

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE UN ACERO
INOXIDABLE MODIFICADO CON VANADIO Y MOLIBDENO FABRICADO POR
FRANCO GARCÍA INGENIERÍA S.A.S

HEILYN TATIANA CASTRO TORRES
ADRIANA JULIETH PINEDA MONTAÑEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2017

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE UN ACERO
INOXIDABLE MODIFICADO CON VANADIO Y MOLIBDENO FABRICADO POR
FRANCO GARCÍA INGENIERÍA S.A.S

HEILYN TATIANA CASTRO TORRES
ADRIANA JULIETH PINEDA MONTAÑEZ

Trabajo de grado de investigación para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico

Director

SANDRA JUDITH GARCÍA VERGARA
Ph.D. en corrosión

Codirector

RICARDO ANDRÉS GARCÍA VERGARA
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2017

AGRADECIMIENTOS

Nuestros agradecimientos más sinceros a Dios, nuestras familias, amigos y nuestra directora de proyecto por toda su ayuda, comprensión y paciencia a lo largo del desarrollo de nuestro proyecto.

Agradecemos de igual manera a los técnicos de la escuela de Ingeniería metalúrgica, especialmente al señor Ambrosio, Domingo y Sergio por toda su colaboración y apoyo. Al Ingeniero David Montilla por brindarnos sus conocimientos.

Finalmente agradecemos enormemente al grupo de investigación de corrosión GIC y al laboratorio de Microscopía electrónica por toda la ayuda prestada.

Dios los bendiga a todos.

DEDICATORIA

Agradezco a DIOS por su presencia en mi vida, por las oportunidades que me ha dado y por todos los caminos que abrió para que este proyecto se hiciera realidad.

A mis papás por todo su amor, sus oraciones y apoyo incondicional, a mi hermano, abuelos, tíos y todas las personas que de una u otra manera me ayudaron en esta etapa de mi vida.

Juan, Jorge y Cata, mis AMIGOS, por su incondicionalidad, sus consejos y jalones de oreja, son los mejores y los quiero con todo el corazón.

Y finalmente a la mejor de todas, a mi amiga Adriana, mi mechitas, por su fortaleza y buen corazón, sin su ayuda, su paciencia y su determinación, este proyecto no hubiese sido posible.

MIL GRACIAS A TODOS Y QUE DIOS LOS BENDIGA.

Heilyn.

DEDICATORIA

A quienes amo con todo mi corazón, mi mami Delix, mi papi Carlos y mi hermano Carlos quienes son el motor diario de mi vida y a quienes trasnoché y molesto con mis tonteras.

A la persona más maravillosa del mundo, mi prometido Jorgis, quien sin su infinita ayuda y apoyo este proyecto no hubiese sido posible.

A mis amigos, Monchis, Cata y Heilyn, por su disposición y apoyo.

Y sobre todo al dueño de mi todo papito Dios por todo cuanto tengo, soy y seré.

Pocas son las palabras para agradecer todo el amor e incondicionalidad conmigo a cada una de estas personas que han construido mi vida.

ADRY

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN.....	16
1. OBJETIVOS	18
1.1. OBJETIVO GENERAL	18
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	18
2. MARCO TEÓRICO.....	19
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	24
3.1. RECEPCIÓN DE LAS MUESTRAS.....	25
3.2. ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA	25
3.3. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL.....	25
3.4. MEDIDAS DE DUREZA	26
3.5. EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.....	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1. INSPECCIÓN VISUAL.....	28
4.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO	28
4.3. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL.....	30
4.3.1 Difracción de rayos X.	31
4.3.2 Microscopia electrónica de barrido y análisis por EDS.....	32
4.4. MEDICIÓN DE DUREZA	34
4.5. EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.....	34
5. CONCLUSIONES	40
6. RECOMENDACIONES.....	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

BIBLIOGRAFIA 45

ANEXO..... 47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del acero inoxidable en estudio (% peso).	29
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología usada para el desarrollo del proyecto.....	24
Figura 2. Fotografías del material de estudiado entregado por la empresa Franco García Ingeniería S.A.S	28
Figura 3. Micrografía óptica del acero inoxidable en estado de suministro, atacada con ácido oxálico al 10% en volumen. a) Superficie del acero a 200X y b) Límite de grano a 1000X.....	31
Figura 4. Difractograma del acero inoxidable en estado de suministro.....	32
Figura 5. Micrografías electrónicas del acero inoxidable en estudio y análisis puntual por EDS. (a) Superficie del acero en estado de entrega. (b) Morfología de un límite de grano. (c) y (d) Morfología de otro límite de grano.....	34
Figura 6. Curva del potencial de circuito abierto que se obtuvo en una solución de NaCl 3,5% a temperatura ambiente para el acero inoxidable modificado con vanadio y molibdeno en estado de entrega.	36
Figura 7. Curvas de resistencia a la polarización del acero inoxidable en estado de entrega.	36
Figura 8. Curvas polarización potenciodinámica del acero en estudio en una solución 3.5% en peso de NaCl a temperatura ambiente.....	37

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Diagrama Hierro (Fe) – Cromo (Cr).....	47
Anexo B. Influencia del carbono ampliando el bucle gamma	48
Anexo A. Diagrama de Shaeffler	49
Anexo B. Equivalencias entre durezas Brinell, Rockwell, Vickers y Shore y la resistencia a la Tracción.	50
Anexo C. Ejemplo para el cálculo de velocidad de corrosión, prueba 1 acero inoxidable en estado de entrega.....	51

RESUMEN

TÍTULO: DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSION DE UN ACERO INOXIDABLE MODIFICADO CON VANADIO Y MOLIBDENO FABRICADO POR FRANCO GARCÍA INGENIERÍA S.A.S*

AUTORES: Castro Torres, Heilyn Tatiana y Pineda Montañez, Adriana Julieth**

PALABRAS CLAVES: Acero inoxidable, difracción de rayos x, microscopia electrónica de barrido, corrosión

DESCRIPCIÓN: Los aceros inoxidables han ocupado, sin duda alguna, un lugar muy importante dentro de los materiales de interés tecnológico desarrollados en el siglo XX y XXI. Es por esta razón que la empresa FRANCO GARCÍA INGENIERÍA S.A.S decide incursionar en la fabricación de un acero inoxidable modificado con vanadio y molibdeno. El presente trabajo de investigación está enfocado en la caracterización química y electroquímica de dicho acero para determinar su resistencia a la corrosión y evaluar su carácter inoxidable. La metodología del estudio comprendió la inspección visual de la pieza suministrada y el análisis de su composición química mediante espectroscopía de emisión óptica, la cual reveló un primer indicio del tipo de acero inoxidable en estudio. La caracterización microestructural se basó en una difracción de rayos x (DRX) junto con un análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB). Para la caracterización electroquímica se determinó el potencial a circuito abierto del electrodo de trabajo y se evaluó la resistencia a la polarización utilizando una diferencia de potencial de -10mV hasta los 10mV con una velocidad de barrido de 0,166mV/s. Con los resultados de potencial Vs corriente fue posible determinar la resistencia a la polarización del sistema y así relacionar este resultado con las pendientes de la curva de polarización potenciodinámica. Finalmente, la extrapolación Tafel de los segmentos lineales obtenidos cerca al potencial de corrosión permitieron hallar el I_{corr} y conocer la velocidad de corrosión del acero modificado. Concluyéndose finalmente que el acero Inoxidable suministrado por la empresa precipitó carburos de cromo en los límites de grano haciendo al acero susceptible a la corrosión intergranular debido al alto contenido de carbono de 0,577 % en peso.

*Proyecto de grado de investigación.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
Director: Ph.D. Sandra Judith García Vergara. Codirector: Ing. Ricardo Andres García Vergara

ABSTRACT

TITLE: DETERMINATION OF THE CORROSION RESISTANCE OF A MODIFIED STAINLESS STEEL WITH VANADIUM AND MOLYBDENUM MADE BY FRANCO GARCÍA INGENIERÍA S.A.S*

AUTHORS: Castro Torres, Heilyn Tatiana y Pineda Montañez, Adriana Julieth**

KEYWORDS: Stainless steel, X-Ray Diffraction, Scanning Electron Microscopy corrosion

DESCRIPTION: Stainless steels have occupied, no doubt, a very important place in the technological interest materials developed in the century XX and XXI. Is for this reason that the company FRANCO GARCIA INGENIERÍA S.A.S has decided to venture into the fabrication of a modified stainless steel with vanadium and molybdenum. The present research is focused on the chemical and electrochemical characterization of this steel to evaluate its corrosion resistance and its stainless character. The methodology of this study included visual inspection of the piece supplied and analyzing its chemical composition by optical emission spectroscopy, which revealed a first indication of the type of stainless steel in study. Microstructural characterization was based on an x-ray diffraction (XRD) and analysis by scanning electron microscopy (SEM). Then, for the Electrochemical characterization first, was determined the open circuit potential of the working electrode and the polarization resistance was evaluated using a potential difference of 10mV -10mV even with a scan rate of 0,166mV / s. With the results of the potential Vs current, was possible to determine the polarization resistance of the system and thus relate this result to the slopes of the potentiodynamic polarization curve. Finally, the Tafel extrapolation of the line segments obtained by the corrosion potential allowed to find out the I_{CORR} and to know the corrosion rate of the modified steel. In conclusion, the company supplied stainless steel precipitated chromium carbides at the grain boundaries making the steel susceptible to intergranular corrosion due to the high carbon content of 0.577%.

*Degree project of research project

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
Adviser: Ph.D. Sandra Judith García Vergara. Coadviser: Ing. Ricardo García Vergara

INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidable tienen un gran interés a nivel industrial, debido a que presentan una excelente combinación de buenas características mecánicas y una elevada resistencia a la corrosión. Estos aceros se clasifican, considerando su estructura metalúrgica, en austeníticos, martensíticos, ferríticos, dúplex y endurecidos por precipitación [1]. Los aceros inoxidable austeníticos son los más ampliamente usados porque poseen excelentes propiedades a baja temperatura y buena resistencia a altas temperaturas. Sólo pueden ser endurecidos mediante trabajo en frío y no son magnéticos. La resistencia a la corrosión es excelente en un amplio rango de ambientes corrosivos. Exhiben una buena soldabilidad y presentan excelentes propiedades de tenacidad y ductilidad [2].

Aunque ya se mencionó que poseen excelente resistencia a la corrosión, no dejan de ser susceptibles a cierto tipo de corrosión que puede ser originada por los cambios estructurales inducidos por un determinado proceso de fabricación o por la temperatura a la que se somete durante su vida útil. Existen circunstancias o procesos tecnológicos en los cuales no ofrecen una respuesta aceptable al ser sometidos por ejemplo a agentes químicos o cuando se producen cambios desfavorables de la estructura interna del acero inoxidable [2]. Para mejorar la susceptibilidad que poseen estos aceros y a su vez mejorar las propiedades mecánicas dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar, se aprovecha la ventaja que tienen para modificar su composición al adicionar elementos aleantes que aumentarán su resistencia a la corrosión y mejorarán significativamente sus propiedades mecánicas. La empresa FRANCO GARCÍA INGENIERÍA S.A.S decide modificar un acero inoxidable cambiando su composición química agregando elementos

como el vanadio y molibdeno, para mejorar sus propiedades sin afectar la principal característica de estos aceros que es su resistencia a la corrosión y así incursionar en la industria colombiana como una de las primeras empresas en realizar este tipo de modificaciones con éxito.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la resistencia a la corrosión de un acero inoxidable modificado con vanadio y molibdeno fabricado por Franco García ingeniería S.A.S.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar química y microestructuralmente el acero modificado con vanadio y molibdeno.
- Determinar la resistencia a la corrosión de un acero inoxidable modificado con vanadio y molibdeno mediante técnicas electroquímicas.

2. MARCO TEÓRICO

Los aceros inoxidable son aleaciones base hierro, cromo, carbono, a los cuales se les añaden otros elementos, tales como níquel, molibdeno, manganeso, silicio y titanio, entre otros, que les confieren una buena resistencia a algunos tipos de corrosión en determinadas aplicaciones industriales. Esta resistencia a la corrosión es la propiedad más importante de este tipo de aceros y la razón de su existencia y su uso extendido. Esta propiedad se debe a la presencia de una película de óxido de cromo, adherente, invisible, densa y estable, con un espesor entre 2-3 nm denominada “capa pasiva” que aísla al acero del medio agresivo [3].

Las propiedades de los aceros inoxidable son influenciadas significativamente por su composición química, la que a su vez determina las características microestructurales de estas aleaciones [4]. En la actualidad, los aceros inoxidable se pueden clasificar en forma general en 5 grandes familias: austeníticos, ferríticos, martensíticos, dúplex y endurecidos por precipitación, siendo los austeníticos la familia con mayor número de aleaciones disponibles, integrada por las series AISI 200 (Aleaciones cromo-manganeso-nitrógeno) y AISI 300 (Aleaciones cromo-níquel) [5]. Dentro del grupo de la serie AISI 300 los más representativos son el AISI 304, también denominado 18-8 (18Cr-8Ni), siendo el más común de los fabricados en la actualidad, y el AISI 316 que se diferencia del anterior, por su contenido de molibdeno (2% en peso), lo que le proporciona una elevada resistencia a la corrosión localizada en ambientes clorurados.

Estos aceros no son magnéticos, y como cualquier material metálico monofásico, se endurecen por trabajo en frío y no por tratamiento térmico. Los elementos de aleación característicos son el cromo (16-26% en peso) y el níquel (6-22% en peso), principal elemento estabilizador de la austenita [5]. Por lo general poseen excelentes propiedades criogénicas, buena resistencia a altas temperaturas y una excelente ductilidad [4].

Uno de los problemas típicos que se puede presentar en los aceros inoxidable austeníticos es la corrosión intergranular, fenómeno conocido también como sensibilización del acero [6]. El proceso de sensibilización suele estar ligado al calentamiento a que se ven sometidas aquellas zonas afectadas térmicamente por el proceso de soldadura en los aceros, de manera que un acero sensibilizado puede sufrir corrosión intergranular en ambientes donde normalmente no deberían tener ningún tipo de corrosión [7]. Otro tipo de corrosión presente en este tipo de aceros es la corrosión por picadura, la cual inicia en puntos de la superficie en los que resulta más difícil conseguir una pasividad estable [8]. El ataque se centra en un área muy reducida respecto a la superficie total expuesta. La relación entre el área de la zona catódica (capa pasiva) y el área de la zona anódica (picadura) es muy alta, creando condiciones de flujo de corriente anódica de elevada densidad y aumentando las velocidades de disolución de la aleación en el interior de la picadura y la progresión de la perforación, fenómeno que no se hace visible en la superficie del acero [5].

Una manera de mejorar estos aceros, evitar los tipos de corrosión mencionados anteriormente y obtener mejores propiedades mecánicas es modificando su composición

química. Generalmente la composición de estos aceros inoxidable se basa en el equilibrio entre elementos aleantes que promueven la formación de ferrita y aquellos que promueven la de la austenita [9].

En el primer grupo encontramos el cromo, molibdeno, niobio, titanio, tungsteno, aluminio y vanadio. Por otra parte, el elemento de austenización por excelencia es el níquel, aunque a elevadas temperaturas, carbono, nitrógeno y cobre también transforman la ferrita en austenita. Cada uno de estos elementos tiene un papel fundamental en las propiedades de los aceros inoxidable austeníticos, por ejemplo, el molibdeno mejora la resistencia a la corrosión y particularmente la corrosión por picadura. Estudios realizados han revelado que adiciones de molibdeno de 1,76% en peso, disminuyen la resistencia a la tracción de los aceros inoxidable austeníticos, pero incrementan la resistencia a la corrosión bajo tensiones de estos aceros [14]. El molibdeno actúa como elemento alfégeno, es decir inhibidor de la fase austenítica, cualquier aumento considerable, aunque pudiera mejorar las propiedades del acero frente a la corrosión, haría necesario la adición de níquel como elemento gammágeno, para mantener una estructura austenítica metalúrgicamente equilibrada [10]. Lo cual podría no ser viable económicamente, dado el alto precio del níquel.

El manganeso, por otra parte, tiende a estabilizar la austenita con respecto a la formación de martensita a altas temperaturas. Otra función del manganeso, es favorecer la solubilidad del nitrógeno en el acero, haciendo posible una familia de aceros inoxidable austeníticos con bajo contenido en níquel y alto contenido en manganeso y nitrógeno

[13]. Los investigadores del CISRI (Institute of special Steel, central iron and Steel research institute) en Beijing, estudiaron la influencia del manganeso en la resistencia a la corrosión por picadura de un acero inoxidable austenítico de la serie 200. El estudio indicó que el contenido de manganeso en estos aceros no debe superar el 1,7% en peso, pues un porcentaje mayor lo hará más susceptible a la corrosión por picadura [15].

El papel del nitrógeno como elemento aleante de los aceros inoxidables ha recibido especial atención en las últimas dos décadas. Considerado un elemento fuertemente gammágeno, el nitrógeno mejora las propiedades mecánicas al aumentar el nivel de resistencia sin pérdida significativa de ductilidad y tenacidad. En términos de resistencia a la corrosión, promueve la pasividad, amplía el intervalo pasivo, mejora la resistencia a la corrosión bajo tensión en algunos medios [5].

También es conocido el efecto de la adición de pequeñas cantidades de cobre, para promover y estabilizar la austenita, así como para mejorar el comportamiento frente a la corrosión en ciertos medios, como retardador del endurecimiento en la deformación en frío y como controlador de propiedades mecánicas (dureza, límite elástico, resistencia a la tracción) [12]. Estudios realizados demostraron que en la acción estabilizante de la austenita frente a la transformación martensítica por deformación aparece el cobre con una eficacia el doble que la del níquel o que la del manganeso [11].

Aunque el vanadio es más utilizado en los aceros inoxidables martensíticos pues, aumenta su dureza, debido a su efecto sobre el tipo de carburo presente, también estabiliza la

ferrita. Se han realizado estudios de su efecto en la resistencia a la fluencia (creep) en aceros inoxidable austeníticos resistentes al calor [16]. Es importante destacar también, la importancia del titanio que se añade principalmente para combinar con el carbono y reducir la susceptibilidad a la corrosión intergranular, actúa como refinador de grano y favorece la formación de ferrita [13]. El nitrógeno y el fósforo también son elementos que modifican las propiedades en los aceros inoxidable austeníticos. Pommier, Busso, Morgeneyer y Pineau estudiaron el efecto que tiene el carbono, el nitrógeno y el fósforo en la formación de grietas intergranulares a elevadas temperaturas en un acero inoxidable austenítico AISI 316 L [17].

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la Figura 1 se presenta la metodología seguida para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

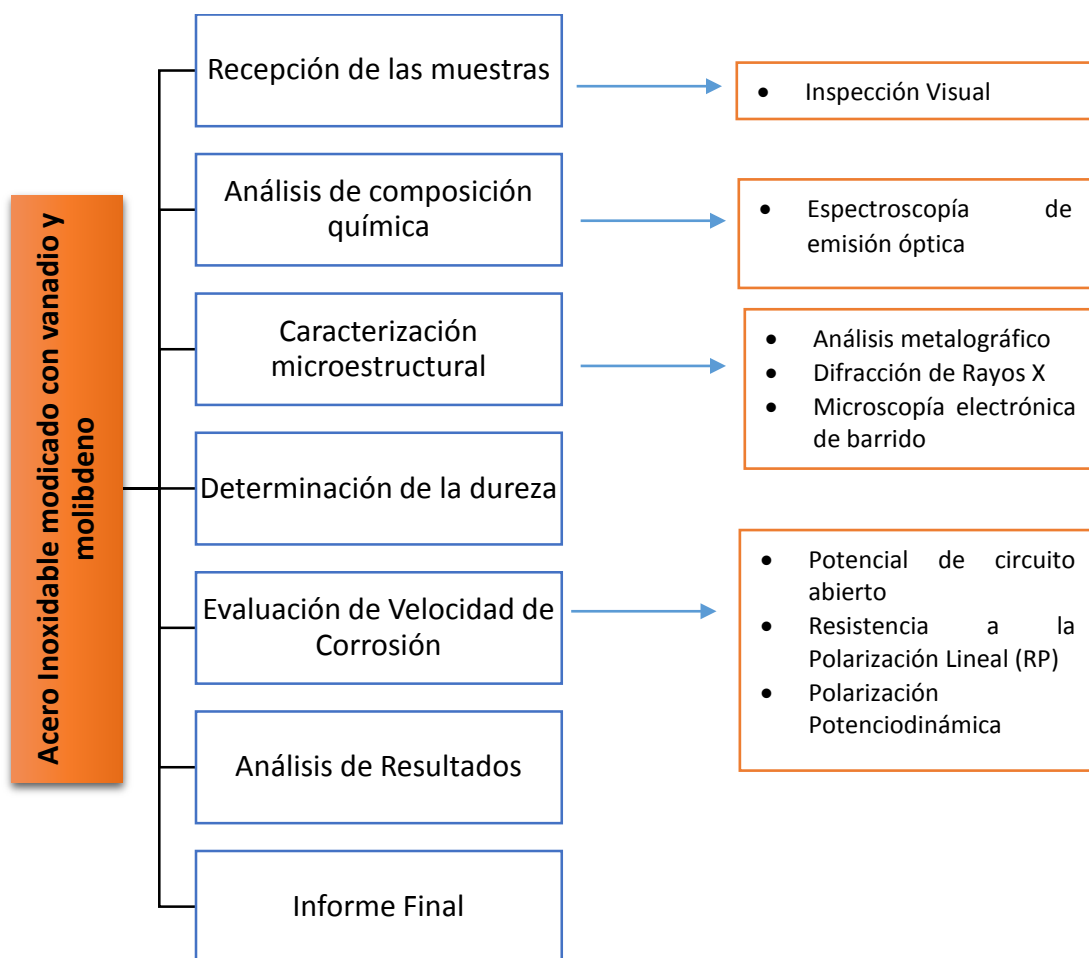


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología usada para el desarrollo del proyecto.

3.1. RECEPCIÓN DE LAS MUESTRAS

El material de estudio corresponde a un acero inoxidable modificado con vanadio y molibdeno. Este material fue fundido y entregado tal como se realizó su respectiva colada, sin ningún tipo de tratamiento térmico ni mecanizado. Inicialmente se realizó la inspección visual de la pieza del acero inoxidable, para luego realizar los cortes y preparar las muestras para la respectiva caracterización.

3.2. ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA

La composición química del acero inoxidable se determinó por espectroscopía de emisión óptica usando un equipo marca SPECTROVAC 1000 DV4.

3.3. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

La preparación metalográfica de las muestras se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM E3-01. Para realizar el pulido mecánico se utilizó papel abrasivo de carburo de silicio resistente al agua marca CARBORUNDUM, con granulometría 80, 120, 150, 220, 320, 400, 600, 800, 1200, 1500, girando 90° para cada cambio de lija, manteniendo un flujo de agua constante. Adicionalmente, las probetas se pulieron en paños gruesos y finos con pulimentos de alúmina (Al_2O_3) de 0,5 y 0,05 μm respectivamente, logrando un acabado tipo espejo, adecuado para el análisis microscópico.

Para el análisis metalográfico, la muestra fue atacada con ácido oxálico al 10% en volumen por un minuto. Se usó un microscopio óptico marca Olympus GX71F, del laboratorio de microscopía de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó por difracción de rayos X, usando un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinc, con un rango de medición de $(10-90^\circ) 2\theta$, barrido a pasos y tiempo de muestreo de 0,6 s. Finalmente, una muestra fue evaluada por microscopía electrónica de barrido usando un microscopio marca Qanta FEG 650 de FEI, con un sistema integrado de microanálisis por Espectroscopía de Dispersión de Energía de rayos X (EDS, por sus siglas en inglés).

3.4. MEDIDAS DE DUREZA

Las mediciones de dureza sobre el acero inoxidable se realizaron usando un durómetro marca Wilson, el cual fue previamente calibrado, siguiendo la norma ASTM 18-08B. Se usó como indentador un cono de diamante con una carga previa de 150 kg. Se tomaron tres medidas.

3.5. EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

Para determinar la resistencia a la corrosión del acero en estudio se usaron medidas de potencial de circuito abierto (OCP, ASTM G-5-14) y polarización potenciodinámica (ASTM G102). Las medidas se realizaron usando una celda electroquímica de tres

electrodos, con un electrodo de plata/cloruro de plata como electrodo de referencia y un electrodo de grafito como contra electrodo. El electrolito usado fue una solución aireada 3.5% en peso de NaCl, a temperatura ambiente, empleando un Potenciostato-Galvanostato Gamry 600. Se realizaron cinco ensayos para verificar la reproducibilidad de los resultados. Primero se midió el potencial de circuito abierto (OCP) por un periodo de 60 min, y luego se realizaron las medidas potenciodinámicas con una variación del voltaje de 0.166 mV/s desde -10 mV hasta 10 mV. La velocidad de corrosión (i_{corr}) se obtuvo por extrapolación de Tafel.

Las muestras para los ensayos electroquímicos se prepararon siguiendo la norma ASTM G1. Se cortaron muestras rectangulares de aproximadamente 1 cm² de área, las cuales fueron conectas eléctricamente a un cable de cobre y luego embebidas en resina epóxica. Finalmente se realizó un desbaste mecánico con lijas de carburo de silicio de grado 80, 220, 320, 600, 800, 1200, y paño con pulimento abrasivo de alúmina de 0,05 micras.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. INSPECCIÓN VISUAL

El material de estudio corresponde a una barra cilíndrica de acero inoxidable obtenida por colada en molde de arena, con una superficie rugosa y áspera. Por su estructura, la pieza hace parte del bebedero de la colada. Al realizar el primer corte transversal se observa una pieza discontinua debido a la presencia de un rechufe en el centro de la pieza por el proceso de contracción del metal en el proceso de solidificación.



Figura 2. Fotografías del material de estudiado entregado por la empresa Franco García Ingeniería S.A.S

4.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO

La composición química del acero en estudio se muestra en la Tabla 1. Se observa que el contenido de cromo es de alrededor de 17 % en peso, lo cual confirma su clasificación como inoxidable. Este contenido de cromo permite prever que se formó una capa superficial de óxido de cromo (Cr_2O_4), que pasivará al acero [8]. Se confirma la presencia de molibdeno (0.1% en peso) y vanadio (0.17% en peso), por medio de los cuales la empresa pretendía modificar el acero. Así mismo, se observa la presencia de níquel, 3.96 % en peso, dada la naturaleza de este elemento se espera una ampliación del rango de estabilidad de la austenita.

Tabla 1
Composición química del acero inoxidable en estudio (% peso).

ELEMENTO	%Fe	%Cr	%Ni	%Mn	%Si	%C	%Mo	%V	%Cu
	76.952	17.010	3,9623	0.31939	0.42642	0.57735	0.10290R	0.17607R	0.12751R

Dentro de las familias de los aceros inoxidables existen características fundamentales y únicas que permiten hacer una rápida asignación del material, como el carácter magnético y el contenido de algunos elementos principales. De esta forma, dado que los aceros inoxidables ferríticos no tienen níquel y que los aceros inoxidables martensíticos son magnéticos, se puede concluir que el acero en estudio pertenece a la familia de los aceros inoxidables auteníticos. En este caso, el alto contenido de carbono, 0,58% en peso, es inquietante, pues los aceros inoxidables se caracterizan por su bajo contenido de carbono [18]. Por lo que se anticipa que podría presentarse la precipitación de carburos de cromo, lo cual comprometería significativamente la resistencia a la corrosión del acero.

El presente acero muestra modificación en su composición química con la adición de 0,18% en peso de vanadio y 0,10% en peso de molibdeno, los cuales, junto con el alto contenido de carbono, le conferirán alta dureza y resistencia al desgaste. Además, la adición de molibdeno confiere al acero una mayor resistencia a la corrosión por picadura y un mejor comportamiento a la corrosión bajo tensión [19].

Por medio del diagrama de equilibrio estable de la aleación hierro cromo (Anexo A), se observa que el acero en estudio, con 17,010 % en peso de cromo, presenta hierro- α (alfa). Pero debido al alto contenido de carbono, haciendo uso del diagrama de influencia del carbono que amplía el bucle Gamma (Anexo B), se favorece la formación de la fase γ (gamma), para contenidos menores al 0,4 % en peso de carbono. Sin embargo, para porcentajes mayores de carbono, el exceso de carbono originará la formación de carburos de hierro y cromo, los cuales generarán concentraciones de esfuerzos y precipitarán en los bordes de grano, haciendo al acero más susceptible a la corrosión intergranular. Del mismo modo, para analizar la estructura de la matriz metálica se emplea el diagrama de Shaeffler (Anexo C). Los cálculos de cromo equivalente (Cr_{eq}) y níquel equivalente (Ni_{eq}), arrojando valores de 17,7657 y 21,44249 respectivamente, por lo cual se prevé la presencia de la fase austenítica.

4.3. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

La microestructura del acero inoxidable se puede observar en la Fig. 5. El ataque con ácido oxálico permite observar la estructura general del material, así como la forma de sus

bordes de grano. La microestructura muestra granos de austenita característicos, con precipitación de carburos en los límites de grano (Fig. 5 (b)). La formación de dichos carburos podría haberse favorecido dado el alto contenido de carbono y de cromo del acero. La presencia de estos carburos en límites de grano podría favorecer la concentración de esfuerzos, además de hacer más susceptible al acero a la corrosión, dado que el cromo que debería estar en la capa pasiva de óxido, fue consumido para formar los carburos [11].

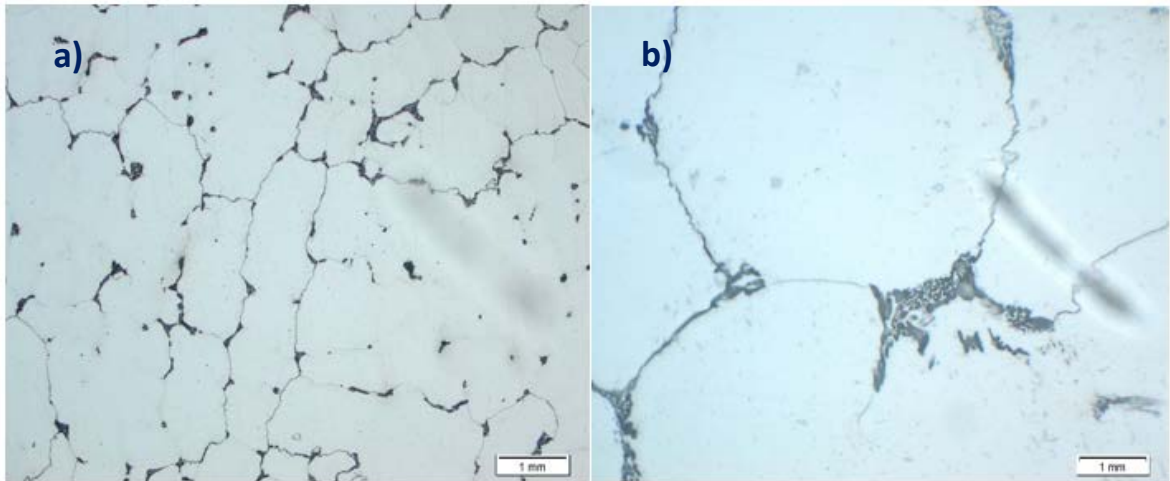


Figura 3. Micrografía óptica del acero inoxidable en estado de suministro, atacada con ácido oxálico al 10% en volumen. a) Superficie del acero a 200X y b) Límite de grano a 1000X.

4.3.1 Difracción de rayos X. El análisis por difracción de rayos X (Fig. 3), muestra la presencia de tres (3) picos prioritarios, que corresponden a las fases $\text{Fe}\gamma$, FeCu_4 y Cr_{23}C_6 respectivamente. La presencia de la fase $\text{Fe}\gamma$ reafirma los análisis anteriormente descritos y confirma que efectivamente la muestra recibida es un acero inoxidable austenítico. Por otra parte, los carburos de cromo presentes en los límites de grano observados en las micrografías anteriores del acero inoxidable modificado demuestran que por la pequeña

cantidad de elementos estabilizantes como el molibdeno (0,10% en peso) condicionan la resistencia a la corrosión y dan lugar a la formación de carburos de tipo $M_{23}C_6$ y hasta reducir la ductilidad y tenacidad del material [5].

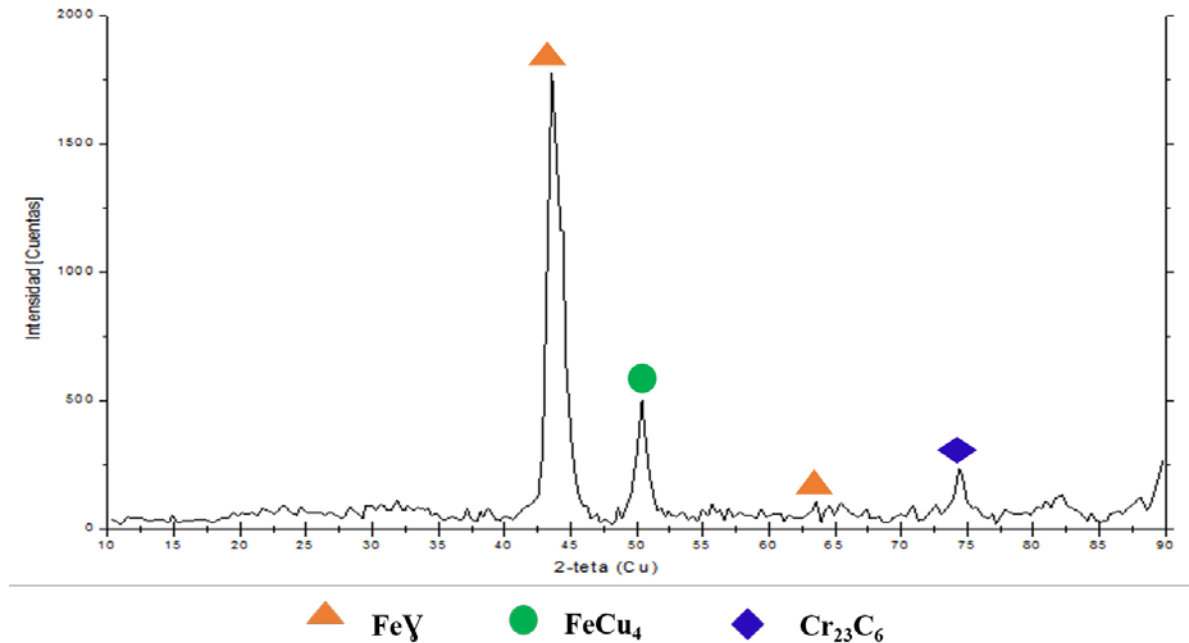
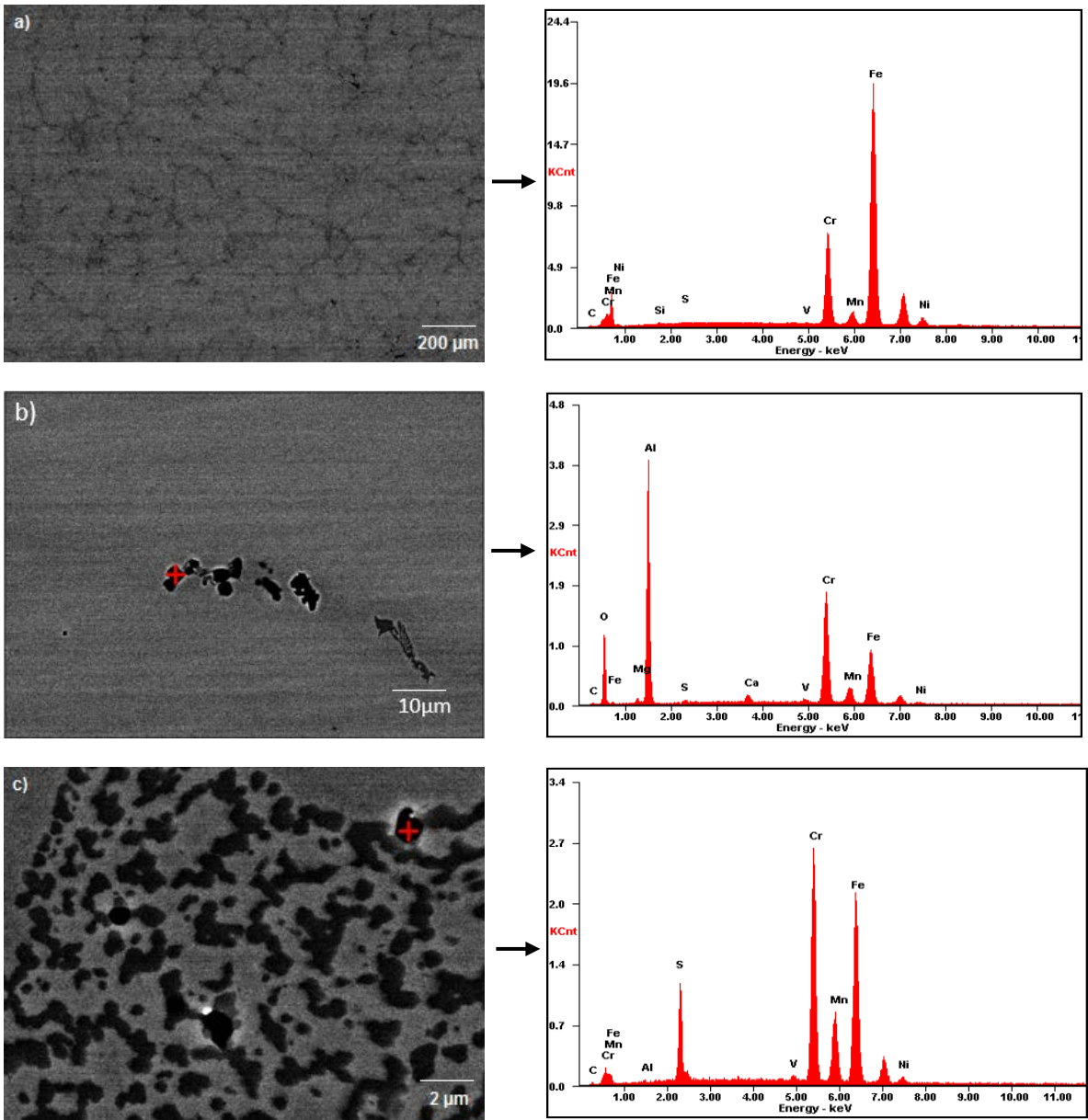


Figura 4. Difractograma del acero inoxidable en estado de suministro.

4.3.2 Microscopía electrónica de barrido y análisis por EDS. La superficie del acero analizada por microscopía electrónica permite un análisis más detallado de las características observadas por microscopía óptica. Se observa una matriz con una superficie continua, equivalente a la fase austenítica, con unas zonas oscuras correspondientes a carburos (Figura 4(a)). El análisis por EDS confirma la presencia de elementos como cromo, níquel, manganeso y vanadio. También se observan precipitados en los límites de grano del acero inoxidable muy posiblemente carburos Figura 4(b)). El análisis de su

composición muestra presencia de aluminio, cromo y hierro, acompañado de pequeños contenidos de níquel, manganeso y vanadio.



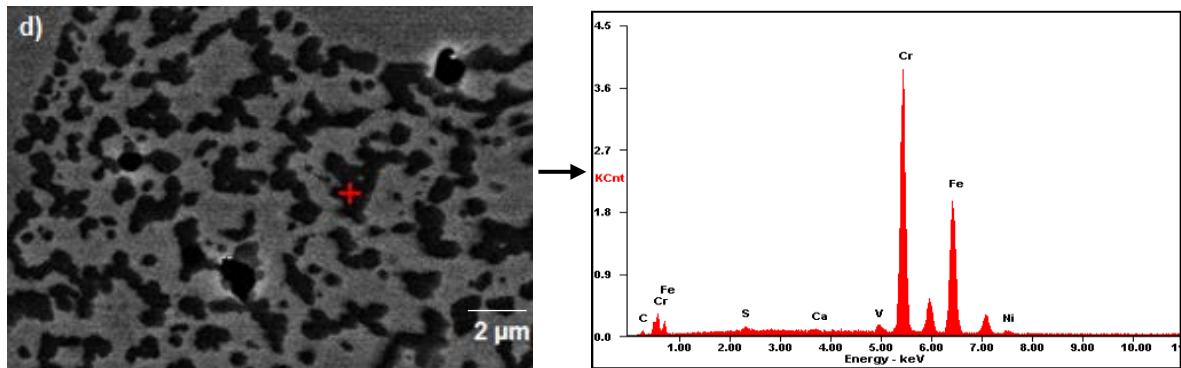


Figura 5. Micrografías electrónicas del acero inoxidable en estudio y análisis puntual por EDS. (a) Superficie del acero en estado de entrega. (b) Morfología de un límite de grano. (c) y (d) Morfología de otro límite de grano.

4.4. MEDICIÓN DE DUREZA

El ensayo de dureza arroja que el promedio de dureza del acero inoxidable es 25 HRC, por tablas de equivalencia (Anexo D), esto es aproximadamente igual a 102 HRB, por lo que puede calcularse que el acero tiene una resistencia a la tracción de aproximadamente 86,7 Kg/mm². La dureza es relativamente baja, considerando la cantidad de elementos aleantes que tiene el acero.

4.5. EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

La Fig. 5 muestra la variación del potencial de circuito abierto con relación al tiempo de exposición para el acero inoxidable en estudio en una solución de NaCl al 3,5% en peso. El potencial de circuito abierto es de alrededor -0,30 V vs Ag/AgCl.

Con base a los potenciales de circuito abierto se tomaron las curvas de resistencia a la polarización de cada muestra (Fig. 6), donde se relaciona el potencial y la densidad de corriente para obtener un comportamiento aproximadamente lineal en un rango de potencial variable cercano al origen de la curva de polarización mostrando una pendiente resultante inversamente proporcional a la velocidad de corrosión, obteniendo de esta manera las densidades de corriente por medio de la ecuación de Stern- Geary (Anexo E) [20] y al mismo tiempo conocer el comportamiento resistivo del acero inoxidable modificado con vanadio y molibdeno en NaCl al 3,5%.

La Fig. 7 presenta la curva de polarización potenciodinámica del acero en la solución de NaCl al 3,5%. Por medio del método de intersección se determinó la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) usando la extrapolación de las pendientes de Tafel (Anexo E), para un potencial de corrosión de -0,366 mV, una i_{corr} aproximadamente de 0,406 A/cm² se obtiene una velocidad de corrosión promedio de 0,12 mpy.

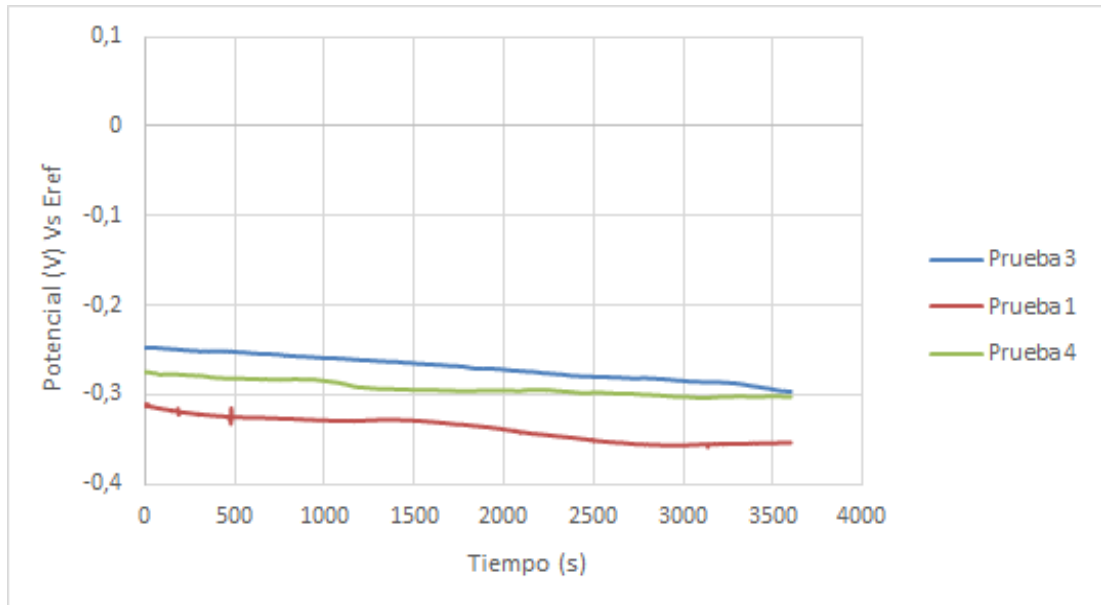


Figura 6. Curva del potencial de circuito abierto que se obtuvo en una solución de NaCl 3,5% a temperatura ambiente para el acero inoxidable modificado con vanadio y molibdeno en estado de entrega.

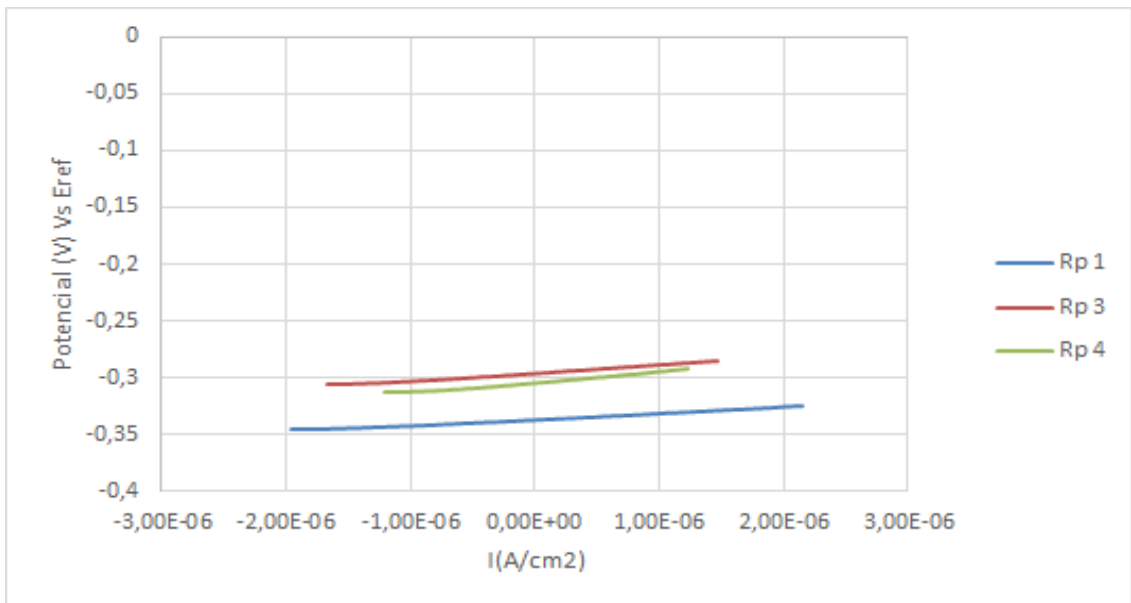


Figura 7. Curvas de resistencia a la polarización del acero inoxidable en estado de entrega.

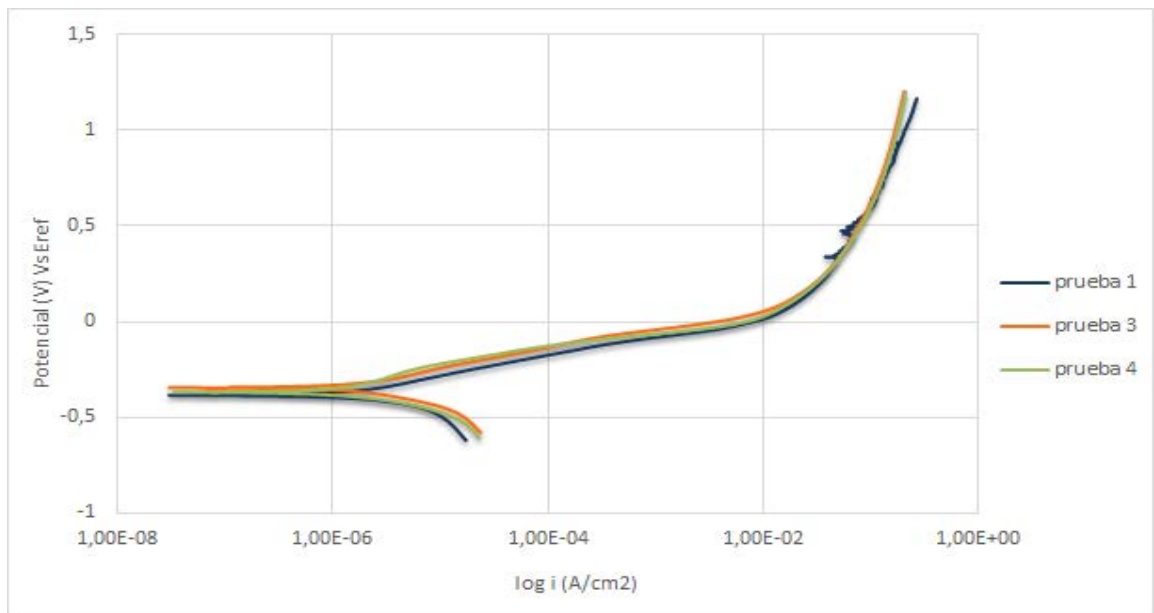


Figura 8. Curvas polarización potenciodinámica del acero en estudio en una solución 3.5% en peso de NaCl a temperatura ambiente.

Uno de los tipos de corrosión a los cuales los aceros inoxidables son más susceptibles es la corrosión por picadura, de ahí que en este trabajo se escogiera una solución de NaCl al 3,5% para evaluar la resistencia a la corrosión del acero en estudio. La corrosión por picaduras es un tipo localizado de corrosión que conduce a la creación de pequeños hoyos en el material. La fuerza motriz de este tipo de corrosión es la despasivación de una pequeña área de material, convirtiéndola en un ánodo, mientras que los alrededores funcionan como un cátodo formando así una celda de corrosión. Los iones de cloro facilitan las picaduras al promover la ruptura de la capa pasivadora en áreas localizadas,

lo que es especialmente cierto en el caso de haber imperfecciones superficiales las que pueden ser del orden de micro grietas superficiales [21]. Las curvas de polarización han sido el método convencional para evaluar la corrosión por picadura, ya que de ellas se puede observar el potencial de picadura [22], sin embargo, las curvas de polarización del acero en estudio en el presente trabajo no muestran el potencial de picadura de forma explícita, es más no se observa una zona pasiva propiamente dicha. Sin embargo, la evaluación de la condición superficial de las muestras al terminar los ensayos electroquímicos, muestra deterioro, y presencia de pequeñas picaduras. La corrosión por picadura se presentó en áreas específicas del material ya que este no es homogéneo en toda su superficie, lo que hizo que esas zonas fuesen propensas a ser atacadas.

Por otro lado es bien conocido que la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables está marcadamente influenciada por la composición química, la microestructura, el tratamiento térmico y las condiciones del ambiente (concentración de la solución, pH, potencial y temperatura) [23]. Respecto a la composición química se ha identificado que el molibdeno es un elemento aleante que favorece la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables [5]. El molibdeno interfiere en el mecanismo de formación de las picaduras, en primera instancia el molibdeno altera la capa pasiva haciéndola más resistente al ataque por cloruros. Pero además, el molibdeno puede formar especies insolubles oxidadas, facilitando la repasivación y desactivando el crecimiento de las picaduras [24]. Sin embargo la concentración de molibdeno del acero en estudio es aún muy baja para favorecer la resistencia a la corrosión por picaduras. El efecto favorable del molibdeno

es evidente cuando su concentración en el acero inoxidable esta por encima de 0.2 % en peso [25,26].

Por otro lado, la velocidad de corrosión calculada a partir de las curvas de polarización, de 0,12 mpy, está dentro lo esperado para un acero inoxidable. Lo cual indica que la presencia de los demás elementos aleantes en el acero, particularmente el cromo y el níquel, favorecen la resistencia a la corrosión. En conclusión, las propiedades de los aceros inoxidables, particularmente su resistencia a la corrosión, depende en gran medida de la composición química. Es importante tanto el tipo de elemento aleante que se adicione al acero, como su cantidad.

5. CONCLUSIONES

El acero fabricado por la empresa Franco Garcia Ingeniería S.A., es un acero inoxidable austenítico con contenidos de molibdeno de 0.10% en peso y de vanadio con 0.18% en peso.

Las micrografías ópticas y electrónicas muestran presencia de carburos en los límites de grano. La presencia de estos carburos puede ser atribuida a la combinación del alto contenido de carbono en el acero, 0.58% en peso, y del alto contenido de cromo, 17.01% en peso. Los análisis por DRX confirmaron la presencia de estos carburos.

A partir de la técnica electroquímica de polarización potenciodinámica se determinó la velocidad de corrosión del acero en estudio en una solución 3.5% en peso de NaCl, dando como resultado alrededor de 0.12 mpy. La gráfica de la figura 7 no muestra una zona de pasivación para el acero estudiado, lo cual indica que 0,12 mpy es una alta velocidad de corrosión para este acero y se atribuye a la presencia de elementos aleantes como cromo y níquel, más que del molibdeno.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda a la empresa FRANCO GARCÍA INGENIERÍA S.A.S tener en cuenta los siguientes contenidos para los elementos aleantes utilizados en aceros inoxidables austeníticos para mitigar la susceptibilidad a los diferentes tipos de corrosión localizada. C <0.08% (en peso); Cr 16%-30% (en peso); Ni 8%-35% (en peso); Mo 0%-7% (en peso); otros N, Cu, Ti, Nb.

Se recomienda seleccionar una mejor calidad de chatarra y materiales de aporte utilizados en el proceso de fundición para mejorar la vida útil del acero reduciendo los defectos que este proceso pueda producir.

Por otra parte, basados en los resultados obtenidos, se recomienda a la empresa FRANCO GARCÍA INGENIERÍA S.A.S. realizar un estudio de las condiciones operativas de sus procesos de fundición pues el exceso del contenido de carbono en este acero (0,57% en peso) supera los rangos normales para un acero inoxidable austenítico (0,03-0,08% en peso) y se atribuyen a exceso de impurezas o contaminación al momento de realizar la fundición. De igual manera los resultados de la composición química (tabla 1) no revelaron presencia de aluminio ni azufre, pero, si hubo presencia de estos dos elementos en los resultados del análisis puntual por EDS realizado (figura 4). Esta inconsistencia se debe a que la pieza suministrada no era homogénea en toda su extensión y fue contaminada durante el proceso de fundición.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Leal, S. (2011). Caracterización de aceros inoxidables y estudio de su resistencia mecánica y conformabilidad (tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León. México. Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/2495/1/1080049438.pdf>
- [2] Casquete, A. (2016). Técnica del ruido electroquímico para el estudio del comportamiento frente a la corrosión de los aceros inoxidables (wrought y pulvimetalúrgicos) (tesis de pregrado). Universidad de Valladolid. España. Recuperado de <http://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/18222/1/TFG-I-419.pdf>
- [3] Quiceno, M. (2015). Análisis comparativo de la velocidad de corrosión por picadura de los aceros inoxidables austeníticos UNS S30403 y UNS S20100, bajo norma ASTM G48, en diferentes tiempos de inmersión (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5366/66028304G643.pdf>
- [4] Vazquez, J. (1996). Estudio de la precipitación de carburos en el acero inoxidable AISI 304 en enfriamiento continuo. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León. México. Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/7559/1/1020112517.PDF>
- [5] Coy, A. (2006). Evaluación de la modificación de elementos (Mo, Mn, Ti) en el comportamiento frente a la corrosión de aceros inoxidables austeníticos (tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid. España. Recuperado de <http://biblioteca.ucm.es/tesis/qui/ucm-t29174.pdf>
- [6] Torres, E. (2004). Apuntes acerca del tratamiento térmico y la clasificación general de los aceros. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas, Cuba. Recuperado de <http://monografias.umcc.cu/monos/2004/QuiMec/um04QM02.pdf>
- [7] Cruz, J. (2012). Fabricación y caracterización de un acero inoxidable austenítico aleado con Nb. Recuperado de <http://tesis.bnct.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/17173/2516703.pdf>
- [8] Aparicio, M., Jitianu, A., Rodriguez, G., Degnah, A., Al-Marzorky, K., Mosa, J., & Klein, L., (2016). Corrosion Protection of AISI 304 stainless steel with Melting Gel Coatings. *Electrochimical Acta*, 202,325-332.

- [9] Laufgang, S. (2003). Aceros inoxidable. Termo Soldex S.A. Recuperado de http://materias.fi.uba.ar/6713/ACEROS_INOXIDABLES.pdf
- [10] Tobler, W. (2004). Influence of molybdenum species on pitting corrosion of stainless steels. *Metallurgy and Materials*, 66 (2), 172-178, doi: 10.3929/ ethz-a-004839477.
- [11] Botella, J., Hierro, P., y Merino, C. (1997). Efectos gammágenos del cobre en los aceros inoxidable 18Cr8Ni. *Revista de Metalurgia*, 33(5), 298-303. Recuperado de <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/841/854>
- [12] Forero, A. Corrosión Intergranular en Aceros Inoxidables. *Instituto de Ensayo e Investigación- Metalurgia*, 20-24. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/24399/1/21552-73698-1-PB.pdf>
- [13] Herrero, D. (2016). Influencia del tratamiento de endurecimiento a alta temperatura en el comportamiento frente a la corrosión por picaduras de una unión soldada de acero inoxidable austenítico (tesis de pregrado). Universidad de Valladolid. España. Recuperado de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/18269/1/TFG-I-411.pdf>
- [14] Young, H., Seo, W., Young, J., LEE, T., & Kim, S. (2016). Influence of Mo on stress corrosion cracking susceptibility of newly developed FeCrMnNiNC based lean austenitic stainless steels. *Materials Characterization* 119,200-208.
- [15] Qu, P., Chen, H., & Lang, Y. (2016). Influence of Mn-Ni alloying elements on surface film and pitting resistance of Cr-Mn austenitic stainless steels. *Construction and Building materials*, 125, 427-437.
- [16] Park, D., Huh, M., Jung, W., Suh, J., Shim, J., & Lee, S. (2013). Effects of vanadium addition on the creep resistance of 18Cr9Ni3CuNbN austenitic stainless heat resistant steel. *Journal of alloys and compounds* 574, 532-538.
- [17] Pommier, H., Busso, E., Morgeneyer T., & Pineau, A. (2016). Intergranular damage during stress relaxation in AISI 316L-type austenitic stainless steels: Effect of carbon, nitrogen and phosphorus contents. *Acta Materialia*, 103, 893-908.
- [18] Leffler, B. (2014). Stainless steels and their properties. Recuperado de http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_9/articles/stainless_steel.pdf

- [19] Barroso, S., e, Ibañez, J. (2014). Introducción al conocimiento de materiales, Madrid. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=OabsAgAAQBAJ&pg=PA6&lpg=PA6&dq=Introducci%C3%B3n+al+conocimiento+de+materiales,+Madrid.+Universidad+Nacional+de+Educaci%C3%B3n+a+Distancia.&source=bl&ots=VDkMIEmfsl&sig=3r9edyj3oZnE5vxZBoJGcTImpq8&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjDv6O8l-nRAhXFSCYKHUjRAHsQ6AEITDAF#v=onepage&q=Introducci%C3%B3n%20a%20l%20conocimiento%20de%20materiales%20C%20Madrid.%20Universidad%20Nacional%20de%20Educaci%C3%B3n%20a%20Distancia>
- [20] Corte, D., y Peña, J. (2011). Obtención de curvas galvanostáticas y ensayos de resistencia a la polarización en varillas de construcción ASTM A42 en solución de agua al 3,5% NaCl. *Revista tecnológica ESPOL*, 5(13) ,1-8. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10025/1/Obtenci%C3%B3n%20de%20Curvas%20Galvanost%C3%A1ticas%20y%20ensayos%20de%20resistencia.pdf>
- [21] Kaneko, M., & Isaacs, H. (2000). Pitting of stainless steel in bromide, chloride and bromide/chloride solutions, *Corrosion Science*, 42, 67-78.
- [22] Burstein, G., Liu, C., Souto, R., & Vines, S. (2004). Origins of pitting corrosion, *Corrosion Engineering Science and Technology*, 39 (1), 25–30.
- [23] Frankel, G., (1998). Pitting corrosion of metals a review of the critical factors, *Journal of the Electrochemical Society*. 145(6), 2186–2198.
- [24] Pardo, A., Merino, M., Coy, A., VIEJO, F., Arrabal, R., & Matykina, E. (2008). Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels combining effects of Mn and Mo additions. *Corrosion Science* 50, 1796-1806.
- [25] Keddam, M. (2002). Anodic Dissolution. Marcel Dekker, Inc, 73p. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=69bImhlRCdcC&pg=PA97&lpg=PA97&dq=Anodic+Dissolution&source=bl&ots=oCXpbvpiVA&sig=VQcN65tzeQJglJXOfe2WYGUFNsY&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwi33OP1n-nRAhXEeCYKHYTEAcgQ6AEISDAH#v=onepage&q=Anodic%20Dissolution>
- [26] Pardo, A., Merino, M., Coy, A., VIEJO, F., Arrabal, R., & Matykina, E. (2008). Effect of Mo and Mn additions on the corrosion behaviour of AISI 304 and 316 stainless steels in H₂SO₄. *Corrosion Science* 50, 780–794.

BIBLIOGRAFIA

- Alberti, M. (2013). Introducción a los Aceros Inoxidables. Recuperado de <http://www.inoxidable.com/index.html>
- ASTM E03-01. (2001). Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. Estados Unidos, West Conshohocken: ASTM International. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/E3.htm>
- ASTM E18-08B. (2008). Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. Estados Unidos, West Conshohocken: ASTM International. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/E18.htm>
- ASTM E407. (2015). Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. Estados Unidos, West Conshohocken: ASTM International. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/E407.htm>
- ASTM G1. (2011). Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. International. Estados Unidos, West Conshohocken: ASTM International. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/G1.htm>
- ASTM G102-89. (2015). Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. Estados Unidos, West Conshohocken: ASTM International. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/G102-89.htm>
- ASTM G5-14. (2014). Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. Estados Unidos, West Conshohocken: ASTM International. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/G5-14.htm>
- ASTM G59-97. (2014). Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. Estados Unidos, West Conshohocken: ASTM International. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/G59-97.htm>
- Cardona, A. (2012). Materiales de Ingeniería Normas y Aplicaciones. Bucaramanga, Colombia: Ediciones UIS.

- Dicaprio, G. (1999). Notas históricas y producción de aceros inoxidable. Barcelona, España. Aceros inoxidable Grupinox. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3319/55868-4.pdf?sequence=4>
- Feng, S., Yang, Q., & Chunming, L. (2011). Effects of Mo on the Precipitation Behaviors in High-Nitrogen Austenitic Stainless Steels, *J. Mater. Sci. Techno*, 27(12), pp. 1125-1130. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/257446046_Effects_of_Mo_on_the_Precipitation_Behaviors_in_High-Nitrogen_Austenitic_Stainless_Steels
- Freire, L., Carnezim, M., Ferreira, M., & Montemor, M. (2011). The electrochemical behavior of stainless steel AISI 304 in alkaline solutions with different pH in the presence of chlorides. *Electrochimical Acta* 56, pp. 5280-5289. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468611003215>
- Gomez, O. (1993). Aleaciones Hierro-Carbono. Bucaramanga, Colombia: Ediciones UIS.
- Jones, D. (1996). Principles and prevention of corrosión, 2da ed. Prentice Hall, p.215.
- Loizaga, A., Sertucha, J., y Suárez, R. (2008). Defectos metalúrgicos generados por la presencia de gases en el metal fundido. Recuperado de http://www.academia.edu/21743293/Dialnet_Defectos_Metalurgicos_Generados_Por_La_Presencia_De_Gases_2662605
- Samantaray, D., Kumar, V., Bhaduri, A., & Dutta. P. (2013). Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Type 304L Stainless Steel Processed in Semi-Solid State, *International Journal of Metallurgical Engineering* 22, pp. 149-153. Recuperado de <http://article.sapub.org/pdf/10.5923.j.ijmee.20130202.06.pdf>
- Vazquez, J. (1996). Estudio de la Precipitación de Carburos en el Acero Inoxidable AISI 304 en Enfriamiento Continuo (tesis de maestría), Universidad Autónoma de Nuevo Leon. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/7559/>

ANEXO

Anexo A. Diagrama Hierro (Fe) – Cromo (Cr)

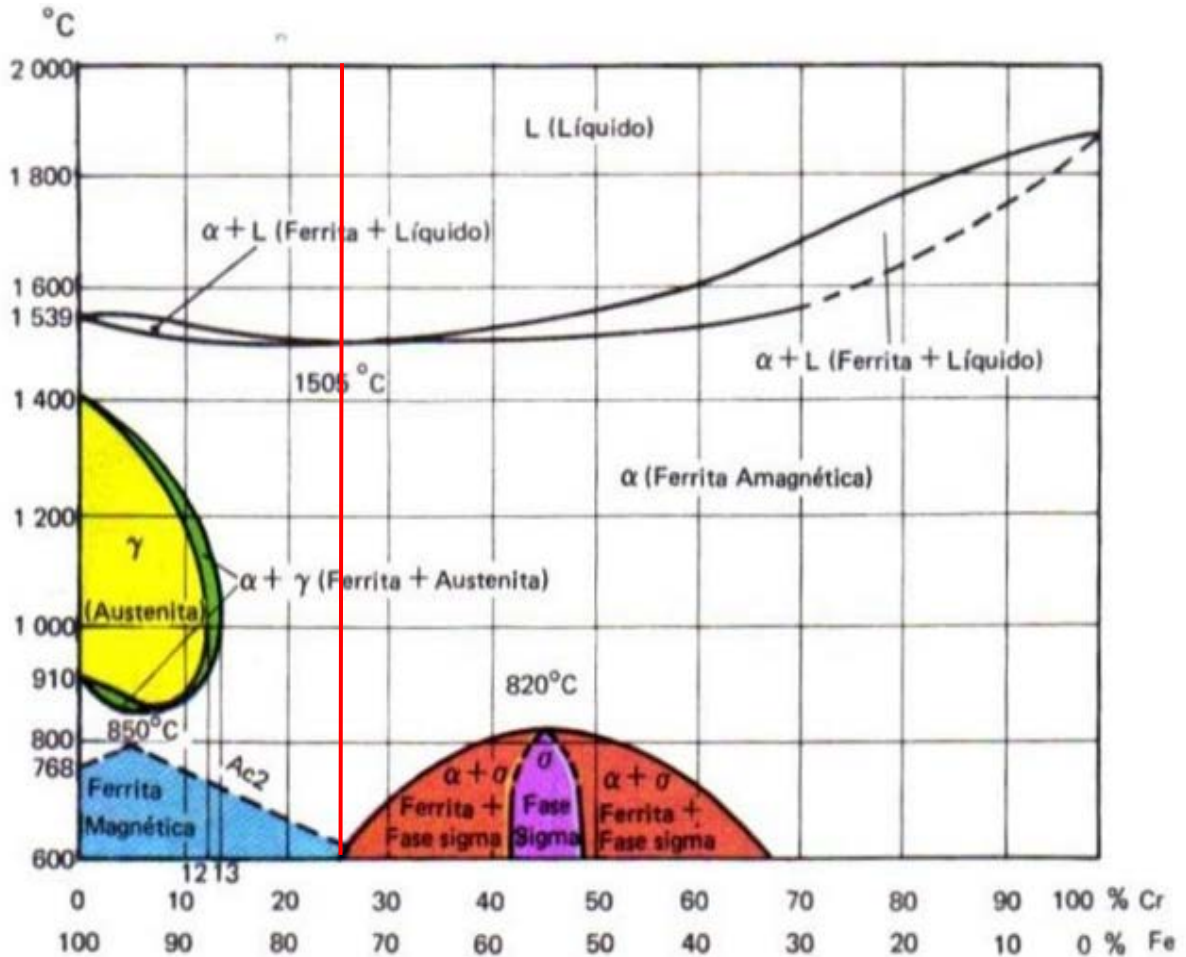
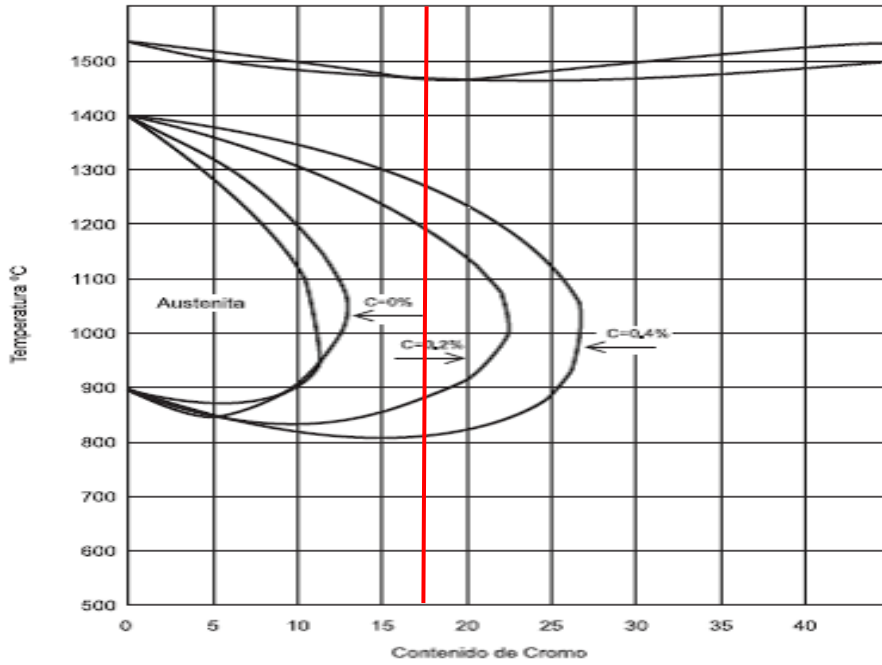


Diagrama Hierro (Fe) – Cromo (Cr), tomado de documento Metalografía, Universidad Tecnológica de Pereira

Anexo B. Influencia del carbono ampliando el bucle gamma



Influencia del carbono ampliando el bucle gamma, tomado de documento Metalografía, Universidad Tecnológica de Pereira.

Anexo A. Diagrama de Shaeffler

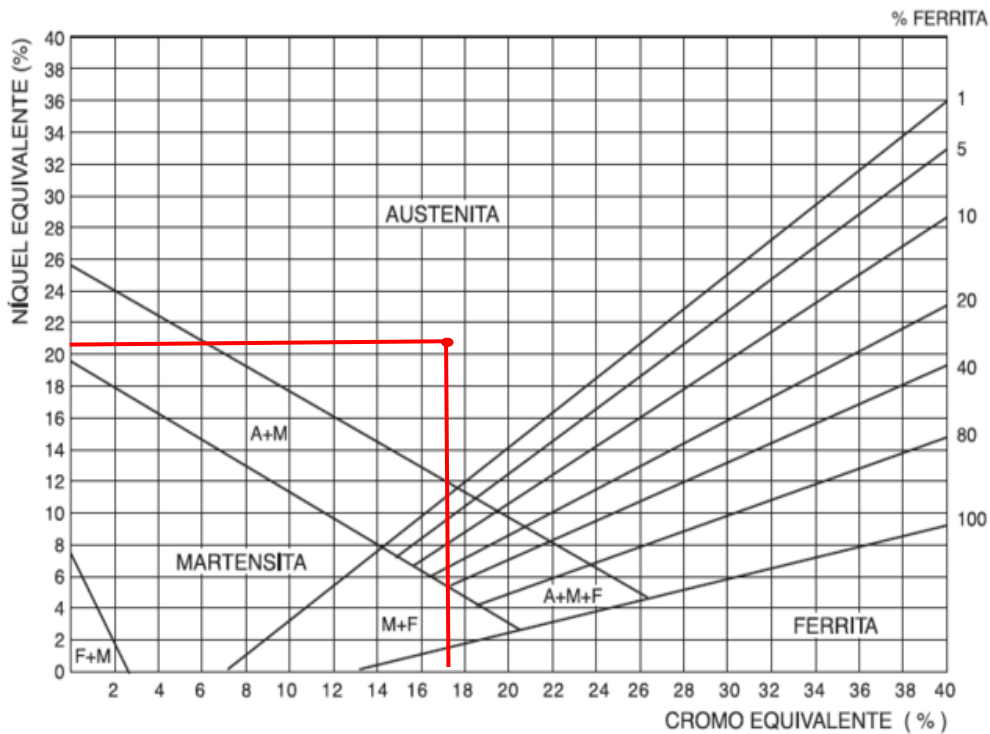


Diagrama de Shaeffler, tomado de documento Metalografía, Universidad Tecnológica de Pereira.

Cálculo de Cromo equivalente y Níquel equivalente:

- Cromo equivalente: $\%Cr + \%Mo + (1,5 \times \%Si) + (0,5 \times \%Nb)$.

Cromo equivalente: $17,010 + 0,10290 + 1,5 (0,42642) + 0,5 (0,0265)$

Cromo equivalente: 17,76578

- Níquel Equivalente: $\%Ni + (30 \times \%C) + (0,5 \times \%Mn)$.

Níquel Equivalente: $3,9623 + (30 \times 0,57735) + (0,5 \times 0,31939)$

Níquel Equivalente: 21,44249

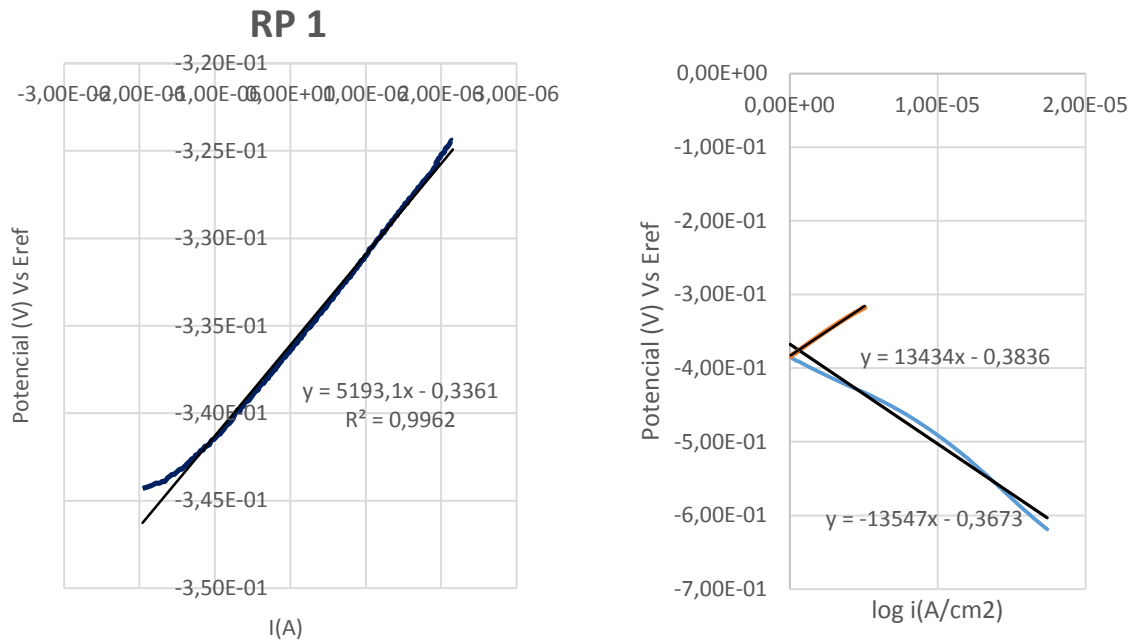
Anexo B. Equivalencias entre durezas Brinell, Rockwell, Vickers y Shore y la resistencia a la Tracción.

Brinell Diámetro Huella	Brinell Dureza HB	Rockwell Dureza Ha	Rockwell Dureza HRb	Rockwell Dureza HRc	Vickers Dureza HV	Shore	Resistencia a la tracción Kg/mm ²
2.35	682	64.0	-	65	885	91.0	232.9
2.40	652	83.0	-	63	820	87.2	221.5
2.45	627	81.5	-	61	765	84.8	213.5
2.50	600	80.5	-	59	633	76.5	188.7
2.55	578	79.5	-	59	717	81.5	204.0
2.60	555	79.0	120	57	675	78.5	195.1
2.65	534	78.0	119	54	598	73.5	181.3
2.70	514	77.0	119	52	567	71.0	174.9
2.75	495	76.5	117	51	540	68.5	168.0
2.80	477	75.5	117	49	515	66.7	162.2
2.85	461	74.4	116	48	494	65.0	157.0
2.90	444	73.5	115	46	472	63.0	150.6
2.95	429	73.0	115	45	454	61.0	145.6
3.00	415	72.5	114	44	437	59.0	140.0
3.05	401	71.5	113	42	420	57.2	136.0
3.10	388	71.0	112	41	404	65.8	132.0
3.15	375	70.5	112	40	389	54.0	127.5
3.20	363	70.0	110	39	375	52.2	123.4
3.25	352	69.5	110	38	363	50.5	120.0
3.30	341	68.5	109	36	350	49.2	115.9
3.35	331	68.0	109	35	339	48.0	112.4
3.40	321	67.5	108	34	327	46.7	109.1
3.45	311	67.0	108	33	316	45.2	105.6
3.50	302	66.5	107	32	305	44.5	102.7
3.55	293	66.0	106	31	296	43.2	99.6
3.60	285	65.5	105	30	287	42.0	96.9
3.65	277	65.0	104	29	279	41.0	94.2
3.70	269	64.5	104	28	270	40.0	91.5
3.75	262	64.0	103	27	263	39.2	89.1
3.80	255	63.0	102	25	256	38.5	86.7
3.85	248	62.5	102	24	248	37.5	84.3
3.90	241	62.0	100	23	241	36.5	81.9

Equivalencias entre durezas Brinell, Rockwell, Vickers y Shore y la resistencia a la Tracción, tomado online de CEMAUSA.

Anexo C. Ejemplo para el cálculo de velocidad de corrosión, prueba 1 acero inoxidable en estado de entrega.

Figura F1. Curva de resistencia a la polarización del acero inoxidable a evaluar en solución de 3,5% en peso de NaCl con una diferencia de potencial desde los -10 mV hasta los 10 mV, a partir del potencial de corrosión, con una velocidad de barrido de 0,166 mV/s



Por medio de la pendiente de la curva de resistencia a la polarización una vez linealizada se obtiene el valor de Rp.

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} = 5193,1 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

Calculo de la velocidad de corrosión

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2,3(\beta_a + \beta_c)} = \frac{13434 \times 13547}{2,3(13434 + 13547)} = 2932,6 \text{ mV}$$

$$i_{\text{corr}} = \frac{\beta}{R_p} = \frac{2932,6}{5193,1} = 0,565 \text{ A/cm}^2$$

Antes de hallar la velocidad de corrosión se determina el peso equivalente del acero inoxidable estudiado

$$PE=18,18$$

Finalmente se encuentra la velocidad de corrosión del acero inoxidable:

$$V_{\text{corr}}= 0,129x \frac{PE}{D} x i_{\text{corr}}$$

$$V_{\text{corr}}= 0,129x \frac{18,18}{7,94} x 0,565$$

$$V_{\text{corr}}=0,167\text{mpy}$$

Tabla E1: Resultados de las curvas de polarización potenciodinámica para el acero inoxidable.

Prueba	Rp	i_{corr}	V_{corr}
1	5193,1	0,565	0,167
3	6919	0,328	0,097
4	9064	0,325	0,096
V_{corr} Promedio= 0,12 mpy			