03	7.8509	27.54	3.91436E-05
68300	18.97222222	8523.9	29.038067	0.003406664	3.27E-03	7.8509	27.54	3.9077E-05
69200	19.22222222	8524.3	29.038067	0.003406505	3.27E-03	7.8509	27.54	3.90752E-05
70100	19.47222222	8557.6	29.038067	0.003393249	3.27E-03	7.8509	27.54	3.89231E-05
71000	19.72222222	8602.1	29.038067	0.003375695	3.27E-03	7.8509	27.54	3.87218E-05
71900	19.97222222	8594.4	29.038067	0.00337872	3.27E-03	7.8509	27.54	3.87565E-05
72800	20.22222222	8587.4	29.038067	0.003381474	3.27E-03	7.8509	27.54	3.87881E-05
73700	20.47222222	8599.5	29.038067	0.003376716	3.27E-03	7.8509	27.54	3.87335E-05
74600	20.72222222	8624.1	29.038067	0.003367084	3.27E-03	7.8509	27.54	3.8623E-05
75500	20.97222222	8606.6	29.038067	0.00337393	3.27E-03	7.8509	27.54	3.87015E-05
76401	21.2225	8628.4	29.038067	0.003365406	3.27E-03	7.8509	27.54	3.86038E-05
77301	21.4725	8629.4	29.038067	0.003365016	3.27E-03	7.8509	27.54	3.85993E-05
78201	21.7225	8594.6	29.038067	0.003378641	3.27E-03	7.8509	27.54	3.87556E-05
79101	21.9725	8598.2	29.038067	0.003377226	3.27E-03	7.8509	27.54	3.87394E-05
80001	22.2225	8609.5	29.038067	0.003372794	3.27E-03	7.8509	27.54	3.86885E-05
80901	22.4725	8569.1	29.038067	0.003388695	3.27E-03	7.8509	27.54	3.88709E-05
81801	22.7225	8545.3	29.038067	0.003398133	3.27E-03	7.8509	27.54	3.89792E-05
82702	22.9727778	8556.8	29.038067	0.003393566	3.27E-03	7.8509	27.54	3.89268E-05

pH 8								
TIEMPO(s)	TIEMPO (hrs)	LPR(ohm/cm ²)	B	icor(B/LRP)	K	DENSIDAD	P. EQ	Vc (K*(icor/D)*P.EQ)
0	0.00	11961	27.7774	0.002322332	3.27E-03	7.8509	27.54	2.66389E-05
900.09	0.25	10792	27.7774	0.00257389	3.27E-03	7.8509	27.54	2.95245E-05
1800.5	0.50	11276	27.7774	0.002463411	3.27E-03	7.8509	27.54	2.82572E-05
2700.4	0.75	11701	27.7774	0.002373935	3.27E-03	7.8509	27.54	2.72308E-05
3600.4	1.00	12041	27.7774	0.002306903	3.27E-03	7.8509	27.54	2.64619E-05
4500.8	1.25	12139	27.7774	0.002288279	3.27E-03	7.8509	27.54	2.62483E-05
5401.2	1.50	12240	27.7774	0.002269397	3.27E-03	7.8509	27.54	2.60317E-05
6301.6	1.75	12281	27.7774	0.002261821	3.27E-03	7.8509	27.54	2.59448E-05
7202.1	2.00	12266	27.7774	0.002264587	3.27E-03	7.8509	27.54	2.59765E-05
8102.5	2.25	12259	27.7774	0.002265888	3.27E-03	7.8509	27.54	2.59914E-05
9002.9	2.50	12328	27.7774	0.002253197	3.27E-03	7.8509	27.54	2.58459E-05
9903	2.75	12114	27.7774	0.002293001	3.27E-03	7.8509	27.54	2.63025E-05
10803	3.00	12135	27.7774	0.002289033	3.27E-03	7.8509	27.54	2.6257E-05
11703	3.25	11972	27.7774	0.002320199	3.27E-03	7.8509	27.54	2.66144E-05
12604	3.50	11815	27.7774	0.00235103	3.27E-03	7.8509	27.54	2.69681E-05
13504	3.75	11682	27.7774	0.002377796	3.27E-03	7.8509	27.54	2.72751E-05
14404	4.00	11363	27.7774	0.00244455	3.27E-03	7.8509	27.54	2.80408E-05
15305	4.25	10955	27.7774	0.002535593	3.27E-03	7.8509	27.54	2.90852E-05
16205	4.50	10452	27.7774	0.002657617	3.27E-03	7.8509	27.54	3.04849E-05
17106	4.75	9796.1	27.7774	0.002835559	3.27E-03	7.8509	27.54	3.2526E-05
18006	5.00	9403	27.7774	0.002954102	3.27E-03	7.8509	27.54	3.38858E-05
18906	5.25	9058.7	27.7774	0.00306638	3.27E-03	7.8509	27.54	3.51737E-05
19807	5.50	8869.2	27.7774	0.003131897	3.27E-03	7.8509	27.54	3.59252E-05
20707	5.75	8797.9	27.7774	0.003157278	3.27E-03	7.8509	27.54	3.62164E-05
21608	6.00	8761.9	27.7774	0.003170251	3.27E-03	7.8509	27.54	3.63652E-05
22508	6.25	8699.9	27.7774	0.003192843	3.27E-03	7.8509	27.54	3.66243E-05
23408	6.50	8589.6	27.7774	0.003233843	3.27E-03	7.8509	27.54	3.70946E-05
24309	6.75	8489	27.7774	0.003272166	3.27E-03	7.8509	27.54	3.75342E-05
25209	7.00	8422.2	27.7774	0.003298119	3.27E-03	7.8509	27.54	3.78319E-05
26109	7.25	8363.5	27.7774	0.003321267	3.27E-03	7.8509	27.54	3.80975E-05
27010	7.50	8311.8	27.7774	0.003341926	3.27E-03	7.8509	27.54	3.83344E-05
27910	7.75	8291.2	27.7774	0.003350229	3.27E-03	7.8509	27.54	3.84297E-05
28810	8.00	8205.5	27.7774	0.003385219	3.27E-03	7.8509	27.54	3.8831E-05
29711	8.25	8184.2	27.7774	0.00339403	3.27E-03	7.8509	27.54	3.89321E-05
30611	8.50	8116.8	27.7774	0.003422213	3.27E-03	7.8509	27.54	3.92554E-05
31511	8.75	8104.7	27.7774	0.003427322	3.27E-03	7.8509	27.54	3.9314E-05
32411	9.00	8016.3	27.7774	0.003465117	3.27E-03	7.8509	27.54	3.97475E-05
33311	9.25	8023.7	27.7774	0.003461921	3.27E-03	7.8509	27.54	3.97109E-05
34212	9.50	7977.9	27.7774	0.003481796	3.27E-03	7.8509	27.54	3.99388E-05
35112	9.75	8042.4	27.7774	0.003453872	3.27E-03	7.8509	27.54	3.96185E-05
36012	10.00	8539	27.7774	0.003253006	3.27E-03	7.8509	27.54	3.73145E-05
36912	10.25	8490.1	27.7774	0.003271742	3.27E-03	7.8509	27.54	3.75294E-05
37812	10.50	8018.4	27.7774	0.00346421	3.27E-03	7.8509	27.54	3.97371E-05
38712	10.75	7865.7	27.7774	0.003531462	3.27E-03	7.8509	27.54	4.05086E-05
39612	11.00	7848.1	27.7774	0.003539381	3.27E-03	7.8509	27.54	4.05994E-05
43099	11.97	9073.5	27.7774	0.003061379	3.27E-03	7.8509	27.54	3.51163E-05
43999	12.22	7971.1	27.7774	0.003484766	3.27E-03	7.8509	27.54	3.99729E-05
44900	12.47	7862.3	27.7774	0.003532989	3.27E-03	7.8509	27.54	4.05261E-05
45800	12.72	7794.9	27.7774	0.003563537	3.27E-03	7.8509	27.54	4.08765E-05
46700	12.97	7831.4	27.7774	0.003546929	3.27E-03	7.8509	27.54	4.0686E-05
47600	13.22	7798.7	27.7774	0.003561801	3.27E-03	7.8509	27.54	4.08566E-05
48501	13.47	7822.5	27.7774	0.003550964	3.27E-03	7.8509	27.54	4.07323E-05
49401	13.72	7820.6	27.7774	0.003551827	3.27E-03	7.8509	27.54	4.07422E-05
50301	13.97	7787.2	27.7774	0.003567061	3.27E-03	7.8509	27.54	4.09169E-05
51202	14.22	7834.9	27.7774	0.003545344	3.27E-03	7.8509	27.54	4.06678E-05
52102	14.47	7781.1	27.7774	0.003569857	3.27E-03	7.8509	27.54	4.0949E-05
53002	14.72	7812.1	27.7774	0.003555692	3.27E-03	7.8509	27.54	4.07865E-05
53903	14.97	7781.5	27.7774	0.003569674	3.27E-03	7.8509	27.54	4.09469E-05

54803	15.22	7772.7	27.7774	0.003573715	3.27E-03	7.8509	27.54	4.09932E-05
55703	15.47	7748.4	27.7774	0.003584923	3.27E-03	7.8509	27.54	4.11218E-05
56604	15.72	7728.9	27.7774	0.003593968	3.27E-03	7.8509	27.54	4.12255E-05
57504	15.97	7740.5	27.7774	0.003588582	3.27E-03	7.8509	27.54	4.11638E-05
58404	16.22	7740.5	27.7774	0.003588582	3.27E-03	7.8509	27.54	4.11638E-05
59305	16.47	7748.1	27.7774	0.003585062	3.27E-03	7.8509	27.54	4.11234E-05
60205	16.72	7811	27.7774	0.003556192	3.27E-03	7.8509	27.54	4.07922E-05
61105	16.97	7761.7	27.7774	0.00357878	3.27E-03	7.8509	27.54	4.10513E-05
62006	17.22	7761.5	27.7774	0.003578872	3.27E-03	7.8509	27.54	4.10524E-05
62906	17.47	7782.9	27.7774	0.003569032	3.27E-03	7.8509	27.54	4.09395E-05
63806	17.72	7837.8	27.7774	0.003544033	3.27E-03	7.8509	27.54	4.06528E-05
64707	17.97	7788.5	27.7774	0.003566466	3.27E-03	7.8509	27.54	4.09101E-05
65607	18.22	7765.4	27.7774	0.003577075	3.27E-03	7.8509	27.54	4.10318E-05
66507	18.47	7747.4	27.7774	0.003585386	3.27E-03	7.8509	27.54	4.11271E-05
67407	18.72	7725.8	27.7774	0.00359541	3.27E-03	7.8509	27.54	4.12421E-05
68307	18.97	7781.5	27.7774	0.003569674	3.27E-03	7.8509	27.54	4.09469E-05
69208	19.22	7786.5	27.7774	0.003567382	3.27E-03	7.8509	27.54	4.09206E-05
70108	19.47	7792.2	27.7774	0.003564772	3.27E-03	7.8509	27.54	4.08907E-05
71008	19.72	7799.7	27.7774	0.003561344	3.27E-03	7.8509	27.54	4.08513E-05
71909	19.97	7846.1	27.7774	0.003540283	3.27E-03	7.8509	27.54	4.06097E-05
72809	20.22	7826.8	27.7774	0.003549013	3.27E-03	7.8509	27.54	4.07099E-05
73709	20.47	7808.8	27.7774	0.003557194	3.27E-03	7.8509	27.54	4.08037E-05
74609	20.72	7847.8	27.7774	0.003539517	3.27E-03	7.8509	27.54	4.06009E-05
75510	20.98	7820.7	27.7774	0.003551782	3.27E-03	7.8509	27.54	4.07416E-05
76410	21.23	7782.4	27.7774	0.003569261	3.27E-03	7.8509	27.54	4.09421E-05
77310	21.48	7755.3	27.7774	0.003581734	3.27E-03	7.8509	27.54	4.10852E-05
78210	21.73	7768.4	27.7774	0.003575694	3.27E-03	7.8509	27.54	4.10159E-05
79110	21.98	7742.2	27.7774	0.003587794	3.27E-03	7.8509	27.54	4.11547E-05
80011	22.23	7765.5	27.7774	0.003577029	3.27E-03	7.8509	27.54	4.10312E-05
80911	22.48	7755.6	27.7774	0.003581595	3.27E-03	7.8509	27.54	4.10836E-05
81811	22.73	7758.8	27.7774	0.003580118	3.27E-03	7.8509	27.54	4.10667E-05
82711	22.98	7746.2	27.7774	0.003585941	3.27E-03	7.8509	27.54	4.11335E-05

BIBLIOGRAFIA

1. Lutz Meyer, Cristian StraBburger, Christoph Schneider, Effect and Present Application of the Microalloying Elements Nb, V, Ti, Zr and B in HSLA Steels, HSLA Steels: Metallurgy and Applications, Proceeding of an Internacional Conference on HSLA Steels'85, Nov., 1985, Beijing, China.
2. Morris Cohen, S.S. Hansen, On the Fundamental of HSLA Steels, Proceeding of an International Conference on HSLA Steels: Metallurgy and Application, HSLA Steels'85, Nov., 1985, Beijing, China.
3. J. Fernandez, S Illescas, J.M: Guilemany, Effect of Microalloying Elements on the Austenitic Grain Growth in a Low Carbon HSLA Steel, Materials Letters, 2006, Elsevier
4. Fuentes Montemayor Juan Antonio. "Propiedades a impactos de aceros microaleados". (2003) UANL
5. Adem Backaloglu, Effect of Processing Parameters on the Microstructure and Properties of an Nb Microalloyed Steel, Materials Letters 56, 2002, Elsevier
6. H. Wang and G. Han, Atmospheric research, 99(2011) 190.
7. Y. SHI, Z. ZHANG, J. SU, F. CAO, J. ZHANG. Electrochemical noise study on 2024-T3 Aluminum alloy corrosion in simulated acid rain under cyclic wet-dry condition. Electrochimica Acta 51 (2006) 4977-4986.
8. E. Huape-Padilla, M. Sanchez-Carrillo, J. P. Flores-delos Rios, R. G. Bautista-Margulis, M.I. Ferrer-Sanchez. Corrosion study of Fe-Al intermetallic alloys in simulated acid rain. Int. J. Electrochem. Sci., 10 (2015) 2141-2154.
9. Z. WAN-QIU, S. DA-YONG, H. EN-HOU, K. WEI. Initial corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy in simulating acid rain under wet-drycyclic condition. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 18(2008) 334-338.
- 10.L. FENG, S. YING-WEI, S. DA-YONG, H. EN-HOU. Corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy in simulated acid rain solution. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 20(2010) 638-642.
- 11.Ospina López R., Aguirre Corrales H. Parra L. H. Scientia Et Technic. Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia), XIII (034); 2007, pp. 273-278.

12. Standard Specification for UNS N08367 Welded Pipe ASTM Designation: B675-96.
13. M. Sireesha, Shaju K. Albert, V. Shankar, S. Sundaresan. *J. of Nuclear Mat.* (279), 2000; pp. 65-76.
14. Porter. L F y Repas, P E: *journal of metals.* V.34. p. 14 (1982).
15. G. Spanos, A. B. Geltmacher, A. C. Lewis, J. F. Bingert, M. Mehl, D. Papaconstatopoulos, Y. Mishin, A. Gupta and P. Matic. *Mater. Sci. Eng. A.* Vol. 452-453 (2007), pp. 558-68
16. Lefu Zhang, Fawen Zhu, Rui Tang. *Front. Energy Power Eng.* 3(2). 2009; pp. 233-240
17. A. T. Motta, A. Yilmazbayhan, M. J. G. da Silva. *J. of Nuclear Mat.* 371 (1-3). 2007; pp 61-75
18. Y. Yang, Q. Yan, R. Ma, F. Zhu, L. Zhang, C. Ge. *Corrosion.* 66,9 (2010); pp E1
19. Li. Xinggang, Yan Qingzhi, MA. Rong, Wang Haoqiang, GE. Changchun. *Front. Energy Power Eng.* 3(2) 2009; pp 193-197
20. S. Banovic, W. DuPont, J N. Marder. *Metall. and Materials Trans;* 32B,6; 2001
21. Lutz Meyer, Cristian StraBburger, Christoph Schneider, Effect and Present Application of the Microalloying Elements Nb, V, Ti, Zr and B in HSLA Steels, *HSLA Steels: Metallurgy and Applications, Proceeding of an International Conference on HSLA Steels'85, Nov., 1985, Beijing, China.*
22. Morris Cohen, S.S. Hansen, *On the Fundamental of HSLA Steels, Proceeding of an International Conference on HSLA Steels: Metallurgy and Application, HSLA Steels'85, Nov., 1985, Beijing, China.*
23. ATEG, presentación "Fundamentos de la corrosion metalica", mayo 2012.
24. ASM HANDBOOK VOL 9, Metallography and Microstructures 2004
25. S. MAGAINO. Corrosionrate of copperrotating-disk-electrode in simulatedacid rain. *Electrochimica Acta*, 42 (1997) 377-382.
26. L. YANG, Y. ZHANG, X. ZENG, Z. SONG. Corrosionbehaviour of superplastic Zn–Al alloys in simulatedacid rain. *CorrosionScience* 59 (2012) 229–237.

27. L. GIANNI, M. CAVALLINI, S. NATALI, A. ADRIAENS. Wet and Dry Accelerated Aging Tests in a Spray Chamber to Understand the Effects of Acid Rain Frequencies on Bronze Corrosion. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 8 (2013) 1822 – 1838.
28. S. MAGAINOA, M. SOGAA, K. SOBUEA, A. KAWAGUCHIA, N. ISHIDAB, H. IMAI. Zinc corrosion in simulated acid rain. *Electrochimica Acta* 44 (1999) 4307-4312.
29. ASTM Designation: G 102 – 89 (Reapproved 1999) Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements.
30. Bard AJ, Faulkner LR. *Electrochemical Methods. Fundamentals and Applications*. Nueva York : Wiley; 1980: 86, 280.
31. González JA. *Control de la Corrosión: Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas*.
32. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, Madrid. 1989: 45, 101, 199.
33. Hausler RH. Practical experiences with linear polarization measurements. *Corrosion*. 1977; 33: 117-28.
34. Smith William F., Hashemi Javad, “fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales.
35. Criado M, Fajardo S, Valdez B, Bastidas JM. Aspectos cinéticos de la corrosión y fenómenos de pasividad. En Valdez Salas B, & Schorr Wiener M (Eds.). *Corrosión y preservación de la infraestructura industrial*. Barcelona, España: OmniaScience; 2013. pp. 11-32.
36. http://www.obtesol.es/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=2772
37. http://www.ehowenespanol.com/propiedades-del-acero-hsla-info_98377/
38. <http://www.conocimientosweb.net/dcmt/ficha20135.html>
39. http://www.tecnosefarad.com/wp-content/archivos/bach_2/materiales/T4_la_corrosion.pdf
40. http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_6.htm

41. <http://maintenancela.blogspot.mx/2011/09/corrosion-y-su-control-parte-i.html>
42. https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/fcm12_2.html