

**EFFECTO DEL ACABADO SUPERFICIAL EN LA RESISTENCIA A CORROSIÓN POR
PICADURA EN UN ACERO INOXIDABLE MARTENSÍTICO**

JUAN JOSÉ SÁNCHEZ INSUASTI

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

ORIENTADOR:

ROLANDO GUILLERMO SOLER

LEYDI JULIETA CARDENAS FLECHAS

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del director

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica

Dra. María Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Secretario general

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora del Programa de Ingeniería Mecánica

Dra. María Angélica Acosta Pérez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar agradecimiento a mi familia, les debo el mayor de los agradecimientos por su amor incondicional, apoyo constante y comprensión durante todo este proceso fueron el pilar sobre el que me sostuve. todas las personas que han hecho posible la realización de esta tesis. En primer lugar, agradezco profundamente al profesor Duberney Hincapié, su constante orientación y apoyo fueron esenciales para el desarrollo de este trabajo, gracias por su compromiso y por compartir su valiosa experiencia conmigo, también quiero dar las gracias a Víctor Hugo su colaboración y compañerismo fueron esenciales para llevar a cabo este proyecto, aprecio su disposición a ayudar en los momentos difíciles y su entusiasmo, que hicieron del trabajo en equipo una experiencia gratificante. A todos mis amigos y familiares, gracias por su aliento y comprensión a lo largo de todo este proceso. Su amor y apoyo incondicionales me dieron fuerzas para seguir adelante. Por último, a todos los profesores y compañeros que de un modo u otro contribuyeron a mi formación académica, un profundo agradecimiento.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1 Corrosión	15
2.1.1 <i>Importancia del estudio de la corrosión</i>	15
2.1.2 <i>Costos de la corrosión</i>	16
2.2 Tipos de corrosión	19
2.2.1 <i>Corrosión uniforme</i>	20
2.2.2 <i>Corrosión por picadura</i>	20
2.2.3 <i>Corrosión galvánica</i>	21
2.2.4 <i>Corrosión por erosión</i>	22
2.2.5 <i>Corrosión por tensión</i>	23
2.3 Aceros inoxidable	25
2.3.1 <i>Aceros inoxidable ferríticos</i>	27
2.3.2 <i>Aceros inoxidable austeníticos</i>	28
2.3.3 <i>Aceros inoxidable dúplex</i>	29
2.3.4 <i>Aceros inoxidable endurecidos por precipitación</i>	30
2.3.5 <i>Aceros inoxidable martensíticos</i>	31
2.4 Acabado superficial en elementos metálicos	33
2.5 Mecanizado de elementos metálicos	35

2.6	Antecedentes	38
2.7	Acero inoxidable AISI 410	39
2.8	Aplicaciones	41
3.	METODOLOGÍA	42
3.1	Selección de parámetros	42
3.2	Calibración del potencióstato	50
4.	RESULTADOS	59
4.1	Ensayo de dureza	62
4.2	Ensayos de polarización	62
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
6.	CONCLUSIONES	71
	REFERENCIAS	72
	ANEXOS	75

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 <i>Corrosión extrema de una viga</i>	16
Figura 2 <i>Corrosión uniforme</i>	20
Figura 3 <i>Corrosión por picadura en un acero</i>	21
Figura 4 <i>Panel de techo con corrosión galvánica</i>	22
Figura 5 <i>Corrosión por erosión</i>	22
Figura 6 <i>Corrosión bajo tensión</i>	23
Figura 7 <i>Representación de una celda electrónica</i>	25
Figura 8 <i>(B) microestructura de un acero inoxidable 436 ref.</i>	27
Figura 9 <i>Microscopía óptica de probeta de AISI 304 patrón 500X</i>	29
Figura 10 <i>Micrografía de la solución de material recocida a 1130 °C y enfriada con agua. Reactivo Beraha II. Ampliación: 200×</i>	30
Figura 11 <i>Microestructura del acero AISI-SAE 630, en estado de entrega, atacado con Villela. 200X</i>	31
Figura 12 <i>Micrografías de campo brillante. CPs: Carburos principales, CSs: Carburos secundarios. Atacado con a) Villela.</i>	32
Figura 13 <i>Maquina CNC, fresadora con puntas de tungsteno, Programa de la CNC.</i>	42
Figura 14 <i>Herramienta de corte utilizada en la CNC</i>	43
Figura 15 <i>Mecanizado de la muestra de AISI 410</i>	46
Figura 16 <i>Resina de poliéster de vidrio y catalizador</i>	47
Figura 17 <i>Plano del molde para las muestras</i>	48
Figura 18 <i>Muestra dentro de la resina totalmente terminada</i>	49
Figura 19 <i>Alistamiento de la solución 3.56% NaCl.</i>	50
Figura 20 <i>Montaje realizado para el ensayo de polarización con el electrodo de referencia y el grafito</i>	50
Figura 21 <i>Celda de calibración en proceso de calibración</i>	51
Figura 22 <i>Inicio de la calibración por cable</i>	52
Figura 23 <i>Aparece la ventana Calibración de capacitancia del cable.</i>	52
Figura 24 <i>Sugerencias del programa.</i>	53

Figura 25 <i>Corroboración de la celda de calibración.</i>	53
Figura 26 <i>Calibración completada.</i>	53
Figura 27 <i>Conexión celda de tres electrodos</i>	54
Figura 28 <i>Montaje de la muestra para la celda electroquímica</i>	55
Figura 29 <i>Conexiones de los cables a la muestra, al electrodo y contraelectrodo</i>	55
Figura 30 <i>Asignación del experimento que desea realizar</i>	56
Figura 31 <i>Parámetros iniciales del ensayo potenciodinámico</i>	57
Figura 32 <i>Recomendaciones del circuito abierto e inicio de la curva de polarización en proceso</i>	57
Figura 33 <i>Resultados arrojados del ensayo potenciodinamico muestra M1</i>	58
Figura 34 <i>Curva de polarización de la muestra M1</i>	58
Figura 35 <i>Acero AISI 410 sin ningún tipo de mecanizado</i>	59
Figura 36 <i>Microscopía óptica antes y después del ensayo corrosivo</i>	60
Figura 37 <i>Curva de polarización dada en la muestra M1.</i>	63
Figura 38 <i>Curva de polarización en la muestra M2.</i>	64
Figura 39 <i>Curva de polarización en la muestra M3.</i>	64
Figura 40 <i>Curva de polarización en la muestra M4</i>	65
Figura 41 <i>Muestras después del ensayo de polarización</i>	66
Figura 42 <i>Corrosión por picadura en M1 X5</i>	67
Figura 43 <i>Corrosión por picadura en M2 X5</i>	67
Figura 44 <i>Corrosión por picadura en M3 X5</i>	68
Figura 45 <i>Corrosión por picadura en M4 X5</i>	68
Figura 46 <i>Gráfica comparativa de las curvas de polarización de las cuatro muestras</i>	69
Figura 47 <i>M1 X5</i>	76
Figura 48 <i>M1 X20</i>	76
Figura 49 <i>M1 X20 DESP</i>	77
Figura 50 <i>M1 X50 ANTES</i>	77
Figura 51 <i>M1 X50 DES</i>	78
Figura 52 <i>M2 X5</i>	78
Figura 53 <i>M2 X5</i>	79
Figura 54 <i>M2 X20</i>	79

Figura 55 <i>M2 X20</i>	80
Figura 56 <i>M2 X50</i>	80
Figura 57 <i>M2 X50</i>	81
Figura 58 <i>M3 X5</i>	81
Figura 59 <i>M3 X5</i>	82
Figura 60 <i>M3 X20</i>	82
Figura 61 <i>M3 X20</i>	83
Figura 62 <i>M3 X50</i>	83
Figura 63 <i>M3 X50</i>	84
Figura 64 <i>M4 X5</i>	84
Figura 65 <i>M4 X5</i>	85
Figura 66 <i>M4 X20</i>	85
Figura 67 <i>M4 X20</i>	86
Figura 68 <i>M4 X50</i>	86
Figura 69 <i>M4 X50</i>	87
Figura 70 <i>Curva de polarización</i>	89

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Costo Global de la Corrosión por región y por sector económico, pérdidas en % de PIB (GDP)</i>	18
Tabla 2 <i>Listado de organizaciones asociadas globalmente.</i>	19
Tabla 3 <i>Resumen de los tipos de corrosión</i>	24
Tabla 4 <i>Esquema designativo AISI para aceros inoxidable</i>	26
Tabla 5 <i>Clasificación y usos de los aceros inoxidable</i>	26
Tabla 6 <i>Aplicaciones de los aceros inoxidable</i>	33
Tabla 7 <i>Composición Química nominal</i>	40
Tabla 8 <i>Aplicaciones y velocidades de corte de mecanizado</i>	44
Tabla 9 <i>Se especifican los parámetros utilizados para el mecanizado de las muestras</i>	45

RESUMEN

Este trabajo investiga el impacto del acabado superficial en la resistencia a la corrosión por picaduras de un acero inoxidable martensítico. Dado que la corrosión por picaduras es un fenómeno crítico que compromete la integridad estructural de los materiales en ambientes corrosivos, se ha llevado a cabo un análisis detallado para comprender cómo influyen los distintos acabados superficiales en la susceptibilidad a este tipo de corrosión.

Se prepararon muestras de acero inoxidable martensítico con diversos tratamientos superficiales, como pulido, esmerilado y otros procesos de acabado. Estas muestras se sometieron a ensayos de corrosión por picaduras en soluciones salinas, simulando las condiciones agresivas típicas de los entornos industriales. Las pruebas se realizaron en entornos controlados para garantizar la precisión y reproducibilidad de los resultados.

Los resultados mostraron que el acabado superficial tiene un efecto significativo en la resistencia a la corrosión por picaduras del acero inoxidable martensítico. En general, se observó que las superficies más lisas y finas presentaban mayor resistencia a las picaduras, mientras que las más rugosas aumentaban la susceptibilidad a la corrosión localizada. Este hallazgo pone de manifiesto la importancia de un tratamiento superficial adecuado para mejorar la durabilidad y fiabilidad de los componentes fabricados con este tipo de acero.

El estudio concluye que la optimización del acabado superficial es crucial para maximizar la resistencia a la corrosión por picaduras en aceros inoxidables martensíticos, proporcionando recomendaciones específicas para las prácticas de acabado que pueden implementarse en diversas aplicaciones industriales.

PALABRAS CLAVE: Aceros inoxidables, Acabado superficial, Norma ASTM G46-21, Polarización potenciodinámica, Corrosión por picadura.

INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidable martensíticos se utilizan ampliamente en aplicaciones que requieren una gran resistencia mecánica y una buena resistencia a la corrosión. Estos materiales son especialmente valiosos en sectores como el aeroespacial, la automoción y el utillaje, donde la durabilidad y la resistencia a entornos corrosivos son cruciales [1]. Aunque, la resistencia a la corrosión por picaduras en los aceros inoxidable martensíticos puede verse afectada significativamente por el acabado superficial del material [1].

La corrosión por picaduras es un tipo de corrosión localizada donde se forman pequeños agujeros o picaduras en la superficie del metal esto se puede apreciar mucho más en entornos con cloruros [2]. La estructura de la superficie del acero inoxidable, incluida su rugosidad y la presencia de imperfecciones superficiales, puede influir en la susceptibilidad del material a este tipo de corrosión, mostrando que un acabado superficial más fino puede reducir el número de puntos donde puede presentarse la corrosión por picadura, mientras que una superficie más rugosa puede aumentar la probabilidad de formación de picaduras [2].

El objetivo de este estudio es analizar las afectaciones que tiene el material a los diferentes acabados superficiales frente a la resistencia de corrosión por picadura en un acero inoxidable martensítico. Se evaluarán muestras con diversos tratamientos superficiales, para determinar su impacto en el comportamiento frente a la corrosión, estos ensayos se llevarán a cabo en entornos controlados, utilizando soluciones salinas para simular las condiciones agresivas típicas de los entornos industriales.

Este análisis identificará las mejores prácticas de acabado superficial para optimizar la resistencia a la corrosión por picaduras en aplicaciones críticas, mejorando la vida útil y la fiabilidad de los componentes hechos de acero inoxidable martensítico.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Determinar mediante técnicas electroquímicas el efecto del acabado superficial en la resistencia a la corrosión por picadura en un acero inoxidable martensítico.

1.2 Objetivos específicos

- Seleccionar los parámetros de proceso para el acabado superficial de las muestras que se van a emplear en la investigación.
- Fabricar las muestras que serán utilizadas en la caracterización microestructural y ensayos de resistencia a la corrosión por picadura.
- Realizar la caracterización metalográfica de las muestras.
- Realizar ensayos de polarización potenciodinámica según la norma ASTM G46-21 para determinar el potencial de picadura de las condiciones estudiadas.
- Analizar los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y presentar los resultados obtenidos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Corrosión

2.1.1 *Importancia del estudio de la corrosión*

El estudio de la corrosión es crucial para las industrias debido a factores como la seguridad, la economía y la sostenibilidad [3]. Un ejemplo comúnmente conocido de corrosión es la oxidación en las vallas de hierro y la degradación de pilotes de acero, situaciones donde se puede percibir fácilmente sin el uso de instrumentos especializados. El término "óxido" se reserva específicamente para la corrosión del hierro, pero la corrosión es un fenómeno destructivo que afecta en diferente grado a todos los metales. En términos generales, se define como la degradación de un material, generalmente un metal, o de sus propiedades debido a reacciones con el entorno. Sin embargo, la norma ISO 8044 define la corrosión como la interacción físico-química entre un material metálico y su entorno, lo que puede provocar cambios en las propiedades del metal y un deterioro significativo en su función, así como en el entorno o sistema técnico al que pertenece [4]. En muchos casos, el fenómeno corrosión no es detectado en cambio de peso o degradación visible, pero los cambios internos pueden hacer que el material falle inesperadamente. Estos cambios pueden desafiar las inspecciones visuales realizadas en ambientes propensos a la corrosión, por lo que las empresas deben esforzarse en el diseño de los equipos y seguir normas durante la operación y ambientes recomendados, para prevenir fallas que lleven a paradas no programadas, daños permanentes, afectación a personas y contaminación ambiental [2].

Es fundamental tener presente el fenómeno de corrosión en entornos expuestos a ambientes agresivos, como plantas de procesamiento químico, plantas de generación de energía y equipos aeronáuticos y marinos, que operan con extensos programas de mantenimiento [3]. A pesar de las mejoras que se realicen en los diseños y mejora en los materiales utilizados, es muy difícil anticipar todas las condiciones adversas que el sistema pueda enfrentar durante su vida útil. La inspección de corrosión generalmente requiere paradas periódicas planificadas o interrupciones del servicio para llevar a cabo el proceso de inspección.

Estas interrupciones programadas pueden ser costosas en términos de pérdida de productividad, energía de reinicio, disponibilidad de equipos y costos de materiales. Aunque estas interrupciones supongan un costo para las empresas, las interrupciones o paradas accidentales son potencialmente mucho más perjudiciales y costosas, por lo que es preferible planificarlas con antelación [2*]. En

la Figura 1 se presenta un caso típico de corrosión generalizada, la cual puede ser observada a simple vista, la cual lleva a una falla que inutiliza la pieza.

Figura 1

Corrosión extrema de una viga



Nota: Se muestra la afectada por corrosión en una viga de soporte. Tomado de: Ameli, Z.; Nesheli, SJ; Landis, EN Clasificación de condición y segmentación de corrosión de puentes de acero basada en aprendizaje profundo mediante máscara RCNN y YOLOv8. *Infraestructuras* 2024, 9, 3.

En el desarrollo industrial, el estudio de la corrosión ha tenido una gran importancia y ha buscado mejorar las condiciones y especificaciones de los materiales y sus aplicaciones, logrando así crear aislantes y materiales más resistentes a la misma ya que este representa una serie de costos anuales para todos los países. Es reportado que aproximadamente un 25% del acero fabricado es destruido por la corrosión, este es considerado en la actualidad como uno de los gastos más significativos en la industria [2].

2.1.2 Costos de la corrosión

Los costos de corrosión para las industrias representan un desafío constante para la seguridad, la economía y la sostenibilidad en sus operaciones diarias, estos costos están asociados principalmente con pérdidas económicas directas e indirectas, que también pueden afectar el medio ambiente [3]. En 2016, la National Association of Corrosion Engineers (NACE), asociación dedicada al desarrollo de estándares, certificaciones y educación sobre la prevención y el control

de la corrosión, creó el International Measures of Prevention, Application and Economics of Corrosion Technologies study (IMPACT). Esta iniciativa se enfoca en examinar el papel de la gestión de la corrosión en el establecimiento de diversas prácticas dentro de la industria [3].

El impacto global del costo de la corrosión en el 2013 se calculó en un costo anual de 2,5 billones de dólares, lo que representa el 3,4% del Producto Interno Bruto (PIB) global. Empleando las prácticas actuales de supervisión de la corrosión, se podrían reducir estos costos entre un 15% y un 35%, lo que se traduce en ahorros anuales de entre 375 y 875 mil millones de dólares a nivel mundial [3].

En el estudio presentado por la NACE [3] se espera que ayude a generar conciencia sobre las implicaciones que tiene la corrosión en cada país y las diferentes industrias que se ven afectadas por este fenómeno. En cada uno de los países se estudiaron los diferentes sectores productivos para determinar cuáles son los que mayormente se veían afectados por la corrosión dentro de sus procesos, siendo los segmentos más afectados la industria de petróleo y gas, tuberías de aguas potables y residuales [3].

En los datos recolectados para el estudio global de la corrosión, se dividieron en regiones con economías representativas, y cada una de las regiones se dividió en tres sectores económicos agricultura, industria y servicios, en la Tabla 1 se presenta un resumen del estudio presentado, puede ser notado que regiones con alta industrialización y productores de hidrocarburos presentan grandes pérdidas debidas a la corrosión. Estas pérdidas a nivel global representan una porción importante del producto interno bruto (PIB) de cada región, es importante destacar que muchas industrias no llevan un monitoreo de estas pérdidas lo que puede llevar a números mucho más altos.

Tabla 1

Costo Global de la Corrosión por región y por sector económico, pérdidas en % de PIB (GDP)

Economic Regions	Agriculture CoC USD billion	Industry CoC USD billion	Services CoC USD billion	Total CoC USD billion	Total GDP USD billion	CoC % GDP
United States	2.0	303.2	146.0	451.3	16,720	2.7%
India	17.7	20.3	32.3	70.3	1,670	4.2%
European Region	3.5	401	297	701.5	18,331	3.8%
Arab World	13.3	34.2	92.6	140.1	2,789	5.0%
China	56.2	192.5	146.2	394.9	9,330	4.2%
Russia	5.4	37.2	41.9	84.5	2,113	4.0%
Japan	0.6	45.9	5.1	51.6	5,002	1.0%
Four Asian Tigers plus Macau	1.5	29.9	27.3	58.6	2,302	2.5%
Rest of the World	52.4	382.5	117.6	552.5	16,057	3.4%
Global	152.7	1446.7	906.0	2505.4	74,314	3.4%

Nota: Muestra las pérdidas por corrosión dentro de los diferentes sectores económicos a nivel mundial. Tomado de: NACE International, "International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study," NACE International, Houston, TX, Report, 2016 [3].

En la Tabla 2 se presenta una lista de las diferentes asociaciones en las regiones de fuente del estudio, las cuales se encargan de realizar las estadísticas y recolección de datos. Además, se encargan de establecer las normas y buenas prácticas en la prevención y el control de la corrosión.

Tabla 2*Listado de organizaciones asociadas globalmente.*

Global Partner Organizations
Association of State and Territorial Solid Waste Management Officials [United States]
Australasian Corrosion Association [Australia]
American Water Works Association [United States]
DECHEMA Institute [Germany]
Exova [U.K., global locations]
India Academy of Engineering [India]
Indira Gandhi Centre for Atomic Research [India]
Institute of Oceanology [China]
International Union Painters and Allied Trades [United States & Canada]
Japan Society of Civil Engineers [Japan]
Petronas [Malaysian]
Saudi Aramco [Saudi Arabia]
U.S. Department of Defense [United States]
University of Science and Technology Beijing [China]
University of Calgary [Canada]

Nota: Se muestran las diferentes organizaciones. Tomado de: NACE International, "International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study," NACE International, Houston, TX, Report, 2016 [3].

2.2 Tipos de corrosión

La corrosión es un fenómeno natural, la cual implica la degradación de los materiales, generalmente metales, debido a reacciones electroquímicas con el entorno. Este fenómeno es un proceso inevitable en metales ya que ellos buscan la estabilidad termodinámica, es decir volver a su estado oxidado que es en el que se encuentran en la naturaleza. Este puede afectar a una amplia gama de materiales y estructuras, desde pequeñas herramientas hasta grandes infraestructuras como puentes, tuberías y edificios [2].

El tipo más común de corrosión es la oxidación, donde los metales en presencia de humedad reaccionan con el oxígeno presente en el medio. Un ejemplo de esto es el hierro, que se oxida formando óxido de hierro, conocido comúnmente como herrumbre. Sin embargo, dentro del proceso corrosivo se pueden tomar diferentes morfologías, como la corrosión generalizada, corrosión por picadura, corrosión galvánica, corrosión bajo tensión y corrosión intergranular, entre otras morfologías. Cada una de estas formas de corrosión presenta mecanismos específicos y puede

ser influenciada por factores como la composición del material, la presencia de agentes agresivos y condiciones ambientales a las cuales este está sujeto.

2.2.1 Corrosión uniforme

La corrosión uniforme se manifiesta sobre toda la superficie del material de manera homogénea, donde se presenta una pérdida uniforme de masa al encontrarse expuesto a un ambiente corrosivo. Esta forma de corrosión es la principal causa sobre la pérdida de material, aunque no se considera como un riesgo de falla que pueda ocurrir en poco tiempo, sin embargo, con el tiempo el metal se vuelve más delgado, y falla [5].

Figura 2

Corrosión uniforme



Nota: Muestra una corrosión uniforme sobre una tubería. Tomada de: Das, A.; Ichi, E.; Dorafshan, S. Image-Based Corrosion Detection in Ancillary Structures. Infrastructures 2023, 8, 66.

2.2.2 Corrosión por picadura

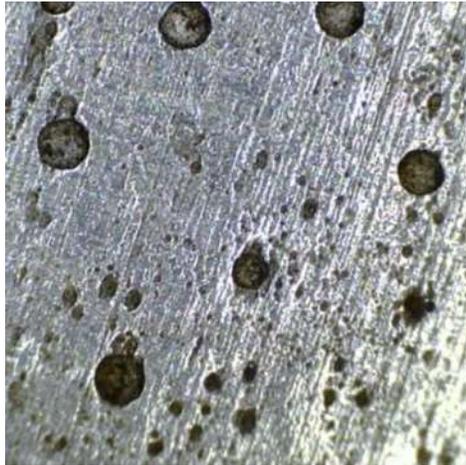
Esta forma de corrosión es probablemente uno de los más comunes cuando se habla de corrosión localizada. Actúa eliminando pequeños volúmenes de metal en ciertas áreas de la superficie, produciendo cráteres o picaduras que pueden llegar a perforar completamente el acero. Un ejemplo ilustrativo es la corrosión por picadura en tuberías, la cual puede desarrollarse en la parte superficial de un metal sumergido en líquidos estancados o con flujo lento [2].

La corrosión por picaduras se considera más peligrosa que la corrosión uniforme debido a su dificultad para ser detectada, anticipada y mitigada. Incluso una picadura mínima y estrecha, que cause una pérdida de metal mínima, puede conducir al fallo de un sistema y resultar en pérdidas industriales significativas. Aunque solo una pequeña cantidad de metal se corroa, las perforaciones

pueden ocasionar costosas reparaciones y la necesidad de reemplazar equipos completos, incrementando los costos [2].

Figura 3

Corrosión por picadura en un acero



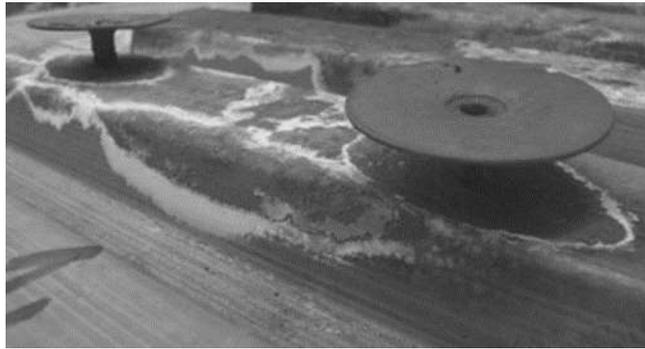
Nota: Muestra las diferentes picaduras generadas por la corrosión. Tomada de: "Pitting corrosion and rust on stainless steel: What are the causes and solutions?", Behaelter KG,

2.2.3 Corrosión galvánica

La corrosión galvánica es una forma de corrosión electroquímica, ocurre en el momento que dos metales de diferente naturaleza entran en contacto eléctrico directo, por lo que, en presencia de un electrolito, como lo es el agua salada, se forma una celda electroquímica, donde a la corrosión acelerada del metal menos noble (ánodo), mientras que el metal más noble (cátodo) se corroe a una velocidad mucho menor. En este proceso, es el material de menor potencial electroquímico es el que presenta este tipo de corrosión [5].

Figura 4

Panel de techo con corrosión galvánica



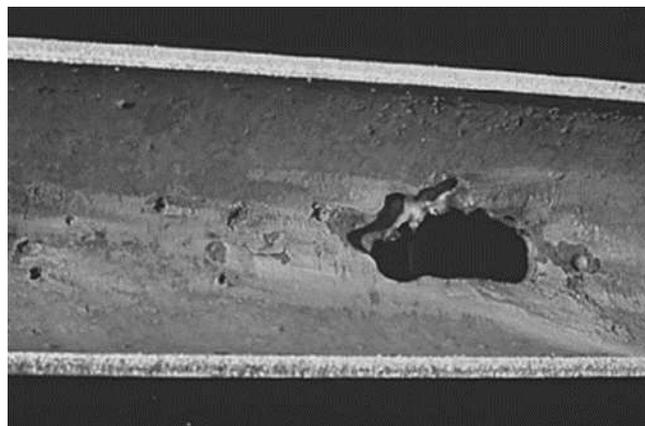
Nota: Se ve la afectación de la corrosión después de un largo tiempo cambiando la estructura de la pieza. Tomado de: P. R. Roberge, *Corrosion Engineering: Principles and Practice*. McGraw Hill Professional, 2008 [2].

2.2.4 Corrosión por erosión

Normalmente es observado este tipo de corrosión en una red de conducción de fluidos hechos con materiales con una protección pasiva, donde hay partículas más duras que la capa protectora. Donde el movimiento aleatorio del fluido produce la eliminación de esta capa, dando inicio a que el proceso de corrosión que se puede describir en la degradación del material por causa de las partículas en movimiento sobre la superficie [5].

Figura 5

Corrosión por erosión



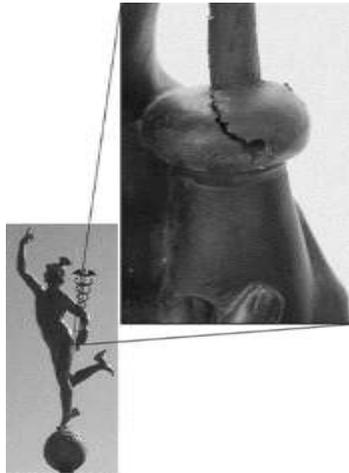
Nota: Se muestra la corrosión por erosión en una tubería transportadora de agua. Tomado de: P. R. Roberge, *Corrosion Engineering: Principles and Practice*. McGraw Hill Professional, 2008 [2].

2.2.5 Corrosión por tensión

Cuando un material se somete a tensiones de tracción, ya sean internas o externas, pueden formarse pequeñas fisuras que inician el proceso de corrosión. El conjunto de tensiones mecánicas y acciones corrosivas, conocida como corrosión bajo tensión, acelera el deterioro del material en comparación con el efecto individual de cada fenómeno. La corrosión produce en el material una debilitación, haciendo que la tensión tenga un impacto más significativo, lo que provoca una mayor fractura del material. Esta fractura, a su vez, facilita la propagación de la corrosión sobre un área mayor, lo que amplifica el proceso [5].

Figura 6

Corrosión bajo tensión



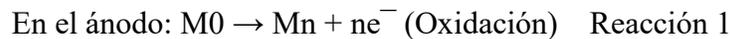
Nota: Se muestra una escultura de cobre corroída bajo tensión. Tomado de: P. R. Roberge, *Corrosion Engineering: Principles and Practice*. McGraw Hill Professional, 2008 [2].

Tabla 3*Resumen de los tipos de corrosión*

Tipo de Corrosión	Descripción
Corrosión Uniforme	Ataque generalizado de la superficie del metal, resultando en una pérdida de espesor de manera uniforme en toda la superficie.
Corrosión por Picaduras	Formación de pequeñas áreas de corrosión localizada en la superficie del metal, que pueden culminar en perforaciones.
Corrosión por Fisuras	Corrosión que se concentra en las áreas de tensión o fisuras del metal, causando la formación de grietas y fracturas.
Corrosión por Erosión	Resultado de la acción mecánica combinada con la corrosión, causada por el flujo turbulento de un fluido o el impacto de partículas sólidas en la superficie.
Corrosión Galvánica	Ocurre cuando dos metales diferentes están en contacto eléctrico en un medio conductor, causando la corrosión del metal menos noble.

Nota: Se muestran la descripción de los tipos de corrosión de forma concisa.

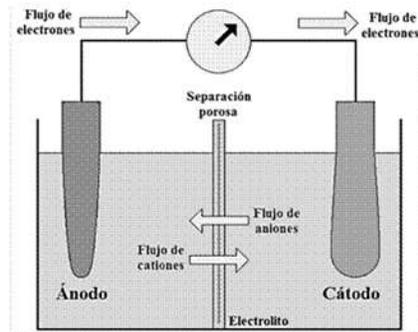
En el caso específico de la corrosión electroquímica, se establece un equilibrio entre corrientes anódicas y catódicas, lo que resulta en una corriente neta total de cero. Este proceso implica la transferencia de electrones entre las especies químicas presentes en la interfase metal-electrolito, lo que conduce a la degradación del material [6]. Ya que los procesos de corrosión ocurren fundamentalmente en metales, a continuación, se describe el intercambio iónico.



Se puede evidenciar como en las Reacciones 1 y 2, el ánodo experimenta una oxidación al ceder electrones al sistema durante la reacción, lo que provoca un aumento en su número de oxidación. Esto hace que el metal base se convierta en cationes que se disuelven en el electrolito, evidenciando así que este es el material que padece el proceso de corrosión. Por otro lado, en el cátodo, los aniones metálicos ganan electrones, lo que reduce su número de oxidación y los devuelve a su estado base. Este proceso se ilustra en la Figura 7 [5].

Figura 7

Representación de una celda electrónica



Nota: Representa el funcionamiento de una celda electroquímica. Tomado de: J. A. Salazar-Jiménez, «Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)», *Rev. Tecnol. En Marcha*, vol. 28, n.º 3, p. 127, sep. 2015.

2.3 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables cuentan con una amplia gama de usos industriales tales como tanques de almacenamiento, reactores, cascos de barco, entre otros usos. Lo que hace que sean tan llamativas es su velocidad de corrosión la cual es bastante lenta en la mayoría de atmósferas ordinarias [7]. Son aleaciones cuyos elementos principales son el cromo (Cr) [8], un elemento que es fundamental cuando se habla de aceros inoxidables. A esto se le es posible añadir elementos que proporcionan propiedades superiores al material, tales como una mayor resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, estabilidad térmica y facilidad de conformado, entre otras. Para entender mejor este concepto se crea la norma DIN EN 10088 la cual define a los aceros inoxidables como los aceros con una proporción mínima de cromo del 10.5% cantidad necesaria para evitar la formación de óxido en atmósferas no contaminadas [4]. Desde los primeros usos de los aceros inoxidables, se ha analizado que la propiedad la cual los hace tolerantes a la corrosión “inoxidables” es lograda gracias a la creación de una capa sutil y sin presencia física de óxido de cromo (Cr_2O_3), este óxido se crea y se regenera por sí mismo en presencia de partículas de oxígeno evitando una mayor oxidación de la aleación implícita, mientras la integridad de esta esta capa no sea abusada de alguna manera, la aleación no se corroe más [7]. Dentro de los aceros inoxidables está dividido por categorías o series, que se clasifican según sus características microestructurales. La designación AISI (por sus siglas en inglés, American Iron and Steel Institute) es utilizada para clasificar las diferentes series de aceros en función de las propiedades y composición química estas aleaciones

utilizan un código compuesto por tres cifras como lo son las series 200, 300, 400, 500, estos tipos de series permiten identificar la clasificación de los aceros como se puede ver en la Tabla 4 [9].

Tabla 4

Esquema designativo AISI para aceros inoxidable

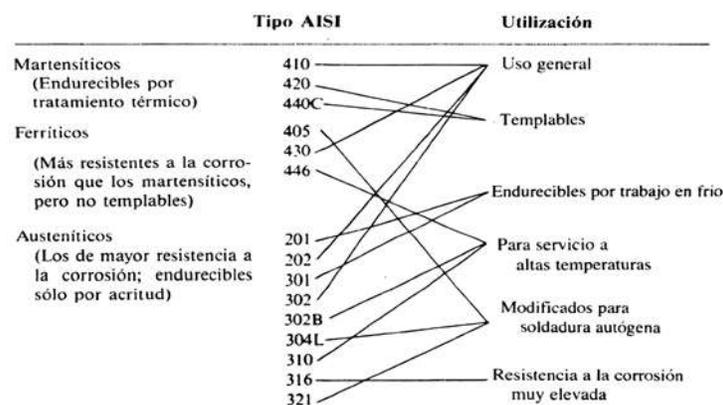
Serie	Aleadores	Estructura
200	Cromo, níquel, manganeso o nitrógeno	Austenítica
300	Cromo y níquel	Austenítica
400	Cromo sólo	Ferrítica ó martensítica
500	Cromo bajo (< 12%)	Martensítica

Nota: Se muestran las series de los aceros indicando las principales aleaciones que está compuesta y a la estructura que corresponden. Tomado de: E. P. DeGarmo, J. T. Black, y R. A. Kohser, *Materiales y procesos de fabricación*. Reverte, 1988.

Conociendo las designaciones del conjunto de aceros inoxidable en la Tabla 5 es posible evidenciar unas de sus clasificaciones junto con los usos que se les pueden dar a estos mismos.

Tabla 5

Clasificación y usos de los aceros inoxidable



Nota: Muestra los usos de los aceros representativos de cada tipo Tomado de: E. P. DeGarmo, J. T. Black, y R. A. Kohser, *Materiales y procesos de fabricación*. Reverte, 1988 [9].

2.3.1 Aceros inoxidables ferríticos

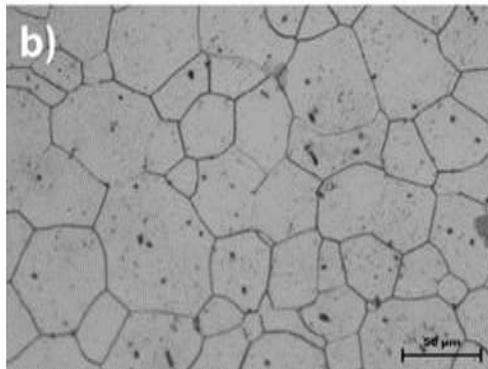
Los aceros inoxidables con estructura ferrítica donde principalmente se encuentran las aleaciones hierro y cromo, considerando que tienen características magnéticas, en conjunto a una buena ductilidad y resistentes a la oxidación y corrosión en temperaturas altas, debiéndose asegurar que la cantidad de cromo este igual o mayor a 11% asegurando la así la presencia de la capa de óxido de cromo, algunos de sus ejemplares se encuentran en la serie 400 como el AISI 405, 430, 442 y 446 [1].

Uno de los que mejor representa esta estructura es el AISI 430, el cual contiene 17% Cr y es considerada una aleación bastante adaptable para una variedad de aplicaciones que sea necesaria una alta resistencia a la corrosión [10]. Sin embargo, la tenacidad de los aceros ferríticos se encuentra restringida a temperaturas bajas y en secciones de gran grosor. Este tipo de acero no puede ser sometido a ser tratado térmicamente y no se encuentran disponibles en el mercado en estado endurecido por trabajo en frío [1].

Comparativamente, su ventaja sobre los aceros inoxidables austeníticos es su resistencia a la corrosión bajo tensión. Uno de sus principales usos dentro de las plantas de procesamiento de petróleo o gas es en los intercambiadores de calor [1]. En la Figura 8 se presenta la microestructura típica de los aceros inoxidables ferríticos, en este caso un acero AISI 439.

Figura 8

(B) microestructura de un acero inoxidable 436 ref.



Nota: Se muestra la microestructura ferrítica del acero AISI 436 C. Gaona Tiburcio, F.H. Eslupiñán López, P. Zambrano Robledo, J.A. Cabral, M.C. Barrios Durtewitz, y F. Almeraya Calderon, "Electrochemical Corrosion of Ferritic 409 and 439 Stainless Steels in NaCl and H₂SO₄ solutions," Journal of Electroanalytical Chemistry, vol. 1452, no. 3981, pp. 15906-15906, 2023.

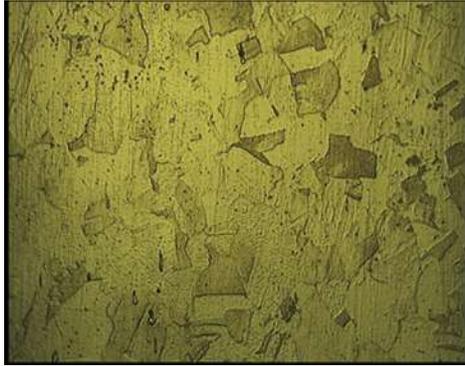
2.3.2 Aceros inoxidables austeníticos

En este tipo de aceros inoxidables contienen cromo el cual le otorga propiedades inoxidables y como elemento importante el níquel, su composición puede variar entre el 16 y el 25% de Cromo y de níquel entre 6 a 22%. Estos al igual que los ferríticos no cuentan con la posibilidad de ser endurecidos por tratamientos térmicos, ya que la transformación a martensita de la perlita no es posible [11], dada su composición química. Los aceros austeníticos se encuentran en una agrupación segmentada en dos grupos al cromo-níquel-manganeso la cual sería serie 200 y al cromo-níquel que pertenecería a la serie 300 [9]. Este tipo de aceros se pueden trabajar en ambos rangos de temperaturas a altas temperaturas como a bajas temperaturas. El trabajo a bajas temperaturas elabora un amplio rango de propiedades mecánicas, en esta condición, el acero puede llegar a ser ligeramente magnético [12]. En estos aceros se encuentra una mayor resistencia a temperaturas elevadas y su capacidad para evitar la formación de escamas es notable. Por lo general, su resistencia a la corrosión supera la de los aceros martensíticos y ferríticos. Son muy resistentes al impacto y difíciles de maquinar.

El principal inconveniente de soldar aceros austeníticos reside en la precipitación de carburos dentro de las áreas adyacentes al cordón de soldadura, lo que puede llevar a la sensibilización y a la corrosión intergranular es decir degradación entre los granos. Para evitar esto, resulta fundamental soldar las piezas sin algún tipo de precalentamiento y utilizando una baja intensidad térmica que sea posible [12].

Figura 9

Microscopía óptica de probeta de AISI 304 patrón 500X



Nota: Se muestra la microscopía óptica austenítica de un acero AISI 304. Influencia del tratamiento térmico de recocido sobre la microestructura, dureza y atenuación ultrasónica de aceros inoxidable AISI 304.

2.3.3 Aceros inoxidables dúplex

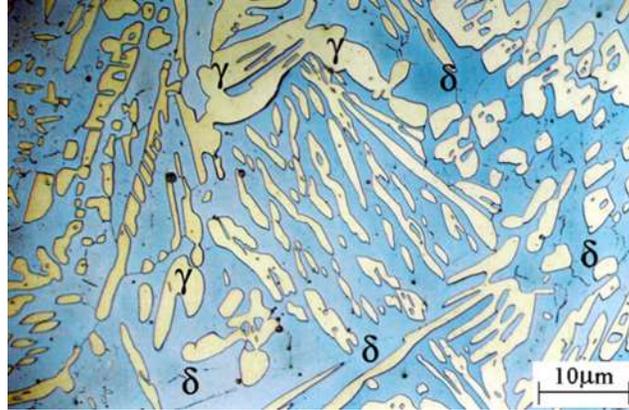
Este tipo de aceros inoxidables están compuestos por la mezcla de ferrita y austenita, con proporciones aproximadamente iguales de cada una, es decir 50% - 50% [1]. Estos aceros han ganado popularidad gracias a su resistencia elevada, buena tenacidad y excelentes capacidades anticorrosivas, especialmente a la fractura por corrosión bajo tensión, lo que los convierte en una opción altamente práctica y rentable en diversas industrias como la marina, los intercambiadores de calor y el procesamiento químico [13].

El desarrollo de estos aceros tuvo una evolución importante en la década de 1970 con la introducción del método de producción del acero de descarburación argón-oxígeno (AOD) y la adición de nitrógeno, lo que permitió mejorar la soldabilidad y la resistencia a la corrosión [14]. Además, se ha diseñado un específico acero inoxidable dúplex para que tenga una resistencia elevada, una excelente resistencia al momento de corrosión por picaduras y una maniobrabilidad en caliente superior, con una composición química y una microestructura definidas.

Los aceros dúplex presentan también el beneficio de una gran fuerza mecánica, con límites elásticos en un intervalo de 700-900 MPa, el doble de la fuerza aceros inoxidables austeníticos, por lo cual se puede suponer un importante ahorro en costes de material. Un ejemplo de su aplicación es para la fabricación de tanques de almacenamiento de buques de carga, se ha observado que el acero inoxidable dúplex 2205 supera en resistencia al acero inoxidable austenítico 317 LN, lo que permite un importante ahorro en el peso de la estructura [1].

Figura 10

Micrografía de la solución de material recocida a 1130 °C y enfriada con agua. Reactivo Beraha II. Ampliación: 200×



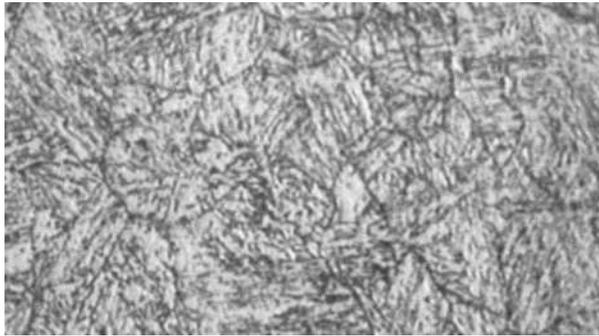
Nota: Se muestra la microscopía óptica de un acero inoxidable superduplex. M. Martins y L.C. Casteletti, "Microstructural characteristics and corrosion behavior of a super duplex stainless steel casting," Journal of Materials Research and Technology.

2.3.4 Aceros inoxidables endurecidos por precipitación

Valorados por su combinación de propiedades mecánicas sobresalientes y su robusta resistencia a la corrosión, los aceros inoxidables endurecidos por precipitación se utilizan en numerosas aplicaciones. como la aeroespacial, el mecanizado y el blindaje nuclear [15]. La composición y las propiedades de estos aceros está asociada con su rendimiento y comportamiento durante los tratamientos térmicos junto a los procesos de fabricación avanzados [16]. Se logra obtener una alta resistencia y dureza, se consiguen mediante la formación de partículas precipitadas a través de la reacción entre cobre, aluminio, titanio, niobio o molibdeno. Generalmente se presenta una leve disminución en la resistencia a la corrosión y un aumento en la susceptibilidad a volverse frágil por el hidrógeno [1]. Este tipo de aceros muestran propiedades mecánicas similares a las de los martensíticos, con un límite de fluencia que oscila entre 500 y 1400 MPa, mientras que la resistencia mecánica que varía entre 850 y 1500 MPa, junto con elongaciones del 1 al 25%; La ventaja esencial es que estas propiedades se logran en aceros con un contenido de carbono inferior al 0.1% [1].

Figura 11

Microestructura del acero AISI-SAE 630, en estado de entrega, atacado con Villela. 200X



Nota: Se muestra la microscopía óptica de un acero AISI 630. Darío Yesid. Peña Ballesteros, Hugo Armando. Estupiñán Durán, y W. Vesga Rivera, "Evaluación De La Corrosión Por Picado De Un Acero Inoxidable Aisi-Sae 630 Endurecido Por Precipitación En Agua De Mar Sintética Mediante Técnicas Electroquímicas," Revista UIS Ingenierías, vol. 7, no. 1, pp. 53-64, enero-junio, 2008.

2.3.5 Aceros inoxidables martensíticos

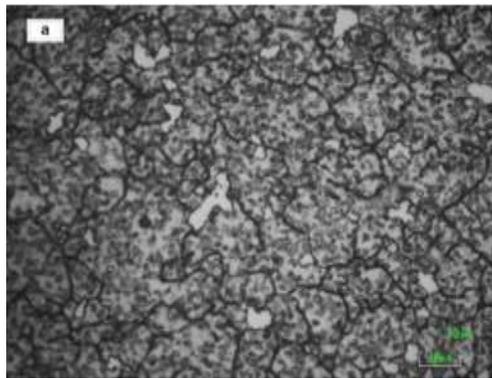
Los principales componentes son el hierro, el cromo y el carbono, que forman aceros inoxidables martensíticos, con un contenido de cromo que varía entre el 11% y el 18%, y hasta más del 1% de carbono. Estos aceros, a temperatura ambiente, presentan magnetismo y se distinguen de los aceros ferríticos y austeníticos por su capacidad de endurecerse mediante tratamiento térmico, siguiendo métodos similares a los utilizados en los aceros para maquinaria [11]. Aunque su capacidad de resistencia a la corrosión es limitada, a menudo se añaden elementos como niobio, silicio, wolframio y vanadio para aumentar la eficacia durante el revenido, y níquel para reforzar su capacidad de resistencia a la corrosión [1]. Trabajar con aceros inoxidables martensíticos en frío y en caliente es sencillo, ya que se pueden mecanizar fácilmente y tienen muy buena tenacidad y resistencia a la corrosión atmosférica. Se utilizan cuando se requiere una gran resistencia mecánica, resistencia a la fluencia y resistencia a la fatiga en ambientes moderadamente agresivos de hasta 650°C [1].

El acero AISI 410 del cual será estudiado en el desarrollo de este trabajo, se encuentra entre los aceros inoxidables más habituales, es utilizado en la industria, se utiliza para fabricar pernos, ejes de bombas, válvulas y álabes de turbinas diseñados para trabajar con gas y vapor. A temperaturas elevadas, estas aleaciones presentan una estructura austenítica que puede transformarse en martensita mediante un tratamiento térmico de temple, lo que se traduce en un aumento de la

dureza y la resistencia al desgaste. La capacidad de templado y revenido está presente en todos los aceros inoxidable martensíticos, siendo la dureza obtenida determinada por la cantidad de carbono presente en la aleación [1]. La capacidad de estos aceros para resistir la corrosión está relacionada con la cantidad de cromo que contienen y con su microestructura. En términos generales, aunque presentan una resistencia a la corrosión menor que otras variedades de aceros inoxidable, los aceros martensíticos se caracterizan por su notable resistencia mecánica [10]. En la Tabla 6 se hace un comparativo de las aplicaciones de los diferentes aceros inoxidable.

Figura 12

Micrografías de campo brillante. CPs: Carburos principales, CSs: Carburos secundarios. Atacado con a) Villela.



Nota: Se muestra la microscopía óptica de un acero inoxidable martensítico. J. Alegría Ortega, "Influencia de la velocidad en la erosión-corrosión de un recubrimiento multicapas de Cr/CrN depositadas sobre acero 440C por el sistema de AC-PVD," 2012.

Tabla 6

Aplicaciones de los aceros inoxidable

I.Martensíticos	II.Ferríticos	III.Austeníticos	IV.Dúplex	V.Endurecibles por precipitación
<ul style="list-style-type: none"> - Aspas de turbinas. - Revestimiento de asientos para válvulas. - Carcasas de bombas - Cuerpos de válvulas y compresores. - Cuchillería, hojas de afeitar e instrumentos quirúrgicos - Ejes y pernos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Estampado profundo de piezas - Aplicaciones de resistencia al agrietamiento por corrosión de tensiones de cloruro, en medios acuosos, oxidación a alta temperatura y corrosión por picadura y hendidura por medios de cloruro - Tubos de escape de automóviles, tanques de radiadores y alcantarillas. - Adornos decorativos - Partes de hornos, boquillas y cámaras de combustión. - Tanques de agua caliente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los aceros que son solo austeníticos pueden ser usados a temperaturas tan bajas como 270°C. - Plantas y equipos químicos. - Equipos para procesamiento de alimentos. - Uso arquitectónico. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tuberías de intercambiadores térmicos de petróleo, plataformas de ultramar, pozos de gas, tuberías en línea, cuerpos de válvulas para manejar agua de mar y bombas de fundición. - Industria de procesamiento químico, de la celulosa. - Usos marinos a temperaturas levemente elevadas. - Plantas de desalación y petroquímicas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Servicios a alta temperatura como intercambiadores de calor y tubos de sobrecalentamiento de calderas a vapor. - Componentes aeroespaciales y marinos - Tanques de combustibles. - Partes de bombas. - Ejes y pernos. - Sierras, cuchillos y juntas tipo fuelle flexible.

Nota: Muestra las diferentes utilidades que tiene cada uno de los aceros anteriormente nombrados en el texto. Tomado de: *Aceros inoxidable: Mesada del quirófano vs. procesamiento de pulpa en Finlandia,* Bulones, Tornillos, Tuercas, Arandelas y Más, 20 de noviembre de 2014.

2.4 Acabado superficial en elementos metálicos

El acabado superficial se ha convertido en un elemento central para conseguir las especificaciones de los productos, lo que ha provocado un cambio en la industria, a su vez, en la producción. Es imprescindible tener en cuenta los diseños y las tareas que hay que llevar a cabo para conseguir estos avances tecnológicos. En primer lugar, hay que transformar estos materiales y mejorar sus propiedades para sacarles el máximo partido. Para integrar estos avances, es esencial comprender y entender los procesos tecnológicos necesarios para obtener piezas que se adapten a los modelos de producción, teniendo en cuenta los costos y los factores medioambientales [17]. La selección meticulosa de los tratamientos superficiales adecuados se basa siempre en la obtención de un conjunto completo de requisitos sobre la superficie de la pieza en relación con las condiciones de funcionamiento previstas en los diseños. La superficie es responsable de todas las interacciones mecánicas, térmicas, químicas y electroquímicas con el entorno. De ahí se derivan las principales funciones que deben cumplir las superficies técnicas. Así, el mecanizado de los aceros inoxidable influye considerablemente en su acabado superficial, afectando tanto a sus propiedades

funcionales como estéticas, la elección de los parámetros de mecanizado adecuados es crucial para obtener el acabado deseado y mantener las propiedades del material [18]. A continuación, son presentados algunos términos importantes en la definición de acabados superficiales de materiales metálicos, producidos por mecanizado.

- **Rugosidad:** El proceso de mecanizado puede generar diferentes niveles de rugosidad en la superficie de los aceros inoxidables. La elección de las herramientas, la rapidez de corte, el espesor de corte y el avance influyen en la rugosidad final. Un acabado más liso generalmente se obtiene con herramientas afiladas, velocidades altas y avances finos.
- **Patrones de Herramienta:** Los patrones de corte dejados por la herramienta pueden ser visibles en la superficie mecanizada. Estos patrones pueden ser deseables en algunas aplicaciones por razones estéticas o funcionales, pero en otras pueden ser considerados defectos que requieren procesos adicionales de pulido o esmerilado.
- **Tensiones Residuales:** Durante el mecanizado, se generan tensiones residuales en la zona expuesta del material. Estas tensiones llegan a impactar con la resistencia a la degradación y la durabilidad de la pieza frente a la corrosión. En algunos casos, puede ser necesario realizar tratamientos térmicos post-mecanizado para aliviar estas tensiones.
- **Oxidación pasiva:** El calor generado durante el mecanizado puede afectar la película pasiva de óxido de cromo que resguarda a los aceros inoxidables de la corrosión. Si esta capa se daña, la resistencia a la corrosión puede reducirse, siendo más susceptible a la corrosión.
- **Contaminación Superficial:** Durante el mecanizado, la superficie de los aceros inoxidables puede contaminarse con partículas de otros metales, especialmente si se usan herramientas de corte que han sido utilizadas en otros materiales. Estas contaminaciones pueden actuar como sitios de iniciación para la corrosión.
- **Brillo y Reflectividad:** El mecanizado puede afectar el brillo y la reflectividad de la superficie de los aceros inoxidables. Un acabado mecanizado fino puede producir una superficie altamente reflectante, mientras que un acabado más rugoso puede dar lugar a una apariencia un poco más opaca como mate.

- Defectos Superficiales: Rayaduras, marcas de herramientas y otras imperfecciones pueden ser introducidas durante el mecanizado. En aplicaciones donde el acabado estético es crítico, puede ser necesario realizar operaciones adicionales de pulido o esmerilado para mejorar la apariencia superficial.

2.5 Mecanizado de elementos metálicos

El mecanizado consta de un proceso de elaboración de piezas mediante el desprendimiento de capas sobrantes con el fin de darle dimensiones, forma y acabado que se desea mediante el uso de herramientas de corte, las cuales son guiadas por el operador [19]. El objetivo del mecanizado es la creación de piezas puntuales con tolerancias ajustadas, lo que lo convierte en uno de los métodos más comunes y precisos para la producción de productos y componentes en distintas líneas industriales con el uso de diferentes aceros.

En los procesos de fabricación pueden intervenir diferentes máquinas de herramientas como tornos, fresadoras, taladros y rectificadoras, los cuales son fundamentales en el proceso de mecanizado, permiten realizar procesos determinados y repetibles. Cada una de estas herramientas de trabajo tiene una intencionalidad en la creación de una pieza, como lo es el torno ya sea en alguna de sus diferentes referencias, son máquinas encargadas del mecanizado de una pieza cuya geometría son cuerpos en revolución [20]. Esta máquina la componen el carro longitudinal (eje Z) el cual es el carro de las herramientas que se mueve a través de toda la pieza y el carro transversal (eje X), el cual mueve las piezas siguiendo una dirección perpendicular al eje central de la pieza. Por último, un tercer carro que es el encargado de mecanizar ya que cuenta con una rotación de 360 grados llamado charriot [20]. Los principales usos de esta herramienta son el mecanizado de radios, espirales, roscas, conos, refrentado y cilindrado. Esto genera virutas y puede dejar una superficie lisa y precisa en la pieza.

El taladrado se utiliza para crear agujeros en el metal mediante una broca que gira y corta a través del material, eliminando virutas y dejando una superficie interior del agujero relativamente lisa para así por consiguiente el operario sea el encargado de introducir el macho el cual es la herramienta que permite el roscado dentro. El agujero depende de la precisión de la máquina y de la broca utilizada. Para la realización de los agujeros es necesario tener en cuenta la calidad del acero y la dureza del mismo para así mismo ajustar las RPM necesarias para crear el agujero, ya que si no se tiene en cuenta esto puede causar daños a la pieza y a la herramienta de corte [20].

El corte por láser se compone por un rayo láser concentrado para fundir el metal y cortarlo a través de él. Este proceso puede proporcionar cortes muy precisos, pero la zona cercana al corte puede experimentar algún endurecimiento. Los factores que determinan la posible aplicación de este método son las propiedades térmicas, ópticas, eléctricas y mecánicas del material [21]. El mecanizado por rayo láser es un proceso no tradicional que utiliza un láser el cual es refractado por una serie de espejos los cuales en conjunto se unen para realizar la remoción del material en una pieza de trabajo metálica. Se conocen que hay infinidad de tipos de láser alrededor de 5000, pero los que son usados con una mayor frecuencia son los de gas de dióxido de carbono, este proceso a diferencia de los otros existe una posibilidad de crear una línea de producción en masa de piezas con los avances de las nuevas tecnologías. Los efectos en el metal son distintos de los obtenidos mediante métodos de mecanizado convencionales, como el fresado o el torneado, este método tiene una gran ventaja y es que no posee ningún contacto físico con la pieza ya que la luz del láser es enfocada por un lente el cual se encarga de la reducción de material, adicionalmente su utilidad se excede a materiales extremadamente duros, el acabado que deja sobre la superficie es rugoso debido a la erosión causada [22].

En el proceso de arranque de viruta se elabora mediante una herramienta cortadora principal para este tipo de proceso, para las superficies de las piezas puede variar según el tipo de herramienta, material y velocidad [23]. Cuando se implementa los diferentes tipos de mecanizado en la fresadora los cuales están dados por investigador Einstein que existen principalmente tres tipos que son procesos de mecanizado mediante arranque de viruta, por abrasión y el mecanizado sin arranque de viruta, que nos permite hacer uso de la máquina principal y poder obtener piezas innovadoras. En cada caso puntual se puede centrar en la fresadora vertical, que puede realizar la prueba del material que se está usando y también para trabajos frontales. El fresado es un trabajo el cual sus principales objetivos son la obtención de superficies planas y curvadas [23].

Las máquinas y herramientas que nos da el mecanizado con diferentes posibilidades que brinda para la creación de diferentes piezas y con diferentes subjetividades que poseen cada una de las máquinas y herramientas como lo son el torno, fresado, taladrado, rectificado y corte con plasma. Cada una de estas máquinas le brindan un acabado diferente a las piezas como lo es la perfección de la superficie o algún tipo de grabado que se necesite realizar en ellas aunque este tipo de procedimientos le brinden un gran acabado a la pieza como tal y apariencia perfecta, esto no la

hace exenta a la corrosión y otros fenómenos de superficie, por lo que cada acabado que brinda cada una de las máquinas y herramientas brinda una superficie diferente, por lo que se pretende analizar con cuál de estos procesos el acero inoxidable es menos propenso a daños por el fenómeno de corrosión.

El mecanizado CNC (Control Numérico por Computadora) es una tecnología que está a la vanguardia de los nuevos avances industriales utilizando sistemas computarizados para controlar herramientas y maquinaria en el proceso de manufactura logrando así una alta precisión y repetibilidad en el sistema de piezas siendo ideal para aplicaciones industriales que requieren tolerancias estrictas y acabados de alta calidad, este requiere tres componentes esenciales para su funcionamiento: el programa de la pieza a mecanizar, una unidad de control computarizada y el equipo de procesamiento[24]. La manera en la que opera es mediante el control numérico computarizado, utilizando un código de programación el cual dicta los parámetros para la creación de las piezas, este puede ser elaborado de manera manual o generado mediante un software CAM a partir de un dibujo 3D de dicha pieza [25].

Para determinar los parámetros de corte del material, es necesario tener en cuenta las revoluciones a las que opera la herramienta de corte, conocer las propiedades de la herramienta de corte que se utilizará en conjunto con el avance que se proporcionará para el mecanizado del material. material por lo tanto en el uso de la fresadora es necesario utilizar las siguientes ecuaciones.

Para determinar las revoluciones por minuto (RPM) determinada en la Ecuación 1 para una fresadora en función de la velocidad de corte y teniendo en cuenta el diámetro de la herramienta:

Ecuación 1

$$RPM = \frac{Vc * 1000}{\pi * D}$$

Donde:

Vc = Es la velocidad de corte en metros por minuto (m/min).

D = Es el diámetro de la herramienta en milímetros (mm).

π = Es aproximadamente 3.14159.

- Para determinar el avance total(F) es necesario tener en cuenta el avance por diente (fz) y el número de dientes de la herramienta de corte (Z).

Ecuación 2

$$F = \text{RPM} \times f_z \times Z$$

Donde:

RPM: Revoluciones por minuto de la herramienta.

f_z : Avance por diente en mm/diente.

Z: Número de dientes de la herramienta.

2.6 Antecedentes

La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable es una característica crítica que determina su conveniencia en aplicaciones exigentes, especialmente en entornos corrosivos. La corrosión por picaduras es una forma localizada de corrosión que se produce cuando se penetra en la capa pasiva de óxido de cromo [2], la que protege la superficie del acero inoxidable.

El acabado superficial de los aceros es un factor determinante en la resistencia de corrosión por picadura donde los diferentes métodos de acabado, pueden alterar la rugosidad de la superficie y la integridad de la capa pasiva así como es estudiado por G.T. Burstein y P.C. Pistorius en donde se investigó la susceptibilidad en un acero inoxidable AISI 304 en donde se analizó a diferentes papeles de carburo de silicio a un grano de 1200 y 4000 indicando que entre menor número de grano el acabado va a ser más rugoso, determinando que un acabado superficial más liso reduce la presencia de picaduras en el acero al reducir el número de sitios susceptibles de crecimiento de picaduras, aunque también demostraron que una vez creciendo la picadura en una superficie más lisa tenía una mayor probabilidad de tener una mayor dimensión en la picadura.[2*6]. A su vez este resultado se obtuvo en el estudio de Wenming Tian Bingxuan Chao, Xiyao Xiong, Zhiyong Li en el cual se analizó la rugosidad sobre una aleación de aluminio con papel de carburo de silicio estudiando con grano 600, 2000 y 5000 indicando que entre menor número grano el acabado va a ser más rugoso que en la superficie más rugosa exhibió más picaduras y más grandes frente a la más lisa, indicando que las picaduras podrían iniciarse más fácilmente en la superficie más rugosa [27].

Aunque en todos los estudios no se encontró un resultado absoluto de que era lo que depende el efecto de la corrosión en la superficie ya T. Hong y M. Nagumo en conjunto se realizó el estudio

del efecto de rugosidad en un AISI 301 con acabado de papel de silicio de grano 240, 400, 800, 1000 y 1500 indicando que entre menor número grano el acabado va a ser más rugoso, como resultado se obtuvo que cuanto más lisa es la superficie mayores los valores para corroerse, mostrando que a una superficie más rugosa es menor el índice corrosión [28]. En la literatura encontrada se muestra que un acabado en donde su superficie esté más lisa será menos la muestra de surcos y ralladuras los que hacen que aumente la corrosión ya sea generalizada o localizada, por lo que al reducir los surcos estos ayudan a evitar la rugosidad en el material, teniendo en cuenta en el mecanizado que al aumento en la velocidad de avance y las profundidades de corte axial y radial harán que aumente la rugosidad de la superficie [29].

Un factor determinante hacia los aceros inoxidable es la cantidad de cromo que estos posean ya que a menor nivel de cromo estos tendrían una menor resistencia en su capa protectora por lo que llegaría a corroerse en un periodo de tiempo, al estar presente en ambientes corrosivos o por ataques electroquímicos hacia el material [28].

2.7 Acero inoxidable AISI 410

El acero inoxidable AISI 410 es un acero martensítico que se destaca por su alta resistencia mecánica, dureza y una resistencia moderada a la corrosión. A continuación, se presentan sus características principales, sus propiedades, aplicaciones y consideraciones sobre su resistencia a la corrosión [30].

Tabla 7

Composición Química nominal

Elementos	Métrico
Carbono, C	$\leq 0.15 \%$
Cromo, Cr	11.5 - 13.5 %
Hierro, Fe	84.3 - 88.5 %
Manganeso, Mn	$\leq 1.0 \%$
Fósforo, P	$\leq 0.040 \%$
Silicio, Si	$\leq 1.0 \%$
Azufre, S	$\leq 0.030 \%$

Nota: Muestra a nivel químico la composición nominal del acero AISI 410. Tomado de: MatWeb, LLC, "Material Property Data: AISI 410 Stainless Steel," MatWeb,

- **Propiedades Mecánicas**

- Elevada resistencia a la tensión y fatiga.
- Gran tolerancia al desgaste y abrasión.
- Dureza elevada, que puede mejorarse mediante tratamientos térmicos, este acero posee en escala de Rockwell C (HRC) 45.

- **Propiedades Físicas**

- Densidad: 7.75 g/cm³
- Punto de fusión: 1480°C (2700°F)
- Módulo elástico: 200 GPa (29,000 ksi)

- **Tratamientos Térmicos**

El acero AISI 410 puede pasar por distintos tratamientos térmicos para adaptar su comportamiento mecánico y mejorar su rendimiento:

- Temple y revenido: Para aumentar la dureza y la resistencia.
- Recocido: Para aliviar las tensiones internas y mejorar la ductilidad.

- **Resistencia a la Corrosión**

El AISI 410 posee una tolerancia moderada a la corrosión gracias a su contenido en cromo, que genera una película de óxido de cromo protegiendo la capa exterior. Sin embargo, no es tan resistente como los aceros inoxidable austeníticos como el AISI 316. Este acero está propenso a la corrosión por picadura, es una desventaja notable en entornos con altas concentraciones de cloruro, como en aplicaciones marinas o industriales con exposición al agua salada.

2.8 Aplicaciones

El acero inoxidable AISI 410 puede ser utilizado en múltiples sectores industriales donde es necesaria una elevada resistencia y dureza, y la resistencia a la corrosión es un factor moderado, como componentes de turbinas, válvulas, ejes de bombas, piezas de compresores, herramientas de corte, piezas de maquinaria y equipos para la industria petroquímica.

3. METODOLOGÍA

3.1 Selección de parámetros

La selección adecuada de los parámetros de corte es crucial para garantizar unos resultados óptimos en términos de calidad de mecanizado, vida útil de la herramienta y eficacia del proceso. Por lo tanto, se llevó a cabo un análisis detallado para determinar los valores óptimos, teniendo en cuenta diversos factores como el tipo de operación, las propiedades del material de la pieza y las especificaciones de la herramienta. Con el objetivo de maximizar la eficiencia y precisión del proceso, se decidió utilizar una máquina CNC LG-500 de Hartford, disponible en los Laboratorios de la Universidad de América, este es un centro de mecanizado vertical de frente abierto con una capacidad de tener 24 herramientas las cuales pueden cumplir funciones como taladrar, fresar y planear, junto con unas guías lineales de alto rendimiento para mayor precisión de corte teniendo una variedad de herramientas para el mecanizado para este trabajo se optó por la herramienta de corte por fresado que se puede ver en la Figura 13.

Figura 13

Maquina CNC, fresadora con puntas de tungsteno, Programa de la CNC.



Nota: Muestra la maquina CNC utilizada para el mecanizado de las muestras junto a la herramienta de corte seleccionada

Con la determinación de la máquina de herramientas CNC disponible en la Universidad América, ubicada en el taller de herramientas, se selecciona la herramienta que se va a usar, es una fresa AKKO AFM 43-OD0504-D063-A22-Z06-H de carburo de tungsteno que le proporciona

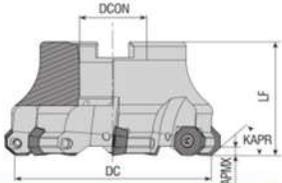
propiedades de dureza y resistencia al desgaste, en la Figura 14 se presentan sus especificaciones técnicas.

Figura 14

Herramienta de corte utilizada en la CNC

konusulan
the spoken kalite...
quality...





Takım Kodu Ordering Code Bestell-Bezeichnung	Stok Stock Lager	Takım Ölçüleri (mm) Dimensions (mm) Abmessung (mm)					Yedek Parçaları / Spare Parts / Ersatzteile			
		DC	ZEFP	DCON	LF	APMX	Kesici Uç Insert Wendeschneide	Sıkma Vidası Screw Schraube	Tork Anahtarı Torx Key Torx-Schlüssel	Montaj Vidası Mounting Screw Befestigungsschraube
AFM43-OD0504-D040-A16-Z04-H	●	40	4	16	40	3.5	OD.. 0504..	4015-M3.5x11	80-T15	2506-M8x30
AFM43-OD0504-D050-A22-Z05-H	●	50	5	22	40	3.5				2407-M10x30
AFM43-OD0504-D063-A22-Z06-H	●	63	6	22	40	3.5				2510-M12x35
AFM43-OD0504-D080-A27-Z07-H	●	80	7	27	50	3.5				2514-M16x35
AFM43-OD0504-D100-A32-Z08-H	●	100	8	32	50	3.5				

R: Sağ / Right / Rechts L: Sol/Left/Links
 ● Stokta / In Stock / Auf Lager ○ Stokta Yok / Non Stock Item / Kein Lagerartikel, Lieferzeit auf Anfrage
 WLTR Ucuna Uygundur. / Compatible with WLTR Insert. Kompatibel mit WLTR Wendepaletten.

Sipariş Örneği/Ordering Example/Bestellbeispiel
 1 ad./pcs./stück AFM42C-XD0806-D063-A27-Z04-H
 Kesme Hesabı : S 331 / Cutting Calculation : P 331 / Schnittberechnung : 331
 Montaj Ölçüleri : S 328 / Mounting Reference : P 328 / Montagehinweis : 328

Nota: Muestra las diemnsiones de la herramienta de corte utilizada para el mecanizado con CNC. Tomado de: Toolbox.sk, "AKKO AFM43-OD0504-D050-A22-Z05-H - Face mill 43° with internal cooling - ø 50 mm,"

Teniendo presente la máquina CNC que va a ser usada junto a la herramienta de corte se procede a la estimación los valores de corte para las muestras, teniendo en cuenta la velocidad de corte (Vc) dados en la Tabla 7 donde se toma la velocidad de corte de fresado para determinar las revoluciones(RPM) a las que se debe cortar la muestra, esto lo podemos determinar utilizando la Ecuación 1.

Tabla 8*Aplicaciones y velocidades de corte de mecanizado*

Aplicación	Vc (m/min)
Torneado	205 - 275
Fresado	130 - 175
Tronzado	80 - 110
Ranurado	125 - 165
Taladrado	60 - 80

Nota: Se muestra la velocidad de corte para los diferentes tipos de mecanizado. Tomada de: Machining Doctor, "Material Data Sheet: AISI 410 Stainless Steel,"

Ecuación 1

Para una $V_c = 130$ m/min

$$RPM = \frac{(130 * 1000)}{(\pi * 63)} = 656.83 \text{ RPM recomendadas}$$

Por consiguiente, es necesario hallar el avance total (F) el cual se logra determinar con la ecuación 3 teniendo en cuenta que las RPM fueron de 656.83, el avance por diente (f_z) es tiene un rango de 0.05 a 0.2 mm/diente y el número de dientes de la herramienta (Z) es de 6.

Ecuación 2.

$$F = RPM \times f_z \times Z$$

$$F = 656.83 * 0.05 * 6 = 197.046 \text{ mm/min}$$

Utilizando los valores calculados permite optimizar el rendimiento del proceso de fresado, asegurando la calidad y la consistencia en la producción de componentes mecanizados con tolerancias precisas por lo que se realizó un primer análisis donde se mecanizo una muestra a una velocidad de 700 RPM a un avance fijo de 200 mm/min obteniendo un acabado poco deseado por lo que se optó por aumentar la velocidad a 1000 RPM manteniendo el mismo avance y de ahí ir aumentando de a 500 RPM por cada muestra cómo se puede evidenciar en la Tabla 9.

Tabla 9

Se especifican los parámetros utilizados para el mecanizado de las muestras

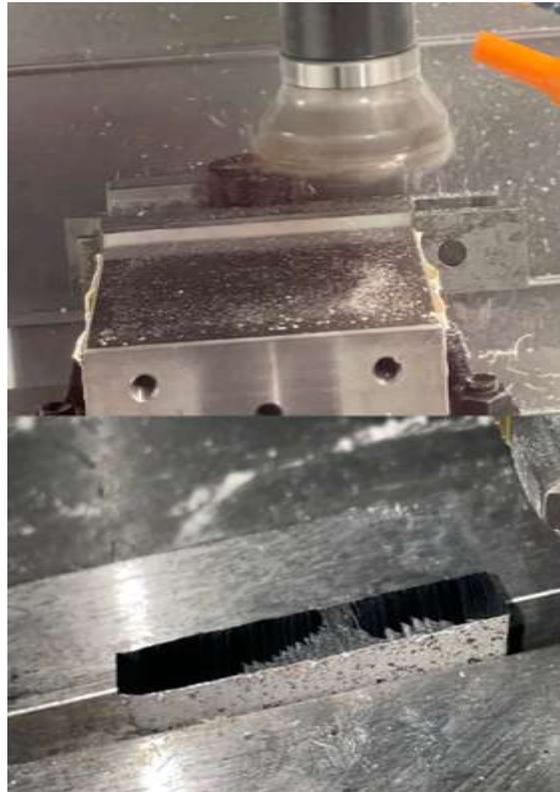
M: Muestra	RPM	Velocidad de avance (mm/min)	Condición
M1	1000	200	Seco
M2	1500		Seco
M3	2000		Seco
M4	2500		Seco

Nota: Parámetros utilizados para el desarrollo de las muestras

Habiendo determinado las velocidades de corte, la muestra de AISI 410 se cortó en rectángulos que tuvieran un aproximado de 1 cm² de área superficial para de esta manera poder mecanizarse con los parámetros estipulados anteriormente como se presenta en la Figura 15, donde se le hace un desbaste inicial para igualar la pieza desbastando de a 20 décimas cuando ya la herramienta tiene un total contacto con la superficie de la muestra.

Figura 15

Mecanizado de la muestra de AISI 410



Nota: Imagen mostrando el proceso de mecanizado de las muestras.

Después de mecanizar todas las muestras, estas se encapsulan en resina 3836 la cual es una resina poliéster para fibra de vidrio la cual junto al catalizador de mek peróxido el cual actúa como agente endurecedor en conjunto de la resina los cuales se pueden evidenciar en la Figura 16, aplicando una proporción entre 1% y 2% de peso frente a la cantidad de la resina siguiendo las recomendaciones del fabricante, para así lograr un recubrimiento sólido de las muestras ya mecanizadas.

Figura 16

Resina de poliéster de vidrio y catalizador

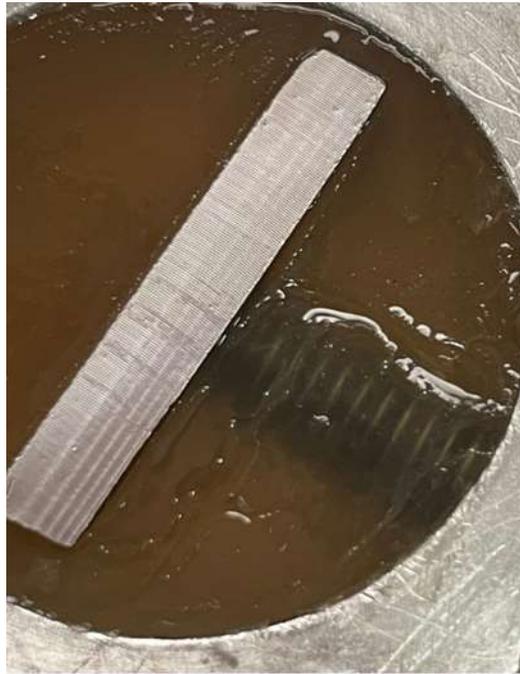


Nota: Imagen de la resina utilizada.

Para garantizar la homogeneidad de todas las muestras, se diseñó un molde de aluminio con una perforación específica para alojar el tornillo M8X1.25, como se ilustra en la Figura 17. Este tornillo establece un contacto directo con la muestra durante el ensayo de polarización, lo que permite el contacto eléctrico garantizando los resultados, lo cual es esencial para obtener datos fiables y comparables.

Figura 18

Muestra dentro de la resina totalmente terminada



Nota: Se ve la muestra ya encapsulada lista para el ensayo de polarización

Para el montaje es requerido el uso de un medio acuoso, fue utilizada una solución de 3.56% Cloruro de Sodio, preparada con 920 ml de agua destilada y con 34 gr de sodio, en la Figura 19. se presenta su preparación. Esta solución permite la conductividad eléctrica y representa un ambiente corrosivo para los aceros. En dado caso que se desee realizar este ensayo en una solución con otros parámetro o porcentajes, es posible calcular el porcentaje de una solución de NaCl (cloruro de sodio) en agua, usando esta fórmula general para el porcentaje en masa:

$$\text{Porcentaje} = \left(\frac{\text{Masa de soluto}}{\text{Masa de la solución}} \right) \times 100$$

Donde:

La masa de soluto es la masa del NaCl.

La masa de la solución es la suma de la masa del NaCl y la masa del agua (solvente).

Figura 19

Alistamiento de la solución 3.56% NaCl.



Nota: Muestra las cantidades utilizadas para formar la solución de 3.56% NaCl

El Gamry 1010E es el potencióstato el cual fue usado para la realización del ensayo en conjunto a la celda que se usa en la calibración de instrumento.

Figura 20

Montaje realizado para el ensayo de polarización con el electrodo de referencia y el grafito



Nota: Muestra el grafito(contraelectrodo) y el electrodo de referencia junto a la manera de ensamblaje.

3.2 Calibración del potencióstato

Es necesario calibrar el potencióstato como lo define el fabricante según el manual de calibración, esta medida se realiza una sola vez dado que el equipo estuvo sin operar durante un largo tiempo, este proceso se debe realizar la debida conexión de los cables en la celda de calibración de 2 k Ω ,

se instala la celda dentro del protector de calibración, cierre la tapa y se conecta el cable de tierra flotante negro del cable de su celda al borne de conexión a tierra del protector como se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Celda de calibración en proceso de calibración

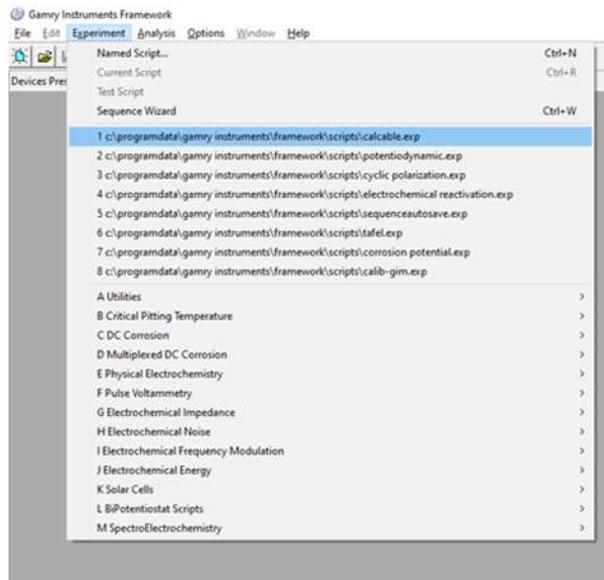


Nota: Se ve el montaje para la calibración de la celda con las conexiones respondientes

Luego iniciar en el computador la aplicación de Gamry Framework. Selecciona Experimento > Calibración por Cable, la cual se puede observar con el número 1 en la Figura 22. Siguiendo a esto, aparecerá una ventana de calibración por cable, como se muestra en la Figura 23. En esta ventana, en el campo etiqueta de cable, es posible agregarle nombre al cable que se está calibrando y darle "ok", el programa despliega una ventana de consejos de rendimiento para tener en cuenta al momento de realizar la calibración se ve en la Figura 24, por último para dar inicio a la calibración el software muestra el tipo de celdas requeridas para seguir con el proceso que en este caso sería la de 2 k Ω Figura 25 y se ejecuta el programa como se ve en la Figura 26, finalmente si la calibración se ha realizado correctamente, aparecerá un mensaje indicando "Calibración Completada", permitiendo el uso del potencióstato.

Figura 22

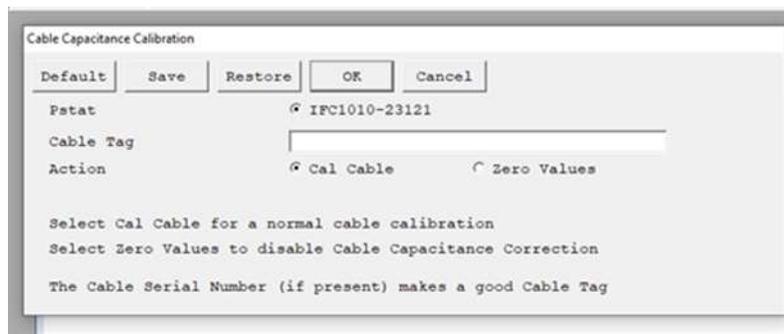
Inicio de la calibración por cable



Nota: Imagen del programa para el inicio de la calibración.

Figura 23

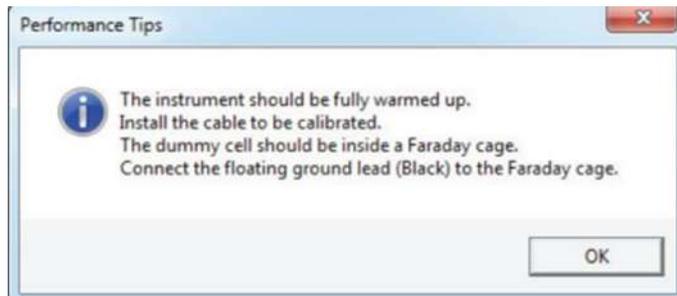
Aparece la ventana Calibración de capacitancia del cable.



Nota: Imagen verificando el proceso para calibración.

Figura 24

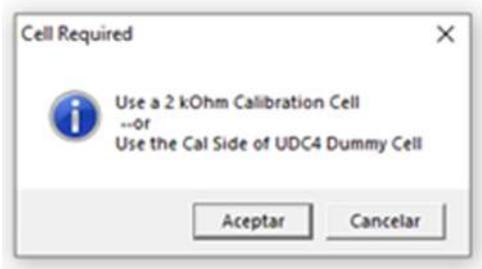
Sugerencias del programa.



Nota: Sugerencias del programa para el desarrollo de la calibración

Figura 25

Corroboración de la celda de calibración.



Nota: Requerimiento para confirmar que están conectado los cables en la celda de calibración.

Figura 26

Calibración completada.



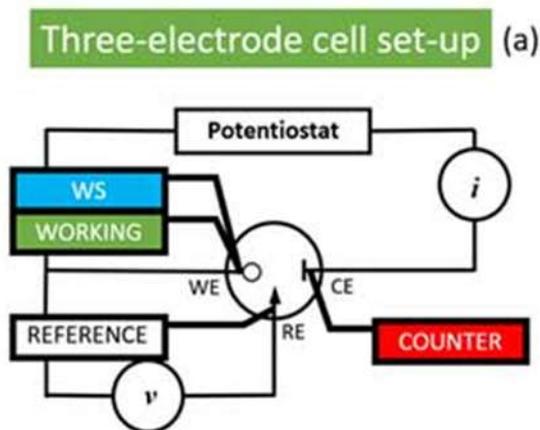
Nota: Ventana indicando que se completó con éxito la calibración.

Después de la calibración se retiran los cables de la celda de calibración y del protector de calibración, quedando el equipo a punto para los ensayos electroquímicos.

Para la conexión en la celda electroquímica se sigue el esquema de una celda de tres electrodos, suministrado por el fabricante del potenciostato en la Figura 27, en este esquema se representan las conexiones utilizadas, siendo

Figura 27

Conexión celda de tres electrodos



Nota: Se evidencia la manera en que se conectan los tres electrodos. Tomado de: Gamry Instruments, "Reference Electrode Performance Evaluation," Gamry Instruments,

En el esquema presentado el conector azul (Working sense - WS) y el verde (electrodo de trabajo - WE) que van conectados a la muestra, tornillo que está en contacto con la muestra, el conector blanco (Electrodo de referencia - RE) este es conectado al electrodo de referencia, el rojo (contraelectrodo - CE) este es conectado a una barra de grafito, la conexión realizada se muestra en la Figura 29.

Figura 28

Montaje de la muestra para la celda electroquímica



Nota: Muestra el grafito(contraelectrodo), la muestra ya ensamblada y el electrodo de referencia.

Figura 29

Conexiones de los cables a la muestra, al electrodo y contraelectrodo



Nota: Muestra las conexiones que se hicieron para el ensayo potenciodinamico.

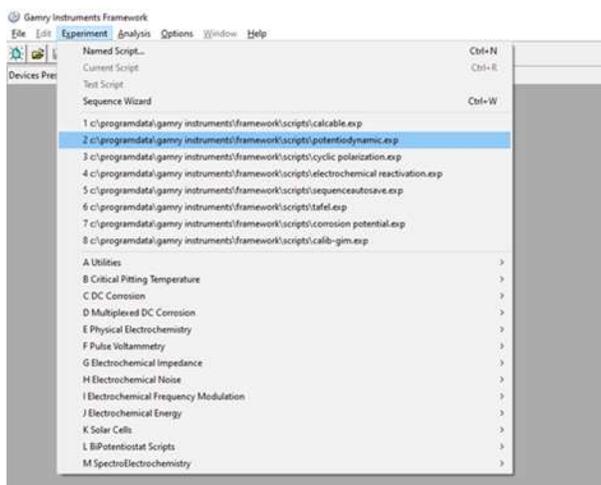
Para la realización de los experimentos como primer paso se procede a verificar las conexiones, seguido de la selección del tipo de ensayo a realizar en el programa Framework, el procedimiento se inicia abriendo Framework > Experimentos > Potenciodynamic donde ahí dará inicio al

experimento, se despliega una ventana en donde indica los parámetros iniciales antes de hacer el experimento donde lo que se modificó fue la densidad agregando la del acero AISI 410 que es 7.75 g/cm³ se evidencia en la Figura 31, después de esto se le da aceptar y da una advertencia de seguridad por el voltaje por último se da inicio al experimento dando como resultado lo que se visualiza en la Figura 32 denotando la corriente (A), como el eje X. y el voltaje de referencia (Vf), como el eje Y

Procedente los datos que dio la gráfica se transfieren a un Excel para de esta manera realizar la comparativa de las cuatro muestras realizadas como se puede evidenciar en la Figura 48.

Figura 30

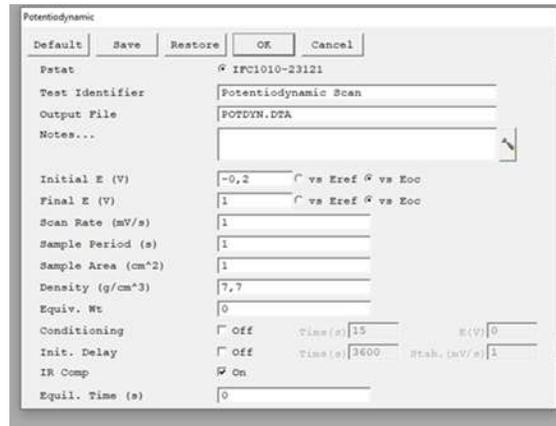
Asignación del experimento que desea realizar



Nota: Imagen del programa indicando el inicio del ensayo potenciodinamico.

Figura 31

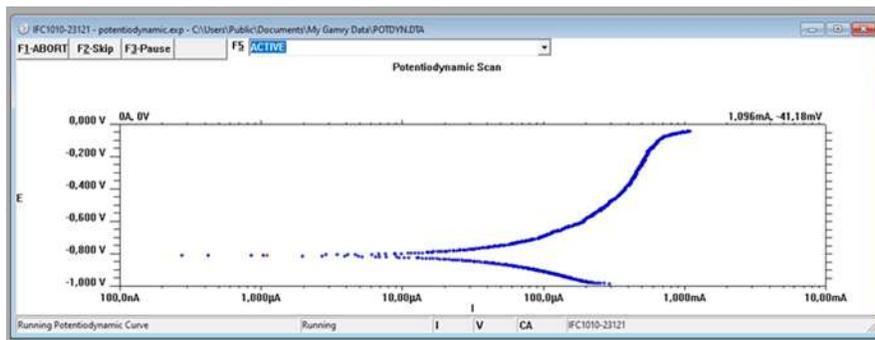
Parámetros iniciales del ensayo potenciodinámico



Nota: Ventana para ajuste de valores dependiendo el material que se vaya a trabajar.

Figura 32

Recomendaciones del circuito abierto e inicio de la curva de polarización en proceso



Nota: Se ve inicio del experimento mostrando el proceso de formado de la curva de polarización.

Figura 33

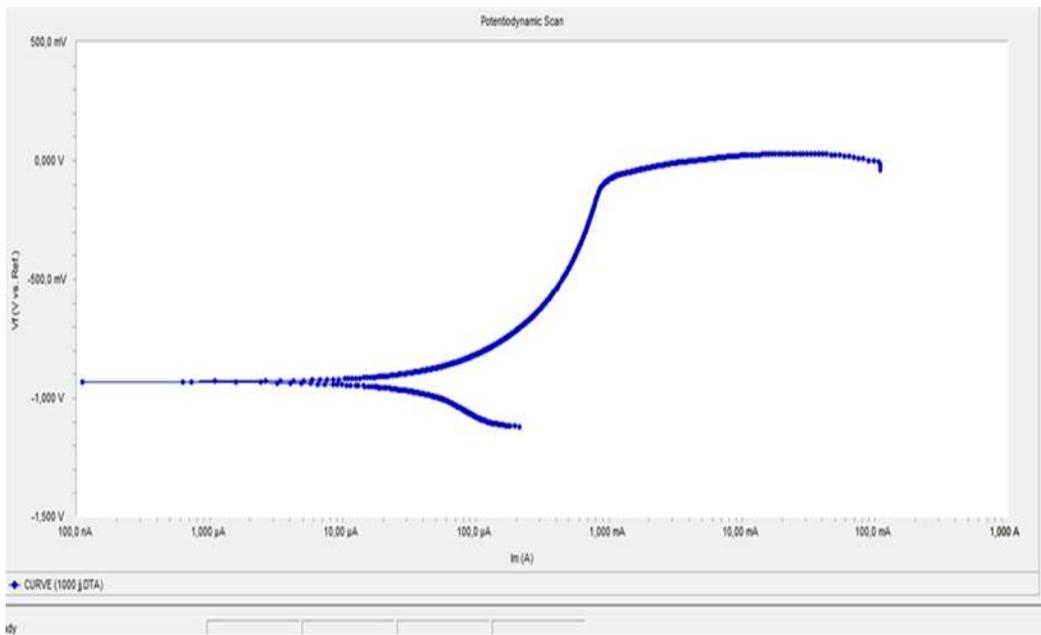
Resultados arrojados del ensayo potenciodinamico muestra M1



Nota: Conjunto de resultados al finalizar los ensayos potencioninamicos.

Figura 34

Curva de polarización de la muestra M1



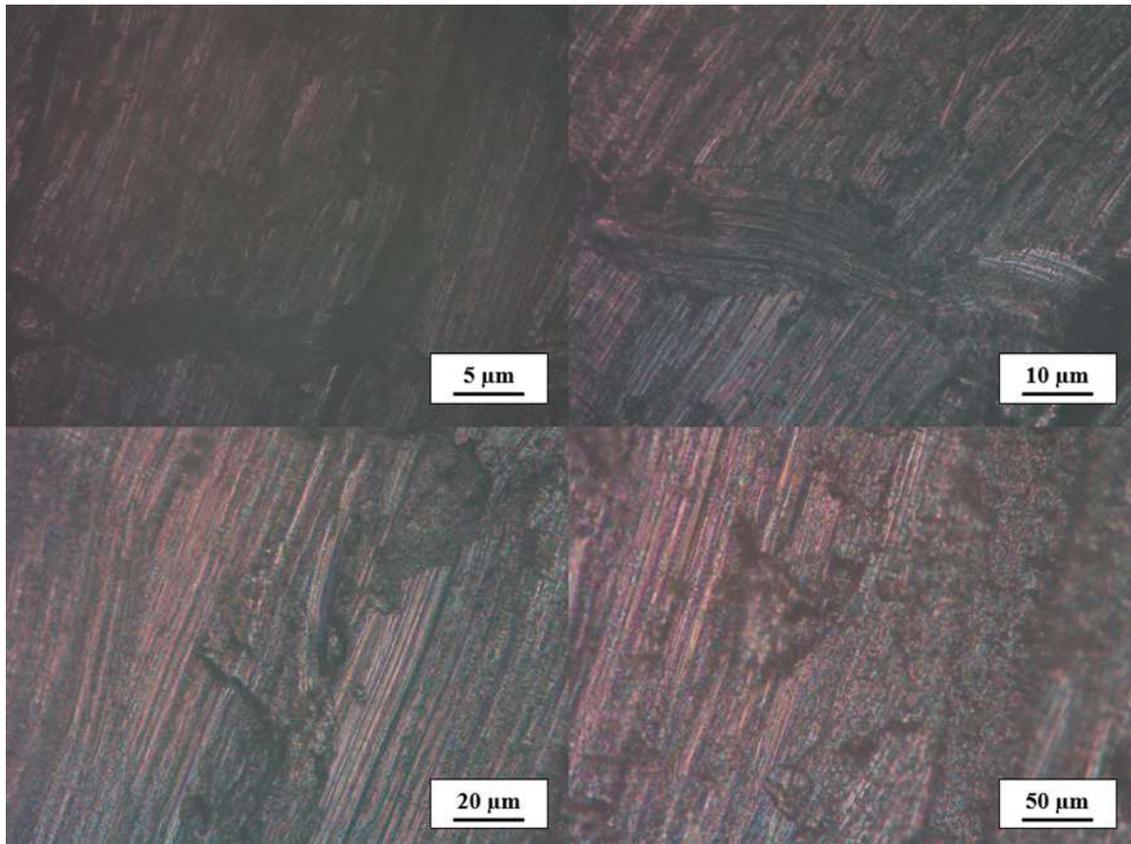
Nota: Resultado final de los resultados mostrando la curva de polarizacion.

4. RESULTADOS

Antes de la realización de los ensayos de corrosión, fueron tomadas imágenes de las superficies verificando su acabado superficial como también los resultados de pruebas de corrosión realizadas en el laboratorio de la Universidad América, fueron analizados y ordenados de tal forma que permita realizar la determinación de las afectaciones que tiene el mecanizado en el acero AISI 410, con ayuda de los datos y mostrados gráficamente en curvas de polarización comparadas no sin antes tener en cuenta como se encontraba el acero antes del proceso de mecanizado el cual se veía de la siguiente manera.

Figura 35

Acero AISI 410 sin ningún tipo de mecanizado



Nota: Se evidencia a diferentes aumentos el AISI 410 sin mecanizar.

Denotando las imperfecciones que tenía el acero sin ningún tipo de mecanizado por su proceso de fabricación

Figura 36

Microscopía óptica antes y después del ensayo corrosivo

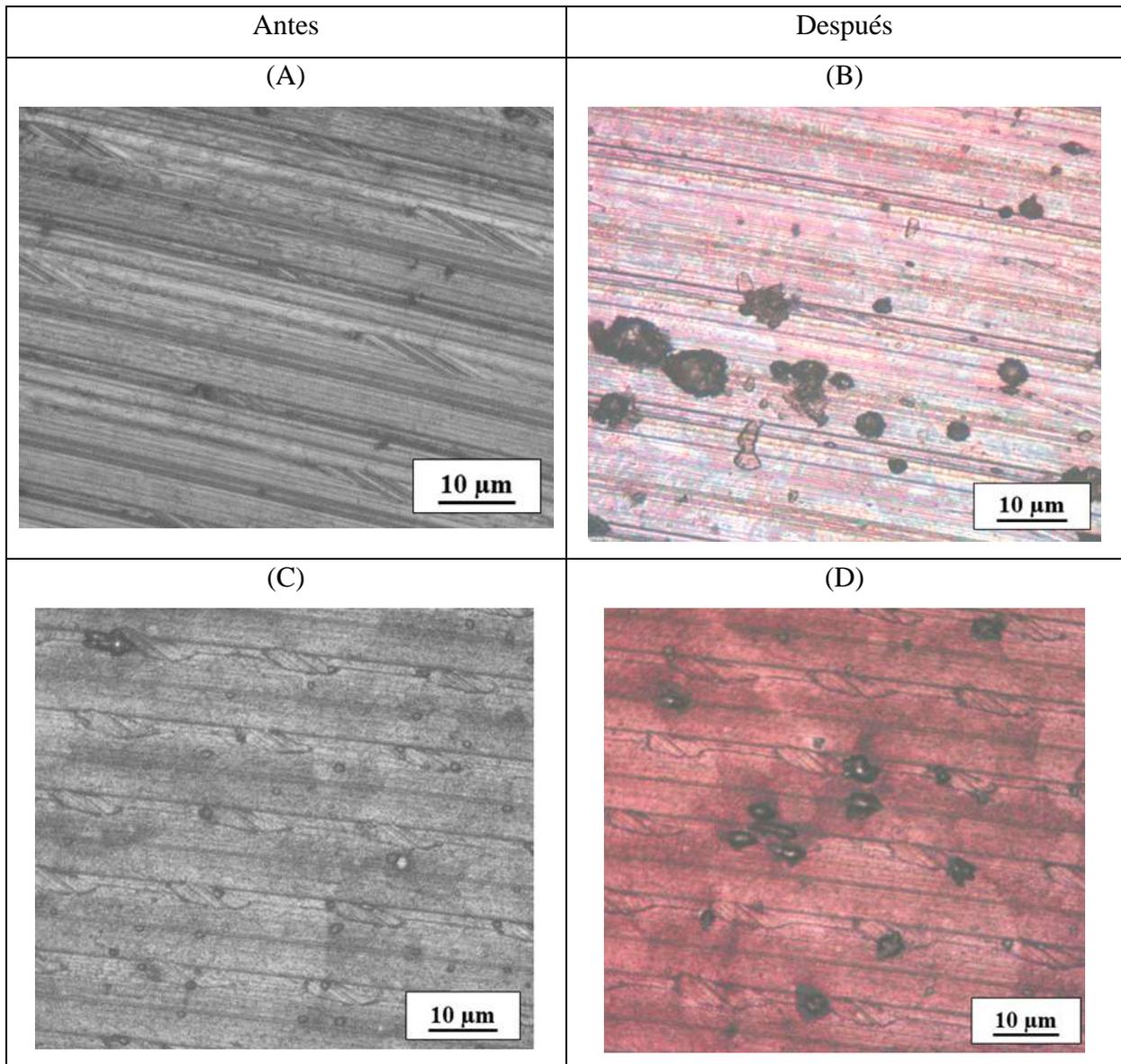
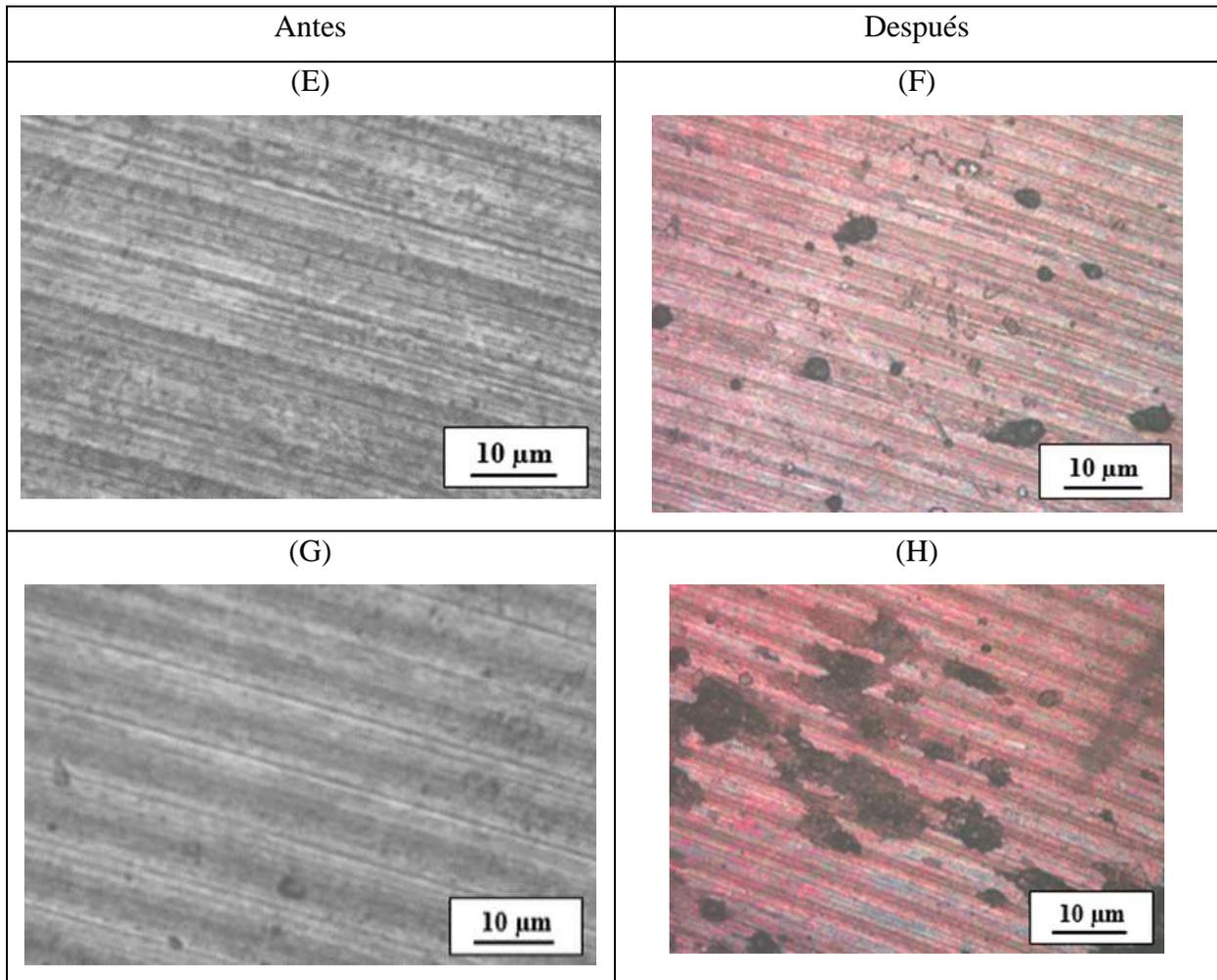


Figura 36. *Continuación*



Nota: (A) Microscopía óptica de la muestra M1 antes del ensayo corrosivo X10. (B) Acción de la corrosión en la muestra M1 X10. (C) Microscopía óptica de la muestra M2 antes del ensayo corrosivo X10. (D) Acción de la corrosión en la muestra M2 X10. (E) Microscopía óptica de la muestra M3 antes del ensayo corrosivo X10. (F) Acción de la corrosión en la muestra M3 X10. (G) Microscopía óptica de la muestra M4 antes del ensayo corrosivo X10. (H) Acción de la corrosión en la muestra M4 X10.

En la Figura 36 se presentan las imágenes de los ensayos metalográficos realizados mediante microscopía óptica realizada en el laboratorio de la Universidad América. Estos ensayos en Figura 36, proporcionan una evaluación de las muestras sometidas previamente a mecanizado y posteriormente al ensayo de polarización.

En la Figura 36 se muestran las afectaciones que tuvo el material por la corrosión por picadura en donde se puede evidenciar que la velocidad de mecanizado puede influir en la microestructura y en su comportamiento frente a la corrosión por picadura. A bajas velocidades de mecanizado como

lo es en la Figura 37 siendo M1 la muestra con menor velocidad de mecanizado, produce una superficie más rugosa que las otras muestras, en donde se denotan los surcos son levemente más anchos y estos van disminuyendo su tamaño a medida que se va aumentando la velocidad, obteniendo un mejor acabado más liso en la superficie, sin la percepción de los surcos dejados por la herramienta de corte, estas pequeñas fisuras y defectos superficiales reduce los puntos de iniciación de picaduras.

Evidencia de corrosión por picadura en las muestras analizadas, como se mencionó anteriormente, este tipo de corrosión se caracteriza por la formación de pequeñas cavidades en la superficie del material, lo que indica una degradación localizada. El uso de microscopía óptica permite la visualización del mecanizado. que se obtuvo en cada una de las muestras.

4.1 Ensayo de dureza

Se realiza un ensayo de dureza en el acero AISI 410, tomando la dureza en tres puntos de la muestra para analizarla en la escala Rockwell C (HRC), con un resultado de 48 HRC tras un ensayo de corrosión en el acero inoxidable AISI 410, esto podría tener varias implicaciones, una dureza de 48 HRC es relativamente alta para el acero inoxidable AISI 410, lo que indica que el material ha mantenido su estructura martensítica y no ha sufrido un reblandecimiento significativo. La capacidad del material para mantener una dureza elevada sugiere una buena resistencia al desgaste y una integridad mecánica adecuada.

Un valor de dureza de 48 HRC hace que el AISI 410 sea adecuado para aplicaciones en las que se requiere tanto una alta resistencia al desgaste. Esto incluye componentes de la industria química, piezas de maquinaria expuestas a entornos corrosivos y herramientas que necesitan mantener un borde afilado. La elevada dureza sugiere que el material tendrá una larga vida útil en aplicaciones exigentes, reduciendo la necesidad de mantenimiento frecuente y sustitución de piezas.

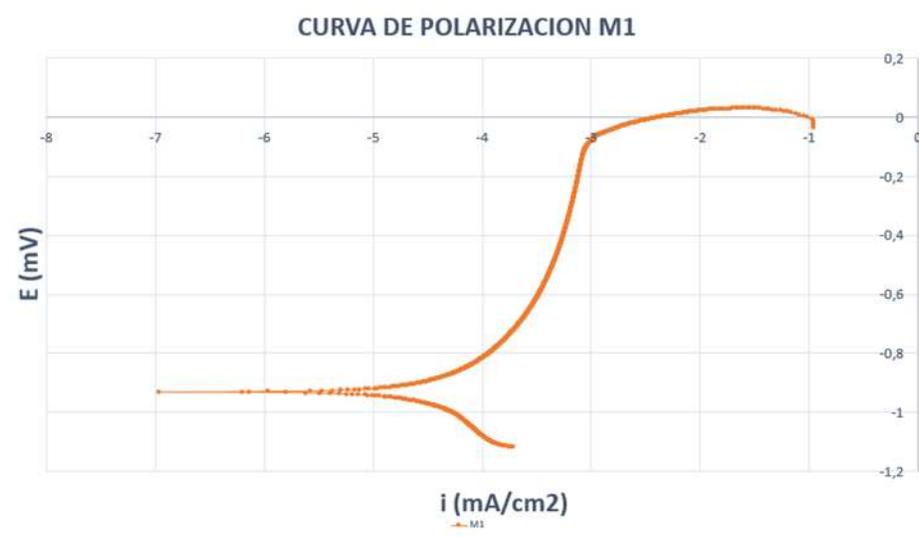
4.2 Ensayos de polarización

En las siguientes figuras se presenta la curva de datos obtenida en el potencióstato Gamry 1010E, los datos fueron graficados en Excel para proporcionar una mejor visualización de los ejes y las curvas de polarización, en la que se pueden observar las curvas de los respectivos mecanizados que se realizaron sobre las muestras de AISI 410 desde la Figura 37 a la Figura 40. Es fundamental destacar que, en todos los ensayos realizados, las curvas de polarización presentaron un comportamiento bastante similar.

La consistencia en las curvas de polarización indica la fiabilidad de los datos obtenidos durante los ensayos. Cada curva de polarización registrada refleja la respuesta electroquímica del acero AISI 410 en condiciones controladas, proporcionando información valiosa sobre su resistencia a la corrosión. En los ensayos, se aplicó un potencial controlado a las muestras y se midió la corriente resultante, lo que permitió evaluar la susceptibilidad del material a la corrosión por picaduras.

Figura 37

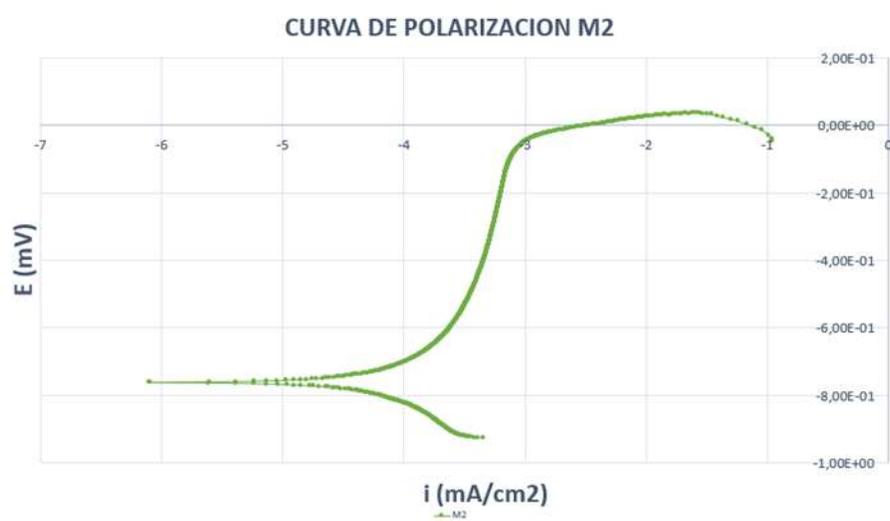
Curva de polarización dada en la muestra M1.



Nota: Se muestra la gráfica de los resultados del ensayo de polarización en la muestra M1

Figura 38

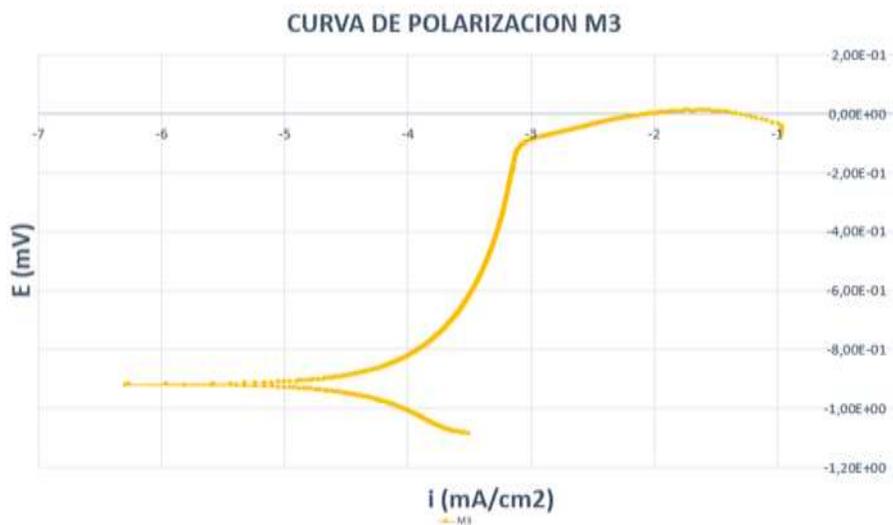
Curva de polarización en la muestra M2.



Nota: Se muestra la gráfica de los resultados del ensayo de polarización en la muestra M2

Figura 39

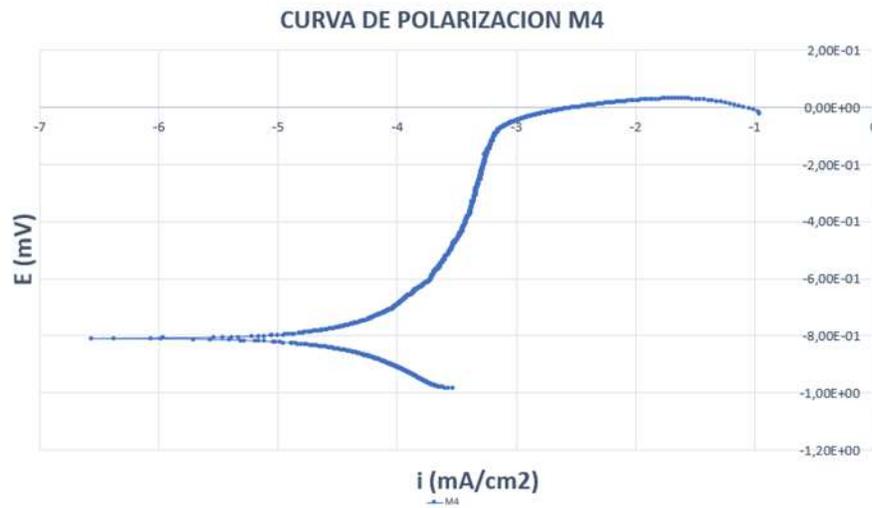
Curva de polarización en la muestra M3.



Nota: Se muestra la gráfica de los resultados del ensayo de polarización en la muestra M3.

Figura 40

Curva de polarización en la muestra M4



Nota: Se muestra la gráfica de los resultados del ensayo de polarización en la muestra M4

Se muestran las gráficas, para evidenciar las diferencias es debido el sobreponerlas en una sola gráfica para comparar los resultados que tuvieron las muestras al mecanizarse a diferentes velocidades implicando afectaciones de corrosión por picadura.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados del mecanizado frente a la resistencia a la corrosión por picaduras en aceros inoxidables martensíticos es de importancia en aplicaciones industriales en las que la durabilidad y la integridad del material son fundamentales. Estos aceros son conocidos por su elevada resistencia mecánica y moderada resistencia a la corrosión, encontrando ampliamente diversos usos para las industrias. Aunque su susceptibilidad a la corrosión por picaduras, especialmente en entornos agresivos, puede comprometer su rendimiento a largo plazo, en la Figura 41 se presentan las muestras después de los ensayos de polarización, se puede notar cómo fueron afectadas las muestras dando como resultado una tonalidad amarillenta en la superficie, producto del proceso corrosivo.

Figura 41

Muestras después del ensayo de polarización

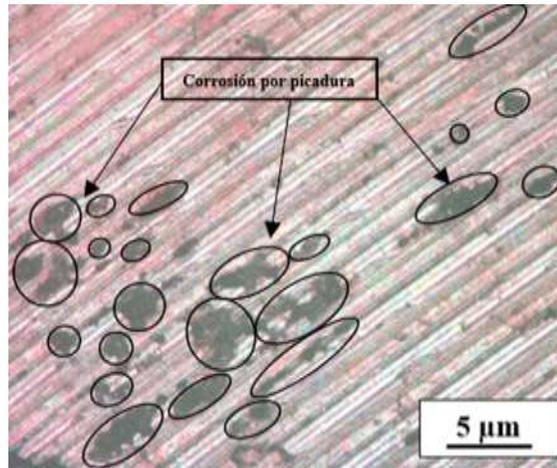


Nota: Se ven las afectaciones por la corrosión a la superficie de las muestras.

En la Figura 41, la detección de las picaduras, como se ha documentado en la literatura, no es fácil identificarlas en sus fases iniciales. Por ello, para realizar un análisis detallado y preciso se requiere el uso de micrografías, que proporcionan una mejor visión y detalle de la superficie afectada, lo que permite una mejor identificación de las picaduras ejemplificadas en las de la Figura 42 hasta la Figura 45.

Figura 42

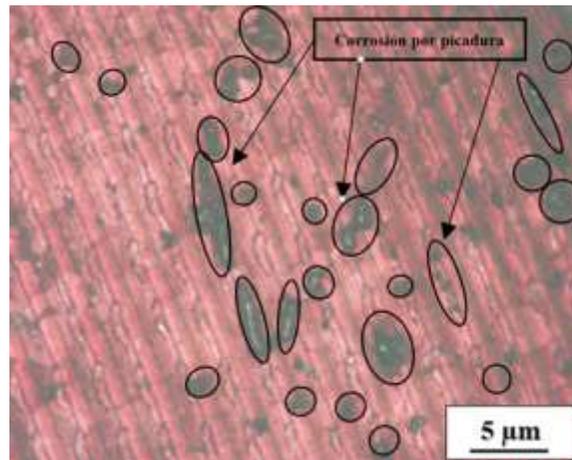
Corrosión por picadura en M1 X5



Nota: Se muestra señalada las zonas donde está presente la corrosión por picadura.

Figura 43

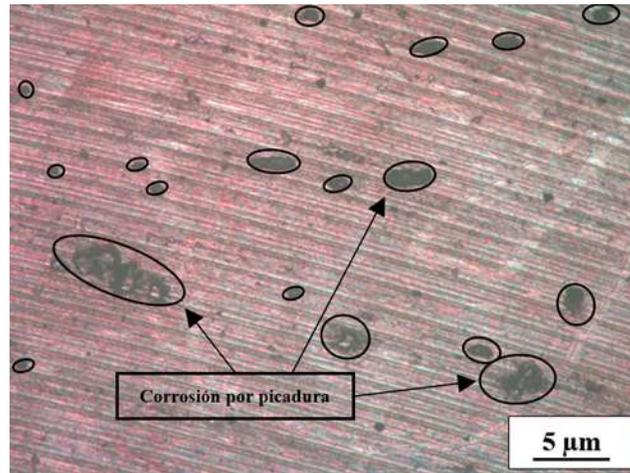
Corrosión por picadura en M2 X5



Nota: Se muestra señalada las zonas donde está presente la corrosión por picadura.

Figura 44

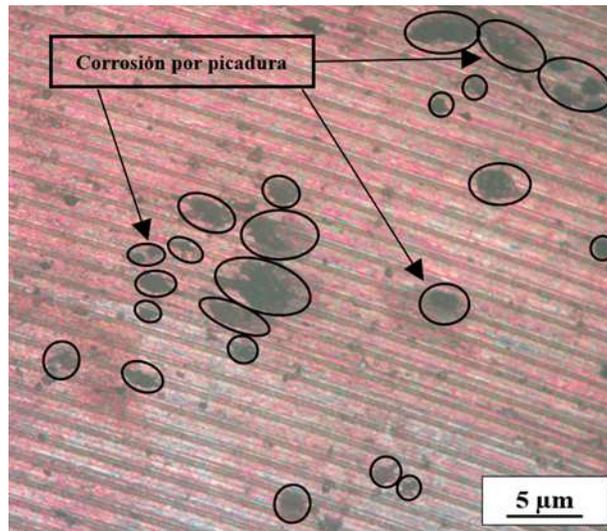
Corrosión por picadura en M3 X5



Nota: Se muestra señalada las zonas donde está presente la corrosión por picadura.

Figura 45

Corrosión por picadura en M4 X5



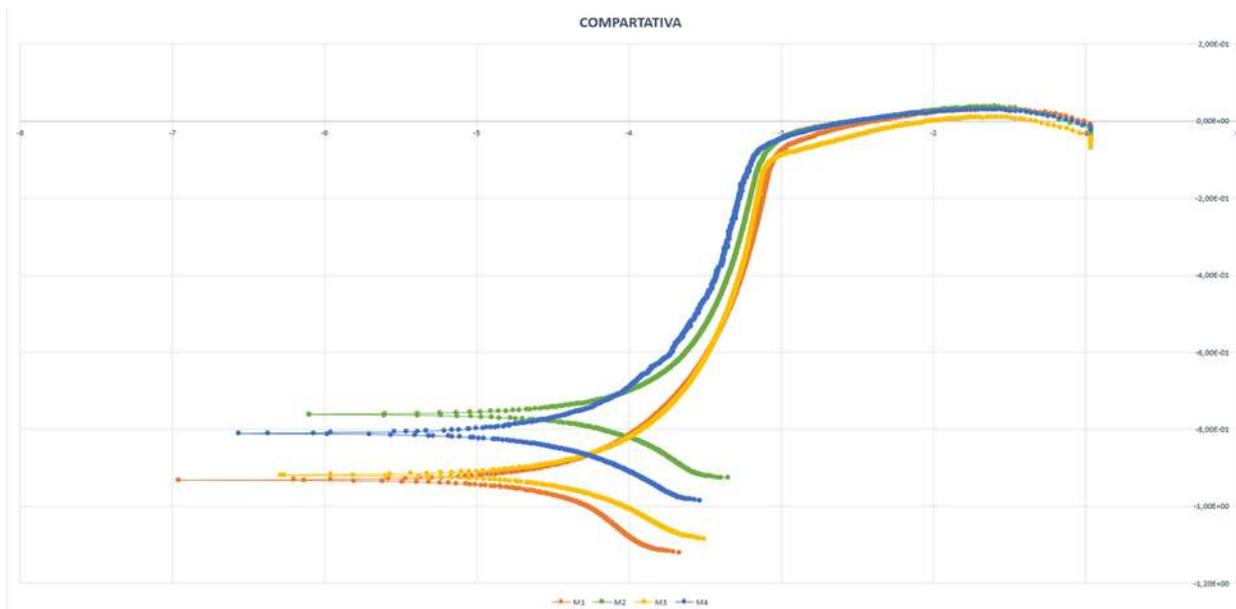
Nota: Se muestra señalada las zonas donde está presente la corrosión por picadura

Se puede ver reflejado que las apariciones de las picaduras van perpendiculares con el paso de la herramienta de corte siendo así los surcos el posible inicio de las picaduras por la rugosidad siendo un factor primordial frente a la corrosión por picadura.

A su vez se evidencia que a la velocidad mínima que se hizo este ensayo las picaduras presentes tienen una densidad pequeña con poca profundidad y un poco más dispersa. A medida que se va aumentando la velocidad se ve que la densidad de las picaduras grandes y profundas, siendo una picadura más compacta en lugares específicos sin repartirse en un área muy grande dentro de la superficie.

Figura 46

Gráfica comparativa de las curvas de polarización de las cuatro muestras



Nota: Representación de las gráficas de todas las muestras.

En este análisis, se examinan las curvas de polarización obtenidas para las cuatro muestras de acero AISI 410 mecanizadas a diferentes velocidades M1 mecanizada a 1000 rev/min y M2 mecanizada a 1500 rev/min, M3 mecanizada a 2000 rev/min y M4 mecanizada a 2500 rev/min. Estas curvas de polarización, tal como se encuentran en la literatura, permiten evaluar la resistencia a la corrosión, en este caso analizando la corrosión por picaduras para el comportamiento del material en ambientes corrosivos.

- El eje X representa el potencial aplicado, medido en milivoltios (mV) con respecto al electrodo de referencia.
- El eje Y muestra la densidad de corriente, en amperios por centímetro cuadrado (A/cm²) o miliamperios por centímetro cuadrado (mA/cm²).

La Figura 46 presenta la comparación de las curvas de polarización de las muestras de acero inoxidable AISI 410 mecanizadas a diferentes velocidades. Se observa que la curva de la muestra

Para evaluar la corrosión por picadura a través de las curvas de polarización y describir una curva, se deben considerar aspectos clave de la curva, como el potencial de picadura y el comportamiento en la región de pasivación, que se entiende como la zona en la que la capa pasiva no permite el que ocurran los procesos electroquímicos. comienza a estabilizar la curva de polarización en la que se observa una disminución de la velocidad de corrosión, se explica la forma de interpretar y expresar. Cuando ocurre un aumento repentino de la corriente indica que la capa pasiva sufrió un daño y está ocurriendo la disolución del metal, es decir se inició la reacción de oxidación (Reacción 1). Las posiciones de las curvas también indican la velocidad en de pérdida de electrones (densidad de corriente), así, curvas posicionada hacia la izquierda del eje X, indican una menor susceptibilidad a la corrosión.

Al analizar las muestras M2 y M4 se muestran con corrientes menores por lo que están desplazadas un poco más hacia la izquierda indicando una menor velocidad de reacción de oxidación producto de la capa pasiva, dando a entender que la muestra M4 presenta un mejor comportamiento, por tal motivo es la que tiene el acabado más liso siendo que a un acabado más liso mejor comportamiento tendrá a una solución de condición agresiva, se encontró en los estudios de que el inicio de picaduras metaestables se veía favorecida con un aumento de la rugosidad [26], datos que presentan un comportamiento similar con los obtenidos en este estudio.

Se analiza que la estabilidad en la región de inactivación anódica mostrando que la capa protectora formada es más robusta, lo que podría brindar cierta reducción en contra a la propagación agresiva de picaduras. En cambio, las muestras M1 y M3 presentan un potencial de picadura más positivo, generando una menor resistencia a la iniciación de picaduras, siendo así más propensas a tener un mayor ataque corrosivo.

6. CONCLUSIONES

Frente a los parámetros seleccionados en la Tabla 9, se analizó que en las muestras el acabado superficial del AISI 410 se obtenía un mejor acabado superficial siendo la muestra M4 la que se denotaba más brillante y pulida de todas las muestras, la cual demuestra un mejor comportamiento en una solución de 3.56% NaCl la condición más agresiva frente a corrosión.

Las muestras del acero AISI 410 las cuales fueron fabricadas y preparadas de acuerdo con los parámetros seleccionados, asegurando la consistencia en el acabado superficial para una evaluación comparativa precisa, determinando una mayor densidad y menor tamaño de las picaduras en las muestras mecanizadas a menor velocidad, en comparación con las que fueron mecanizadas a mayor velocidad. Se observa una menor densidad de picaduras, pero un mayor tamaño de las mismas.

Por medio de la microscopía óptica se logra evidenciar cómo es afectada la capa de protección en todas las muestras, exponiendo que ninguna estuvo exenta a la corrosión, aunque la que tuvo una mayor velocidad de mecanizado fue la que presentó menor corrosión por picadura en el proceso.

Los resultados de esta investigación confirman que el acabado superficial influye en la resistencia a la corrosión por picaduras del acero inoxidable martensítico AISI 410. Los ensayos de polarización potenciodinámica demostraron notables variaciones en el comportamiento electroquímico de las muestras, en función de los parámetros seleccionados para dar el acabado superficial.

Se recomiendan estudios adicionales que combinen técnicas electroquímicas con análisis micrográficos y de composición química para una comprensión más completa de los mecanismos de corrosión por picaduras. Estas conclusiones proporcionan una comprensión detallada del efecto del acabado superficial en la resistencia a la corrosión por picaduras del acero inoxidable martensítico AISI 410, destacando la importancia de los parámetros de mecanizado en el comportamiento electroquímico del material.

REFERENCIAS

- [1] S.Leal, « Caracterización de aceros inoxidables y estudio de su resistencia mecánica y conformabilidad», Tesis Magíster, Universidad autónoma nuevo león, México, 2011.
- [2] P. R. Roberge, Corrosion Engineering: Principles and Practice. McGraw Hill Professional, 2008.
- [3] G. Koch, J. Varney, N. Thompson, O. Moghissi, M. Gould, J. Payer, «Estudio de medidas internacionales de prevención, aplicación y economía de tecnologías de corrosión», NACE International, Houston, Texas, 2016.
- [4] «UNE-EN ISO 8044:2020 Corrosión de metales y aleaciones.» Accedido: 12 de Abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0064897>
- [5] J. A. Salazar-Jiménez, «Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)», Rev. Technol. En Marcha, vol. 28, n.o 3, p. 127, sep. 2015.
- [6] B. Caballero, «Estudio de la corrosión por picadura a través de técnicas electroanalíticas en acero inoxidable 304 sin protección y recubierto electroquímicamente con aleaciones de Níquel-Fósforo», Tesis Magíster, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2019. 7.
- [7] R. O. Adams, «A review of the stainless steel surface», J.Vac. Sci. Technol. A, vol. 1, n.o 1, pp. 12-18, ene. 1983. 9.
- [8] J. K. L. Lai, C. H. Shek, y K. H. Lo, Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments. Bentham Science Publishers, 2012.
- [9] E. P. DeGarmo, J. T. Black, y R. A. Kohser, Materiales y procesos de fabricación. Reverte, 1988.
- [10] E. D. Padilla, «Aplicaciones de los aceros inoxidables», Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal. Cienc. Geográficas, vol. 2, n.o 3, Art. n.o 3, jul. 1999.
- [11] M. S. Pere, Metales resistentes a la corrosion. Marcombo, 1990.

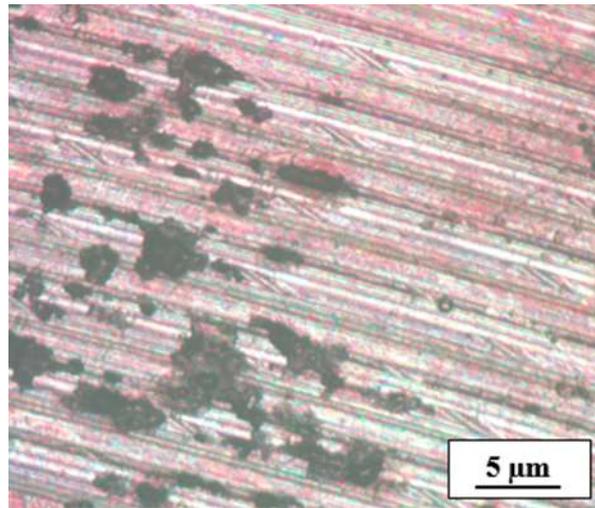
- [12] R. Ospina, H. Aguirre, H. Parra, «Soldabilidad en aceros inoxidable y aceros disimiles», *Scientia Et Technica*, vol. XIII, núm. 34, mayo, 2007, pp. 273-278.
- [13] M. Maslak, M. Stankiewicz, B. Slazak, «Duplex Steels Used in Building Structures and Their Resistance to Chloride Corrosion.», *Materials*, vol. 14, n.o 19, p. 5666, sep. 2021.
- [14] R. Francis, G. Byrne, *Duplex Stainless Steels—Alloys for the 21st Century*, (19 de mayo de 2021).
- [15] C. Tiburcio, M. Lara, E. Maldonado , M. Baltazar, J. Cabral, D. Nieves, J. Olguin, F. Estupiñan, F. almeraya,«Electrochemical Corrosion Behavior of Passivated Precipitation Hardening Stainless Steels for Aerospace Applications», *Superalloys*, vol. 13, n.o 5, pp. 835-835, abr. 2023.
- [16] P. Cui, G. Xing, Z. Nong, L. Chen, Z. Lai, Y. Liu, J. Zhu «Recent Advances on Composition-Microstructure-Properties Relationships of Precipitation Hardening Stainless Steel», *Materials*, vol. 15, n.o 23, pp. 8443-8443, nov. 2022.
- [17] F.-W. Bach, K. Möhwald, A. Laarmann, y T. Wenz, *Modern Surface Technology*. John Wiley & Sons, 2006.
- [18] D. J. Whitehouse, *Handbook of Surface and Nanometrology*. CRC Press, 2002.
- [19] M. S. Pere, *Electromecanizado: Electroerosión y Mecanizado Electroquímico*. Marcombo, 1989.
- [20] M. G. SIMON, *Procedimientos de mecanizado*. Ediciones Paraninfo, S.A., 2006.
- [21] L. Bachs, J. Cuesta, y N. Careles, *Aplicaciones Industriales Del Láser*. Marcombo, 1988.
- [22] G. P. ALBERT y T. C. FELIPE, *Ejecución de procesos de mecanizado, conformado y montaje*. Ediciones Paraninfo, S.A., 2005.
- [23] A. Leyensetter y G. Würtemberger, *Tecnología de los oficios metalúrgicos*. Reverte, 1987.
- [24] S. I. Solís-Santamaría, T. M. Solís-Santamaría, H. G. Lasluisa-Naranjo, y E. D. Albán-Andrade, «Evolución y utilidad del mecanizado CNC en el diseño industrial», *Rev. Científica INGENIAR Ing. Technol. E Investig.* ISSN 2737-6249, vol. 6, n.o 11, Art. n.o 11, ene. 2023.

- [25] F. A. Maldonado Galarza, «Diseño de una máquina fresadora CNC para mecanizado de prototipos de barcos en madera.», bachelorThesis, Espol, 2015.
- [26] Burstein, G. T., & Pistorius, P. C. (1995). Surface roughness and the metastable pitting of stainless steel in chloride solutions. *Corrosion*, 51(5), 380-385.
- [27] Tian, W., Chao, B., Xiong, X., & Li, Z. (2018). Effect of surface roughness on pitting corrosion of 2A12 aluminum alloy. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(3), 3107-3123.
- [28] Hong, T., & Nagumo, M. (1997). Effect of surface roughness on early stages of pitting corrosion of type 301 stainless steel. *Corrosion science*, 39(9), 1665-1672.
- [29] Kadirgama, K., Noor, M. M., Rejab, M. R. M., Rahman, M. M., Sani, M. S. M., & Mon, T. T. (2009, June). The Effect of End Milling Parameters on Surface Roughness when Machining Corrosion Resistance Alloy. In *International Conference on Advance Mechanical Engineering (ICAME09)* (pp. 22-25).
- [30] G. Chakraborty et al., «Study on tempering behaviour of AISI 410 stainless steel», *Mater. Charact.*, vol. 100, pp. 81-87, feb. 2015.
- [31] ASTM International, (2021). G5 – 14(2021) Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA
- [32] ASTM International, (2021). G46 – 21 Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA
- [33] ASTM International, (2024). G61 – 86(2024) Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA

ANEXOS

Figura 47

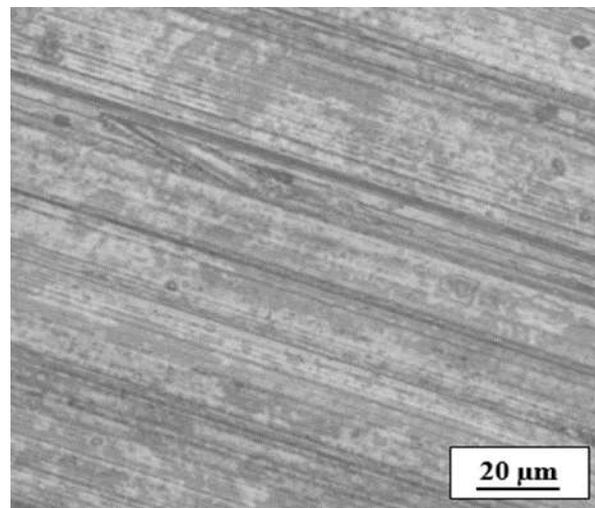
M1 X5



Nota: Imagen tomada después del ensayo potenciodinamico de M1 X5 evidenciando la afectación

Figura 48

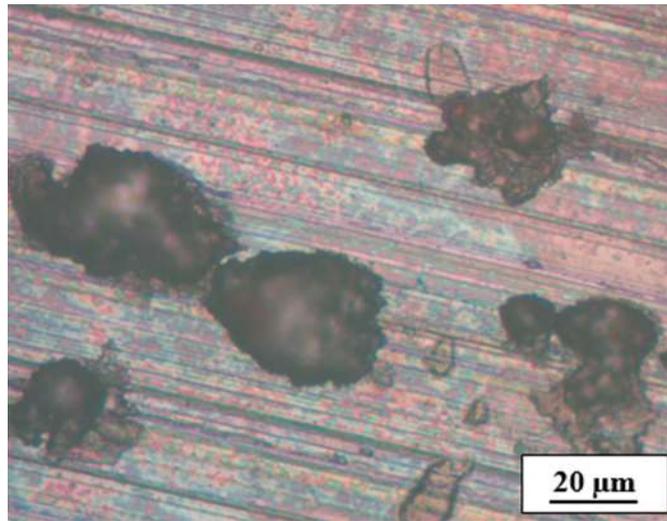
M1 X20



Nota: Imagen tomada antes del ensayo potenciodinamico de M1 X20.

Figura 49

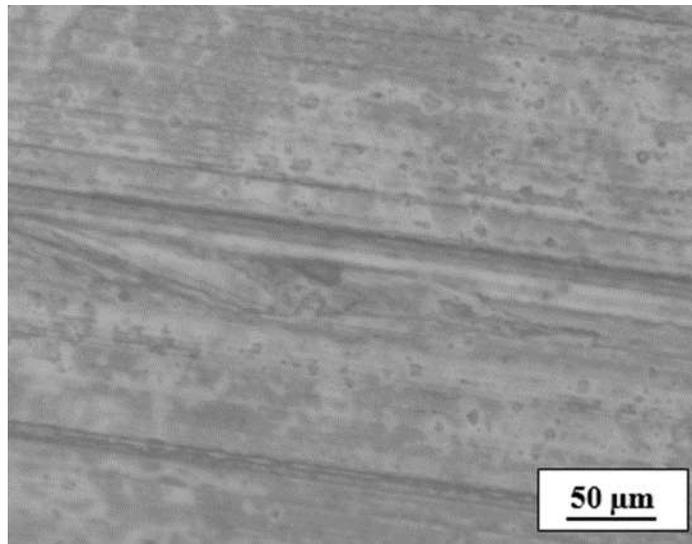
M1 X20 DESP



Nota: Imagen tomada después del ensayo potenciodinámico de M1 X20 evidenciando la afectación

Figura 50

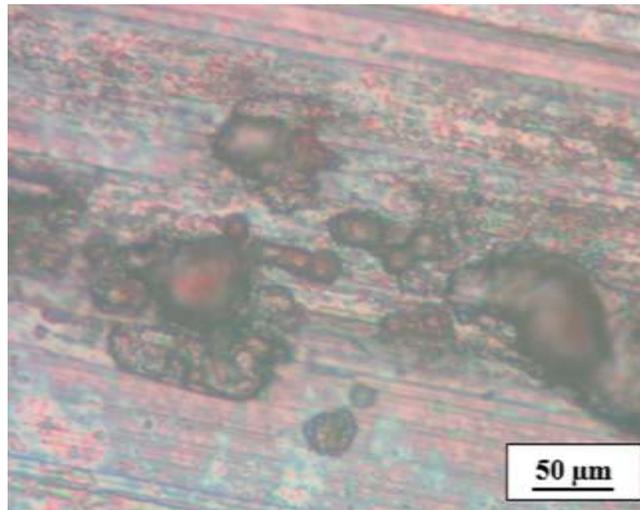
M1 X50 ANTES



Nota: Imagen tomada antes del ensayo potenciodinámico de M1 X50.

Figura 51

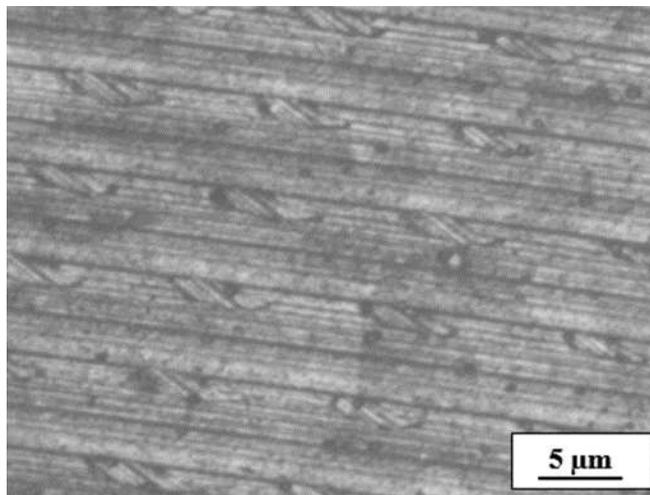
M1 X50 DES



Nota: Imagen tomada después del ensayo potenciodinámico de M1 X50 evidenciando la afectación

Figura 52

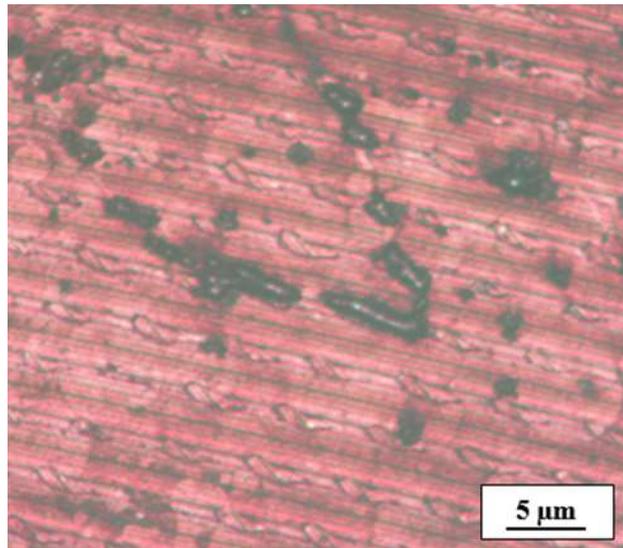
M2 X5



Nota: Imagen tomada antes del ensayo potenciodinámico de M2 X5.

Figura 53

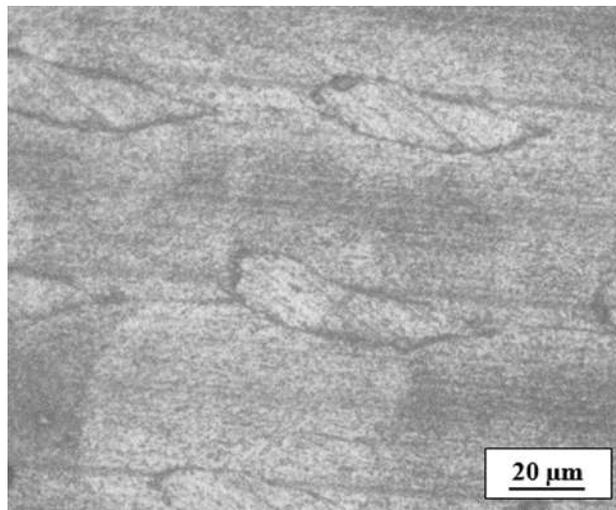
M2 X5



Nota: Imagen tomada después del ensayo potenciodinamico de M2 X5 evidenciando la afectación

Figura 54

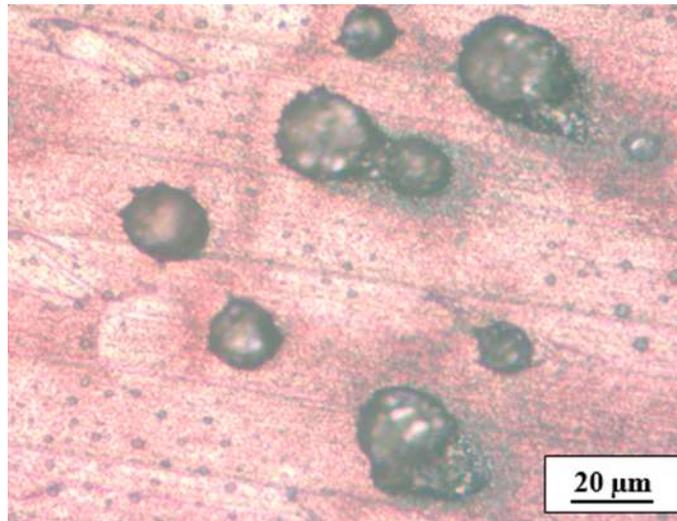
M2 X20



Nota: Imagen tomada antes del ensayo potenciodinamico de M2 X20

Figura 55

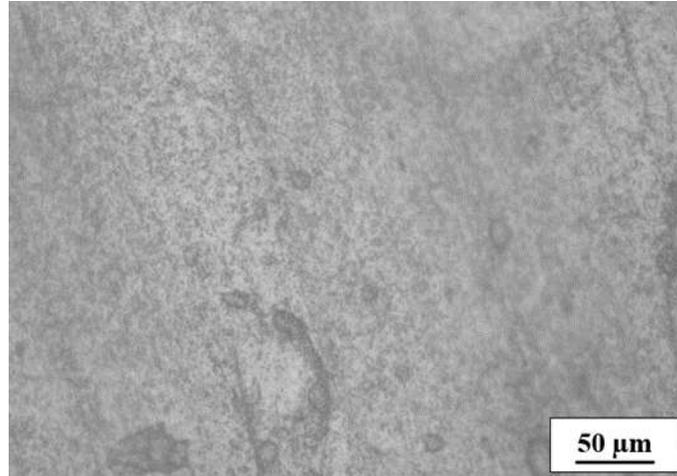
M2 X20



Nota: Imagen tomada después del ensayo potenciodinamico de M2 X20 evidenciando la afectación

Figura 56

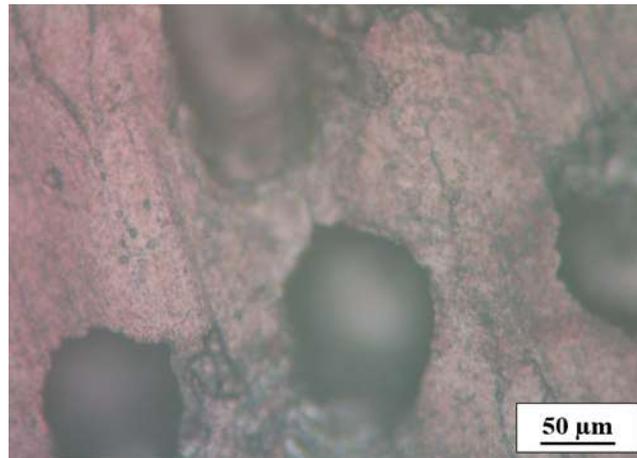
M2 X50



Nota: Imagen tomada antes del ensayo potenciodinamico de M2 X50.

Figura 57

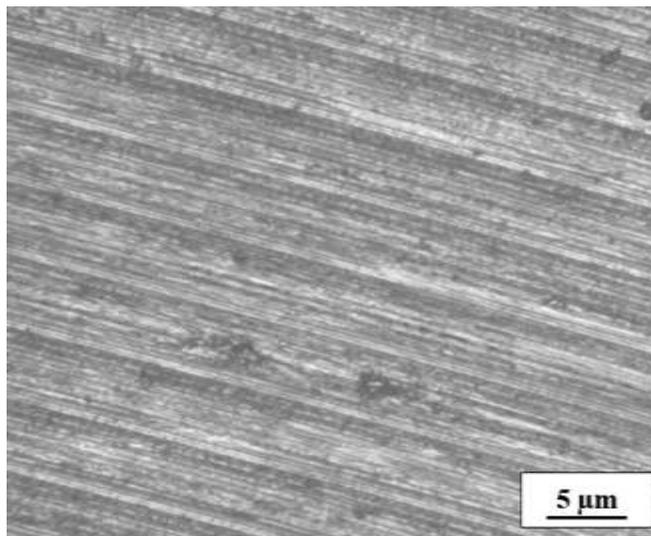
M2 X50



Nota: Imagen tomada después del ensayo potenciodinámico de M2 X50 evidenciando la afectación

Figura 58

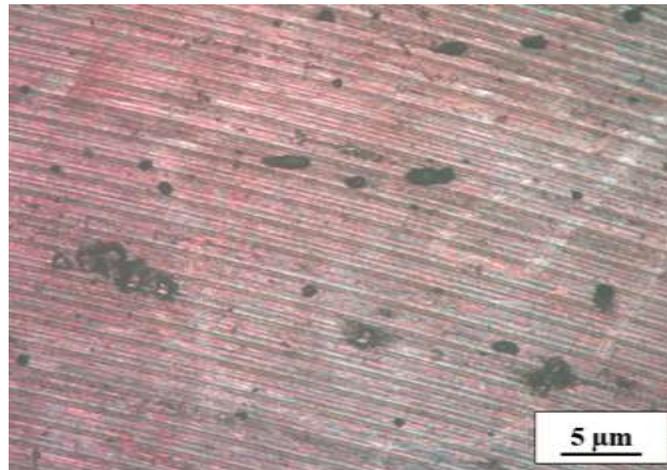
M3 X5



Nota: Imagen tomada antes del ensayo potenciodinámico de M3 X50.

Figura 59

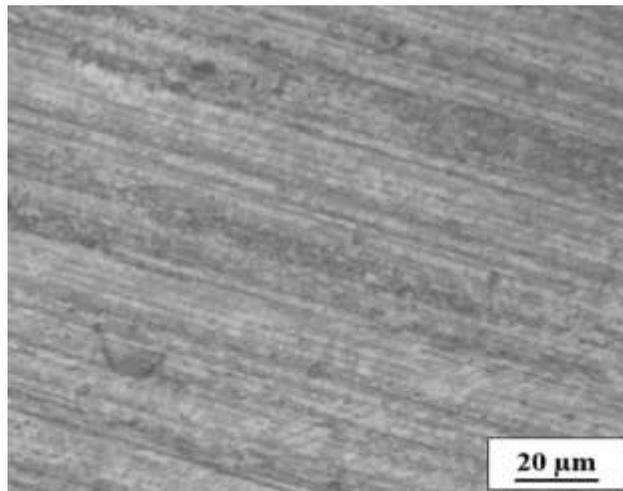
M3 X5



Nota: Imagen tomada después del ensayo potenciodinámico de M3 X5 evidenciando la afectación

Figura 60

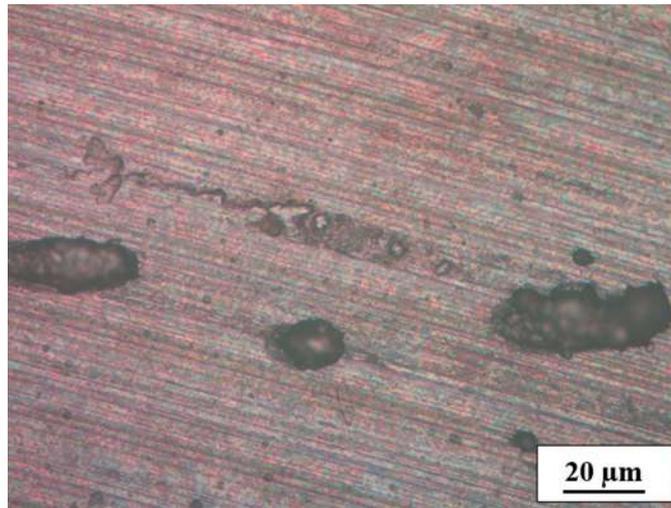
M3 X20



Nota: Imagen tomada antes del ensayo potenciodinámico de M3 X20

Figura 61

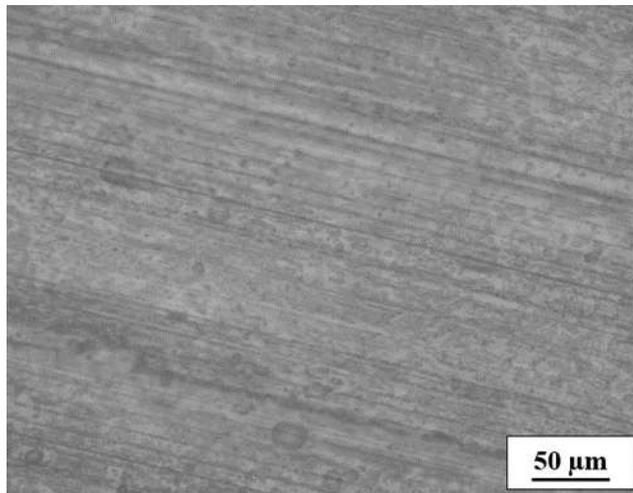
M3 X20



Nota: Imagen tomada después del ensayo potenciodinamico de M3 X20 evidenciando la afectación

Figura 62

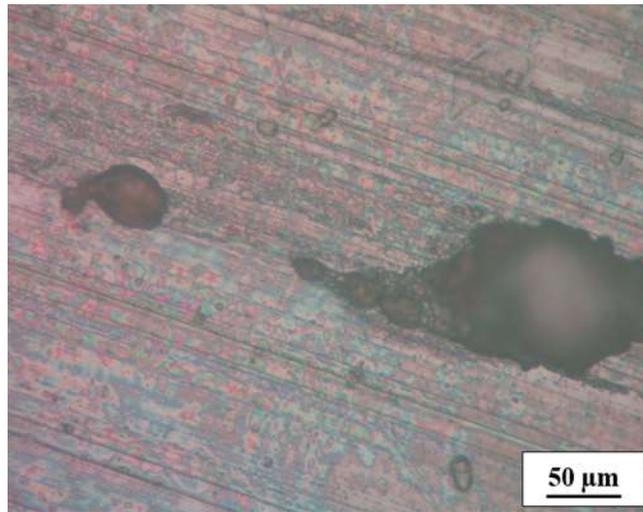
M3 X50



Nota: Imagen tomada antes del ensayo potenciodinamico de M3 X50

Figura 63

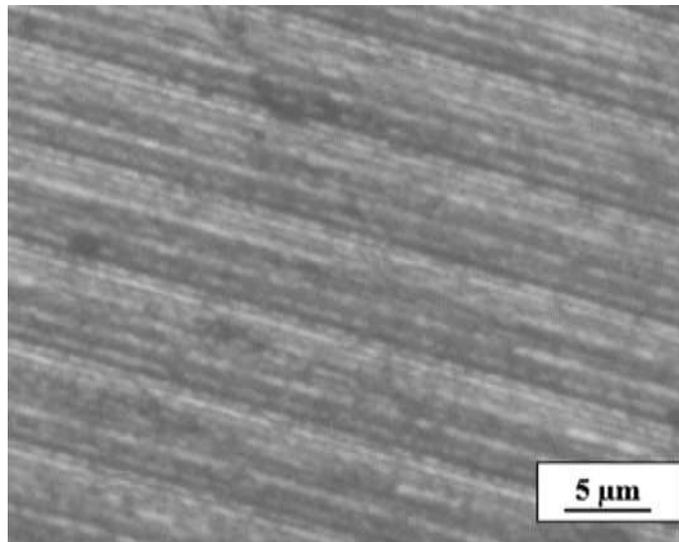
M3 X50



Nota: Imagen tomada después del ensayo potenciodinamico de M3 X50 evidenciando la afectación

Figura 64

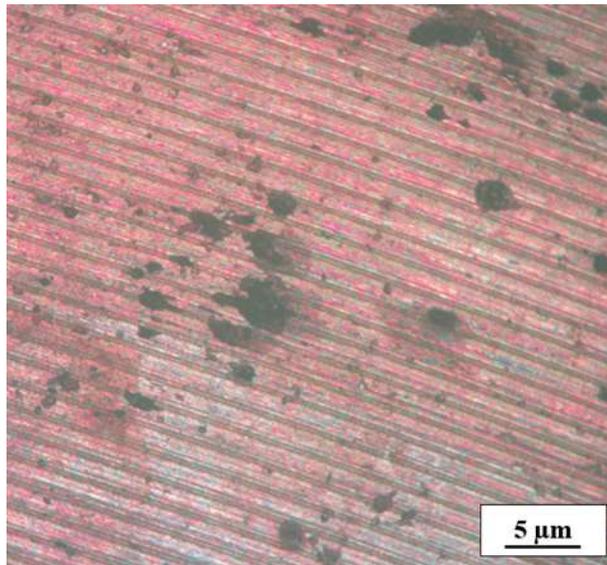
M4 X5



Nota: Imagen tomada antes del ensayo potenciodinamico de M4 X5.

Figura 65

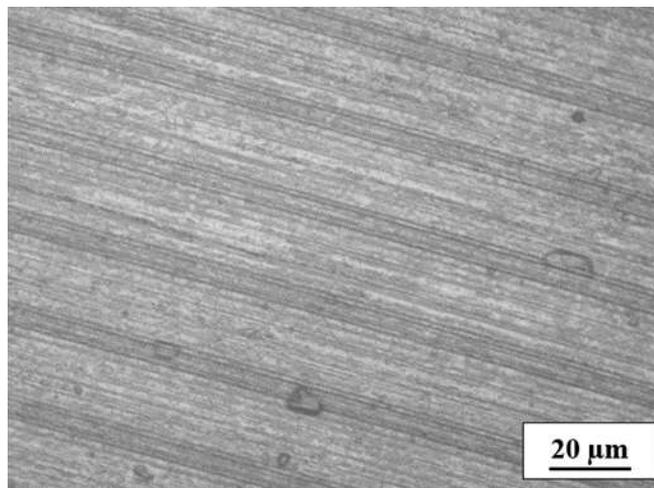
M4 X5



Nota: Imagen tomada después del ensayo potenciodinamico de M4 X5 evidenciando la afectación

Figura 66

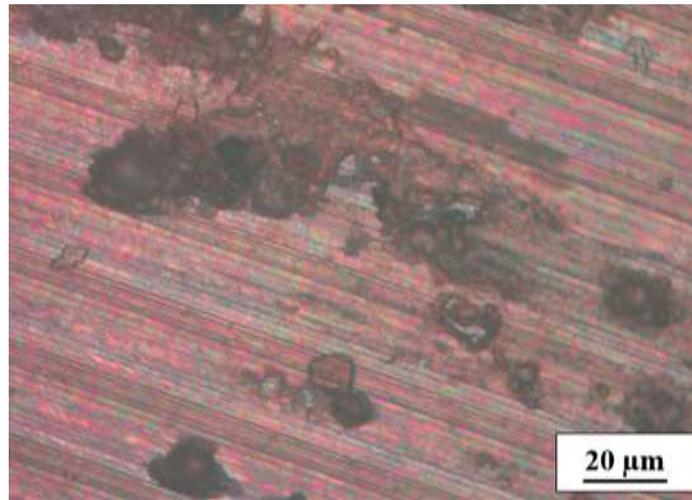
M4 X20



Nota: Imagen tomada antes del ensayo potenciodinamico de M4 X20.

Figura 67

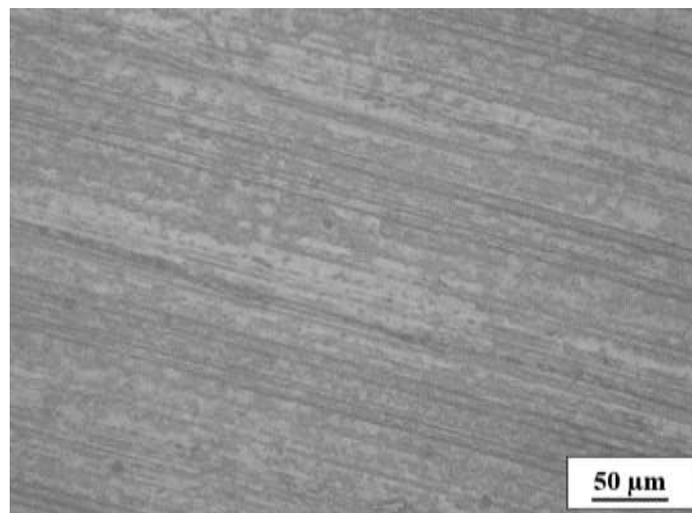
M4 X20



Nota: Imagen tomada después del ensayo potenciodinamico de M4 X20 evidenciando la afectacion

Figura 68

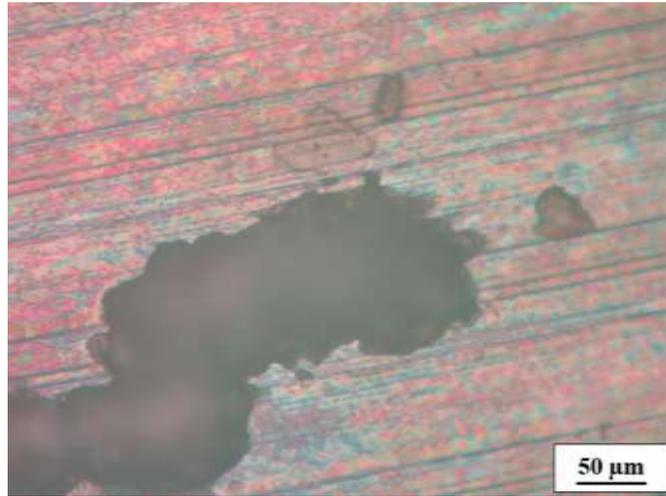
M4 X50



Nota: Imagen tomada antes del ensayo potenciodinamico de M4 X50.

Figura 69

M4 X50



Nota: Imagen tomada después del ensayo potenciodinámico de M4 X50 evidenciando la afectación

Normativa para ensayos de corrosión en aceros inoxidable.

El ensayo de polarización es una técnica electroquímica ampliamente utilizada para estudiar la capacidad de los materiales para resistir a la corrosión en los materiales metálicos. Este método permite obtener información detallada sobre el índice de corrosión junto a los mecanismos corrosivos que afectan a un material en un entorno específico. Mediante un potenciómetro, se aplica una corriente eléctrica controlada al material estudiado y se mide la respuesta en términos de potencial eléctrico. Este ensayo es crucial frente al desarrollo y la valoración de aleaciones, revestimientos protectores y la capacidad de los inhibidores para prevenir el proceso corrosivo [31].

Las normas utilizadas para el desarrollo de una prueba de polarización se componen de las siguientes normas: ASTM G5-14(2021), ASTM G61-86(2024) y ASTM G46-21. Proporcionan directrices y procedimientos normalizados para evaluar la vulnerabilidad a la corrosión de los materiales mediante técnicas electroquímicas. Estas normas describen métodos precisos para realizar mediciones potencioestáticas, potenciodinámicas y de polarización cíclica, estableciendo las condiciones experimentales, el equipo necesario y los cálculos requeridos para determinar las velocidades de corrosión y la capacidad de resistir la corrosión en puntos específicos. Su aplicación asegura la reproducibilidad y comparabilidad de los resultados, facilitando la caracterización y

selección de materiales en función de su desempeño ante la corrosión en diferentes entornos industriales.

Las normas ASTM G5-14(2021), ASTM G61-86(2024) y ASTM G46-21 son esenciales para el análisis de la corrosión en metales por medio de técnicas electroquímicas. Para llevar a cabo este ensayo de manera exitosa, es fundamental el seguir una serie de procesos para su elaboración, de esta manera:

1. Preparación de la Muestra:

- Selección del Material: Elija una muestra representativa del material que se va a estudiar.
- Superficie de la Muestra: Limpie y prepare la superficie del material. Esto puede incluir pulido, desengrasado y lavado con soluciones específicas para eliminar contaminantes.

2. Montaje del Sistema Electroquímico:

- Celda Electroquímica: Coloque la muestra en una celda electroquímica adecuada. La celda debe incluir un electrodo de referencia (comúnmente un electrodo de calomelanos saturado o un electrodo de plata/cloruro de plata) y un contraelectrodo (generalmente de platino).
- Electrolito: Llene la celda con un electrolito apropiado que simula el entorno operativo del material. El electrolito debe estar en contacto con todas las superficies relevantes de la muestra.

3. Configuración del Potenciostato:

- Conexión de Electrodo: Conecta el electrodo de trabajo (muestra), el electrodo de referencia y el contraelectrodo al potenciostato.
- Calibración: Verifique y calibra el potenciómetro según las especificaciones del fabricante y las condiciones del ensayo.

4. Realización del Ensayo:

- Aplicación de Potencial: Inicie el ensayo aplicando un escaneo de voltaje aplicando el electrodo de trabajo. Esto puede ser un barrido lineal, donde el potencial se incrementa o disminuye de manera controlada.

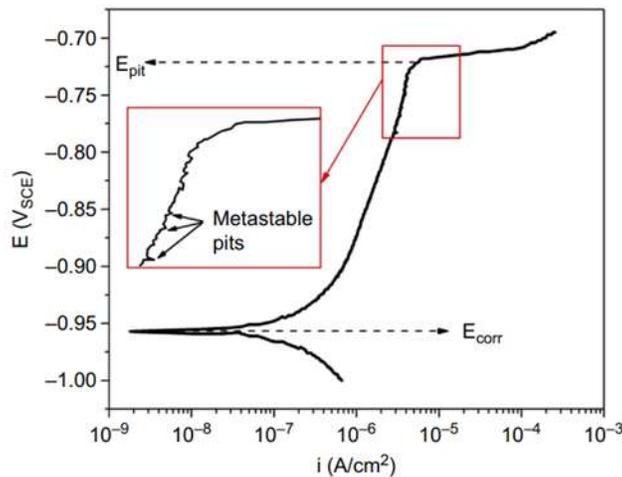
- Medición de Corriente: Registre la corriente que fluye a través del sistema en respuesta al potencial aplicado. Este dato es fundamental para determinar las características de polarización del material.

5. Análisis de Datos:

- Curva de Polarización: Grafique la corriente contra el potencial para obtener la curva de polarización. Esta curva proporciona una descripción de los procedimientos anódicos y catódicos que tienen lugar en la superficie del material como se puede evidenciar en la Figura 13.

Figura 70

Curva de polarización



Nota: Curva de polarización esquemática para un metal que puede sufrir picaduras donde las picaduras se inician en el potencial de ruptura (E_{pit}).

Mediante un potenciostato, se puede llevar el control de la superficie metálica en relación con un potencial de referencia. Una polarización anódica provocaría un aumento de las densidades de corriente anódica como se puede observar en la Figura 13. El ensayo de polarización es un implemento fundamental dentro de la investigación de corrosión, proporcionando información crítica para la industria y la investigación académica. La correcta ejecución y análisis de este ensayo permiten avances significativos en la protección y el desarrollo de materiales.

- Norma ASTM G5-14(2021)

La norma ASTM G5-14(2021) nombrada "Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements" proporciona un método de referencia normalizado para realizar mediciones de polarización anódica potenciodinámica en metales y aleaciones. Este método se utiliza para evaluar la susceptibilidad de un material a la corrosión en soluciones específicas y en condiciones controladas. La técnica se basa en aplicar un potencial variable al material y medir la corriente resultante, lo que permite determinar características electroquímicas críticas, como la tendencia a la pasivación y la susceptibilidad a la corrosión localizada, incluidas la corrosión por picaduras y la corrosión intergranular [31].

- Norma ASTM G46-21

La norma ASTM G46-21, nombrada "Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion", proporciona orientación para la inspección visual y la evaluación de la corrosión por picaduras en metales. Esta norma establece los criterios y técnicas para identificar, medir y clasificar las picaduras en superficies metálicas, esta norma es ampliamente utilizada en la industria para la evaluación de la integridad de componentes metálicos en servicio, así como en la investigación y desarrollo de nuevos materiales y tratamientos superficiales. Es crucial para el mantenimiento predictivo y la evaluación de la vida útil de los equipos expuestos a entornos corrosivos [32].

- Norma ASTM G61-86(2024)

La norma ASTM G61-86(2024), nombrada "Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys", describe un método para medir la susceptibilidad a la corrosión localizada, como la corrosión por picaduras y la corrosión intergranular, en aleaciones a base de hierro, níquel o cobalto, utilizando la polarización cíclica potencioestática. Este método es útil para evaluar cómo los diferentes materiales y condiciones afectan a la susceptibilidad a la corrosión localizada. Se utiliza principalmente en laboratorios de investigación y desarrollo de materiales, así como en industrias en las que la resistencia a la corrosión es crítica, como la aeroespacial, la automovilística y la petroquímica [33].