

UNIVERSIDAD NACIONAL
SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO
FACULTAD DE CIENCIAS



**TRATAMIENTO TÉRMICO Y SUSCEPTIBILIDAD A LA
CORROSIÓN DEL ACERO AUSTENÍTICO 316-L EN
SOLUCIÓN DE NaCl A DIFERENTE PH**

INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN

AUTORES:

Lic. José Alfredo García Peralta

MsC. Luis Alberto Moreno Rubiños

MsC. Eleuterio Ramírez Apolinario

MsC. Ausberto Wilson Urquiaga Vásquez

HUARAZ - PERÚ

Mayo, 2009

ÍNDICE

Procedimiento.....	
15	
5.	
RESULTADOS.....	
20	
6. DISCUSIÓN	DE
RESULTADOS.....	25
9.	
CONCLUSIONES.....	
.26	
10.	
RECOMENDACIONES.....	
...26	
11.	
BIBLIOGRAFÍA.....	
.27	
ANEXOS.....	2
8	

**TRATAMIENTO TÉRMICO Y SUSCEPTIBILIDAD A LA CORROSIÓN DEL
ACERO AUSTENÍTICO 316-L EN SOLUCIÓN DE NaCl A DIFERENTE PH
THERMAL TREATMENT AND CORROSION SUSCEPTIBILITY OF 316-L
AUSTENITIC STEEL IN NaCl SOLUTION AT DIFFERENT LEVELS OF PH.**

Ramírez Apolinario Eleuterio¹, García Peralta José A.¹, Urquiaga Vásquez Ausberto W.¹,

Moreno Rubiños Luis A.¹

¹Sección de Física. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación ha consistido en estudiar la susceptibilidad a la corrosión del acero AISI 316-L en una solución de NaCl al 25% y PH 5.64 y 10.1 de bajo contenido de carbono. Se ha constituido tres grupos de muestras, una sin tratamiento térmico y dos con tratamiento térmico de recocido de disolución a 1050 °C, enfriados rápidamente en solución de agua con hielo y sal. Las curvas de polarización fueron obtenidas a través de un potenciostato-galvanostato, determinándose las velocidades de corrosión para diferentes PH. Se encontró que la susceptibilidad a la corrosión está relacionada con la velocidad de corrosión. El tratamiento térmico efectuado al acero AISI 316-L es menos susceptible a la corrosión en un medio de NaCl a 25% y PH 10.1, ya que su velocidad de corrosión es de $0.18 \frac{g}{cm^2 año}$

Palabras claves: Maclas, Recocido de Disolución, Potencial de Picado, Ductibilidad, Película pasivante, Celda electrolítica, Curvas de polarización.

ABSTRACT

The goal this research work was study the influence of thermal treatment on susceptibility to corrosion of AISI 316-L stainless steel in a NaCl 2.5% and PH 5.64 and 10.1 solution. Three sample groups, one of them without thermal treatment and two of

them with thermal treatment of solution annealing to 1050°C were used. Experimental sample groups were quickly cooled down in water solution mixed with ice and salt. Susceptibilities to corrosion were determined by means of tracing of polarization curves as a result of polarize AISI 316-L stainless steel samples to different corrosion potentials. Such process drives oxidoreduction reactions changing ionic flux when the level of PH in solution is modified. Corrosion susceptibility is related with the velocity of corrosion and thermal treatment carried out to AISI 316-L stainlesssteel. AISI 316-L steel shows low susceptibility to corrosion in a NaCl 2.5% and PH 10.1 solution, because its velocity of corrosion is equal to $0.18 \frac{g}{cm^2 year}$

Key words: Twins, solution annealing, pitting potential, ductibility, passiving films, curves of polarization, electrolytic cell.

INTRODUCCIÓN

Los Aceros Inoxidables son aleaciones base hierro, contiene cromo y níquel como elementos Básicos de aleación; estos elementos son añadidos al acero en estado de fusión: el cromo en un rango del % al 30% para hacerlo inoxidable en toda su masa [1]. La adición de un 5% de Cr al Acero Inoxidable mejora su resistencia a la corrosión pero solamente con tenores de $Cr > 11\%$. Se puede hablar con propiedad de Aceros Inoxidables. El Níquel le da tenacidad al Acero Inoxidable [2].

Los Aceros Inoxidables Austeníticos son mejores comparados con los Aceros Inoxidables Martensíticos y Ferríticos por su buena resistencia a la corrosión, soldabilidad y buenas propiedades mecánicas. Esta resistencia a la corrosión es debida a la formación de una fina película de óxido de cromo superficial, protectora, aislante, no porosa e insoluble [3]. La formación de esta película protectora es debida a la fuerte atracción del Cromo por el oxígeno.

Los Aceros Inoxidables Austeníticos presentan un excelente comportamiento dentro de un amplio espectro de medios corrosivos que contienen iones Cl^- , Br^- , I^- .

La resistencia de los acero austeníticos a los medios corrosivos se debe principalmente al Cromo, que está en cantidades del 11% al 25%. [4]

La adición de Níquel entre 7% y 20% mejora la resistencia a la corrosión de los Aceros inoxidables Austeníticos en medios ligeramente oxidantes o reductores. Esta acción del Níquel no solo se limita a mejorar la resistencia a la corrosión, sino que aumenta la cantidad de fase γ del Acero Inoxidable Austenítico dotándolo de mejores características en ductibilidad, tenacidad y soldabilidad [5].

REALIDAD PROBLEMATICA

En medios clorados y sulfurados los Aceros Inoxidables Austeníticos sufren corrosión por picado, las picaduras son cavidades o pitts que se producen en la superficie de la aleación, es una de las formas más peligrosas en que puede presentarse la corrosión, produciendo perforación de equipos con solo una pequeña pérdida de peso [6].

El picado en aceros inoxidables austeníticos se produce cuando hay presencia de aniones cloruro Cl^- que rompen la película pasivamente, absorbiéndose sobre la superficie metálica. Esta destrucción puntual produce ánodos pequeños frente a grandes

superficies que actúan como cátodos produciéndose un gran requerimiento de electrones y por ende una corrosión muy rápida [7].

Según [8] la localización de picaduras esta generalmente asociada a la presencia de inclusiones no metálicas, siendo los centros más activos para la formación de picado, las inclusiones de Sulfuro de Magnesio (MnS). Los MnS son buenos conductores electrónicos y pueden ser polarizados al potencial de superficie del acero inoxidable; a este potencial los sulfuros son termodinámicamente inestables, tendiendo a disolverse.

Uhlig[9] menciona que la propensión al picado en aceros inoxidables 18-8 desaparece si se agrega a la solución una concentración determinada de aniones inhibidores tales como: nitrato, perclorato, cromato o sulfato, etc. Probetas de acero inoxidable 18-8 expuestas a una solución de 10% FeCl_3 +3% NaNO_3 durante 25 años no mostraban picado en tanto que sin el nitrato se picaban en pocos minutos. Esta disminución en la propensión al picado se debe a que estos aniones inhibidores producen un desplazamiento en el potencial de picado (E_p).

El efecto de estos aniones inhibidores es de promover reacciones de intercambio electrolítico, luego de absorberse sobre la superficie metálica reduciendo notablemente los sobrepotenciales anódicos y catódicos y catalizando las reacciones de corrosión especialmente a aquellas de ataque localizado [10].

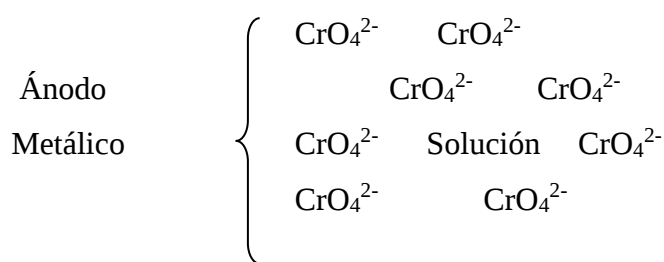


Fig. 1. Muestra el efecto de los aniones inhibidores sobre la Superficie despasivada del Acero Inoxidable Austenítico.

El pH de la solución no afecta el potencial de picado del acero inoxidable 18-8 en soluciones acidas, en tanto que en soluciones alcalinas (NaCl al 0,1N y 25°C) el potencial de picado aumenta al aumentar el pH de la solución, alcanzando un valor máximo a $\text{pH}=11$. Para $\text{pH}>11$, el potencial de picado disminuye, esto se debe a que hay una elevada concentración de oxhidrilos OH^- , perdiéndose el efecto inhibidor de estos, con lo cual el pH de la solución disminuye. [11].

El objeto del presente trabajo es estudiar la Influencia del tratamiento térmico sobre la susceptibilidad a la corrosión del Acero Inoxidable AISI 316-L en una solución de Cloruro de Sodio al 2,5%, pH 5,65 y 10,1.

La susceptibilidad a la corrosión se determina a través del trazado de las Curvas de Polarización; estas consisten en polarizar la muestra de Acero AISI 316-L a distintos Sobrepotenciales, forzando reacciones de oxido-reducción y midiendo la corriente iónica al variar el pH de la solución.

JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El siguiente trabajo de investigación está orientado a estudiar una técnica para mejorar la resistencia a la corrosión del acero austenítico, materiales que presentan deterioros asociados a la corrosión localizada, siendo los posibles centros de picado las inclusiones metálicas. Al término de la investigación estaremos en la condición de relacionar la susceptibilidad a la corrosión de estos tipos de materiales con su velocidad de corrosión y el tratamiento térmico efectuado.

ENUNCIADO DEL PROBLEMA

De acuerdo a lo mencionado anteriormente se formuló el siguiente problema:

¿Cuál es la influencia del tratamiento térmico de recocido de disolución a 1050°C sobre la susceptibilidad a la corrosión del acero inoxidable AISI 316-L?

2. HIPÓTESIS

El tratamiento térmico de recocido de disolución a 1050°C permite que el Acero Inoxidable austenítico 316-L sea más resistente a la corrosión en un medio de Cloruro de sodio al 2,5% a PH 5,64 y 10,1.

3. MARCO TEÓRICO

Aceros inoxidables

A todos los aceros inoxidables se les puede añadir un pequeño porcentaje de molibdeno, para mejorar su resistencia a la corrosión por cloruros. El molibdeno es introducido como elemento de aleación en los aceros inoxidables precisamente para disminuir la corrosión. La presencia de molibdeno permite la formación de una capa pasiva más resistente.

Este tipo de aceros inoxidables son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades que tienen. Las propiedades básicas son:

- Excelente resistencia a la corrosión
- Excelente factor de higiene -limpieza
- Fáciles de transformar
- Excelente soldabilidad
- No se endurecen por tratamiento térmico
- Se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas.

Tienen gran aplicación en las industrias químicas, farmacéuticas, de alcohol, aeronáutica, naval, uso en arquitectura, alimenticia, y de transporte. Es también utilizado en cubiertos, vajillas, piletas, revestimientos de ascensores y en un sin número de aplicaciones.

Los aceros inoxidables que llevan molibdeno son de gran utilización en las industrias químicas, de alcohol, petroquímicas, de papel y celulosa, en la industria petrolífera, industrias textil y farmacéutica.

Las zonas térmicamente afectadas por operaciones de soldado son particularmente sensibles a la corrosión, ya que durante el ciclo térmico de soldado parte del material es mantenido en la franja crítica de temperaturas.

La consideración de este fenómeno llevó al desarrollo de los inoxidables austeníticos extra bajo carbono, en los cuales el tenor de carbono es controlado en un máximo de 0,03%, quedando así extremadamente reducida la posibilidad de sensibilización.

La utilización de estabilizadores tiene también la finalidad de evitar el problema de la sensibilización. El titanio, adicionado como elemento de aleación, inhibe la formación de carburo de cromo debido al hecho de tener una afinidad mayor por el carbono que aquella que tiene el cromo. Así, se precipita carburo de titanio y el cromo permanece en solución sólida. Con la misma finalidad puede ser utilizado el niobio.

Tanto el titanio como el niobio son estabilizadores del carbono y los aceros inoxidable así obtenidos, son conocidos como aceros inoxidables estabilizados. Se utilizan para aplicaciones en equipos que operan entre 400 y 900 °C, los aceros inoxidables estabilizados son los más recomendados, ya que conservan mejores propiedades mecánicas en esas temperaturas que los aceros de extra bajo carbono; notoriamente la resistencia al **creep**.

En el inoxidable (20Cr-25Ni-4,5Mo-1,5Cu), la adición de elementos de aleación busca mejorar no sólo la resistencia al picado sino también la resistencia a la corrosión en medios ácidos reductores. El elevado tenor de níquel mejora también el comportamiento frente a la corrosión bajo tensión.

En los casos en que se pretende una buena resistencia mecánica y no existe gran preocupación por la corrosión intergranular, los aceros inoxidables, con tenores de carbono en el rango de 0,04/0,10%, son recomendados. La precipitación de una fina red de carburos de cromo, tan perjudicial bajo el punto de vista de la corrosión, se torna benéfica cuando lo que interesa son las propiedades mecánicas.

Aumentos considerables en los tenores de cromo y níquel permiten elevar la temperatura de formación de cascarilla (escamado) de los aceros inoxidables austeníticos. El inoxidable es recomendado para trabajo al aire libre, a temperaturas inferiores a 925 °C en servicios continuos. En las mismas condiciones, el inoxidable, con cromo 24/26% y níquel 19/22%, resiste temperaturas de hasta 1150 °C. Es un material clasificado como acero inoxidable refractario.

Grandes aumentos de níquel, llevan a las aleaciones Ni-Cr-Fe, donde el elemento con mayor presencia en el material ya no es el hierro sino el níquel, Estos materiales no son conocidos como aceros inoxidables sino como aleaciones a base de níquel y presentan

excelente resistencia a la corrosión en diversos medios a altas temperaturas. El elevado tenor de níquel da también garantía de una buena resistencia a la corrosión bajo tensión.

Con un aumento del tenor de azufre con la finalidad de mejorar la maquinabilidad. La ductilidad y la resistencia a la corrosión quedan comprometidas por este aumento en la cantidad de azufre.

Los aceros inoxidable son divididos en grupos de acuerdo con el micro-estructura básico formado y con la posibilidad de endurecimiento por tratamiento térmico, los tres principales grupos son:

- **ACERO INOXIDABLE MARTENSITICOS:** Son Aceros aleados al cromo y endurecibles por tratamiento térmico, los más comunes son: AISI 410 y AISI 420.
- **ACERO INOXIDABLE FERRITICOS:** Son Aceros aleados al cromo, no endurecen significativamente por tratamiento térmico. El AISI 430 es el más representativo de este grupo. Y resistente a la corrosión más barata.
- **ACERO INOXIDABLE AUSTENITICOS:** Son Aceros aleados al cromo-níquel que solamente endurecen por deformación al frío (endurecimiento mecánico). La serie 300 (AISI 302, AISI 304, AISI 304L, AISI 310, AISI 316, AISI 316L ...) son los más significativos de este grupo, resistente a la corrosión.

Tratamiento térmico del acero

El tratamiento térmico en el material es uno de los pasos fundamentales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas para las cuales está creado. Este tipo de procesos consisten en el calentamiento y enfriamiento de un metal en su estado sólido para cambiar sus propiedades físicas. Con el tratamiento térmico adecuado se pueden reducir los esfuerzos internos, el tamaño del grano, incrementar la tenacidad o producir una superficie dura con un interior dúctil. La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecido.

Para conocer a que temperatura debe elevarse el metal para que se reciba un tratamiento térmico es recomendable contar con los diagramas de cambio de fases como el de hierro–hierro–carbono. En este tipo de diagramas se especifican las temperaturas en las que suceden los cambios de fase (cambios de estructura cristalina), dependiendo de los materiales diluidos.

Los tratamientos térmicos han adquirido gran importancia en la industria en general, ya que con las constantes innovaciones se van requiriendo metales con mayores resistencias tanto al desgaste como a la tensión. Los principales tratamientos térmicos son:

- **Temple:** Su finalidad es aumentar la dureza y la resistencia del acero. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior A_c (entre 900-950°C) y se enfría luego más o menos rápidamente (según características de la pieza) en un medio como agua, aceite, etcétera.
- **Revenido:** Sólo se aplica a aceros previamente templados, para disminuir ligeramente los efectos del temple, conservando parte de la dureza y aumentar la tenacidad. El revenido consigue disminuir la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, dejando al acero con la dureza o resistencia deseada. Se distingue básicamente del temple en cuanto a temperatura máxima y velocidad de enfriamiento.
- **Recocido:** Consiste básicamente en un calentamiento hasta temperatura de austenitización (800-925°C) seguido de un enfriamiento lento. Con este tratamiento se logra aumentar la elasticidad, mientras que disminuye la dureza. También facilita el mecanizado de las piezas al homogeneizar la estructura, afinar el grano y ablandar el material, eliminando la acritud que produce el trabajo en frío y las tensiones internas.
- **Normalizado:** Tiene por objeto dejar un material en estado normal, es decir, ausencia de tensiones internas y con una distribución uniforme del carbono. Se suele emplear como tratamiento previo al temple y al revenido.

Corrosión electrolítica

El agente agresor es otro metal de diferente potencial electroquímico puesto en contacto con el metal corroído a través de un medio acuoso (electrolito) que induce entre ellos un par eléctrico. Entre los elementos del par se producirá una corriente eléctrica, concretamente desde el ánodo (más negativo) al cátodo (más positivo), perdiendo el primero electrones, con la consiguiente descomposición del material, y acumulando el segundo los productos insolubles de la corrosión.

- La corrosión electrolítica resulta más peligrosa que la puramente química puesto que en ella los productos de la descomposición no se depositan sobre el elemento que sufre la corrosión, protegiéndolo, sino sobre el que la produce.
- El proceso se favorece cuando en el agua aparecen sales contaminantes y es mayor cuanto mayor es la intensidad de corriente, bien por una elevada diferencia de potencial entre los metales o por la presencia de corrientes parásitas (por ello se recomienda la puesta a tierra de las instalaciones eléctricas).
- El potencial eléctrico de los metales más comunes en la construcción es el siguiente:
 - C o b r e (e: +0,344)
 - H i e r r o (e: -0,440)
 - Z i n c (e: -0,762)
 - A l u m i n i o (e: -1,670)

Con lo cual, la combinación de cualquier metal con uno distinto, cuando exista un medio acuoso o electrolito, provocará un par eléctrico de mayor o menor intensidad.

De esta manera, la combinación en una misma instalación de conductos de cobre y acero galvanizado (recubrimiento de zinc) suele ser destructora, ya que al liberarse iones de cobre y depositarse en los tramos de tubería galvanizada se producirá la picadura de esta última por corrosión electrolítica. Las altas temperaturas favorecen este proceso.

Por otro lado, también existe diferencia de potencial eléctrico entre el acero y el óxido de hierro que se forma en su superficie, de modo que la oxidación de los metales férricos favorece la aparición de corrosión electrolítica, en lo que llamamos oxidación-corrosión.

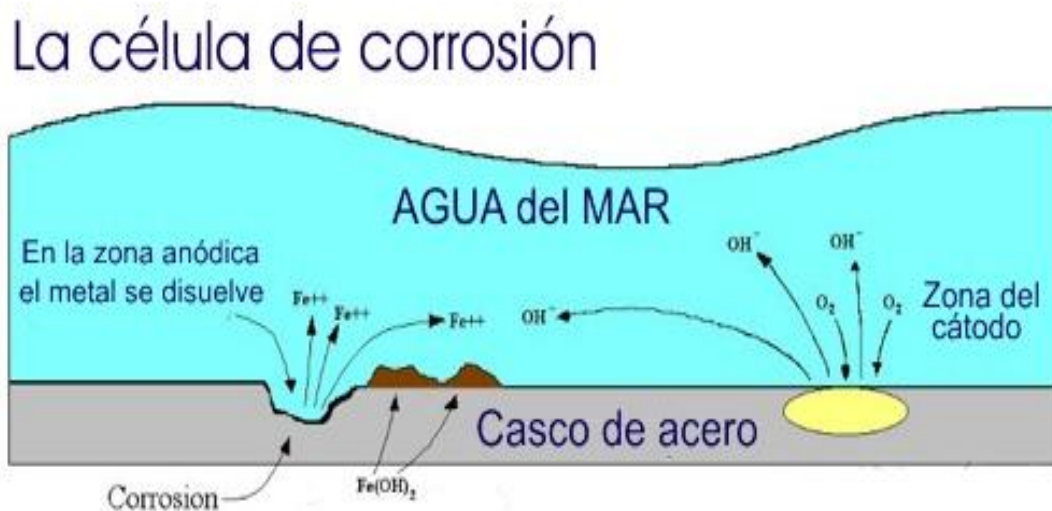


Fig. 2. Muestra la corrosión electrolítica

Corrosión por picado

La corrosión **por picado** es muy localizada y, eventualmente puede perforar el metal, de allí su peligrosidad. El picado es causado por la ruptura local de la película de óxido protector que cubre el metal. Frecuentemente las picaduras son difíciles de detectar ya que los pequeños agujeros son tapados por productos de corrosión y por ese motivo puede provocar fallos inesperados. Si bien la cantidad de metal que se disuelve es poca si ocurre una perforación podrá poner, por ejemplo, fuera de servicio un tubo de un intercambiador de calor, con la necesidad de la parada de planta para su recambio. Si ocurre el picado de un tanque, una cañería subterránea, etc., producirá severos daños en el ambiente (contaminación de suelos, fuentes de agua, etc) y pérdidas del producto. Los cloruros son aniones muy agresivos que causan picado en metales tales como aceros (al carbono e inoxidable) y aluminio y aleaciones entre otros. La disolución localizada en

general se inicia en los lugares donde ocurren heterogeneidades superficiales tales como inclusiones, heterogeneidades en la composición o en la estructura cristalina.

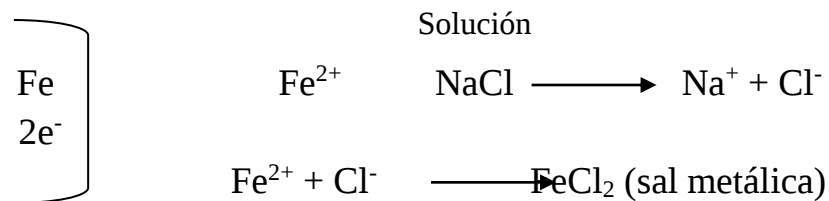


Fig. 3. Muestra la corrosión por picado

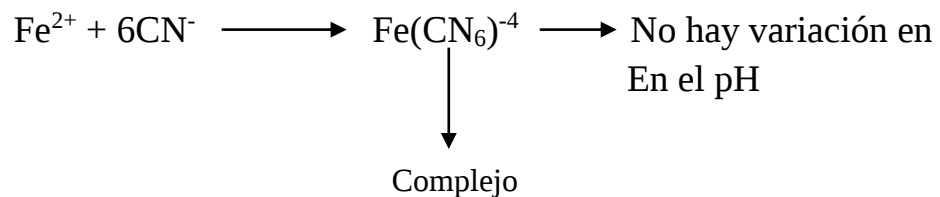
Con respecto al mecanismo de picado, existen diversas teorías:

➤ Teoría de la acidez libre

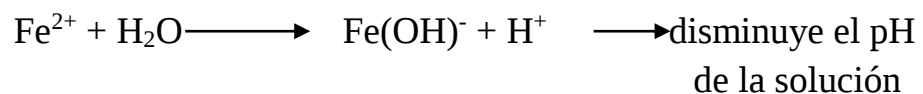
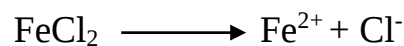
Esta teoría fue propuesta por Hoar[12], el observo que el picado estaba relacionado siempre con la presencia de aniones de ácidos fuertes.



- Si en la solución hay aniones débiles CN^-



- Si en la solución hay aniones de ácido fuerte.

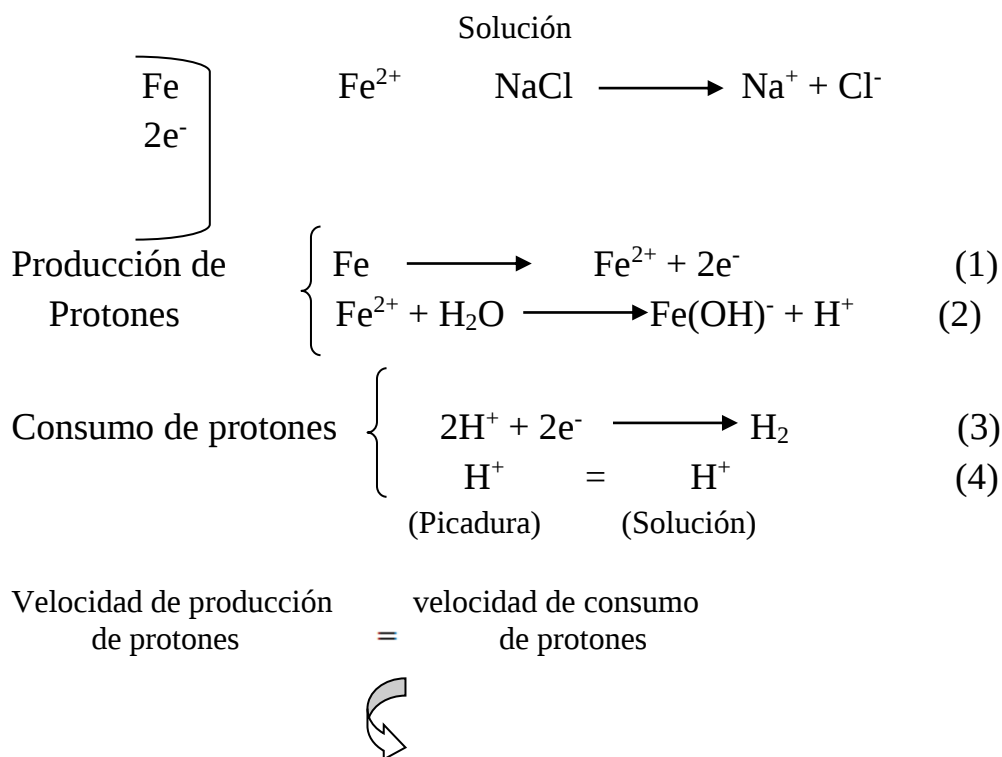


Al disolverse el metal se producen cationes que se encuentran en la solución con una cantidad equivalente de aniones a fin de mantener electroneutralidad. De esta forma se obtiene una solución de sal metálica.

Si los aniones corresponden a un ácido débil, la sal metálica precipitará o formará algún complejo, no produciéndose variación en el pH de la solución. En cambio, si los aniones corresponden a un ácido fuerte, habrá una hidrólisis de la sal metálica, produciéndose un aumento localizado de protones. Esta acidificación localizada aumenta la solubilidad del óxido pasivante y como resultado el óxido deja de formarse sobre la superficie del metal.

➤ Teoría de la acidificación

Mecanismo de acidificación localizada propuesto por Galvele [13] considera que la picadura se produce cuando se alcanza un nivel crítico de acidificación en la interface metal-solución en el punto de picado que impide la repasivación de la superficie metálica. Si la velocidad de producción de protones se iguala a la velocidad de consumo, esto es posible solamente al potencial de corrosión del metal que está en el interior de la picadura (E'_c). E'_c se define como el potencial mínimo al cual el picado puede ser sostenido, por lo que el potencial de picado será $E_p > E'_c$.



Ocurre a un potencial de corrosión E'_c

$$\begin{aligned} \dot{E}_c &= E_p \\ \dot{E}_c &< E_p \end{aligned}$$

El tratamiento térmico de Recocido de Disolución depende poco del tipo de Acero Inoxidable Austenítico, el tratamiento térmico se efectúa a temperaturas entre 1050-1150°C, la finalidad del calentamiento a temperaturas altas es para eliminar todos los vestigios de acritud, disolver la totalidad de carburos y obtener una solución sólida homogénea de austenita después de un proceso de laminado frío.

El enfriamiento rápido en agua es para mantener en solución a los carburos que tienden a precipitar. Los aceros más aleados o más carburados se calientan a la temperatura superior, el tiempo de calentamiento varía entre 5 y 60 minutos según las dimensiones de la pieza [14].

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Material de Estudio

La población de estudio está constituido por materiales de acero inoxidable austenítico del tipo 316-L, que presentan las siguientes propiedades mecánicas y físicas como se muestran en las tablas I, II y III.

TABLA I: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI 316-L

Elemento	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
% Peso	0,03max	0,5	1,4	17,0	11,5	2,2

Fuente: Fabricante Aceros Bohler.

TABLA II: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI 316-L

Dureza (Brinell) HB	Limite de Fluencia min Kp/mm ²	Resistenci a a la tracción Kp.mm	Alargamiento L=5d min %	Contracción min %
160	22	50-70	45	50

Fuente: Fabricante Aceros Bohler.

TABLA III: PROPIEDADES FÍSICAS DE ACERO AISI 316-L

Peso específico $\frac{g}{cm^3}$	Módulo de elasticidad a 20°C Kp/mm	Resistencia eléctrica a 20°C $Ohm\ mm^2/m$	Conductividad térmica a 20°C $Cal/cmS^{\circ}C$	Calor específico a 20°C $Cal\ g^{\circ}C$
7.95	20.300	0.75	0.035	0.12

Fuente: Fabricante Aceros Bohler.

Muestra de Estudio

Por las características de estudio que se realizó en la investigación es de tipo Correlacional, y de acuerdo a la técnica de contrastación de hipótesis es de tipo Experimental.

Diseño de la muestra

En el presente trabajo de investigación se emplearon siete probetas, las cuales se dividieron en dos grupos para su estudio:

Grupo 1: Análisis de Microestructura

Grupo 2: Ensayos Electroquímicos

TABLA IV: PROBETAS USADAS PARA ANÁLISIS DE MICROESTRUCTURA

GRUPO I	PROBETAS	USO
	01* 02** 03***	Micro Estructura

TABLA V: PROBETAS USADAS PARA ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS

GRUPO II	PROBETAS	ELECTROLITO	pH	USO
	04* 05***	NaCl al 2,5%	5,64	Ensayo Electroquímico
	06* 07***	NaCl al 2,5%	10,1	

- * Sección transversal sin T.T. de recocido de disolución a 1,050°C.
- ** Sección longitudinal de recocido de disolución a 1,050° C
- *** Sección transversal con T.T. de recocido de disolución a 1,050°C

Método

Variables en estudio

Las variables de estudio que comprende nuestra investigación, por su relación de dependencia, tipo y escala de medición se enmarca en la siguiente clasificación:

	VARIABLES	INDICADORES
Variable independiente	X: Tratamiento térmico	-Microestructura -Modificación de las propiedades mecánicas del material
Variable dependiente	Y: Resistencia a la corrosión de acero AISI 316-L	-Medio corrosivo de Na Cl al 2.5% a PH de 5.64 y 10.1 -Curvas de polarización

Procedimiento

El procedimiento desarrollado es el siguiente:

Preparación de probetas.

De una barra de forma cilíndrica de 7/8” se cortaron seis probetas de sección transversal de 3,88cm² de área aproximadamente con un espesor de 0,5cm.

La ultima probeta se cortó con sección longitudinal, luego se encapsularon con una resina epoxica.

Estas probetas fueron sometidas a un desbastado mecánico con lija N° 801200 y pulidas a espejo con pasta de diamante de 3µm.

Antes de realizar los estudios electroquímicos se les colocó a cuatro probetas un contacto eléctrico a través de un alambre de cobre debidamente aislado en la unión con la probeta. Las probetas fueron recubiertas con una resina epoxica, de forma tal de dejar un área expuesta de aproximadamente 1cm^2 .

Preparación del electrolito

Ensayos electroquímicos.

Las curvas de polarización se determinaron usando un potenciostato-galvanostato PJT35-2 Tacussel y una celda electroquímica de 3 electrodos. Como electrodos de trabajo se usaron las probetas N° 04, 05***, 06* y 07*** de acero AISI 316-L, un contraelectrodo de platino y un electrodo de calomel saturado (SCE) como electrodo de referencia.

Los potenciales tomados con el SCE fueron referidos al electrodo normal de hidrogeno (ENH).

La velocidad de barrido se fijó en $10\text{mV}/\text{min}$ para cada ensayo, previo a cada medición se permitió a las probetas alcanzar un potencial libre o potencial de corrosión estable de -400mV mediante una exposición directa en el medio corrosivo de NaCl al 2,5% durante 15 minutos a temperatura ambiente. Las probetas N° 04* -05*** trabajaron en el medio corrosivo a pH 5,64 y finalmente las probetas N° 06* - 07*** a pH 10,1.

Tratamiento Térmico de recocido de Disolución

El tratamiento térmico que se efectúa a las probetas N° 03***, 05*** y 07*** se denominó “**Tratamiento Térmico de Recocido de Disolución**” y consiste de un calentamiento lento y gradual en horno hasta una temperatura de $1,050^{\circ}\text{C}$ durante 30min. Y luego un enfriamiento en agua a temperatura ambiente [14].

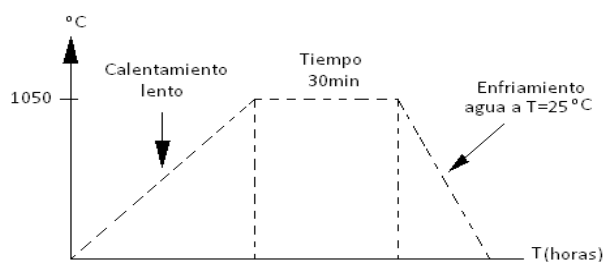


Fig. 4: Muestra el esquema del T.T. usado.

Para justificar el tratamiento térmico de recocido de disolución a 1050°C se analizó el diagrama de equilibrio pseudobinario Fe-Cr-Ni para un 70% de Fe.(Fig. 4).

La razón de usar este diagrama Fe-Cr-Ni es que a 1050°C para la muestra usada del acero AISI 316-L de composición: Cr=17% y Ni:11,5% estamos en la fase austenita. Se eligió la temperatura de 1050°C para modificar la microestructura del material de suministro que fue laminado en frío y así obtener una microestructura totalmente austenítica de granos casi uniformes, después de un enfriamiento en agua a 25°C

Ataque Químico para revelar la Microestructura

Para revelar la microestructura del Acero AISI 316-L se usaron probetas N° 01^{*}, 02^{**} y 03^{***} con acabado a espejo.

El ataque químico por inmersión que se practicó a las probetas fue en una solución de glicerregia[15], la que se preparó con:

- Ácido Nítrico: 40ml.
- Ácido Clorhídrico: 120ml.
- Glicerina: 120ml.

El tiempo de inmersión duró 10 minutos aproximadamente a temperatura ambiente, revelándose una microestructura totalmente austenítica, vista a través del microscopio óptico metalúrgico Neophot 21.

Calculo de la Velocidad de Corrosión

La determinación de la velocidad de corrosión se determinó usando el Método de Intersección de Taffel. La ecuación de Taffel [10] es:

$$E = b + m \log J \quad (1)$$

Donde:

E = sobretensión en m v.

J = densidad de corriente en m A/cm²

b y m son constantes

Las constantes b y m se determinan aplicando el método de mínimos cuadrados:

$$m = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{1}{n} (\sum y - m \sum x) \quad (3)$$

Con estos datos obtenemos rectas tanto para la zona anódica como catódica.

$$Y_0 = b + mx \dots\dots\dots \text{recta catódica} \quad (4)$$

$$Y_a = b + mx \dots\dots\dots \text{recta anódica} \quad (5)$$

Igualando las ecuaciones (4) y (5) encontramos el I_{corr} que representa la intensidad de corriente. Como se tiene una superficie de 1cm^2 , entonces el J_{corr} lo obtenemos dividiendo el $I_{\text{corr}}/1\text{cm}^2$.

Las leyes de Faraday establecen que se necesita 964936 C para disolver o liberar un equivalente gramo de cualquier elemento.

La velocidad de corrosión de un metal o aleación se determina conociendo el J_{corr} y usando las leyes de Faraday, con la cual se obtiene la fórmula para la velocidad de corrosión y velocidad de penetración

$$V_{\text{corr}} \left(\frac{g}{\text{cm}^2 s} \right) = \frac{J_{\text{corr}} \left(\frac{A}{\text{cm}^2} \right)}{96.493C} W_{eq}(g) \quad (6)$$

$$P_{\text{corr}} \left(\frac{mm}{s} \right) = \frac{J_{\text{corr}} \left(\frac{A}{\text{cm}^2} \right)}{96.493C \rho \left(\frac{g}{\text{cm}^3} \right)} W_{eq}(g)$$

Donde:

W_{eq} : es el peso equivalente del material

ρ : es la densidad del material

Además:

$$\sum_{i=1}^m W_{eq} = \frac{f_i M_i}{n_i} ;$$

Donde f_i , M_i , n_i son la fracción atómica, el peso atómico y el número de electrones requerido para la oxidación del i -ésimo componente de la aleación. El peso equivalente del Acero AISI 316-L es de 27,58 gramos.

Curvas de Polarización

Una curva de polarización se caracteriza por contener información acerca del potencial de corrosión (E_{corr}), el potencial de Flade, el potencial de picado (E_p) y la corriente de pasivación [16].

La forma de la curva varía de acuerdo a varios parámetros tales como: concentración del medio, el pH del medio, velocidad de barrido.

En algunos casos no se puede distinguir con precisión algunos parámetros tales como: potencial de Flade y la delimitación definida de la zona pasiva, etc.

En este caso las curvas de polarización se determinaron con una velocidad de barrido de $10 \text{ mV}/\text{min}$ y cuyo PH se hizo variar de 5.64 a 10.11 (gráficos N° 02 y 03), usando una solución acuosa de 2.5% de Na Cl.

5.-RESULTADOS

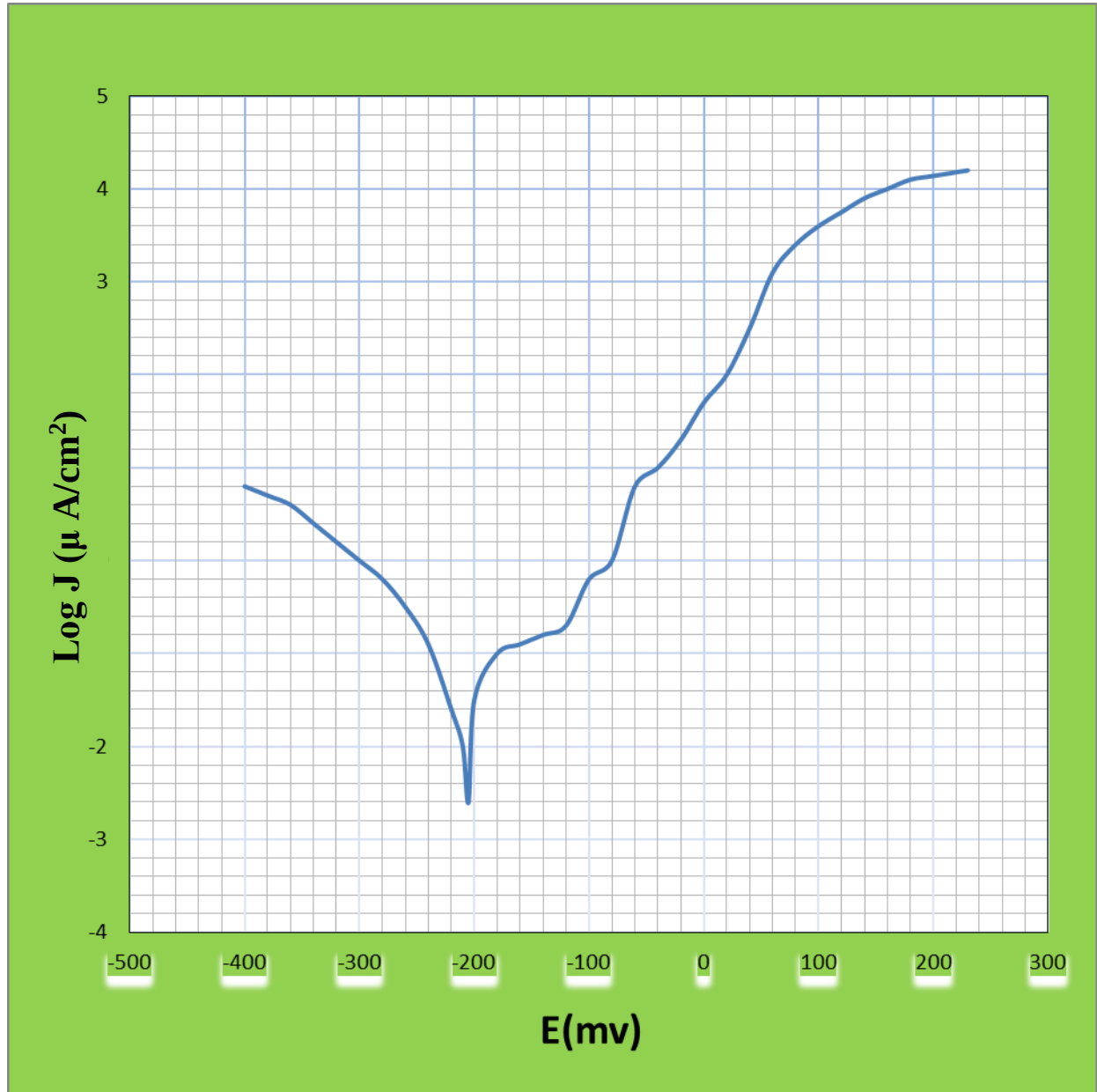
CUADRO N° 01

Graficas	V_{corr} (g/cm ² .año)	J_{corr} μA/cm ²	E_{corr} (mv)	E_p (mv)	Rango de pasivacion (mv)
N° 1 sin T.T. de recocido de disolución a 1050°C, solución al 2,5% de NaCl al pH=5,64	0,358	0,0398	-200	--	--
N°2 con T.T. de recocido de disolución a 1050°C, solución al 2,5% de NaCl al pH=5,64	0,233	0,0295	-195	160	40
N° 3 sin T.T. de recocido de disolución a 1050°C, solución al 2,5% de NaCl al pH=10.1	0,322	0,0357	-10	163,7	106,9
N°4 con T.T. de recocido de disolución a 1050°C, solución al 2,5% de NaCl al pH=10.1	0,182	0,0202	+50	580	430

Fuente: elaborado por los autores

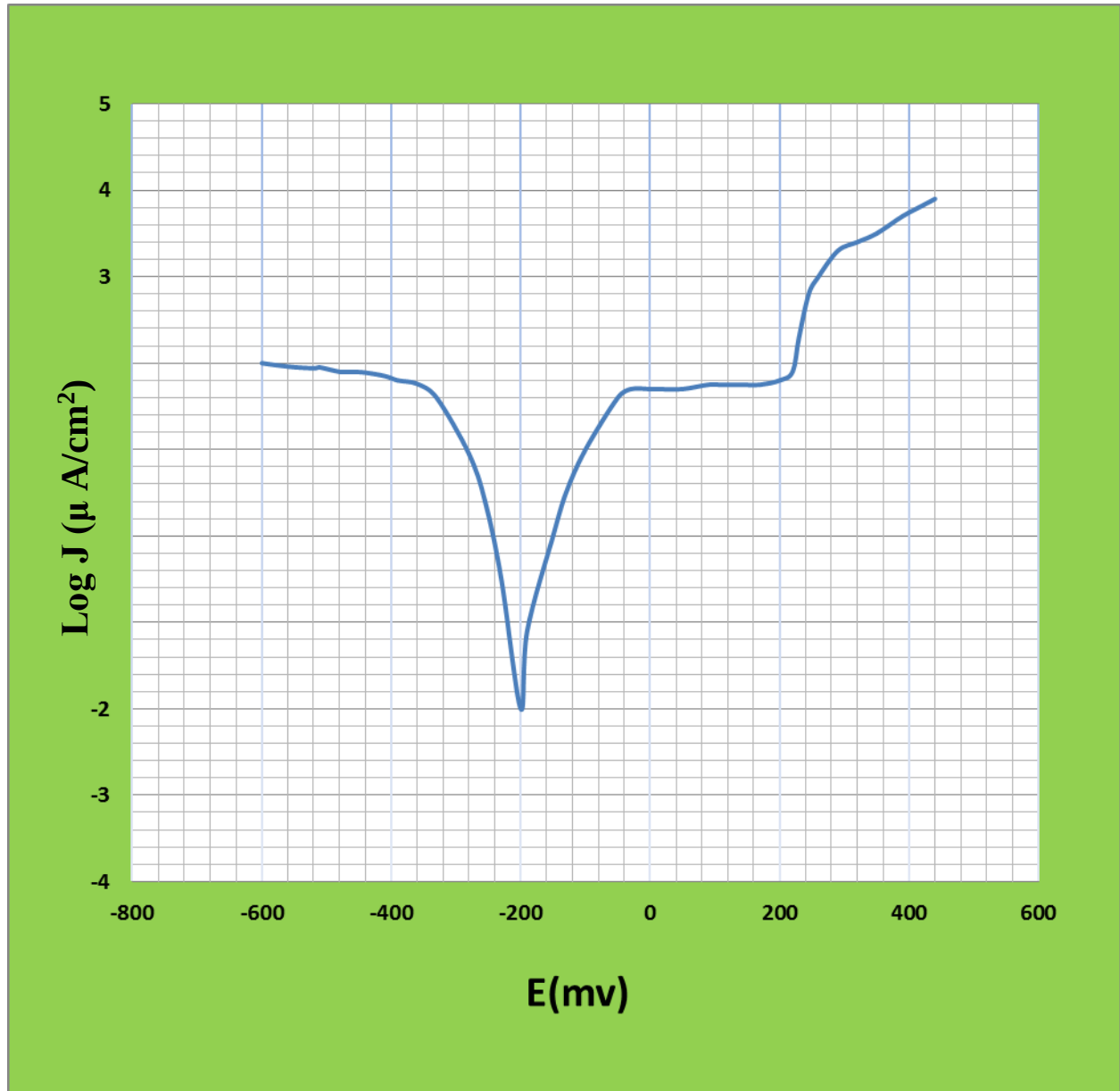
En el cuadro se puede observar la velocidad de corrosión del Acero AISI 316-L, sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico, a PH 5.64 y 10.1 respectivamente.

GRÁFICO N°1: Acero AISI 316-L, sin tratamiento térmico de recocido de disolución a 1050°C en una solución de NaCl al 2.5% y PH 6.64



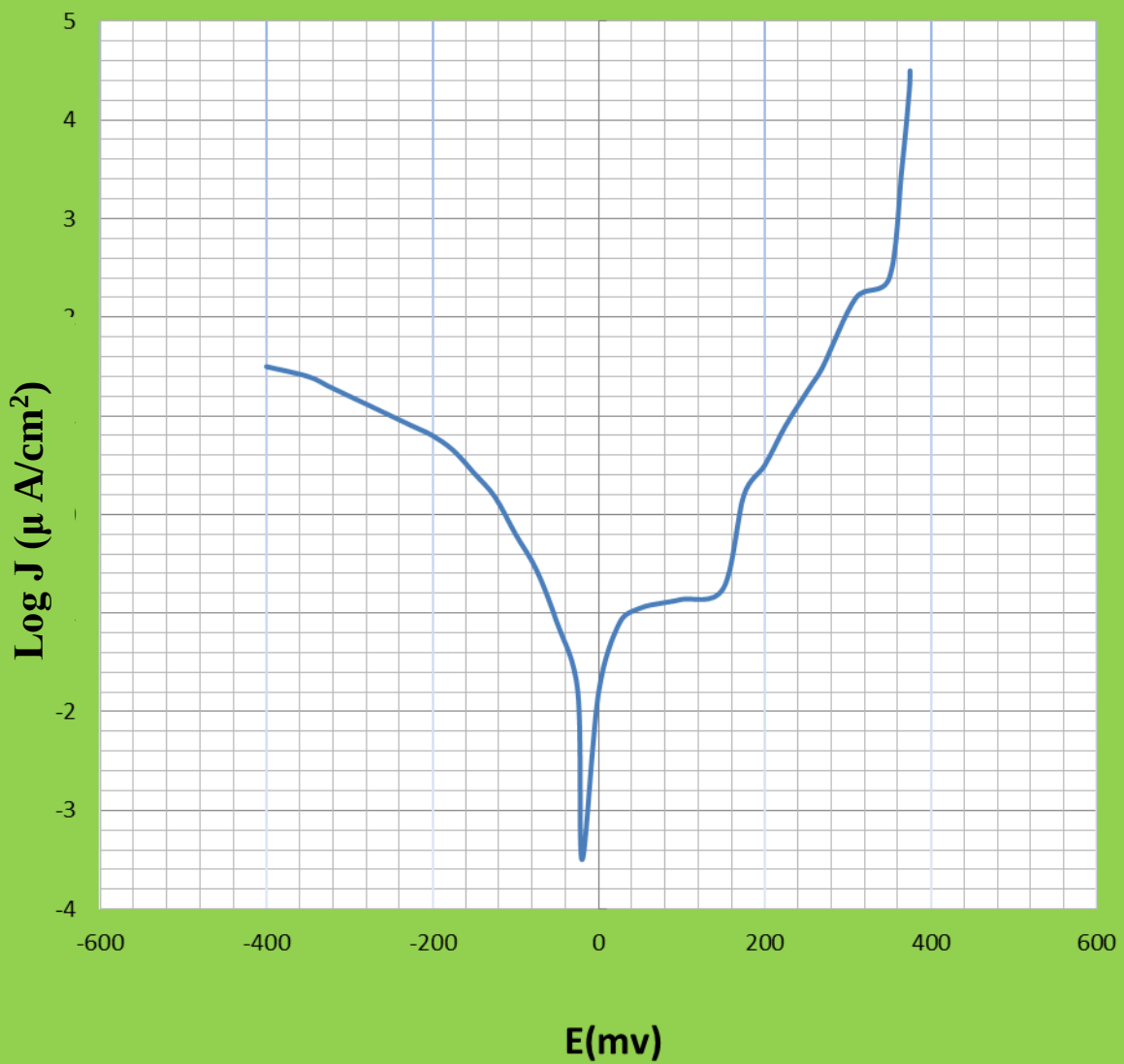
Su potencial de corrosión es de -200mV, no presenta potencial de picado ni rango de pasivación

GRÁFICO N°2: Acero AISI 316-L, con tratamiento térmico de recocido de disolución a 1050°C en una solución de NaCl al 2.5% y PH 6.64



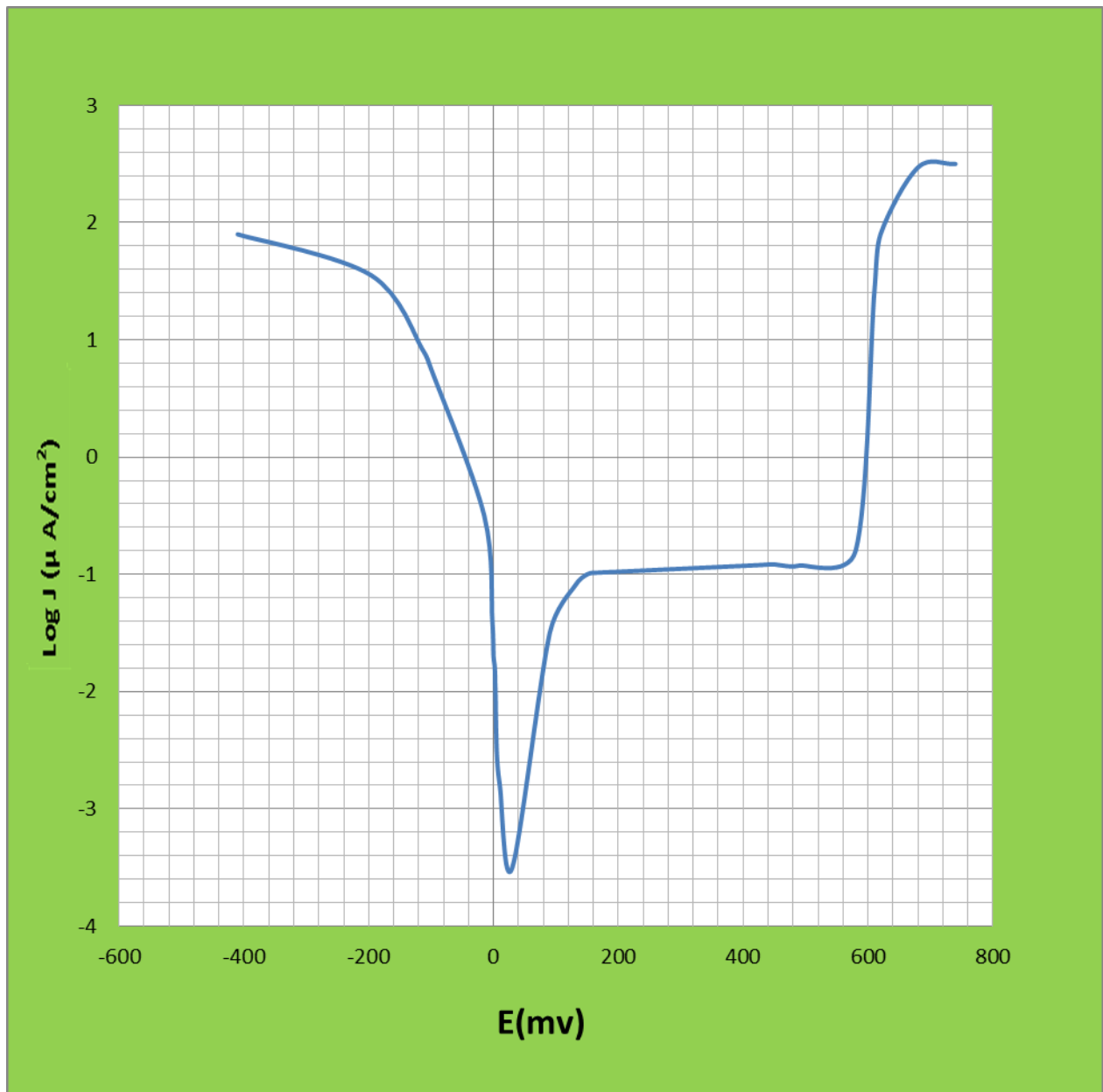
Su potencial de corrosión es de -195mV, su potencial de picado es de 160 mV y su rango de pasivación es de 40mV

GRÁFICO N°3: Acero AISI 316-L, sin tratamiento térmico de recocido de disolución a 1050°C en una solución de NaCl al 2.5% y PH 10.1



Su potencial de corrosión es de -10mV, su potencial de picado es de 163.7 mV y su rango de pasivación es de 106,9mV

GRÁFICO N°4: Acero AISI 316-L, con tratamiento térmico de recocido de disolución a 1050°C en una solución de NaCl al 2.5% y PH 10.1



Su potencial de corrosión es de +50mV, su potencial de picado es de 580 mV y su rango de pasivación es de 430mV

6.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el cuadro N°1 podemos observar que la velocidad de corrosión disminuye cuando las muestras son sometidas a tratamiento térmico, notándose además que cuando el PH es mayor, menor será la velocidad de corrosión, esto quiere decir que; El acero AISI 316-L con tratamiento térmico de recocido de disolución expuesto en una solución de Na Cl al 2.5% y PH 10.1, presenta un mejor comportamiento de resistencia a la corrosión ya que su V_{corr} es de $0.182 \frac{g}{cm^2 año}$, frente al mismo acero con el mismo tratamiento térmico y

en el mismo medio, con PH=5.64 que presenta $V_{corr}=0.233 \frac{g}{cm^2 año}$.

Esto se debe a que el tratamiento térmico de recocido de disolución mejora la resistencia a la corrosión del Acero AISI 316-L

También se observa que el potencial de corrosión se desplaza desde un valor de -200mv hasta un rango de 50mv, esto quiere decir que el Acero AISI 316-L se va comportando mejor en medios donde el PH es más básico

Con respecto al potencial de picado, se observa que va aumentando desde 160mv, para una muestra con comportamiento térmico de recocido de disolución a 1050°C, en una solución de Cl Na al 2.5% y PH 5.64, hasta 580mv, para la misma muestra con recocido de disolución a 1050°C en una solución de ClNa al 2.5% y PH 10.1. Esto quiere decir que el potencial de picado aumenta, por tanto el Acero AISI316-L, demora más en picarse

Además, el rango de pasivación se incrementa desde 40mv, hasta 430mv; esto indica que el rango de pasivación se va haciendo más estable, es decir el Acero AISI 316-L se resiste mejor a la corrosión a PH básicos

A PH =5.64 hay una mayor concentración de protones H^+ en la solución, que al combinarse con los iones Cl^- producen HCl que acidifica más la solución impidiendo la regeneración de la película pasivante. Cuando cambiamos el PH de la solución a 10.1, la concentración de protones H^+ disminuye, aumentando la concentración de oxhidrilos OH^- que probablemente actúan como inhibidores incrementando el rango de pasivación.

El otro efecto es el incremento del rango de pasivación debido a la posible presencia de molibdeno (Mo), elemento que tiene un efecto sinérgico

7.- CONCLUSIONES

- El tratamiento térmico de recocido de disolución mejora la resistencia a la corrosión del Acero AISI 316-L.
- Cuando el PH de la solución de Cl Na al 2.5% aumenta de 5,64 a 10.1, la resistencia a la corrosión del Acero AISI 316-L aumenta.
- El potencial de picado del acero AISI-316-L con tratamiento térmico de recocido de disolución aumenta de 160 mV a 580mV, al variar el PH de 5.64 a 10.1

8.- RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar trabajos para valores de PH más ácidos y más básicos, para realizar comparaciones del potencial de corrosión con respecto al Ph.

Además ,sería necesario realizar análisis de micro estructura del Acero AISI 316-L ,sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico ,a fin de observar el comportamiento de la micro estructura del material , a fin de eliminar los granos austeníticos maclados por efecto de laminado en frio.

BIBLIOGRAFÍA

1. Hey, A “Temas sobre aceros inoxidable”. Comisión Nacional de Energía Atómica. Buenos Aires – Argentina (1988).
2. Fontana, M. “Corrosión Engineering”. 3ª Edición McGraw-Hill. Inc. New York (1985).
3. Molera, P “Metales Resistentes a la Corrosión”. Editorial Marcombo S.A. Barcelona-España (1990).
4. Conicet.”Desarrollo de los Aceros Inoxidables.”Universidad de la Plata-Argentina (1988).
5. Kamachi, M. Hama, S. “Pitting Crevice and Intergranular Corrosion Resistance of Titanium Modified Austenitic Stainless Steel”, Indira Gandhi Central For Atomic Research Kalpakkam 60, 102 .India.(2000).
6. Sedrik, A.J.”Corrosion of Stainless steel”. John Wiley & Sons, New York (2002).
7. Galvele. “Passivity and its Breakdown on Iron and Iron Base Alloys” . NACE, Houston (2006).
8. Prado, S. “Tesis Doctoral: Influencia de Óxidos y Sulfuros en Aleaciones Base Hierro sobre la Susceptibilidad de estos Materiales al Daño por Hidrógeno y la Corrosión Localizada”. San Carlos de Bariloche – Argentina (1991).
9. Uhlig, H.H. y Revie R.W. ”Corrosion and Corrosion Control” 3ª Edición, John Wiley & Sons. New York. (2005).
10. Galvele, J. “Corrosión” Departamento de Materiales .Editorial C.N.E.A. Buenos Aires-Argentina.(2000)
11. Galvele, J.R. “Treatise on Materials Science and Technology”. Ed J.C. Wiley Academic Press. London (2001).
12. Colombero, R. y Hochmann, J.”Aceros Inoxidables, Aceros Refractarios”.3ª Edición Unmo Bilbao-España (2005).
13. Callister, W. “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales” Editorial Reverte, S.A. Tomo I (1990).

ANEXOS

TABLA I

E(mV)	J($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Log J($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
230	15848.90	4.2
200	13803.80	4.14
180	12589.20	4.1
160	10000.00	4
140	7943.30	3.9
120	5623.40	3.75
100	3981.00	3.6
80	2512.00	3.4
60	1258.90	3.1
40	316.20	2.5
20	100.00	2
0	50.10	1.7
-20	19.98	1.3
-40	10.00	1
-60	6.30	0.8
-80	1.00	0
-100	0.63	-0.2
-120	0.20	-0.7
-140	0.16	-0.8
-160	0.12	-0.9
-180	0.10	-1
-200	0.03	-1.5
-205	0.0025	-2.6
-210	0.01	-2
-220	0.025	-1.6
-240	0.125	-0.9
-260	0.31	-0.5
-280	0.63	-0.2
-300	1.00	0
-320	1.60	0.2
-340	2.55	0.4
-360	4.00	0.6
-380	5.05	0.7
-400	6.50	0.8

TABLA II

E(mV)	J($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Log J($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
440	7943.30	3.9
420	6309.60	3.8
390	3981.00	3.6
350	3162.00	3.5
320	2512.00	3.4
290	1995.00	3.3
260	1000.00	3
245	635.00	2.8
230	199.50	2.3
220	79.50	1.9
200	63.00	1.8
170	56.50	1.75
140	56.50	1.75
110	56.50	1.75
90	56.50	1.75
50	50.50	1.7
10	50.50	1.7
0	50.50	1.7
-30	50.50	1.7
-50	40.00	1.6
-100	10.00	1
-130	3.50	0.5
-150	1.00	0
-190	0.08	-1.1
-200	0.01	-2
-230	0.30	-0.5
-255	2.50	0.4
-280	9.00	0.95
-330	40.00	1.6
-360	57.50	1.76
-390	63.00	1.8
-410	70.80	1.85
-440	77.80	1.89
-460	79.50	1.9
-480	79.50	1.9
-510	90.00	1.95
-520	88.00	1.94
-560	92.00	1.96
-600	100.00	2

TABLA III

E(mV)	J($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Log J($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
375	31620.00	4.5
374	19950.00	4.3
365	3162.00	3.5
350	251.00	2.4
310	158.50	2.2
270	31.50	1.5
255	19.95	1.3
225	7.95	0.9
200	3.15	0.5
175	1.60	0.2
150	0.18	-0.75
100	0.138	-0.86
75	0.12	-0.9
50	0.11	-0.95
25	0.079	-1.1
0	0.016	-1.8
-20	0.0003	-3.5
-25	0.016	-1.8
-50	0.079	-1.1
-75	0.27	-0.56
-100	0.60	-0.2
-125	1.52	0.18
-150	2.65	0.42
-175	4.50	0.65
-200	6.50	0.8
-225	7.95	0.9
-250	10.00	1
-275	12.60	1.1
-300	16.00	1.2
-325	19.95	1.3
-350	25.00	1.4
-400	31.50	1.5

TABLA IV

E(mV)	J($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Log J($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
740	315.00	2.5
680	295.00	2.47
620	79.00	1.9
610	25.00	1.4
580	0.15	-0.8
490	0.118	-0.925
470	0.117	-0.93
450	0.12	-0.915
430	0.120	-0.92
410	0.118	-0.925
390	0.117	-0.93
370	0.116	-0.935
350	0.115	-0.94
330	0.114	-0.945
310	0.113	-0.95
290	0.112	-0.955
270	0.111	-0.96
250	0.110	-0.965
230	0.100	-0.97
210	0.099	-0.975
190	0.098	-0.98
170	0.097	-0.985
150	0.10	-1
130	0.079	-1.1
90	0.031	-1.5
30	0.0003	-3.5
5	0.00158	-2.8
5	0.0030	-2.5
3	0.01	-2
2	0.0158	-1.8
0	0.0199	-1.7
-2	0.0398	-1.4
-15	0.316	-0.5
-100	5.62	0.75
-112	7.95	0.9
-196	35.50	1.55
-410	158.50	2.2

