

Evaluación de la resistencia a la corrosión de un acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517
para uso en desalinizadores de agua de mar

Ángela Viviana Torres Delgado

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera Metalúrgica

Director

Mauricio Rincón Ortiz

Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales

Codirectora

Ana María Pérez Ceballos

Doctora en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A mi papá por estar pendiente de mí siempre, por brindarme todo su amor y comprensión. Por cada día esforzarse para que no me haga falta nada y pueda alcanzar todos mis sueños.

A mi mamá por ser todo lo que un hijo necesita, dándome su amor y paciencia. Por escucharme en todo momento, preocuparse por mí y brindarme su sabiduría para tomar decisiones correctas.

A mi hermana por acompañarme y darme ánimo para lograr todo lo que me propongo, y así poder cumplir nuestros sueños.

A mi abuelita por estar incondicionalmente para mí, por darme todo su amor tan puro y real. Por haberme enseñado distintos valores que han sido de gran ayuda para convertirme en la persona que soy hoy en día.

A mi novio por acompañarme a lo largo de mi vida universitaria, estar pendiente de mí y alegrarse por cada uno de mis logros.

A mi tío Juan Pablo por estar dispuesto a darme consejos, darme su cariño y ser un amigo para mí.

A Nerly Montañez por generar en mí el interés por el estudio de los materiales y estar dispuesta a brindarme sus conocimientos.

A mis amigos David Norato, Vivian Arrieta y Juan Esteban por hacer que mi paso por esta etapa de mi vida estuviese colmado de buenos recuerdos y experiencias.

Agradecimientos

A Dios por darme sabiduría y salud.

A mi director Mauricio Rincón Ortiz, con quién pude adquirir diferentes habilidades que serán de gran utilidad para mi vida profesional. Agradezco por brindarme sus conocimientos y estar dispuesto a solventar cualquier inquietud.

A mi codirectora Ana María Pérez Ceballos, por su orientación y apoyo en la dirección de este proyecto de investigación.

A mis demás profesores quienes generaron en mí el amor por la metalurgia y la investigación. Por ayudarme en mi formación como una persona integra, con habilidades técnicas y sociales

Al Grupo de investigación en desarrollo y tecnología de nuevos materiales. En especial a Mayerly Fernández y Sara Navarro, por ayudarme en el desarrollo de este proyecto prestándome sus servicios.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) de la Universidad Industrial de Santander por el apoyo para la realización de este trabajo de grado, por medio del proyecto de investigación N°2685 titulado: “Evaluación de la resistencia a la corrosión en presencia de cloruros de aceros inoxidable super dúplex para uso en desalinizadores de agua de mar”

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Referencial.....	15
2.1 Recursos Hídricos	15
2.2 Desalinización de agua de mar	16
2.3 Aceros inoxidables dúplex	17
2.4 Corrosión.....	18
2.4.1 Corrosión generalizada	18
2.4.2 Corrosión localizada	19
2.5 Corrosión en aceros inoxidables dúplex	20
3. Metodología experimental	21
3.1 Caracterización metalográfica	22
3.2 Caracterización electroquímica.....	24
4. Resultados y Análisis	25
4.1 Caracterización metalográfica	25
4.2 Caracterización electroquímica.....	27
4.2.1 Polarización potenciodinámica cíclica.....	27
4.2.2 Espectroscopía de impedancia electroquímica	32
4.2.3 Método de Extrapolación de Tafel.....	36

4.2.4. Velocidad de corrosión	37
4.3 Análisis morfológico del picado	39
5. Conclusiones	42
6. Recomendaciones	44
Referencias Bibliográficas	45
Apéndices.....	51

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Composición química del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517	23
Tabla 2. Espaciamiento austenítico y fracción volumétrica de ferrita y austenita del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517	27
Tabla 3. Potenciales críticos del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en diferentes condiciones	31
Tabla 4. Parámetros obtenidos por el método de extrapolación de Tafel y EIS del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en agua de mar sintética y NaCl 3,5 % p/p a temperatura ambiente, 50°C y 70°C	38
Tabla 5. Profundidad máxima de los pozos de picado analizados del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 al ser expuesto a la técnica CPP bajo diferentes condiciones	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de la metodología experimental utilizada	22
Figura 2. Microestructura del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517	26
Figura 3. Curvas de polarización potenciodinámica cíclica: a) NaCl 3,5%p/p aireada, b) NaCl 3,5%p/p deaireada, c) Agua de mar sintética aireada, d) Agua de mar sintética deaireada	29
Figura 4. Circuito equivalente tipo Randles	32
Figura 5. Diagrama de Nyquist del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en agua de mar sintética y NaCl 3,5 % p/p a temperatura ambiente, 50°C y 70°C, bajo condiciones aireadas	33
Figura 6. Diagramas de Bode del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en agua de mar sintética y NaCl 3,5 % p/p a temperatura ambiente, 50°C y 70°C, bajo condiciones aireadas	34
Figura 7. Resistencia a la polarización del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en agua de mar sintética y NaCl 3,5% p/p a temperatura ambiente, 50°C y 70°C	35
Figura 8. Curvas del método de extrapolación de Tafel del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en agua de mar sintética y NaCl 3,5 % p/p a temperatura ambiente, 50°C y 70°C	37
Figura 9. Reconstrucción digital 3D de un pozo de picado del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 expuesto a la técnica CPP en agua de mar sintética a 70°C aireada	40
Figura 10. Inclusión presente en el acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en NaCl 3,5% p/p a 70°C	42

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Micrografías utilizadas para la medición del espaciamiento interaustenítico y fracción volumétrica del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517	51
Apéndice B. Composición química de la sal de mar sintética	53
Apéndice C. Circuitos equivalentes de la técnica de EIS	54
Apéndice D. Reconstrucción digital 3D de los pozos de picado del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 expuesto a la técnica CPP en diferentes condiciones	57

Glosario

β_a	Pendiente de Tafel anódica
β_c	Pendiente de Tafel catódica
CPE	Elemento de fase constante
CPP	Polarización potenciodinámica cíclica
E_{corr}	Potencial de corrosión
EIS	Espectroscopía de Impedancia Electroquímica
E_{pit}	Potencial de picado
E_{rp}	Potencial de repasivación
i_{corr}	Densidad de corriente de corrosión
OCP	Potencial de circuito abierto
PREN	Número equivalente de resistencia al picado
%RA	Porcentaje de exactitud relativa
R_p	Resistencia de polarización
R_s	Resistencia de la solución
V_{corr}	Velocidad de corrosión

Resumen

Título: Evaluación de la resistencia a la corrosión de un acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 para uso en desalinizadores de agua de mar*

Autor: Ángela Viviana Torres Delgado**

Palabras Clave: Agua potable, desalinizadores, corrosión por picado, aceros inoxidables dúplex, velocidad de corrosión

Descripción: Los aceros inoxidables austeníticos y dúplex han sido seleccionados como los principales materiales utilizados en medios agresivos por su buena resistencia a la corrosión. Particularmente, los aceros inoxidables dúplex poseen mayor resistencia a la corrosión localizada y mejores propiedades mecánicas. Estas propiedades hacen que sobresalgan para su uso en desalinizadores de agua de mar, donde especies químicas como los iones cloruro afectan la integridad de las diferentes partes de los equipos. Actualmente, algunos de los componentes de las plantas desalinizadoras como bombas y válvulas se fabrican de aceros inoxidables dúplex en estado fundido. Por lo cual, en este proyecto de investigación se evaluó el comportamiento frente a la corrosión de un acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en estado fundido, al ser expuesto en soluciones de NaCl 3,5% p/p y agua de mar sintética, a temperatura ambiente, 50°C y 70°C. Se realizaron pruebas de corrosión localizada por medio de la técnica de Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP), y con ayuda de técnicas no electroquímicas como Microscopía Óptica confocal y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), se examinó la morfología de los pozos de picado. Adicionalmente, en cada una de las condiciones estudiadas se calculó la velocidad de corrosión, teniendo en cuenta parámetros como la densidad de corriente (i_{corr}) y la resistencia de polarización (R_p) determinados mediante extrapolación de Tafel y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS).

Los resultados obtenidos indican que, al aumentar la temperatura el material presenta mayor susceptibilidad a la corrosión localizada y generalizada, este comportamiento se exhibió en ambos medios. Los potenciales críticos de la aleación tienden a valores más negativos al aumentar la temperatura. Los valores calculados de velocidad de corrosión se encuentran entre 0,432 $\mu\text{m/año}$ y 321,590 $\mu\text{m/año}$, siendo el caso más crítico cuando el acero fue expuesto a una solución de NaCl 3,5% p/p a 70°C.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Mauricio Rincón Ortiz. Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales. Codirector: Ana María Pérez Ceballos. Doctora en Ingeniería

Abstract

Title: Evaluation of the corrosion resistance of a duplex stainless steel DIN / EN 1.4517*

Author: Ángela Viviana Torres Delgado**

Key Words: Drinking water, desalinators, pitting corrosion, duplex stainless steel, rate corrosion

Description: Austenitic and duplex stainless steels have been selected as the main materials used in aggressive environments because of their good corrosion resistance. Particularly, duplex stainless steels have higher resistance to localized corrosion and better mechanical properties. These properties make them outstand for use in seawater desalinators, where chemical species such as chloride ions affect the integrity of the different parts of the equipment. Currently, some of the components of desalination plants such as pumps and valves are made of duplex stainless steels and are in as-cast state. Therefore, in this research project, the corrosion behavior of a duplex stainless steel DIN/EN 1.4517 in as-cast state, when exposed to solutions of NaCl 3.5% w/w and synthetic seawater, at room temperature, 50°C and 70°C. Localized corrosion tests were carried out by means of the Cyclic Potentiodynamic Polarization technique (CPP), and with the help of non-electrochemical techniques such as Optical Microscopy and Scanning Electron Microscope (SEM), the morphology of the pitting wells was examined. Additionally, in each of the conditions studied, the corrosion rate was calculated, considering parameters such as current density (i_{corr}) and polarization resistance (R_p) determined by Tafel extrapolation and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS).

The results obtained indicate that, as the temperature increases, the material presents greater susceptibility to localized and generalized corrosion, this behavior was exhibited in both studied environments. The critical potentials of the alloy tend to more negative values with increasing temperature. The calculated values of corrosion rate are between 0.432 $\mu\text{m}/\text{year}$ and 321.590 $\mu\text{m}/\text{year}$, being the most critical case when the steel was exposed to NaCl 3.5% w/w at 70°C.

* Degree Work

** Faculty of physical chemical engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Adviser: Mauricio Rincón Ortiz. PhD in Science and Technology with specialization on Materials Science. Co-adviser: Ana María Pérez Ceballos. PhD in Engineering

Introducción

Colombia, como país signatario de la Resolución 70/01 de la Organización de las Naciones Unidas se ha comprometido a formular y gestionar políticas públicas que permitan el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (Naciones Unidas, 2018). Teniendo en cuenta que el objetivo número 6 busca garantizar la disponibilidad de agua y gestión sostenible y el saneamiento para todos, el gobierno elaboró el Plan Director de Agua y Saneamiento Básico que determina la visión estratégica 2018-2030 para la gestión eficiente y sostenible del agua potable y el saneamiento básico (Minvivienda, 2018). De acuerdo con el Departamento Nacional de Planeación, los departamentos con mayor escasez de agua potable son la Guajira y el Chocó cuya cobertura alcanza 63.1% y 40.3%, respectivamente (DNP, 2019). El territorio de ambos departamentos está limitado por el océano, por lo cual podrían verse beneficiados con la instalación de plantas industriales de desalinización de agua de mar.

En los procesos de desalinización se cuenta con métodos térmicos y de membrana. Actualmente, los métodos de membrana son los que más sobresalen, ocupando cerca del 69 a 73% de todos los sistemas instalados a nivel mundial (Bundschuh et al., 2021). La tecnología de Ósmosis Inversa (OI) para producir agua potable a partir de agua de mar es apropiada para su implementación en la alta Guajira (Imitola et al., 2019). Se estima que Chocó también podría verse favorecido por dicha técnica para solventar su escasez de agua destinada al consumo humano. Dada la necesidad de tener una alta resistencia a la corrosión debido a la agresividad del medio, se ha establecido que para esta aplicación es obligatorio el uso de aceros inoxidable de alta aleación o aceros inoxidable bifásicos (Panagopoulos et al., 2020). Existen extensivos estudios sobre el efecto del ion cloruro y el agua de mar sobre la resistencia a la corrosión de los

aceros inoxidable austeníticos, sin embargo, no se encuentran estudios sistemáticos en aceros inoxidable dúplex, los cuales pueden ser usados tanto en piezas fundidas como en laminadas. Así pues, en esta propuesta de investigación se realizó la evaluación de la influencia del ion cloruro y agua de mar sintética a diferentes temperaturas, sobre la resistencia a la corrosión de un acero inoxidable dúplex en estado fundido por medio de las siguientes técnicas electroquímicas: Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP, por sus siglas en inglés), Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés) y curvas de polarización tipo Tafel.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el efecto sobre la resistencia a la corrosión en presencia de cloruros y agua de mar sintética de un acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 para uso en desalinizadores de agua de mar.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar los potenciales críticos de corrosión del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517, en presencia de cloruros y agua de mar sintética, por medio de la técnica de polarización potenciodinámica cíclica (CPP).

Determinar las velocidades de corrosión en presencia de cloruros y agua de mar sintética del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517, mediante la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).

Evaluar la morfología superficial del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en estado fundido, al ser expuesto a soluciones de cloruros y agua de mar sintética, empleando técnicas de microscopía.

2. Marco Referencial

A continuación, se presenta una descripción de los fundamentos teóricos que se tomaron en cuenta para el desarrollo del proyecto.

2.1 Recursos Hídricos

En 2015, se aprobó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible por parte de los estados miembros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Los 17 objetivos planteados buscan “Transformar nuestro mundo” como se expresa en el documento expedido, de tal manera que exista una armonía en el aspecto económico, social y ambiental (Naciones Unidas, 2018). En particular, el agua es asociada con casi todos los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), a nivel social cerca de 2.200 millones de personas no cuentan con agua potable y 4.200 no tienen servicios de saneamiento adecuados en todo el mundo (World Bank, 2021). Además, se espera que para el año 2050 cerca de 685 millones de personas repartidas en 570 ciudades, tengan una disminución de la cantidad de agua dulce de alrededor del 10% (UNESCO, 2020). Todo lo anterior trae consigo consecuencias a las poblaciones más vulnerables. Ahora bien, Colombia como país comprometido con los ODS estableció el Plan Director de Agua y Saneamiento Básico 2018 – 2030, buscando garantizar la seguridad hídrica y el cumplimiento del objetivo número 6: Agua limpia y saneamiento (Minvivienda, 2018). Sin embargo, Colombia siendo uno de los nueve países más ricos en recursos hídricos del mundo sigue teniendo una brecha sustancial en el acceso a agua potable, de modo que un tercio de la población urbana sufre estrés hídrico (World Bank, 2020). Según cifras del Departamento Nacional de Planeación, en el año 2019 la Guajira y el Chocó demostraron ser los departamentos con mayor escasez de agua potable cubriendo tan solo el 63.1% y el 40.3% de la población, respectivamente (DNP, 2019).

La desalinización de agua de mar es viable en estos departamentos ya que parte de su territorio está limitado por los océanos Atlántico y Pacífico, respectivamente.

2.2 Desalinización de agua de mar

Para entrar en contexto, la disponibilidad de agua promedio anual es de 1.386 millones de Km^3 , donde 97.5% es de agua salada y 2.5% de agua dulce; para consumo humano solo es apto el 0.007% del agua dulce (Carrión, 2019). Las cifras anteriores evidencian la necesidad de generar nuevos sistemas para la obtención de agua potable a partir de diferentes métodos. La desalinización es un proceso que busca eliminar las sales del agua con el fin de obtener agua para uso humano de alta calidad. Se han instalado aproximadamente 20 mil plantas de desalinización en el mundo, produciendo más de 100 millones de $\text{m}^3/\text{día}$ de agua desalinizada (Lim et al., 2021). Sin embargo, estos sistemas presentan inconvenientes en cuanto a los costos operativos y la generación de la salmuera como subproducto. Hoy en día, se ha ido avanzando en métodos que puedan utilizar fuentes de energía renovable para el funcionamiento de las plantas desalinizadoras, disminuyendo los costos significativamente (Bundschuh et al., 2021). La desalinización de agua de mar se puede dar por tecnologías de membrana o térmicas. Los sistemas de membrana como su nombre lo indica utilizan una membrana a través de la cual el agua se difunde a medida que las sales se retienen en el lado de alimentación de ésta. Por otro lado, la desalinización térmica se basa en evaporación y condensación para separar la sal del agua de mar. Algunos de las tecnologías utilizadas son: ósmosis inversa, *flash* de varias etapas, destilación de efectos múltiples, nanofiltración, reversión de electrodiálisis, electrodesionización, compresión de vapor, ósmosis directa, entre otros (Panagopoulos et al., 2020).

El método de ósmosis inversa (OI) representa el 84% del total de plantas desalinizadoras instaladas (Jones et al., 2019). El principio de funcionamiento consiste en aplicar presión

hidráulica para trasladar las moléculas de agua de un compartimiento de mayor concentración de sal a uno de menor, a través de una membrana semipermeable (Panagopoulos et al., 2019). Dentro de sus componentes se encuentra la membrana semipermeable, los tanques de almacenamiento y el sistema de alta presión constituido por: bombas, válvulas, tuberías, entre otros (Park et al., 2020). Este método cuenta con numerosos estudios los cuales abarcan nuevos materiales para sus componentes, fuentes de energía renovable para su funcionamiento y diseños más factibles desde el punto de vista operacional (Bundschuh et al., 2021). En Colombia, existen algunos estudios sobre la viabilidad de implementar una planta desalinizadora de agua de mar en la Alta Guajira. El proceso que se considera adecuado es el de ósmosis inversa por tener menor consumo de energía y costo de instalación (Imitola et al., 2019). Sin embargo, no hay que ignorar los otros métodos que pueden llegar a ser prometedores con los avances tecnológicos. Los diferentes equipos que se utilizan para los procesos operativos están hechos en su mayoría de elementos metálicos, los cuales son especialmente aceros inoxidable dúplex (Panagopoulos et al., 2020).

2.3 Aceros inoxidables dúplex

Los aceros inoxidables dúplex son aquellos que tienen una microestructura constituida por las fases austenita y ferrita, las cuales están presentes en grandes cantidades y en fracciones casi iguales (Gunn, 1997). Estos aceros presentan en su composición química un contenido de 23 - 30% de cromo y 2.5 - 7% de níquel, principalmente. Los elementos de aleación no se encuentran uniformemente distribuidos en la matriz bifásica. La fase ferrita se verá favorecida por elementos como el Cr, Mo, Si y W, y la fase austenita por elementos estabilizadores de dicha fase como lo son el Ni, N, Cu y Mn. A comparación de los aceros inoxidables austeníticos, los aceros inoxidables dúplex poseen mayor resistencia a la corrosión localizada y mejores

propiedades mecánicas, por lo cual son deseados en una amplia gama de entornos (Gunn, 1997). En estado fundido estos aceros se utilizan en bombas, válvulas y otros equipos. Se pueden encontrar en aplicaciones incluyendo industrias de petróleo y gas, marinas, desalinización, energía, química y procesos, pulpa y papel y procesamiento mineral (Francis, 2018).

2.4 Corrosión

La corrosión es el ataque destructivo de un material debido a la reacción que se da con el medio que lo rodea, provocando un deterioro en sus propiedades. Existen diferentes razones para estudiar la corrosión en materiales, algunas de ellas son: control de costos, diseño, pérdida de producto y contaminación ambiental (Mccafferty, 2009). Es necesario contar con un estudio del comportamiento de materiales frente a la corrosión en un medio, debido a que esto podrá generar una mejor selección de material y un mejor diseño en diversas aplicaciones (Winston & Uhlig, 2008). Diferentes autores han clasificado la corrosión de acuerdo con la forma o el mecanismo que la origina, comúnmente se clasifica en dos: corrosión uniforme o generalizada y corrosión localizada (Vila, n.d).

2.4.1 Corrosión generalizada

Esta forma de corrosión se caracteriza por ser un ataque de manera más o menos uniforme en toda la superficie del material. Se da cuando el medio corrosivo tiene acceso a todas las partes de la superficie, adicionalmente, el material es composicionalmente uniforme (Jones, 1996). Es decir, ninguna parte de la superficie del metal es atacada con mayor preferencia que otra, la pieza de metal va perdiendo espesor hasta que finalmente falla. Dentro de esta forma se encuentra la corrosión del zinc en ácido clorhídrico y la corrosión atmosférica de aceros en ambientes exteriores agresivos (Mccafferty, 2009). La corrosión uniforme se puede prevenir

mediante una adecuada selección de materiales y sobredimensionamiento si es necesario, uso de inhibidores, control de pH, recubrimientos y protección catódica.

2.4.2 Corrosión localizada

La corrosión localizada es un ataque específico en la superficie del material. Normalmente, es causada por acciones químicas, físicas o metalúrgicas en sitios o áreas adyacentes en la superficie (McIntyre, 2017). Adicionalmente, provoca fallas o incluso destrucción total de equipos sin previo aviso. Todos los sistemas de metales y aleaciones son susceptibles de acuerdo con entornos específicos. Existen diferentes tipos de corrosión localizada como, por ejemplo: corrosión por picado, corrosión por rendija, corrosión erosión, entre otros (Davis, 2000).

2.4.2.1 Corrosión por picado. Este tipo de corrosión se caracteriza por pozos estrechos en la superficie con un radio de igual o menor magnitud que la profundidad. Se inicia por adsorción de aniones agresivos, como haluros y sulfatos, los cuales difunden a través de la película pasiva en sitios irregulares de la estructura del óxido hasta llegar a la interfaz metal – óxido. Se presenta en gran medida en aluminio y en aceros, siendo más problemático en condiciones de pH casi neutro con aniones corrosivos, tales como Cl^- y SO_4^{2-} (Cicek, 2014). Para el estudio de la corrosión por picado se pueden realizar curvas de polarización ya sea potencioestáticamente o galvanostáticamente (Szkłarska-Smialowska, 2005).

Existen tres formas del método potencioestático: 1) estacionario, donde se mantiene la muestra en cada potencial asignado hasta que la corriente sea constante, 2) potenciodinámico, de tal modo que se cambia el potencial continuamente a una tasa constante, y 3) cuasi-estacionario, se va cambiando el potencial paso a paso a una tasa deseada. A partir del ensayo, se pueden distinguir dos potenciales característicos: el potencial de picado (E_p), en el cual se produce un

aumento continuo de la corriente generando la formación de hoyos, y el potencial asociado con la caída de la corriente provocada por la repasivación de los hoyos (Erp). Por debajo de Erp no se produce picado metaestable ni estable. En algunos casos se da la formación de picado metaestable, el cual se observa como oscilaciones presentes a medida que se acerca al potencial de picado (Szkłarska-Smialowska, 2005).

Por otro lado, es poco común realizar mediciones galvanostáticas debido a que no es posible identificar la región de pasividad. Sin embargo, puede llegar a simular mejor las condiciones requeridas (Szkłarska-Smialowska, 2005).

2.5 Corrosión en aceros inoxidables dúplex

La película pasiva rica en cromo otorga una alta resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables dúplex. Al tener en su composición química elementos como el molibdeno y el nitrógeno, la resistencia a la corrosión y la cinética de repasivación refuerzan la película cuando se rompe. Normalmente, en condiciones de pH neutro la velocidad de corrosión suele ser muy baja (<0.01 mm/año). Sin embargo, la presencia de iones agresivos puede generar un daño localizado de la película pasiva e iniciar la corrosión localizada (Francis, 2018). Por ejemplo, puede generarse corrosión por picado por la presencia del ion cloruro en un amplio rango de pH.

En estudios previos, se ha analizado el comportamiento frente a la corrosión de aceros inoxidables austeníticos como el 304L y 316L reportando corrosión severa por picado y por rendija, puesto que no son resistentes al oxígeno disuelto en el agua de mar (Huang et al., 2012). La resistencia a la corrosión es una de las propiedades más importantes, debido a que factores como el oxígeno disuelto, la temperatura y la salinidad, influyen fuertemente en el comportamiento del material en servicio. Normalmente, en los aceros inoxidables dúplex se observa la presencia de corrosión por picado, corrosión por rendija y corrosión bajo tensión.

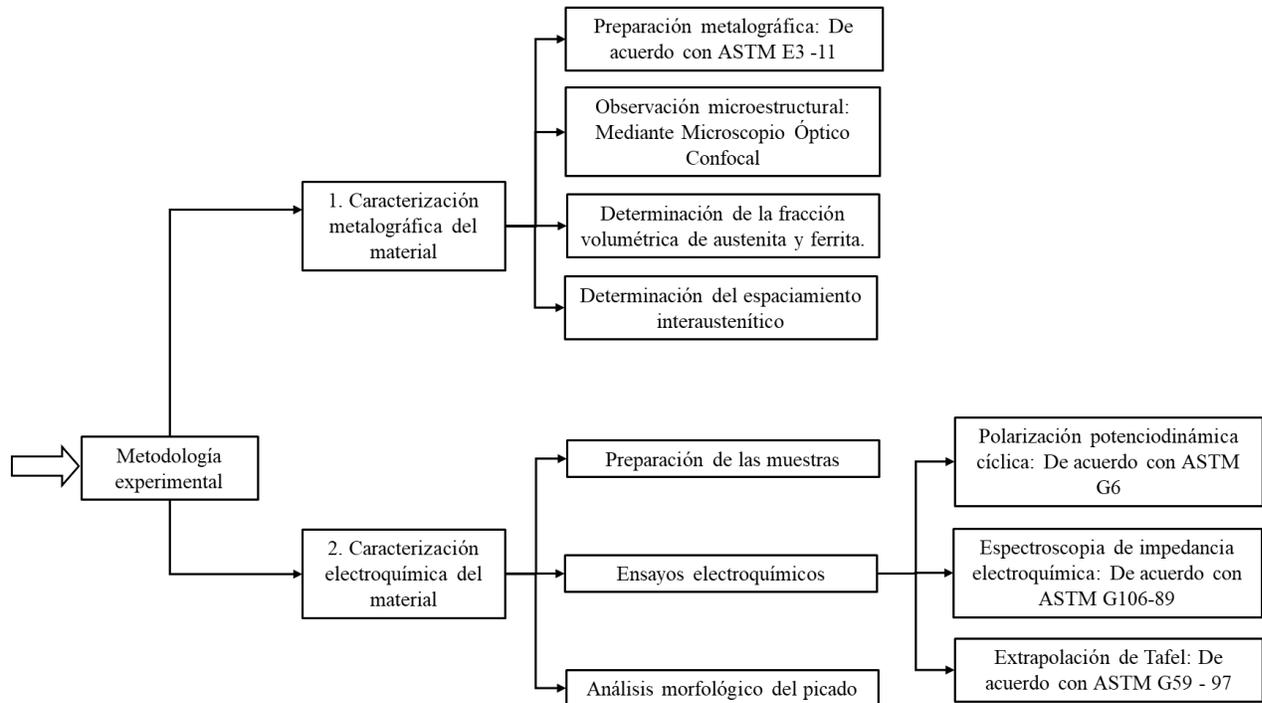
Elementos como el cromo, nitrógeno y molibdeno proporcionan buena resistencia a la corrosión por picado y corrosión bajo tensión. De acuerdo con la ecuación 1, el número equivalente de resistencia al picado (PREN) está en función de la composición química, este puede predecir la susceptibilidad a la corrosión por picado (Francis, 2018). Un valor alto puede interpretarse como una mayor resistencia a la corrosión por picado. Los aceros inoxidable dúplex presentan un mayor PREN en comparación con los austeníticos (Panagopoulos et al., 2020).

$$PREN = \%Cr + 3.3 (\%Mo + 0.5\%W) + 16\%N \quad (1)$$

El estudio del comportamiento frente a la corrosión en condiciones de servicio de aceros inoxidable dúplex genera grandes beneficios para la implementación efectiva de los sistemas de desalinización de agua de mar, por consiguiente, se busca tener estudios sistemáticos de materiales que puedan ser empleados. En este caso se evaluó un acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517, el cual presenta buena resistencia a la corrosión por su contenido de cromo, níquel, molibdeno y cobre (Sulzer, 2020).

3. Metodología experimental

Con el propósito de cumplir con los objetivos planteados en el presente proyecto de investigación, se llevaron a cabo dos etapas: caracterización metalográfica y caracterización electroquímica. En la figura 1 se ilustra una breve descripción del desarrollo experimental propuesto.

Figura 1.*Diagrama de la metodología experimental utilizada*

3.1 Caracterización metalográfica

De acuerdo con la norma ASTM E3-11, se llevó a cabo la preparación metalográfica de las muestras. Inicialmente, se cortaron muestras representativas de forma transversal con un área de 2 cm² en promedio, empleando una cortadora de disco horizontal Metaserv. Las probetas cortadas se montaron por compresión en caliente en un compuesto fenólico para tener mayor facilidad en el momento de desbastar y pulir. Luego, fueron sometidas a un desbaste manual en papel de grano de carburo de silicio, desde número 80 hasta 1200. Posteriormente, se pulieron utilizando pasta de diamante de 3 μm y 1 μm en paño (ASTM, 2017).

La microestructura del acero fue revelada mediante ataque químico por inmersión, según ASTM E407-07 (ASTM, 2016). El reactivo empleado fue Behara con un tiempo de inmersión de 45 segundos, destacando que se modificó la composición del reactivo de esta manera: 60ml H₂O,

40ml HCl y 1g de $K_2S_2O_5$. La microestructura del material fue observada mediante un Microscopio Óptico Confocal marca HIROX modelo KH770. Ahora bien, tanto para la determinación de la fracción volumétrica de austenita y ferrita, como para la medición del espaciamiento interaustenítico se utilizó como herramienta el software de análisis de imagen ImageJ. Se emplearon cinco micrografías capturadas en toda la superficie de la muestra a un aumento de 280X tomadas en el Microscopio Óptico Confocal. La determinación de la fracción volumétrica de austenita y ferrita se realizó empleando la función *Threshold* del software en cada una de las cinco capturas. Adicionalmente, se determinó el espaciamiento interaustenítico siguiendo la norma ASTM E112. Donde asimismo se emplearon las cinco micrografías, en las cuales se trazaron cinco rectas verticales paralelas y se efectuó la medición de la distancia entre las fases por medio de análisis estadístico. En el apéndice A, se encuentran las cinco capturas utilizadas. Una vez obtenidos los valores de fracción volumétrica y espaciamiento interaustenítico se calculó la desviación estándar y el porcentaje de exactitud relativa (%RA, por sus siglas en inglés). Teniendo en cuenta que el %RA debe ser menor a 10% (ASTM, 2021).

La composición química del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 suministrada por el fabricante se presenta en la tabla 1. De acuerdo con la composición del material, se calculó el número equivalente de resistencia al picado (PREN) con la ecuación 1.

Tabla 1.

Composición química del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517

%Fe	%C	%Cr	%Ni	%Cu	%Mo	%Mn	%Si	%N
59,975	0,028	25,580	6,760	2,970	2,760	1,070	0,640	0,190

3.2 Caracterización electroquímica

Las muestras empleadas se cortaron transversalmente con un área superficial de 2 cm², adicionalmente, fueron unidas con un hilo conductor de cobre y montadas en resina epóxica. Se realizó una preparación superficial de las probetas, la cual consistió en un desbaste con papel de grano de carburo de silicio desde número 80 hasta el número 800. Luego, se limpió la superficie con agua desionizada y alcohol isopropílico.

En los ensayos electroquímicos se realizó un montaje de una celda convencional compuesta por un electrodo de trabajo de acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517, un electrodo de referencia de Calomel Saturado (ECS) y un contra electrodo de platino (Pt). Los electrodos se sumergieron en dos soluciones: una solución de agua de mar sintética y una solución de 3.5% p/p de NaCl en un volumen de 500 ml. La composición del agua de mar sintética se presenta en el apéndice B. Se hicieron ensayos para temperaturas de 25°C, 50°C y 70°C. Además, cada una de las pruebas se realizó tres veces para verificar la reproducibilidad de los resultados.

Para la determinación de los potenciales críticos de corrosión, se empleó la técnica de Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP, por sus siglas en inglés), siguiendo los parámetros otorgados por la norma ASTM G61-86 (ASTM, 2018). Se realizaron pruebas tanto en condición aireada como deaireada. La solución utilizada se purgó durante 1 hora con nitrógeno gaseoso analítico y continuo, en el caso de las pruebas en condición deaireada, hasta dar por finalizada la prueba. Con el fin de observar la corrosión localizada por picado en las muestras se utilizó el Microscopio Óptico Confocal Hirox KH7700. Se evaluó la afectación generada en el material según ASTM G46-21 (ASTM, 2021). También con ayuda del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés) se tomaron imágenes con el fin de identificar mejor la morfología de los pozos de picado. Se realizó análisis químico con un detector EDAX APOLO X

resolución de 126.1 eV < (en. Mn K α) para análisis EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy) junto con el Software EDX Genesis dando información semi-cuantitativa de los elementos químicos.

Por otro lado, con el propósito de conocer las velocidades de corrosión se empleó el método de extrapolación de Tafel para la determinación de la corriente de corrosión y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), según ASTM G59 -97 y ASTM G106-89, respectivamente (ASTM, 2020) (ASTM, 2016). En el caso de Extrapolación de Tafel se empleó una velocidad de barrido de 0,167 mV/s, con un potencial inicial y final de -300 mV y +300 mV sobre el potencial de corrosión, respectivamente. Mientras que para EIS se realizó un barrido de frecuencias entre 100000 Hz y 0,01 Hz, utilizando una señal sinusoidal de potencial con una amplitud de 10 mV. Se utilizó el software Zview para simular el circuito equivalente y obtener el valor de cada uno de sus componentes. Por otro lado, el software Ec-Lab[®] se empleó para obtener las pendientes de Tafel.

Es necesario destacar que se realizó la medición del potencial de circuito abierto durante una hora antes de iniciar cada una de las pruebas electroquímicas.

4. Resultados y Análisis

En el presente proyecto de investigación se alcanzaron los siguientes resultados.

4.1 Caracterización metalográfica

El acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 fue fabricado mediante fundición, por lo cual en el proceso de solidificación resulta una estructura dendrítica. Este tipo de materiales se caracteriza por tener una matriz bifásica compuesta de austenita y ferrita. Gracias al contenido de elementos estabilizadores de la austenita como el níquel, manganeso y nitrógeno, y elementos

estabilizadores de la ferrita tales como el cromo y molibdeno, se genera un equilibrio de fases en cantidades aproximadamente iguales (Falkland et al, 2018). En la figura 2, se observan las características mencionadas anteriormente, logrando destacar que la fase austenita se representa en las regiones claras y la fase ferrita en las zonas oscuras.

Por otro lado, en la tabla 2 se enuncian los resultados obtenidos de la medición de espaciamento austenítico y fracción volumétrica. Se realizó el análisis estadístico correspondiente generando un porcentaje de exactitud relativa (%RA, por sus siglas en inglés) menor a 10% en ambos casos. De acuerdo con los valores obtenidos de fracción volumétrica donde se tiene un contenido aproximadamente igual entre las fases presentes, el material en estudio tiene buenas propiedades mecánicas y mayor resistencia a la corrosión respecto a los aceros austeníticos (Álvarez y Degallaix, 2013).

Figura 2.

Microestructura del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517

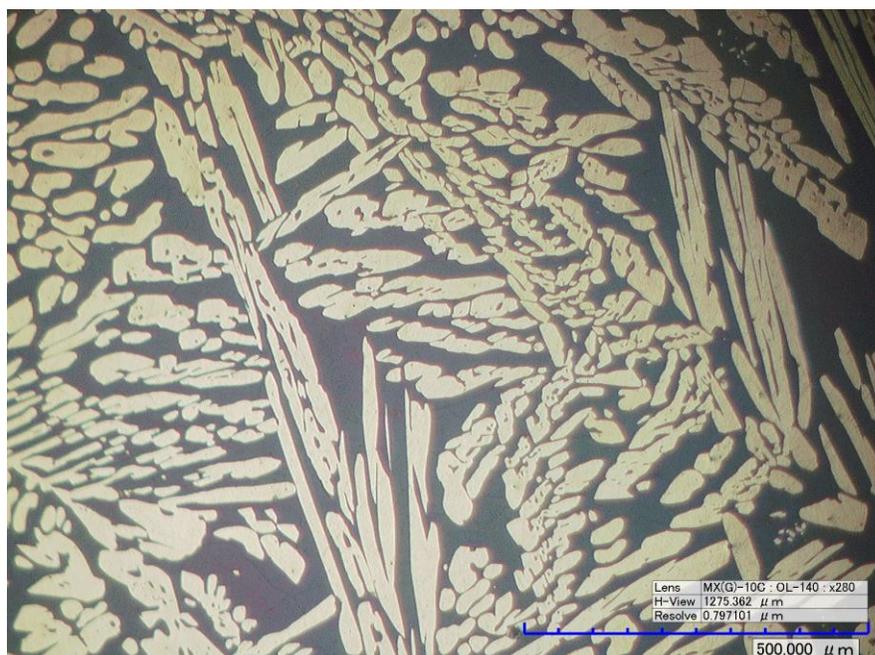


Tabla 2.

Espaciamiento austenítico y fracción volumétrica de ferrita y austenita del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517

	Valor promedio	Desviación estándar	%RA
Espaciamiento austenítico	28,68 μm	2,12	9,17
Fracción Volumétrica de Ferrita	53,38%	2,00	4,57
Fracción Volumétrica de Austenita	46,62%	2,00	5,45

Con la ecuación 1 y la tabla 1 se calculó el PREN del material de estudio, obteniéndose un valor de 37,728. De acuerdo con la literatura, es posible comprobar que el acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 cumple con los requerimientos en cuanto a composición química y valor de PREN, debido a que los aceros inoxidables dúplex se destacan por su alto contenido de cromo (23 – 30%) y níquel (2,5 – 7%), y un valor de PREN entre 26 y 38 (Gunn, 1997) (Panagopoulos et al., 2020). El contenido de elementos como el cromo, molibdeno, nitrógeno y cobre proporcionan un aumento en la resistencia a la corrosión (Falkland et al, 2011). En comparación con los aceros inoxidables austeníticos como el 304/ 304L y 316/ 316L con valores de PREN 18 y 24, respectivamente, los aceros inoxidables dúplex presentan mayor resistencia a la corrosión por picado (Bennet et al., 2016).

4.2 Caracterización electroquímica

4.2.1 Polarización potenciodinámica cíclica

En la figura 3, se presentan las curvas obtenidas de los ensayos de polarización potenciodinámica cíclica para del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517, en solución de NaCl

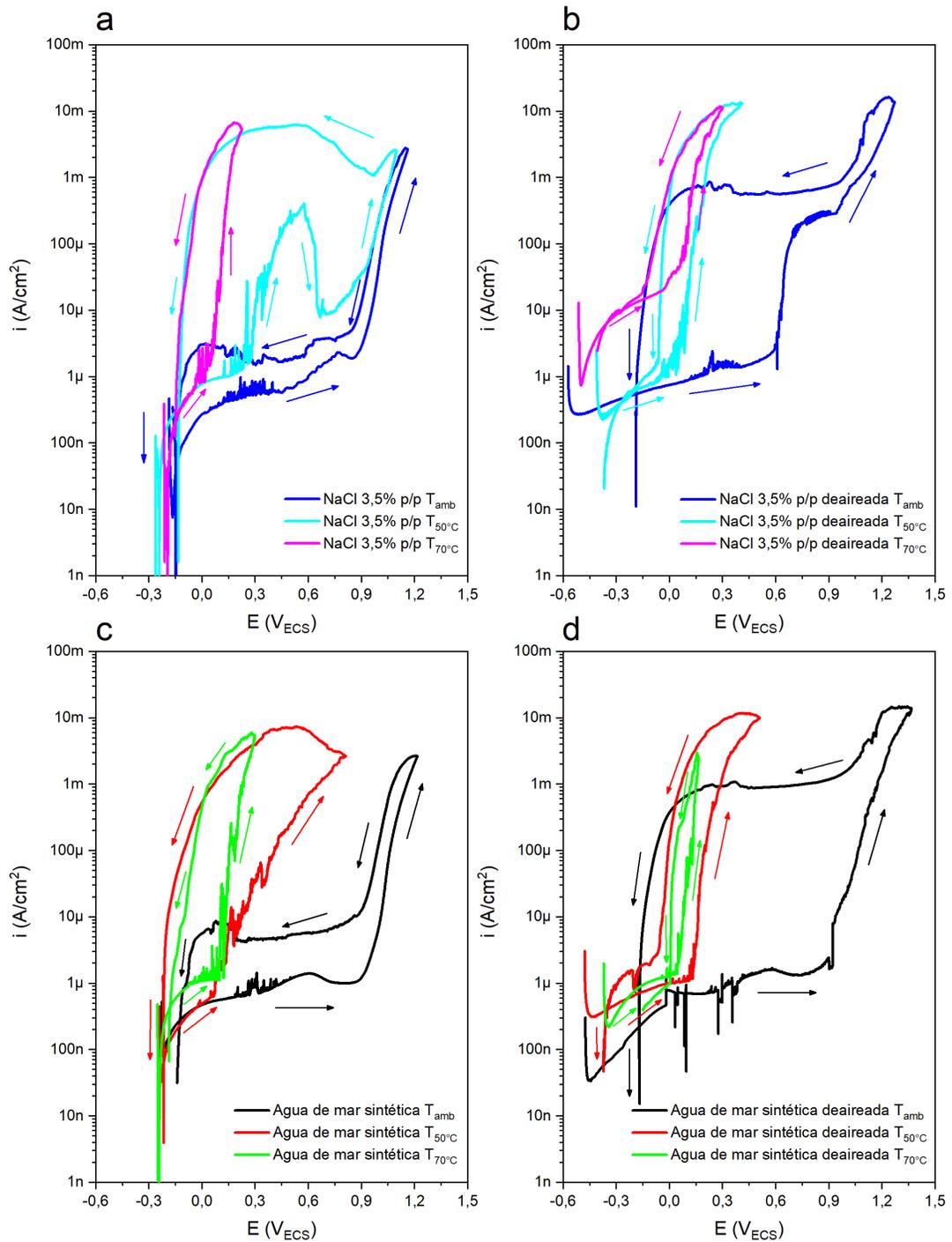
3,5% p/p y agua de mar sintética a temperatura ambiente, 50°C y 70°C. Inicialmente, se observa que en condición aireada tanto para cloruro como para agua de mar (Ver figuras 3a y 3c) se tiene un potencial de corrosión (E_{corr}) aproximadamente de $-0,22 \pm 0,02$ V. Mientras que en condición de aireada el potencial de corrosión disminuye a $-0,4 \pm 0,05$ V (Ver figura 3b y 3d). Las diferencias en E_{corr} para las gráficas bajo condición de aireada se dieron principalmente porque las soluciones se purgaron con gas nitrógeno, removiendo el oxígeno presente en ellas.

En todas las curvas, luego de superar el E_{corr} se inicia la rama anódica. De tal modo que se da un barrido de ida en términos de potencial llegando hasta el potencial de picado (E_{pit}), donde la densidad de corriente presenta un crecimiento marcado hasta llegar a 5 mA/cm^2 . Luego, se cambia la dirección de barrido de potencial hasta cruzar la curva de polarización del barrido de ida, este punto es conocido como potencial de repasivación (E_{rp}) e indica que la aleación estará protegida ante cualquier ataque a potenciales menores a este. En cada una de las figuras se observa una tendencia en la cual, al generarse un aumento en la temperatura el potencial de picado disminuye. Igualmente, se genera un cambio en la histéresis bajo cada condición estudiada. Sin embargo, en todas las curvas la histéresis es positiva, la cual se presenta por la susceptibilidad al ataque por corrosión localizada. La densidad de corriente en el barrido inverso es mayor respecto a la densidad de corriente en el barrido directo en un mismo valor de potencial lo que es indicativo de la presencia de corrosión localizada (Esmailzadeh et al., 2018).

Por otro lado, se exhibe la influencia que tiene la presencia de oxígeno en el comportamiento del material en la solución. En el caso de la solución aireada, el oxígeno enriquece la capa pasiva lo que hace que se dé una protección en el material tanto termodinámicamente como cinéticamente (McCafferty, 2009).

Figura 3.

Curvas de polarización potenciodinámica cíclica: a) NaCl 3,5%p/p aireada, b) NaCl 3,5%p/p deaireada, c) Agua de mar sintética aireada, d) Agua de mar sintética deaireada



Ahora bien, características como el potencial de picado y el potencial de repasivación para cada una de las curvas se presentan en la tabla 3. Como todas las pruebas se realizaron a una velocidad de barrido fija, es posible comparar la susceptibilidad de la aleación bajo cada condición estudiada (Revie, 2011). De acuerdo con los resultados, se estima que a temperatura ambiente los potenciales de picado tienen mayores valores respecto a las otras temperaturas analizadas. Igualmente, en el caso del potencial de repasivación se obtuvo que a temperatura ambiente los potenciales tienden a ser más positivos, seguido a esto a temperatura de 50°C y por último a 70 °C. Sin embargo, bajo la condición de agua de mar sintética deaireada el potencial de protección a 70°C presenta el mayor valor, luego a temperatura ambiente y 50°C.

A temperatura ambiente se presenta picado metaestable, el cual se exhibe como oscilaciones en la curva del barrido de ida antes del E_{pit} , también es posible notar una diferencia amplia entre E_{pit} y E_{rp} reflejando una región de pasividad mayor respecto a temperaturas de 50°C y 70°C. Sin embargo, bajo condición de aireada se exhibe un área más grande del bucle de histéresis, por lo cual se tiene una menor resistencia a la corrosión localizada por picado respecto a la solución aireada (Esmailzadeh et al.,2018). Ahora bien, para la solución de agua de mar sintética aireada y deaireada se alcanzaron mayores valores de E_{pit} respecto a la solución de cloruro aireada y deaireada, respectivamente. Por otro lado, el E_{rp} para las soluciones de agua de mar y NaCl 3,5 %p/p aireada tienen valores más positivos respecto a ambas soluciones deaireadas, demostrando que la presencia de oxígeno en la solución genera un enriquecimiento de la capa pasiva (Jones, 1996).

El caso más crítico se da a 70°C donde se tienen, en general, menores valores de E_{pit} , debido a que por encima de este potencial se inician y desarrollan nuevas picaduras haciendo la aleación más susceptible. Adicionalmente, a pesar de que, el bucle de histéresis no tiene un área

grande el potencial de protección es menor, lo cual hace que sea más probable que se propague la corrosión localizada (Esmailzadeh et al.,2018). Aun cuando a 70°C se tienen menores valores de los potenciales críticos de la aleación, a 50°C se observa notoriamente la disminución de estos potenciales en contraste con la temperatura ambiente. De lo anterior, es posible inferir el efecto que manifiesta la temperatura en los potenciales críticos de la aleación. Concluyendo, que al aumentar la temperatura tanto E_{pit} como E_{rp} tienden a valores más negativos generando que la aleación sea más susceptible a la corrosión localizada.

Tabla 3.

Potenciales críticos del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en diferentes condiciones

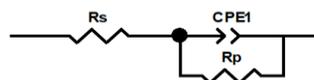
Solución	Condición	Temperatura [°C]	E_{pit} [mV]	E_{rp} [mV]
		Tamb	878	-111
Agua de mar sintética	Aireada	50	97	-201
		70	79	-184
	Deaireada	Tamb	900	-160
		50	126	-345
		70	55	-6
		Tamb	856	-130
NaCl 3,5% p/p	Aireada	50	256	-134
		70	-11	-140
		Tamb	605	-175
	Deaireada	50	52	-234
		70	-20	-284

4.2.2 Espectroscopía de impedancia electroquímica

Las mediciones realizadas por la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica se representan en los diagramas de Nyquist y Bode como se muestran en las figuras 5 y 6, respectivamente. El comportamiento de las curvas tanto en agua de mar sintética como en NaCl 3,5 % p/p presenta un comportamiento de tipo capacitivo mostrando solo una constante de tiempo, producto de la doble capa eléctrica. Los datos se ajustaron correctamente con un circuito equivalente tipo Randles. Dicho circuito está compuesto por la resistencia de la solución (R_s), un elemento de fase constante (CPE1) y la resistencia de polarización (R_p), como se muestra en la figura 4. En el Apéndice C, se exponen algunas de las simulaciones realizadas con sus respectivos valores. Los valores de resistencia a la solución dependen de diversos factores como la concentración iónica, la temperatura e incluso la geometría del área por la cual se transporta la corriente (Basics of EIS, n.d.). Por lo tanto, se observa un cambio de este valor bajo cada condición estudiada. A temperatura ambiente, para cada solución se tiene un mayor valor respecto a 50°C y 70°C, donde el valor de la resistencia para estas dos últimas temperaturas no varía notablemente. También se presentan los valores n del parámetro adimensional del elemento de fase constante, los cuales indican un comportamiento capacitivo como ya se había mencionado anteriormente, debido a que se acercan a 1. Cabe resaltar que los valores de χ^2 se encuentran del orden de 10^{-3} , demostrando un correcto ajuste de los datos recopilados ya que este valor es el cuadrado de la desviación estándar entre los datos originales y los datos ajustados.

Figura 4.

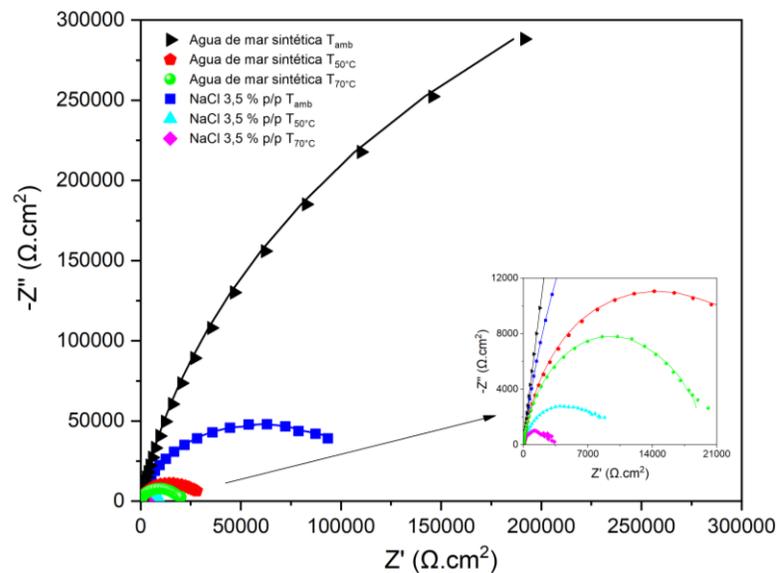
Circuito equivalente tipo Randles



El diagrama de Nyquist presenta los valores de impedancia real e imaginaria para cada valor de frecuencia, adicionalmente, el diámetro del semicírculo indica el valor de la resistencia a la polarización (R_p). El comportamiento bajo las diferentes temperaturas y soluciones estudiadas es característico de sistemas en los cuales solo existe una constante de tiempo. Adicionalmente, a partir del diagrama es posible conocer el valor de la resistencia a la solución (R_s) con la intersección de alta frecuencia con el eje real, como puede verse en la figura 5.

Figura 5.

Diagrama de Nyquist del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en agua de mar sintética y NaCl 3,5 % p/p a temperatura ambiente, 50°C y 70°C, bajo condiciones aireadas.



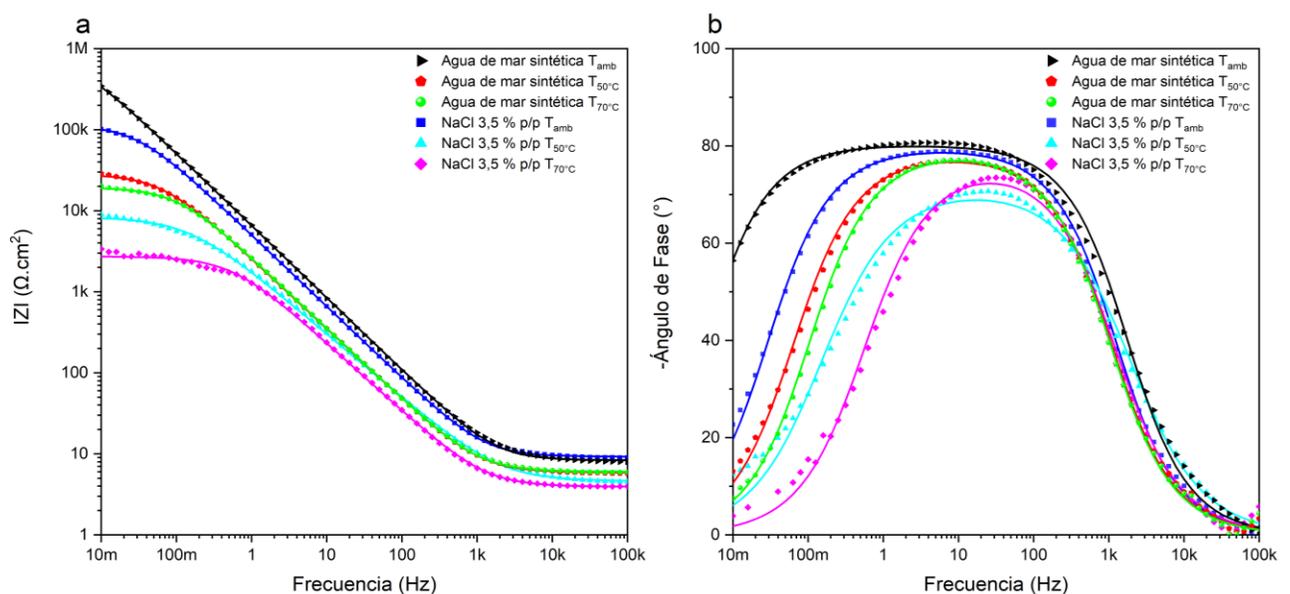
Por otro lado, los diagramas de bode están en función de la frecuencia. En la figura 6 (a), se representa el módulo de la impedancia donde es posible inferir el cambio que se da para cada valor de frecuencia. Se observa que a frecuencias bajas el mayor valor de módulo de impedancia es de $345,990 \text{ K}\Omega.\text{cm}^2$ el cual pertenece a la solución de agua de mar sintética a temperatura ambiente y el menor valor corresponde a la solución de NaCl 3,5 % p/p a 70°C siendo igual a

3,368 $K\Omega.cm^2$. Así mismo, para altas frecuencias se conserva la tendencia de obtener un mayor valor para agua de mar sintética a temperatura ambiente y menor para NaCl 3,5 % p/p a $70^\circ C$. Teniendo en cuenta la figura 6 (b), donde el ángulo de fase varía de acuerdo con la frecuencia se concluye que bajo todas las condiciones estudiadas se tiene un comportamiento más capacitivo que resistivo, ya que el valor del pico tiende a un valor de -90° . Igualmente, al aumentar la temperatura disminuye el ángulo de fase, siendo más susceptible al proceso de corrosión.

En general, se observa que a medida que aumenta la temperatura en cada una de las soluciones, el valor de la impedancia disminuye siendo esto un indicativo de que el ambiente es más agresivo para el material. Ahora bien, comparando las soluciones empleadas se nota que la solución de agua de mar sintética es menos agresiva respecto a la solución de NaCl 3,5 % p/p para cada una de las temperaturas evaluadas.

Figura 6.

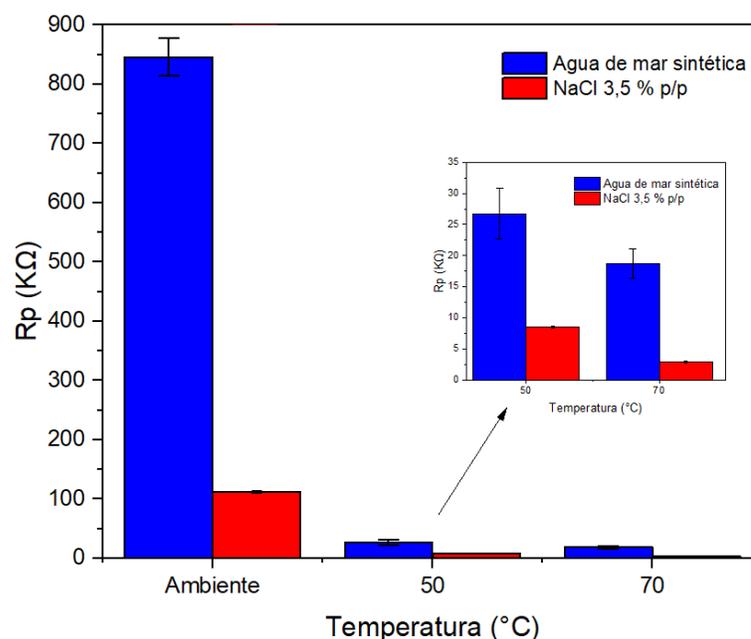
Diagramas de Bode del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en agua de mar sintética y NaCl 3,5 % p/p a temperatura ambiente, $50^\circ C$ y $70^\circ C$, bajo condiciones aireadas.



Ahora bien, en la figura 7 se expone la resistencia a la polarización promedio para cada condición estudiada, con su respectiva desviación estándar. El valor de R_p es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión. Es decir, entre mayor sea este valor el material tendrá menor susceptibilidad a la corrosión (Cottis y Turgoose, 1999). Es posible notar que tanto para NaCl 3,5 % p/p como para agua de mar sintética, a medida que se aumenta la temperatura, R_p disminuye. Sin embargo, bajo condición de agua de mar sintética se observa una mayor diferencia en este fenómeno, con respecto a la solución de NaCl 3,5 % p/p para la cual el cambio no se da tan abrupto. En el caso del agua de mar sintética a temperatura ambiente se presenta mayor R_p que en solución de NaCl 3,5 % p/p, de igual modo se manifiesta para 50°C y para 70°C. Por lo tanto, el material se corroe menos en agua de mar sintética a temperatura ambiente y el caso más crítico se da para NaCl 3,5 % p/p a una temperatura de 70°C.

Figura 7.

Resistencia a la polarización del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en agua de mar sintética y NaCl 3,5% p/p a temperatura ambiente, 50°C y 70°C.



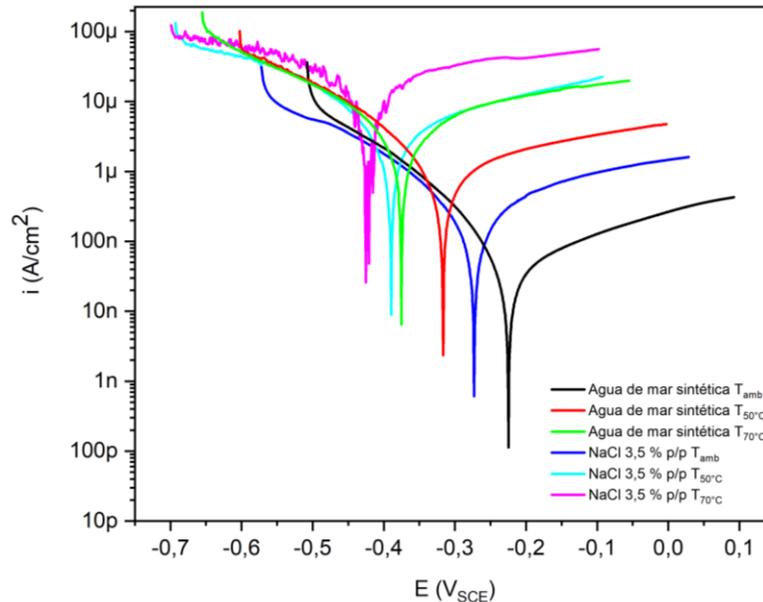
4.2.3 Método de Extrapolación de Tafel

Las curvas potenciodinámicas resultantes del método de extrapolación de Tafel para el material en estudio se muestran en la figura 8. En la tabla 4 se encuentran los parámetros electroquímicos determinados. Inicialmente, se analizó el comportamiento de manera termodinámica, de tal modo que entre más negativo sea el potencial de corrosión (E_{corr}) se tendrá mayor probabilidad de corroerse el material. Pues bien, es posible afirmar que a medida que se aumenta la temperatura las curvas son desplazadas hacia una zona más activa, es decir, hacia potenciales más negativos (izquierda); como también se observa que en solución de agua de mar sintética el material es menos susceptible a la corrosión respecto a la solución de NaCl 3,5 % p/p para cada una de las temperaturas estudiadas. Igualmente, analizando el comportamiento cinético de las curvas obtenidas se observa que los valores de la densidad de corriente de corriente (i_{corr}) son directamente proporcionales a la velocidad de corrosión, es posible definir que la cinética del proceso de corrosión es más lenta en cada una de las temperaturas para la solución de agua de mar sintética respecto a NaCl 3,5 % p/p. Asimismo, en ambos medios se observa un crecimiento en el valor de i_{corr} a medida que aumenta la temperatura. Por lo tanto, el medio menos agresivo en el que, desde el punto de vista termodinámico como cinético, el material es menos susceptible a la corrosión se da a temperatura ambiente en agua de mar sintética. Mientras que la condición más desfavorable para el material se da a 70°C en la solución de NaCl 3,5 % p/p.

Las pendientes de Tafel se trazaron en la región lineal alejada del potencial de circuito abierto. En vista de que, si se realiza la medición cerca al potencial de equilibrio, la corriente catódica se verá afectada por la corriente anódica y viceversa, contribuyendo a la corriente total (McCafferty, 2019).

Figura 8.

Curvas del método de extrapolación de Tafel del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en agua de mar sintética y NaCl 3,5 % p/p a temperatura ambiente, 50°C y 70°C



4.2.4. Velocidad de corrosión

Para determinar la densidad de corriente de corrosión de cada una de las pruebas se emplearon las pendientes de Tafel (β_a , β_c) y los valores de R_p obtenidos por EIS (ecuación 2). Por medio de la ecuación 3 se calculó la velocidad de corrosión (V_{corr}). Donde PE es el peso equivalente del material 27,94 g/eq, k es la constante farádica con un valor de $3,27 \cdot 10^{-3}$ mm g/ μ A cm año y ρ es la densidad del material 7,87 g/cm³.

$$i_{corr} = \frac{\beta_a * \beta_c}{2,303 (\beta_a + \beta_c)} * \frac{1}{R_p} \quad (2)$$

$$V_{corr} = \frac{k * i_{corr} * PE}{\rho} \quad (3)$$

En la tabla 4 se encuentran los valores obtenidos de las ecuaciones anteriores. Es factible concluir que el material cuando se expone a temperatura ambiente en agua de mar sintética presenta una velocidad de corrosión menor respecto a las demás condiciones estudiadas, con un valor de 0,432 $\mu\text{m/año}$. De tal modo que, al aumentar la temperatura el cambio de los valores de la tasa de corrosión aumenta en la solución de agua de mar y NaCl 3,5 % p/p. Sin embargo, bajo condiciones de NaCl 3,5 % p/p la variación es más notable respecto a agua de mar. Por otra parte, en NaCl 3,5 % p/p a una temperatura de 70°C el material tiende a corroerse a una tasa de 321,590 $\mu\text{m/año}$, siendo ésta la condición más crítica para el material.

De acuerdo con los resultados presentados anteriormente tanto en la técnica CPP, cómo en extrapolación de Tafel y EIS, el material es más susceptible a la corrosión al aumentar la temperatura. Además, el agua de mar sintética es un medio menos agresivo para el material respecto a la solución de NaCl 3,5% p/p. Posiblemente, la presencia de los otros compuestos en el agua de mar sintética puede servir como inhibidores, protegiendo de la corrosión al material.

Tabla 4.

Parámetros obtenidos por el método de extrapolación de Tafel y EIS del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en agua de mar sintética y NaCl 3,5 % p/p a temperatura ambiente, 50°C y 70°C.

Solución	Temperatura (°C)	E_{corr} (mV)	β_a (mV/dec)	B_c (mV/dec)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	V_{corr} ($\mu\text{m}/\text{año}$)
Agua de mar sintética	Ambiente	-223,248	288,4	97,0	0,037	0,432
	50	-316,645	401,1	136,9	1,649	19,255
	70	-376,2	345,2	197,8	2,922	33,927

Solución	Temperatura (°C)	E_{corr} (mV)	β_a (mV/dec)	B_c (mV/dec)	i_{corr} (μA/cm²)	V_{corr} (μm/año)
NaCl 3,5 % p/p	Ambiente	-273,715	303,8	155,2	0,396	4,600
	50	-388,317	336,6	167,9	5,676	65,896
	70	-422,951	454,2	303,9	27,702	321,590

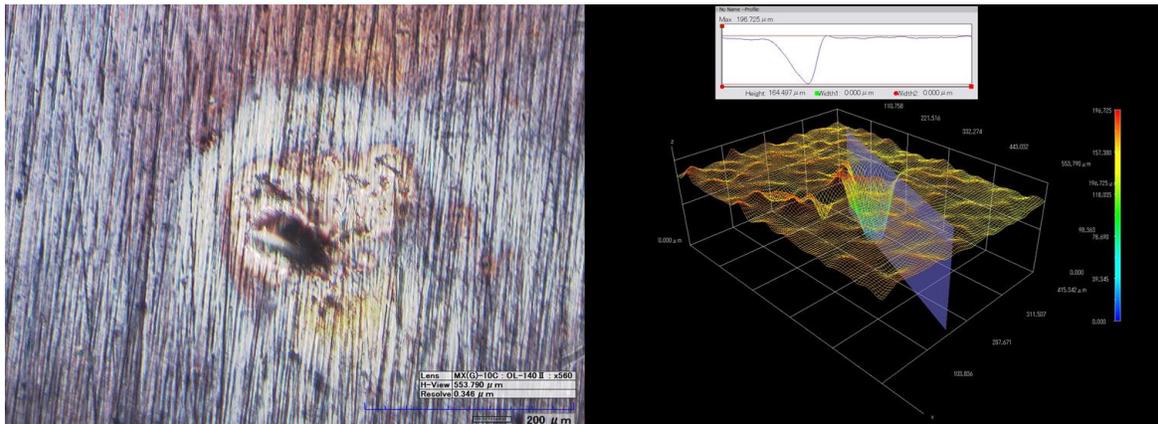
4.3 Análisis morfológico del picado

El acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 se evaluó en el microscopio confocal luego de realizar las pruebas CPP en agua de mar sintética y NaCl 3,5% p/p a temperatura ambiente, 50°C y 70°C, en condición aireada y deaireada. En algunos casos hubo presencia de pozos de picado para los cuales se midió la profundidad, debido a que este es un parámetro importante para evaluar la criticidad del pozo (Hoepfner, n.d) En la figura 9 se muestra uno de los pozos medidos en el material cuando fue expuesto a agua de mar sintética a 70°C aireada. El pozo tuvo una profundidad de 164,497 μm.

En el apéndice D se encuentran capturas tomadas en la superficie del material bajo cada condición estudiada. Cuando se realiza la evaluación a temperatura ambiente del material tanto en agua de mar sintética como en NaCl 3,5% p/p aireada, no se evidencia la presencia de picaduras. Sin embargo, a condición deaireada se desarrollan picaduras en la superficie del material. Adicionalmente, a temperaturas de 50°C y 70°C el material se ve afectado y se evidencian pozos de picado. En la tabla 6, se expone la profundidad máxima de los pozos de picado en la superficie del material, encontrados para cada una de las pruebas ejecutadas.

Figura 9.

Reconstrucción digital 3D de un pozo de picado del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 expuesto a la técnica CPP en agua de mar sintética a 70°C aireada.

**Tabla 5.**

Profundidad máxima de los pozos de picado analizados del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 al ser expuesto a la técnica CPP bajo diferentes condiciones.

Solución	Condición	Temperatura (°C)	Profundidad (μm)
Agua de mar sintética	Aireada	Ambiente	-
		50	108,473
		70	164,497
	Deaireada	Ambiente	28,727
		50	35,797
		70	27,100
NaCl 3,5% p/p	Aireada	Ambiente	-
		50	36,466
		70	105,660

Solución	Condición	Temperatura (°C)	Profundidad (µm)
		Ambiente	19,164
	Deaireada	50	104,343
		70	42,233

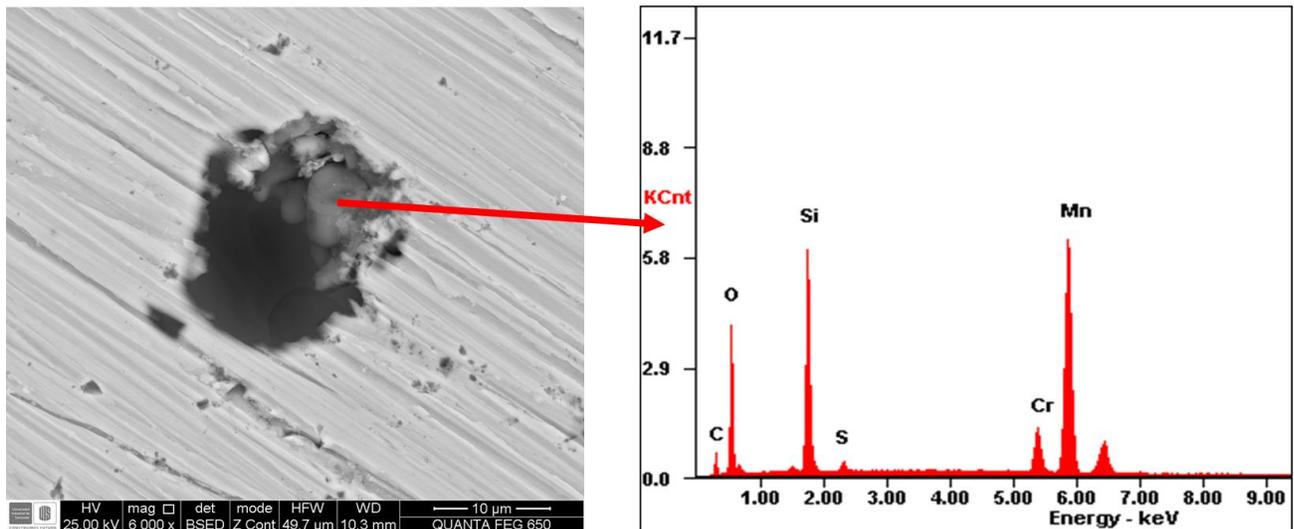
Asimismo, la morfología de los pozos no es definida y tiende a disminuir su diámetro a medida que aumenta la profundidad. Alrededor de algunos pozos se observa diferentes tonalidades, las cuales pueden ser producto de la densidad de corriente aplicada (Chavez et al., 2019). Al someter el material a temperatura de 50°C y 70°C se incrustan productos de corrosión en la superficie del material. Los productos de corrosión evitan que el pozo siga creciendo, debido a que actúan como una barrera cubriendo el centro del hoyo (Wang et al., 2016). Por otra parte, una razón por la que se da el inicio y el crecimiento del picado es la condición superficial del material. Al tratarse de un material fundido dentro de su estructura existe la posibilidad de tener microdefectos e inclusiones, lo cual contribuye a la formación de picaduras (Wang et al., 2016).

En la figura 10, se evidencia la presencia de una inclusión en la superficie del material y el crecimiento de un pozo de picado alrededor de ella. Según la literatura, las inclusiones pueden llegar a ser sitios para que se inicie la nucleación de corrosión localizada por picado. Algunas de las razones por las cuales se da esta nucleación tienen que ver con la interfaz inclusión/matriz, donde existe una diferencia tanto en el coeficiente de expansión térmica como en la reactividad química de la inclusión respecto a la matriz (Schmuki et al, 2005). Adicionalmente, la disolución del material ocurre en un principio en el borde de la inclusión (Williams et al, 2010). En los aceros inoxidable, la presencia de inclusiones no metálicas principalmente las de sulfuro de

manganeso son consideradas sitios potenciales de generación de pozos de picado. Esto se debe a que la inclusión actúa como ánodo o cátodo en la aleación y hace que se formen fisuras en la interfaz, rompiendo la capa pasiva del material (Kashfipour, 2015). Asimismo, se da una disminución en la cantidad de cromo alrededor de las inclusiones, haciendo que el material sea más vulnerable a la corrosión por picado. Por lo tanto, en los aceros inoxidable tanto la composición, densidad y tamaño de inclusiones pueden llegar a ser determinantes para que se produzca la corrosión por picado (Williams et al, 2010).

Figura 10.

Inclusión presente en el acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 en NaCl 3,5% p/p a 70°C



5. Conclusiones

De acuerdo con la caracterización metalográfica, el acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 presenta una estructura dendrítica la cual es esperada por ser un material fundido. Fue

posible determinar la fracción volumétrica ocupada por cada una de las fases, donde se evidencia una relación entre las fases de ferrita y austenita de 53:47. Asimismo, el espaciamiento austenítico es de 28,68 μm . Conforme a la composición química del material se obtuvo un valor de 37,738 de PREN, comprobando que cumple con los requerimientos para ser catalogado como un acero inoxidable dúplex según la literatura.

Los potenciales críticos de la aleación fueron determinados para cada condición estudiada. Siendo posible observar el efecto que tiene la temperatura sobre dichos potenciales en la solución de agua de mar sintética y NaCl 3,5% p/p, tanto en condición aireada como deaireada. Al aumentar la temperatura el material es más susceptible a la corrosión localizada por picado, evidenciado en valores de potencial de picado y potencial de repasivación más negativos. Asimismo, al eliminar el oxígeno presente en cada condición los potenciales críticos de la aleación tienden a ser menores, generando mayor tendencia a la corrosión localizada.

Las velocidades de corrosión del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 se encuentran entre 0,432 $\mu\text{m/año}$ y 321,590 $\mu\text{m/año}$. De acuerdo con las tasas de corrosión calculadas, la solución de agua de mar sintética es un medio menos agresivo para el material respecto a NaCl 3,5% p/p. Se evidencia que al aumentar la temperatura la resistencia a la corrosión del material disminuye.

Se evaluó la morfología superficial del material luego de ser expuesto a cada una de las pruebas. Se logró identificar la presencia de pozos de picado generados por corrosión localizada en la mayoría de las condiciones estudiadas, exceptuando las pruebas realizadas a temperatura ambiente en ambas soluciones aireadas. La profundidad máxima encontrada en uno de los pozos de picado fue de 164,497 μm . Por otro lado, algunos de los pozos que se presentaron se nuclean en inclusiones y no tienen una morfología circular definida. En las pruebas de 50°C y 70°C se

encontraron algunos productos de corrosión, los cuales posiblemente actuaron como barrera en el crecimiento de los pozos.

6. Recomendaciones

Los proyectos de investigación que sean efectuados para continuar con el estudio del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 podrían abarcar la aplicación de un tratamiento térmico al material para su evaluación por técnicas electroquímicas. Con el fin de observar posibles mejoras en las propiedades del material. También es importante realizar estudios en cuanto a la capa pasiva que se forma en el material y el envejecimiento de esta, por medio de técnicas como Espectroscopía Fotoelectrónica de Rayos X (XPS, por sus siglas en inglés).

Referencias Bibliográficas

Alvarez-Armas, I. y Degallaix-Moreuil, S.. (2013). Duplex Stainless Steels. 10.1002/9781118557990.

ASTM International (2016). E407 – 07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. 1 – 22. <https://www.astm.org/e0407-07r15e01.html>

ASTM International. (2015). Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements. Astm, 03(Reapproved), 1–11. <https://doi.org/10.1520/G0106-89R15.2>

ASTM International. (2016). G106 – 89 “Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical”. <https://www.astm.org/g0106-89r99.html>

ASTM International. (2017). E3 - 11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens 1. ASTM Book of Standards, 03.01(July), 1–12. <https://doi.org/10.1520/E0003-11R17.1>

ASTM International. (2018a). G46 - 21 Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion 1. Annual Book of ASTM Standards, 94(Reapproved), 1–8. <https://doi.org/10.1520/G0046-94R18.2>

ASTM International. (2018b). G61 – 86 “Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron, Nickel or Cobalt Based Alloys.” Annual Book of ASTM Standards. <https://doi.org/10.1520/G0061-86R18.2>

ASTM International. (2020). G59 – 97 “Standard Test Method for Conducting Potenciodynamic Polarization Resistance Measurements”. <https://www.astm.org/g0059-97r20.html>

ASTM International. (2021). E112 - 13 “Standard Test Methods for Determining Average Grain Size” <https://www.astm.org/e0112-13.html>

Basics of EIS: Electrochemical Research-Impedance. (n.d.). <https://www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/>

Bennett, David C. Nixon, Robert A. (Randy). (2016). Corrosion and Materials Fundamentals for Engineers in Wastewater Treatment Plants & Collection Systems (3rd Edition) - 3.2.2.5 Precipitation Hardening (PH) Stainless Steels. NACE International. <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0113WVW1/corrosion-materials-fundamentals/precipitation-hardening>

Bundschuh, J., Kaczmarczyk, M., Ghaffour, N., & Tomaszewska, B. (2021). State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: Present and future prospects. In Desalination (Vol. 508, p. 115035). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115035>

Chavez, I. K. R., Calderón, S. L. P., & Ortiz, M. R. (2019). Uso de técnicas electroquímicas para determinar la resistencia a la corrosión localizada de un acero inoxidable súper dúplex UNS S-32760. Matéria (Rio de Janeiro), 24(1). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190001.0626>

Cicek, Volkan. (2014). Corrosion Engineering - 5.2.3 Pitting Corrosion. John Wiley & Sons. <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt01117991/corrosion-engineering/pitting-corrosion>

Cottis, R., y Turgoose, S. (1999). Electrochemical Impedance and Noise

Davis. (2000). Corrosion - Understanding the Basics - 8.3.2.2 Crevice Corrosion. ASM International.

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00C5UZZ3/corrosion-understanding/localized--crevice-corrosion>

DNP. (2019). Agua limpia y saneamiento - La Agenda 2030 en Colombia - Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.ods.gov.co/es/objetivos/agua-limpia-ysaneamiento> Gunn, R.

(1997). Developments, grades and specifications. In Duplex Stainless Steels (pp. 1–13). Elsevier.

<https://doi.org/10.1533/9781845698775.1>

Esmailzadeh, S., Aliofkhazraei, M., & Sarlak, H. (2018). Interpretation of Cyclic Potentiodynamic Polarization Test Results for Study of Corrosion Behavior of Metals: A Review 1. 54(5), 976–989. <https://doi.org/10.1134/S207020511805026X>

Falkland, Marie Louise & Glaes, M. & Liljas, M.. (2011). Duplex Stainless Steels. 10.1002/9780470872864.ch52.

Francis, Roger. (2018). Corrosion of Duplex Stainless Steels - A Practical Guide for Engineers - References. NACE International.

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0127XTXC/corrosion-duplex-stainless/references>

Gunn, R. (1997). Physical and mechanical properties. *Duplex Stainless Steels*, 56–72. <https://doi.org/10.1533/9781845698775.56>

Hoepfner, D. W. (n.d.). Chapter 5-Pitting Corrosion: Morphology and Characterization. Recuperado de www.holsip.com

Huang, W., Lafontaine, J., Cao, F., & Hornemann, J. (2012). Severe MIC Pitting Corrosion of 304L Stainless Steel Components After A Relatively Short Period of Exposure to Natural Seawater | SPE. <https://search.spe.org/i2kweb/SPE/doc/onepetro:A3BD502E>

Imitola, A., Lopez, A., & Julián, R. (2019). Diseño de una Planta Desalinizadora de Agua de Mar en la Zona de la Media-Alta Guajira. UniNorte. <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/8757/ProyectoFinal.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Jones, D. A. (1996). *Principles and Prevention of corrosión. Second Edition*. Prentice - Hall

Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., & Kang, S. mu. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. In *Science of the Total Environment* (Vol. 657, pp. 1343–1356). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>

Kashfipour, M. A. (2015). Investigation of Nonmetallic Inclusions and their Corellation to Pitting Corrosion of Austenitic Stainless Steels.

Lim, Y. J., Goh, K., Kurihara, M., & Wang, R. (2021). Seawater desalination by reverse osmosis: Current development and future challenges in membrane fabrication – A review. *Journal of Membrane Science*, 629, 119292. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2021.119292>

Mccafferty, E. (2009). *Introduction to Corrosion Science*. Springer

McIntyre, Dale. (2017). *Forms of Corrosion - Recognition and Prevention (2nd Edition)* - 2.2.1 Pitting Corrosion. NACE International <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0127X9SB/forms-corrosion-recognition/pitting-corrosion>

Minvivienda. (2018). PLAN DIRECTOR AGUA Y SANEAMIENTO BÁSICO. www.minvivienda.gov.co Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. (LC/G.2681-P/Rev.3),

Panagopoulos, A., Haralambous, K. J., & Loizidou, M. (2019). Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review. *Science of the Total Environment*, 693, 133545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.351>

Panagopoulos, A., Loizidou, M., & Haralambous, K. J. (2020). Stainless Steel in Thermal Desalination and Brine Treatment: Current Status and Prospects. *Metals and Materials International*, 26(10), 1463–1482. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00398-w> Park, K., Kim, J., Yang, D. R., & Hong, S. (2020).

Revie, R. Winston. (2011). Uhlig's Corrosion Handbook (3rd Edition) - 85.3.4 Scan Rate. John Wiley & Sons. <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008U0IV8/uhlig-s-corrosion-handbook/scan-rate>

Schmuki, P., Hildebrand, H., Friedrich, A., & Virtanen, S. (2005). The composition of the boundary region of MnS inclusions in stainless steel and its relevance in triggering pitting corrosion. *Corrosion Science* 47(5), 1239–1250. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2004.05.023>

Sulzer. (2020). Cast materials. UNESCO. (2020). Agua y cambio climático. In *Revista de Obras Publicas* (Vol. 167, Issue 3618).

Szklarska-Smialowska, Z.. (2005). Pitting and Crevice Corrosion - Title Page. *NACE International*. <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt007YBIE1/pitting-crevice-corrosion/front-matter>

Towards a low-energy seawater reverse osmosis desalination plant: A review and theoretical analysis for future directions. In *Journal of Membrane Science* (Vol. 595, p. 117607). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117607>

UNESCO. (2020). Agua y cambio climático. In *Revista de Obras Publicas* (Vol. 167, Issue 3618).

Vila. (n.d). Formas, mecanismos y prevención de la corrosión.

Wang, Y., Cheng, G., & Li, Y. (2016). Observation of the pitting corrosion and uniform corrosion for X80 steel in 3.5 wt.% NaCl solutions using in-situ and 3-D measuring microscope. *Corrosion Science*, 111, 508–517. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2016.05.037>

Williams, D. E., Kilburn, M. R., Cliff, J., & Waterhouse, G. I. N. (2010). Composition changes around sulphide inclusions in stainless steels, and implications for the initiation of pitting corrosion. *Corrosion Science*, 52(11), 3702–3716. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2010.07.021>

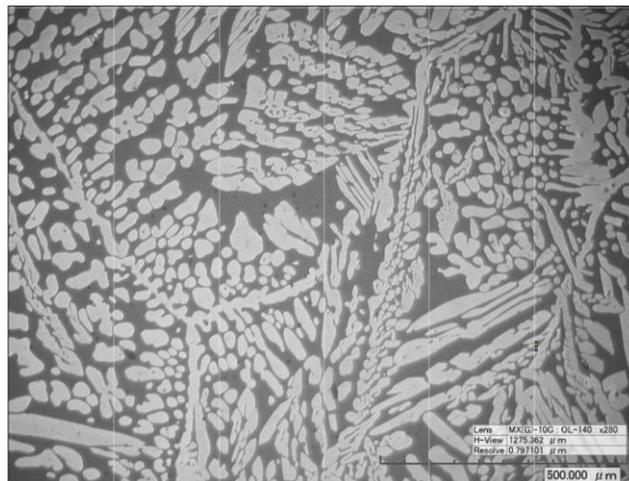
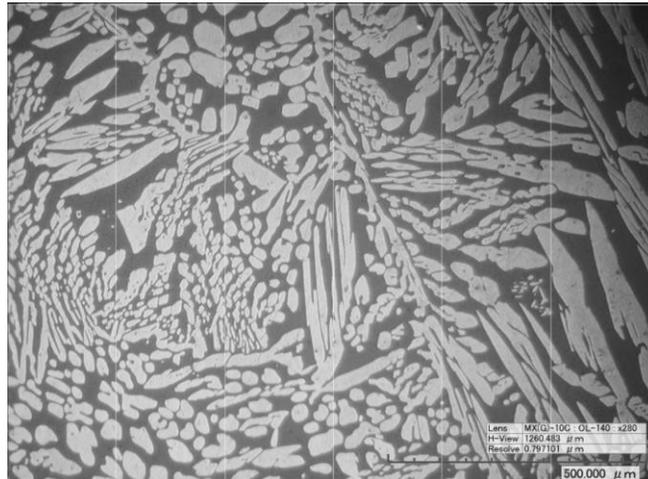
Winston, R., & Uhlig, H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering* (J. Wiley, Ed.; WILEY-INTERSCIENCE). https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=HJHMhOgrEiwC&oi=fnd&pg=PR5&dq=corrosion&ots=vvohG0yzw_&sig=w0KfXg9ZQYq5MA_1uKz1isRv3dQ#v=onepage&q=corrosion&f=false

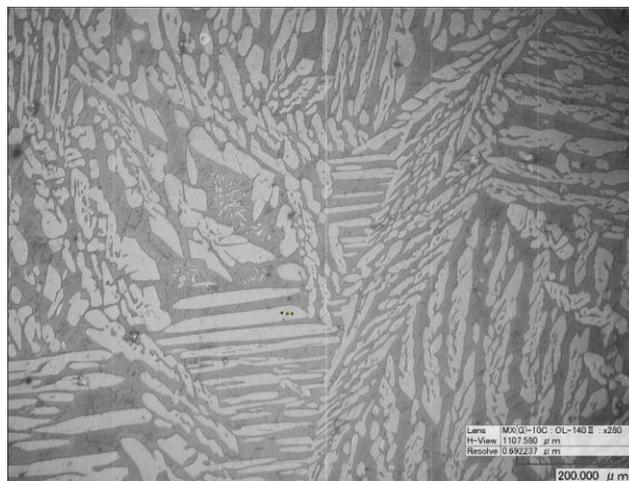
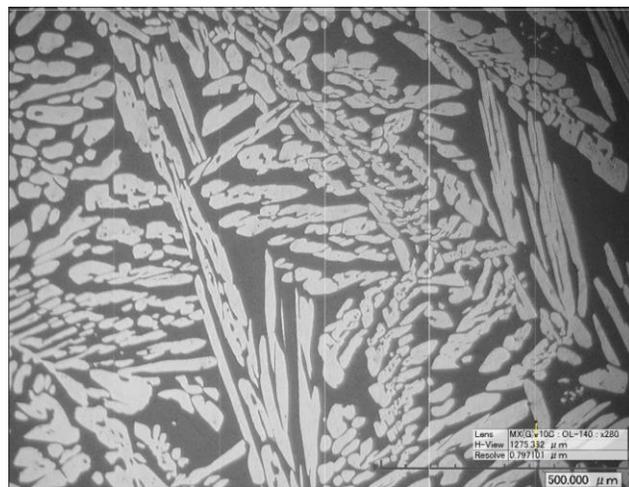
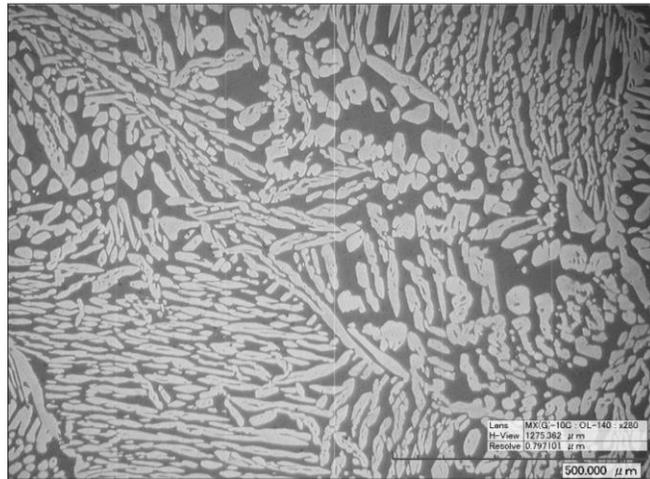
World Bank. (2020). Cambiando el rumbo: mejorando la seguridad hídrica para la recuperación y el crecimiento sostenible en Colombia. <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2020/09/02/colombia-water-security>

World Bank. (2021). Descripción general del agua. <https://www.worldbank.org/en/topic/water/overview>

Apéndices

Apéndice A. Micrografías utilizadas para la medición del espaciamiento interaustenítico y fracción volumétrica del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517





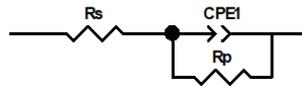
Apéndice B. Composición química de la sal de mar sintética

Composición	Mezcla Sal – Mar (%)	Sustituto de solución de agua de mar (g/l)
NaCl	58,490	24,53
MgCl₂-6H₂O	26,460	5,20
Na₂SO₄	9,750	4,09
CaCl₂	2,765	1,16
KCl	1,645	0,695
NaHCO₃	0,477	0,201
KBr	0,238	0,101
H₃BO₃	0,071	0,027
SrCl₂-6H₂O	0,095	0,025
NaF	0,007	0,003

Composición química dada por el fabricante *Lake Products Company LLC*

Apéndice C. Circuitos equivalentes de la técnica de EIS

a)



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(+)	8,366	0,057029	0,68168
CPE1-T	Free(+)	2,9614E-05	1,5206E-07	0,51347
CPE1-P	Free(+)	0,89111	0,0010403	0,11674
Rp	Free(+)	8,2923E05	31642	3,8158

Chi-Squared: 0,0035157
 Weighted Sum of Squares: 0,48517

Circuit Model File:

Mode: Run Fitting / Freq. Range (0,001 - 1000000)
 Maximum Iterations: 100
 Optimization Iterations: 0
 Type of Fitting: Complex
 Type of Weighting: Calc-Modulus

b)



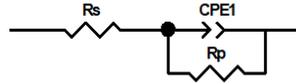
Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(+)	5,888	0,027169	0,46143
CPE1-T	Free(+)	7,8091E-05	3,9037E-07	0,49989
CPE1-P	Free(+)	0,86982	0,00099009	0,11383
Rp	Free(+)	28631	208,64	0,72872

Chi-Squared: 0,0015865
 Weighted Sum of Squares: 0,21893

Circuit Model File:

Mode: Run Fitting / Freq. Range (0,001 - 1000000)
 Maximum Iterations: 100
 Optimization Iterations: 0
 Type of Fitting: Complex
 Type of Weighting: Calc-Modulus

c)



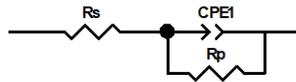
Element	Freedom	Value	Error	Error %
R_s	Free(+)	6,053	0,027636	0,45657
CPE1-T	Free(+)	7,4906E-05	4,0327E-07	0,53837
CPE1-P	Free(+)	0,87617	0,00104	0,1187
R_p	Free(+)	19531	126,2	0,64615

Chi-Squared: 0,0016277
 Weighted Sum of Squares: 0,22462

Circuit Model File:

Mode: Run Fitting / Freq. Range (0,001 - 1000000)
 Maximum Iterations: 100
 Optimization Iterations: 0
 Type of Fitting: Complex
 Type of Weighting: Calc-Modulus

d)



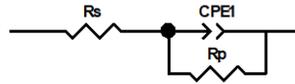
Element	Freedom	Value	Error	Error %
R_s	Free(+)	9,292	0,040412	0,43491
CPE1-T	Free(+)	3,8654E-05	1,5782E-07	0,40829
CPE1-P	Free(+)	0,88602	0,00081773	0,092292
R_p	Free(+)	1,1264E05	1406,2	1,2484

Chi-Squared: 0,0012349
 Weighted Sum of Squares: 0,15559

Circuit Model File:

Mode: Run Fitting / Freq. Range (0,001 - 1000000)
 Maximum Iterations: 100
 Optimization Iterations: 0
 Type of Fitting: Complex
 Type of Weighting: Calc-Modulus

e)



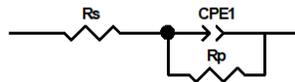
Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(+)	4,623	0,04966	1,0742
CPE1-T	Free(+)	0,00012374	1,4154E-06	1,1439
CPE1-P	Free(+)	0,79294	0,0020911	0,26371
Rp	Free(+)	8544	102,94	1,2048

Chi-Squared: 0,0044606
 Weighted Sum of Squares: 0,59771

Circuit Model File:

Mode: Run Fitting / Freq. Range (0,001 - 1000000)
 Maximum Iterations: 100
 Optimization Iterations: 0
 Type of Fitting: Complex
 Type of Weighting: Calc-Modulus

f)



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(+)	3,928	0,038562	0,98172
CPE1-T	Free(+)	0,00012366	1,979E-06	1,6004
CPE1-P	Free(+)	0,85256	0,002798	0,32819
Rp	Free(+)	2704	32,908	1,217

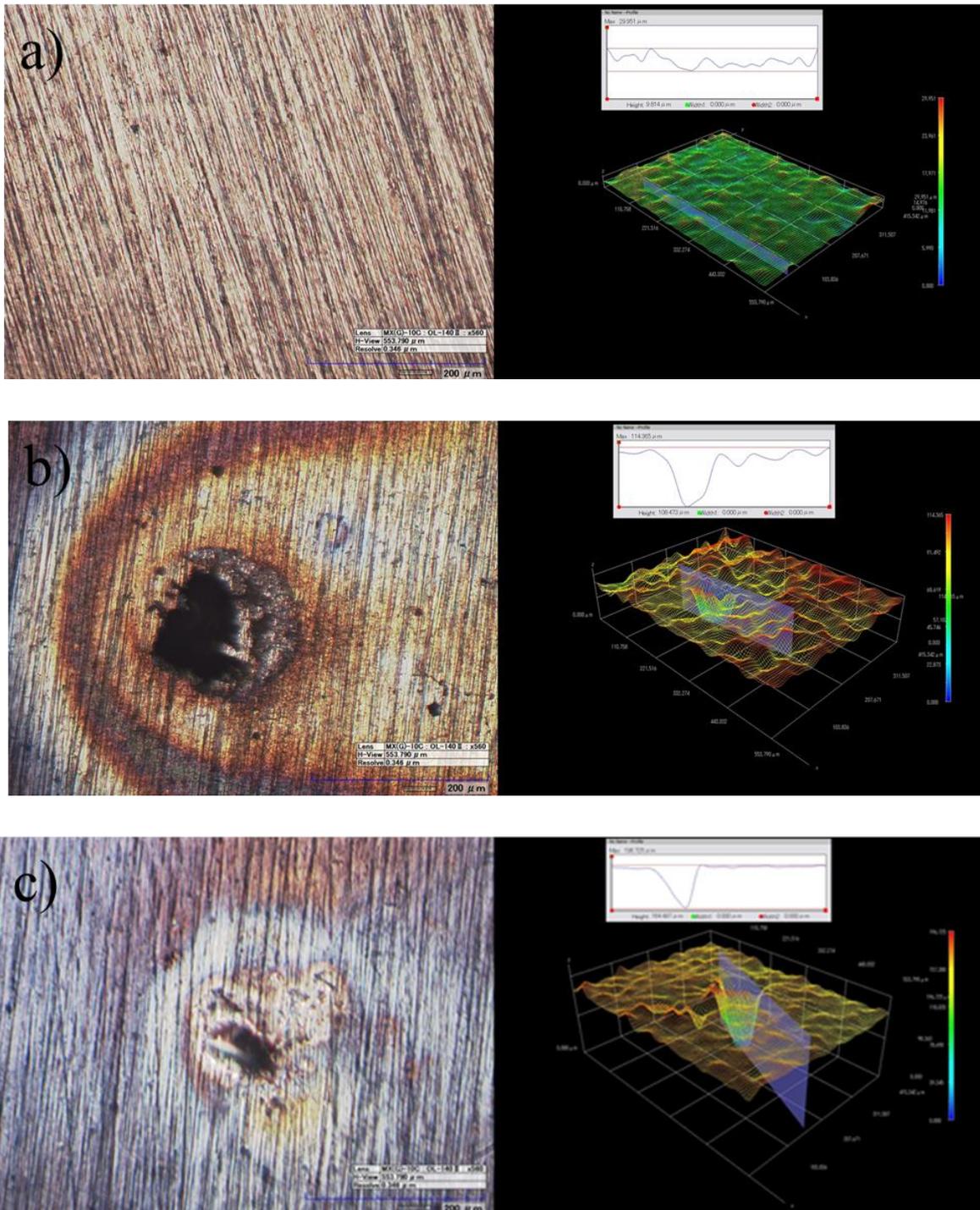
Chi-Squared: 0,0067812
 Weighted Sum of Squares: 0,86799

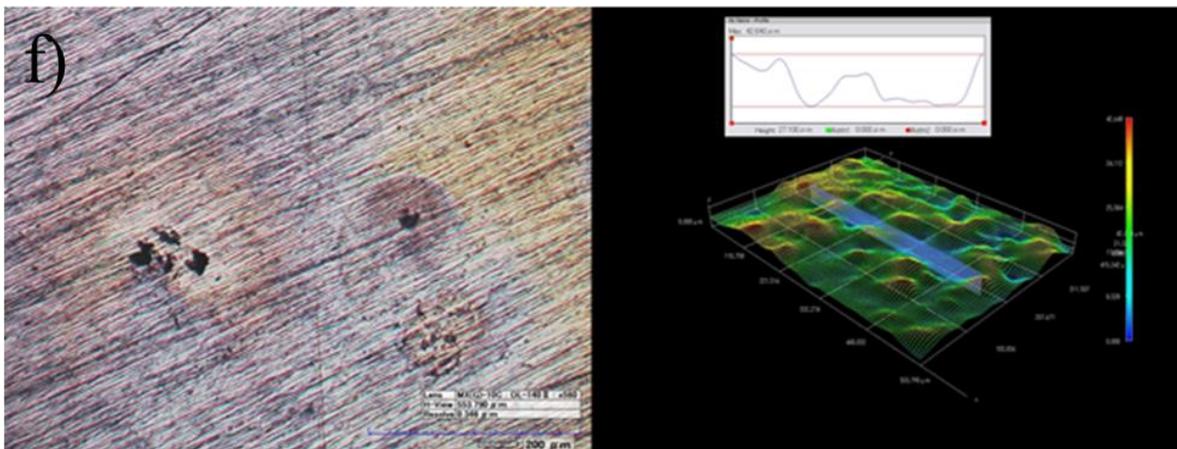
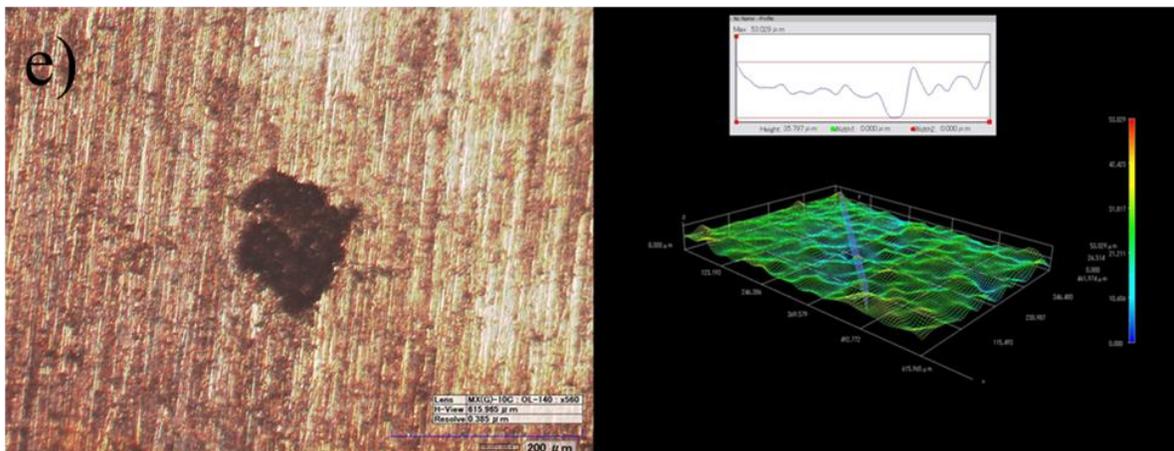
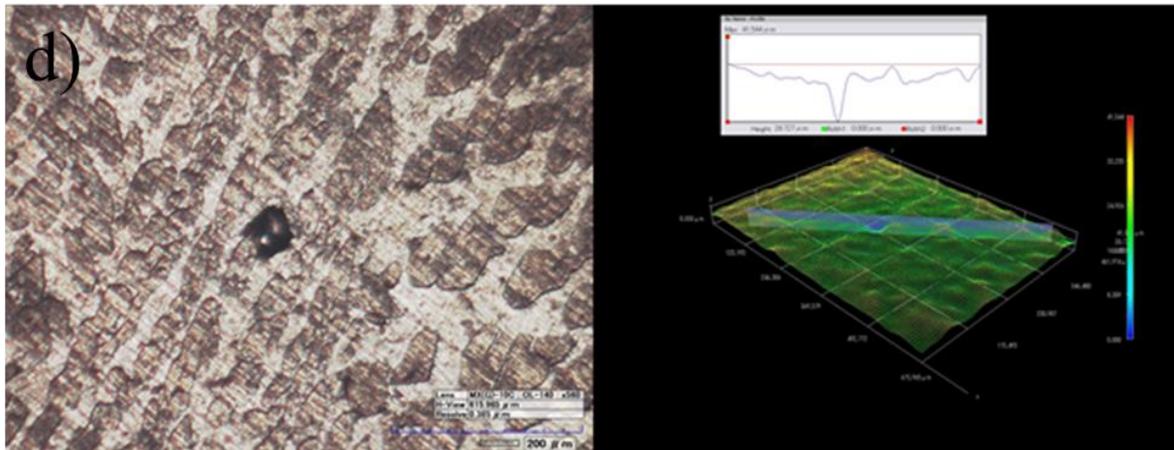
Circuit Model File:

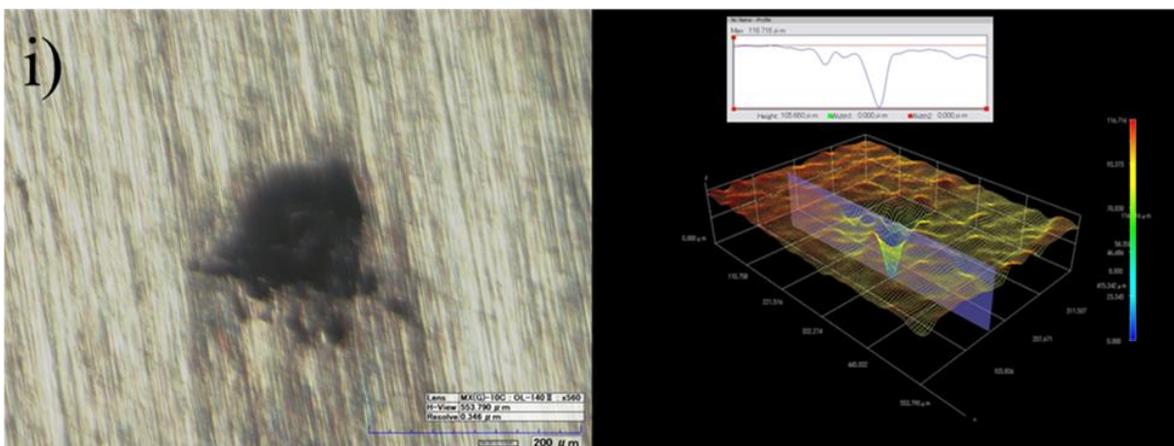
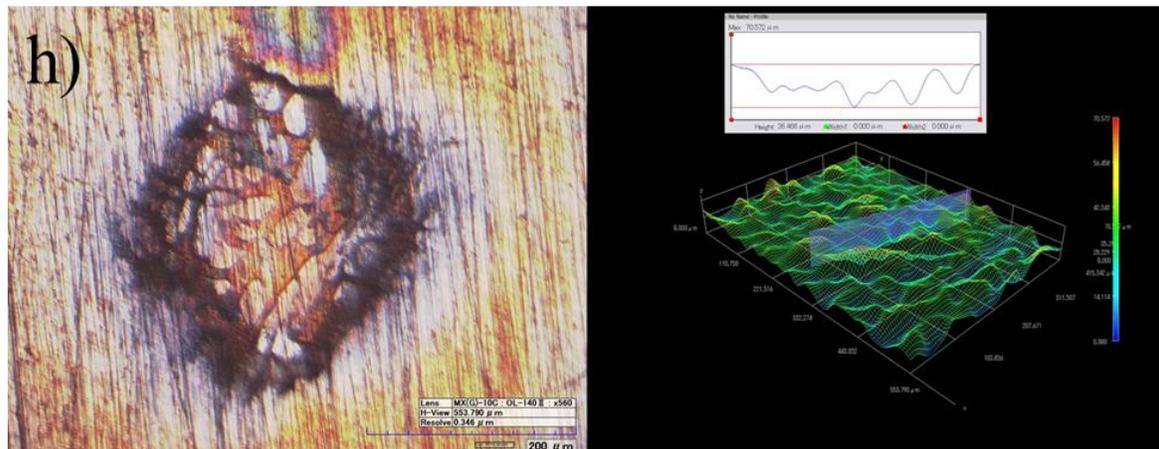
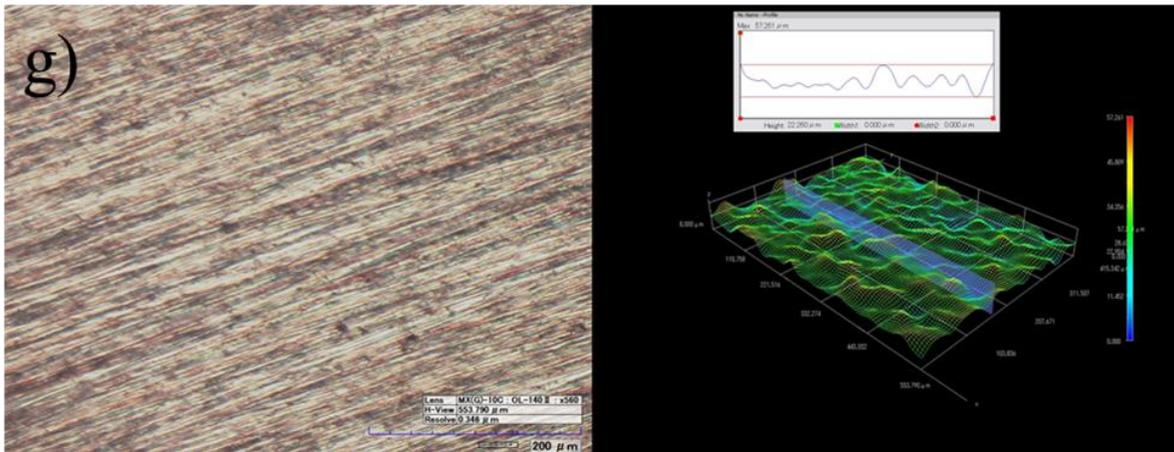
Mode: Run Fitting / Freq. Range (0,001 - 1000000)
 Maximum Iterations: 100
 Optimization Iterations: 0
 Type of Fitting: Complex
 Type of Weighting: Calc-Modulus

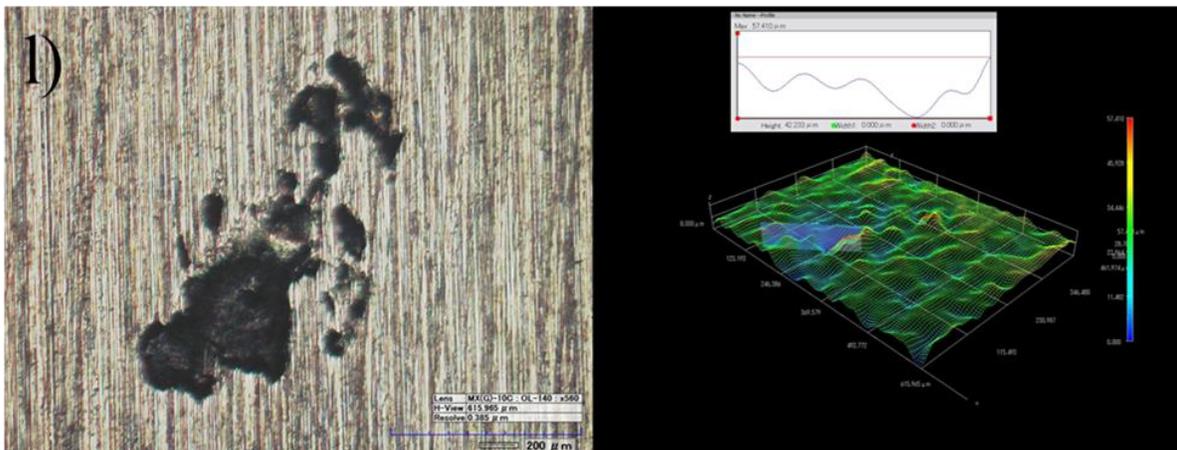
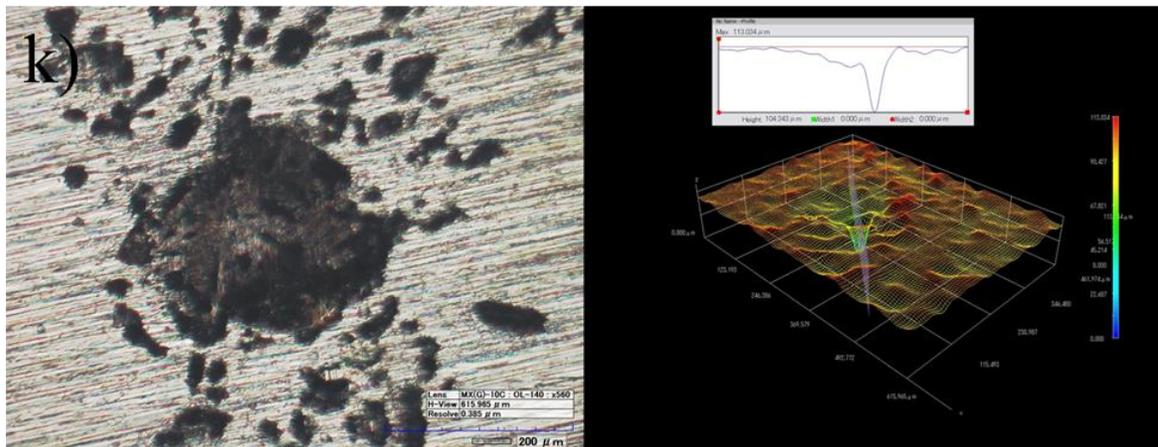
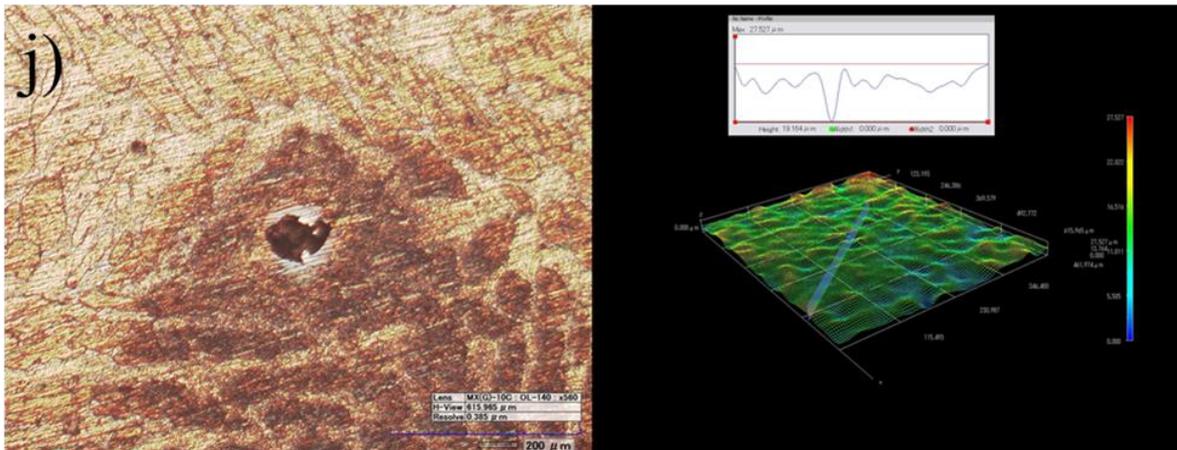
Circuitos equivalentes con sus respectivos valores realizados con Zview. **a)** Agua de mar sintética temperatura ambiente, **b)** Agua de mar sintética 50°C, **c)** Agua de mar sintética 70°C, **d)** NaCl 3,5% p/p temperatura ambiente, **e)** NaCl 3,5% p/p 50°C y **f)** NaCl 3,5% p/p 70°C.

Apéndice D. Reconstrucción digital 3D de los pozos de picado del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 expuesto a la técnica CPP en diferentes condiciones









Reconstrucción digital 3D de los pozos de picado del acero inoxidable dúplex DIN/EN 1.4517 expuesto a la técnica CPP. **a)** Agua de mar sintética temperatura ambiente aireada, **b)** Agua de mar sintética 50°C aireada, **c)** Agua de mar sintética 70°C aireada, **d)** Agua de mar sintética

temperatura ambiente deaireada, **e)** Agua de mar sintética 50°C deaireada, **f)** Agua de mar sintética 70°C deaireada, **g)** NaCl 3,5% p/p temperatura ambiente aireada, **h)** NaCl 3,5% p/p 50°C aireada, **i)** NaCl 3,5% p/p 70°C aireada, **j)** NaCl 3,5% p/p temperatura ambiente deaireada, **k)** NaCl 3,5% p/p 50°C deaireada, y **l)** NaCl 3,5% p/p 70°C deaireada.