



**ESTUDIO DE LAS JUNTAS SOLDADAS DE
ACERO NAVAL ASTM A131 UTILIZANDO
EL PROCESO SMAW EXPUESTAS A
AMBIENTES MARINOS MEDIANTE UNA
HERRAMIENTA COMPUTACIONAL**

Autores:

Ibarra Rivero, Enderson José

C.I.: 25.550.405

Scioscia González, Luis Eduardo

C.I.: 26.162.844

Urb. Yuma II, Calle N°3, Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (Master)-Fax: (0241) 871239



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ESTUDIO DE LAS JUNTAS SOLDADAS DE ACERO NAVAL ASTM A131
UTILIZANDO EL PROCESO SMAW EXPUESTAS A AMBIENTES
MARINOS MEDIANTE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL**

Proyecto de Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Autores:

Ibarra Rivero, Enderson José

C.I.: 25.550.405

Scioscia González, Luis Eduardo

C.I.: 26.162.844

Tutor: Ing. Donato Romanello

San Diego, Julio 2020



FI-M -009-2020-1CR (TG)

Valencia, 08 de junio de 2020

Ciudadano:
Ibarra R., Enderson J..
25.550.405
Scioscia G., Luis E.
26.162.844
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° **02-2020** de fecha **11-02-2020** aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **ESTUDIO DE LAS JUNTAS SOLDADAS DE ACERO NAVAL ASTM A 131 UTILIZANDO EL PROCESO SMAW EXPUESTAS A AMBIENTES MARINOS MEDIANTE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL** presentado por usted (es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Donato Romanello C.I: 4.131.877 como Tutor Académico que lo asesorara en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,



Prof. Luis Lira

Decano de la Facultad de Ingeniería

c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

Ll/a.a



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Donato Romanello, portador de la cédula de identidad N° V-4.131.877, en mi carácter de tutor del Trabajo de Grado presentado por los ciudadanos Ibarra Rivero Enderson José, portador de la Cédula de Identidad N° V-25.550.405, y Scioscia González Luis Eduardo, portador de la Cédula de Identidad N° V-26.162.844, titulado **ESTUDIO DE LAS JUNTAS SOLDADAS DE ACERO NAVAL ASTM A131 UTILIZANDO EL PROCESO SMAW EXPUESTAS A AMBIENTES MARINOS MEDIANTE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL**. Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 29 días del mes de Junio del año dos mil veinte

Ing. Donato Romanello

V-4.131.877

AGRADECIMIENTOS

Luis Scioscia

Primeramente, gracias a Dios por acompañarme en la carrera y haberme permitido lograr esta meta importante en mi vida. Así como también, darme la salud necesaria durante el transcurso de mi carrera. A toda mi familia, por estar presentes y darme amor incondicional es esta etapa de mi vida. A mi papá, por ser mi mayor ejemplo a seguir por su inteligencia y persona. A mi mamá, por darme su amor en todo momento y sus consejos en momentos difíciles. A María Antonieta, que me acompañó durante gran parte de la carrera y estuvo siempre conmigo apoyándome y dándome su amor. A Enderson por ser un gran amigo y compañero de tesis. A todos mis profesores de la Uc y Ujap, que siempre hicieron su mayor esfuerzo para que mi educación fuera la mejor. Sin su entrega y dedicación sería complicado haber terminar esta carrera. A todos mis compañeros de clase, que durante muchos años compartimos, estudiamos y nos apoyamos unos a los otros.

Enderson Ibarra

Primeramente a Dios y a mis padres por ser tan maravillosos y siempre apoyarme en lo que quise hacer y emprender, este logro es gracias a ustedes. A toda mi familia por quererme y estar conmigo en los momentos más difíciles de mi vida. A personas como Maryury Medina, Jean Artiaga, Carlos Martínez y mi compañero Luis Scioscia por guiarme y darme las fuerzas para seguir cuando las cosas se pusieron difícil durante todo este año. A mis profesores que desde primaria me dieron las herramientas educativas y éticas para encontrar mi pasión por la ingeniería mecánica y a mis amigos por su motivación incondicional. Mamá, Papá gracias, no se imaginan cuanto los amo. A Donato Romanello, por aceptar ser nuestro tutor y ayudarnos a realizar este trabajo de grado el cual es muy importante para nosotros.

ÍNDICE

CONTENIDO	Pp.
ÍNDICE DE FIGURA	ix
ÍNDICE DE CUADRO	x
ÍNDICE DE TABLA	x
ÍNDICE DE GRÁFICO	xi
NOMENCLATURA	xii
RESUMEN	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO	
I EL PROBLEMA	
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del Problema.....	4
1.3 Objetivos de la investigación.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Justificación.....	5
1.5 Alcance.....	6
1.6 Limitaciones.....	6
II MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes.....	7
2.2 Bases Teóricas.....	10
2.2.1 Introducción histórica a la soldadura.....	10
2.2.2 Soldadura por arco eléctrico.....	11
2.2.2.1 Selección del electrodo.....	13
2.2.2.2 Ventajas del uso de la soldadura SMAW....	15
2.2.2.3 Limitaciones del uso de la soldadura SMAW	15
2.2.3 Soldabilidad.....	15
2.2.3.1 Soldabilidad de aceros al carbono.....	15
2.2.4 Selección del tipo de corriente.....	16
2.2.4.1 Arco con corriente continua.....	16
2.2.4.2 Arco con corriente alterna.....	16
2.2.5 Microestructura de los aceros.....	16
2.2.5.1 Acero al carbono ASTM A131.....	16
2.2.5.2 Propiedades del acero ASTM A131.....	17
2.2.6 Corrosión.....	18
2.2.6.1 Mecanismos Electroquímicos de la	18
Corrosión.....	
2.2.6.2 Tipos de Corrosión.....	19

2.2.6.3	Corrosión generalizada.....	19
2.2.6.4	Corrosión localizada.....	20
2.2.6.5	Corrosión galvánica.....	20
2.2.6.6	Corrosión por fisuras.....	21
2.2.6.7	Corrosión por picaduras.....	21
2.2.6.8	Corrosión por cavitación.....	22
2.2.6.9	Corrosión microbiológica.....	22
2.2.6.10	Corrosión salina neutra.....	22
2.2.6.11	Corrosión salina ácida.....	22
2.2.7	Simulación.....	22
2.2.7.1	Simulación de la corrosión.....	23
2.2.7.2	Modelado de sistemas electroquímicos.....	24
2.2.7.3	Simulación de soldadura por arco eléctrico...	24
2.2.7.4	Comsol multiphysics.....	25
2.2.7.5	Módulo de corrosión.....	25
2.3	Definición de términos básicos.....	26
III	MARCO METODOLÓGICO	
3.1	Tipo de la investigación.....	27
3.2	Nivel de la investigación.....	27
3.3	Diseño de la investigación.....	27
3.4	Población y muestra.....	27
3.4.1	Población.....	27
3.4.2	Muestra.....	29
3.5	Técnica e Instrumentos de recolección de datos.....	29
3.6	Fases del proyecto.....	29
IV	RESULTADOS	
4.1	Fase I. Establecer las variables que componen las juntas soldadas de acero naval ASTM A131.....	31
4.1.1	Variables que componen las propiedades mecánicas del material utilizado y los materiales de aporte.....	31
4.1.2	Ensayos mecánicos de la soldadura.....	35
4.1.2.1	Ensayo de Tensión.....	35
4.1.2.2	Ensayo de doblado.....	36
4.1.3	Variables que definen las herramientas computacionales.....	37
4.1.3.1	SolidWorks® en su versión 2018.....	37
4.1.3.2	Comsol Multiphysics® en su versión 5.4.....	38
4.2	Modelar las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico mediante una herramienta computacional.....	40
4.2.1	Planteamiento del modelado.....	40

4.2.2	Modelado 3D.....	40
4.2.3	Cargas y sujeciones.....	44
4.2.3.1	Ensayo de Tensión.....	44
4.2.3.2	Ensayo de doblado.....	47
4.3	Realizar la simulación de la corrosión mediante una herramienta computacional a las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico.....	50
4.3.1	Evaluación de parámetros previos.....	50
4.3.2	Simulación en Comsol Multiphysics.....	52
4.3.2.1	Diseño del ambiente marino.....	52
4.3.2.2	Superficie anódica.....	53
4.3.2.3	Superficie catódica.....	56
4.3.2.4	Selección del estudio.....	57
4.3.2.5	Mallado.....	58
4.3.3	Resultados de la simulación.....	60
4.3.3.1	Cálculo de la velocidad de corrosión.....	62
4.3.3.2	Ensayo de tracción luego del proceso corrosivo.....	64
4.4	Evaluar los resultados obtenidos de la herramienta computacional.....	65
4.4.1	Evaluación de las propiedades mecánicas antes del ensayo de corrosión.....	65
4.4.2	Evaluación de las propiedades mecánicas después del ensayo de corrosión.....	68
4.4.3	Análisis de resultados.....	69
	CONCLUSIONES	71
	RECOMENDACIONES	73
	BIBLIOGRAFÍA	74
	ANEXOS	
A	SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS	80
A	CONSTANTES USADAS PARA LA ECUACIÓN DE FARADAY	84

ÍNDICE DE FIGURA

		Pp.
1	Soldadura por Arco Eléctrico	11
2	Equipo de soldadura SMAW.....	12
3	Especificación de aceros de uso frecuente.....	14
4	Propiedades mecánicas del acero ASTM A 131.....	17
5	Representación de una celda electroquímica.....	19
6	Corrosión Generalizada.....	20
7	Corrosión galvánica sobre una placa de acero (ánodo) en contacto con unos tornillos y tuercas de acero.....	21
8	Corrosión por fisuras.....	21
9	Dimensionamiento (Cortes probetas de tensión).....	35
10	Muestra espécimen transversal de doblado.....	36
11	Dimensionamiento de los cortes de las probetas de doblado.....	37
12	Curvas de variación de temperatura en nodos ubicados en la zona de afectación térmica.....	38
13	Potencial electrolítico en el agua de mar que rodea un soporte monopila. Estructura utilizada para turbinas eólicas en alta mar protegidas por ánodos de sacrificio representada en Comsol.....	38
14	Mallado FEM mostrando los bordes de los ánodos de sacrificio con su respectivo radio virtual representado en rojo.....	39
15	Propiedades físicas del acero ASTM A131 cargadas en el software.....	41
16	Bisel y espaciamiento de la probeta de doblado utilizado para la soldadura en V (Unidades en mm).....	42
17	Vista superior de la probeta de doblado.....	42
18	Esquema 3D de la probeta de doblado.....	42
19	Esquema 3D de la probeta de doblado con el cordón de soldadura.....	43
20	Bisel y espaciamiento de probeta de tracción utilizado para la soldadura en V (Unidades en mm).....	43
21	Vista superior de la probeta de tracción.....	43
22	Esquema 3D de la probeta de tracción.....	44
23	Sujeción realizada a la probeta de tracción.....	44
24	Mallado de la probeta sometida a tracción.....	45
25	Ensayo de tensión (Tensión de von Mises).....	46
26	Deformación unitaria equivalente.....	47
27	Sujeción realizada a la probeta de tracción.....	47
28	. Mallado de la probeta sometida a tracción.....	48
29	Ensayo de doblado (Tensión de von Mises).....	49
30	Deformación unitaria equivalente.....	49
31	Datos recopilados para la ciudad de Puerto Cabello.....	50

32	Representación del agua de mar en el programa Comsol Multiphysics para la probeta de tracción.....	52
33	Representación del agua de mar en el programa Comsol Multiphysics para la probeta de doblado.....	53
34	Electronegatividad de algunos elementos.....	54
35	Representación de la superficie anódica en el programa Comsol Multiphysics para la probeta de doblado.....	54
36	Representación de la superficie anódica en el programa Comsol Multiphysics para la probeta de tracción.....	55
37	Representación de la superficie catódica en el programa Comsol Multiphysics para la probeta de doblado y tracción.....	57
38	Representación de la superficie afectada por la corrosión.....	58
39	Representación del mallado en la probeta de tracción.....	59
40	Representación del mallado en la probeta de doblado.....	60
41	Distribución del potencial electrolítico en la probeta de tracción. Caso de estudio, 120 días.....	60
42	Distribución de la densidad del vector de corriente electrolítica en la probeta de tracción. Caso de estudio, 120 días.....	61
43	Distribución del potencial electrolítico en la probeta de doblado. Caso de estudio, 120 días.....	61
44	Distribución de la densidad del vector de corriente electrolítica en la probeta de doblado. Caso de estudio, 120 días.....	62
45	Ensayo de tensión después de la corrosión en Comsol Multiphysics (Tensión de von Mises).....	65

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO		Pp.
1	Especificaciones del procedimiento de soldadura.....	32
2	Composición iónica principal del agua de mar (mg/L).....	51

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA		Pp.
1	Procedimiento de soldadura.....	33
2	Características típicas del metal depositado (E6011 Y E7018).....	34
3	Composición química del metal depositado.....	34
4	Fuerzas resultantes generadas por SolidWorks.....	45
5	Información de malla generada por SolidWorks.....	45

6	Fuerzas resultantes generadas por Solidworks.....	48
7	Información de malla generada por SolidWorks.....	48
8	Descripción de la configuración utilizada para cargar los valores de la superficie anódica en el programa Comsol Multiphysics.....	55
9	Variables asignadas por el programa para definir la superficie anódica.....	56
10	Variables asignadas por el programa para definir la superficie catódica.....	57
11	Variables asignadas para el mallado de la probeta de tracción.....	58
12	Variables asignadas para el mallado de la probeta de doblado.....	59
13	Fuerzas resultantes.....	64
14	Información del mallado.....	64
15	Valores característicos de las probetas soldadas.....	65
16	Propiedades mecánicas de las probetas soldadas (A).....	67
17	Valores característicos de las probetas soldadas (D).....	68

ÍNDICE DE GRÁFICO

GRÁFICO	Pp.
1 Diagrama esfuerzo vs deformación de las probetas soldadas.....	67
2 Diagrama esfuerzo vs deformación de las probetas soldadas después del ensayo de corrosión.....	68

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción
D	Diámetro
A	Amperaje
V	Voltaje
V_a	Velocidad de avance
V_{cor}	Velocidad de corrosión
T	Temperatura
I_{cor}	Corriente de corrosión
t	Tiempo
M	Masa molar del metal del electrodo
n	Número de electrones transferidos
F	Constante de Faraday
d	Densidad
K	Constante
U_r	Resiliencia
U_T	Tenacidad
So	Esfuerzo de fluencia
e	Elongación
Su	Esfuerzo de tracción/último



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ESTUDIO DE LAS JUNTAS SOLDADAS DE ACERO NAVAL ASTM A131
UTILIZANDO EL PROCESO SMAW EXPUESTAS A AMBIENTES
MARINOS MEDIANTE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL**

Propuesta de Trabajo de Grado

Autor: Ibarra, Enderson / Scioscia, Luis

Tutor: Ing. Donato Rommanello

Fecha: Julio, 2020

RESUMEN

El presente estudio tuvo como fin principal predecir el comportamiento de las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico expuestas a ambientes marinos mediante una herramienta computacional, siendo dicho acero naval un material destacado en la industria marítima. El tipo de investigación fue de campo con un diseño experimental donde la población estuvo formada por los distintos tipos de soldadura que se podrían emplear para trabajar con los aceros navales (entre ellas las de tipo MIG MAG) y la muestra de este trabajo que fue la soldadura SMAW en aceros navales. Se aplicaron los siguientes procedimientos: Se establecieron las variables que componen las juntas soldadas, seguidamente se modelaron las juntas soldadas de acero naval aplicando el proceso de soldadura por arco eléctrico, luego se realizó la simulación de la corrosión a las juntas soldadas de dicho material con el proceso de soldadura mencionado, ejecutando todos estos procesos mediante una herramienta computacional al igual que la evaluación de los resultados obtenidos. Finalmente siguiendo los lineamientos descritos en las fases planteadas se alcanzó el objetivo de la investigación al predecir el comportamiento de las juntas soldadas del acero naval ASTM A131.

Descriptores: Juntas soldadas, estudio, acero naval, ASTM A131, proceso de soldadura, arco eléctrico, ambientes marinos, simulación.

INTRODUCCIÓN

En la moderna industria naval, se requieren los niveles más altos de calidad y seguridad en la soldadura. Debido a esto nace la necesidad de estudiar y conocer el impacto que el ambiente marino ocasiona en dichos materiales y en cordones de soldaduras para generar confiabilidad y soluciones a posibles problemas que puedan surgir con el paso del tiempo. La presente investigación tuvo como objetivo principal predecir el comportamiento de las juntas soldadas de acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico expuestas a ambientes marinos mediante una herramienta computacional.

La principal preocupación sobre estos ensayos fue debido al alto costo que representarían lo que dio lugar a la búsqueda de alternativas presupuestarias factibles, que fueran capaces de satisfacer los requerimientos y predecir con simulación las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión. Las juntas soldadas de acero naval utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico fueron sometidas a ensayos de corrosión mediante un software de simulación. Estos resultados sirvieron de base y pudieran ser considerados en futuros proyectos de ingeniería con el fin de aumentar la confiabilidad y seguridad del diseño, generando y mejorando el diseño de productos en el área industrial.

Este proyecto, en el Capítulo I, expone un planteamiento del problema que muestra la realidad y necesidad nacional, que fue la base para comprender la importancia estudiar mediante una simulación computarizada las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico expuestas en ambientes marinos. El Capítulo II, se desarrolla atendiendo a los referentes o antecedentes que sirvieron de base y soporte a esta investigación que remiten a estudios de factibilidad y diseños de juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico expuestas en ambientes marinos, así como las teorías, conceptos y aspectos legales que funcionan de pilares fundamentales para comprender el rumbo de este estudio, asimismo el uso de

herramientas computacionales que simulen los procesos necesarios para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

El capítulo III, por su parte se enfoca en el aspecto metodológico, que muestra la modalidad de la investigación, el tipo y nivel de estudio, la población y muestra a la cual fue dirigida esta investigación, las técnicas e instrumentos de recolección de la información así como el sistema y operación de variables que permitieron identificar la dimensión e indicadores que condujeron el alcance de los objetivos planteados. En el capítulo IV se muestran los recursos humanos, recursos institucionales, recursos materiales que incurrieron en el desarrollo de la investigación.

Por último la investigación finaliza con el análisis de resultados y recomendaciones las cuales tuvieron como objetivo ser una guía de ayuda a la industria naval y otras investigaciones que necesiten conocer el comportamiento de las juntas soldadas del acero ASTM A131 asimismo fomentar el uso de herramientas computacionales para el estudio de problemas de ingeniería.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

La industria naval ha existido desde hace miles de años y ha evolucionado desde entonces para convertirse en un eje central de la economía mundial, iniciando en el antiguo Egipto pasando por el siglo XV en el que se inicia el desarrollo de barcos, y con esto se impulsa el mercado marítimo y los viajes por el mar en Europa, de allí pues se inició una revolución en la creación de barcos y buques que introdujo la soldadura como nueva técnica de unión la cual reduce significativamente el peso permitiendo una mayor velocidad en la navegación, asimismo se crean nuevas aleaciones y descubren nuevos materiales que hacen más factible y seguro la estadía en el mar, debido a esto nace la necesidad de estudiar y conocer el impacto que el ambiente marino ocasiona en dichos materiales y soldaduras para generar soluciones a posibles problemas que puedan surgir con el paso del tiempo.

En la actualidad son muchos los materiales que se emplean en la industria naval dentro de los que destaca el acero ASTM A131, principalmente los buques se construyen con este acero los cuales requieren de uniones permanentes. A pesar del avance técnico aún existen inconvenientes para la selección del proceso de la soldadura, en algunos casos por la mala selección de su tipo estas presentan deficiencias en las propiedades mecánicas y alta degradación al estar expuestas a ambientes marinos, asimismo haciendo el uso de la soldadura SMAW específicamente soldadura por arco eléctrico con electrodos revestidos, las cuales se caracterizan por ser la forma más común de soldadura, estudiaremos la respuesta de las juntas soldadas en el acero naval ASTM A131 con este proceso de soldadura a un ambiente corrosivo.

El efecto corrosivo principalmente galvánico o electroquímico sobre las juntas soldadas afecta las propiedades mecánicas y pueden ocasionar fisuras o rupturas en los buques, tanques o estructuras fabricadas con el acero ASTM A131. Así mismo,

provocando accidentes o derrames de sustancias que pueden ser nocivas para el medio ambiente.

Dentro de los procesos de soldadura más usados se tiene el proceso por arco bajo gas protector el cual posee una óptima resistencia a la corrosión y brinda las propiedades mecánicas necesarias. Sin embargo, el principal problema con este proceso de soldadura en la situación país actual de Venezuela es el alto costo y la poca disponibilidad de estos equipos, esto lleva a buscar una alternativa más asequible para el uso en reparación de buques y estructuras en ambientes marinos, así mismo que estos sean capaces de cumplir con los requerimientos mecánicos y resistencia a la corrosión. Siendo la opción más viable el proceso de soldadura SMAW.

En este mismo orden de ideas existen factores como el costo, tiempo y dinero que dificultan la realización de investigaciones y ensayos destructivos y no destructivos para conocer propiedades mecánicas y efectos corrosivos, por lo que es necesario utilizar programas computacionales de simulación para conocer estos factores, los cuales se evidencian en los sectores navales del país donde se encuentran muchos buques afectados por la corrosión. En las épocas por venir la demanda en la soldadura para la remodelación de estos buques va a aumentar y se va a necesitar información sustentable para llevar a cabo estos proyectos.

1.2. Formulación del Problema

¿Cómo predecir la falla en las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico expuestas a ambientes marinos?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Predecir el comportamiento de las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico expuestas a ambientes marinos mediante una herramienta computacional.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Establecer las variables que componen las juntas soldadas de acero naval ASTM A131.

- Modelar las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico mediante una herramienta computacional.
- Realizar la simulación de la corrosión mediante una herramienta computacional a las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico.
- Evaluar los resultados obtenidos de la herramienta computacional.

1.4.Justificación

La situación económica que afronta Venezuela en la actualidad ha llevado a distintas industrias dentro de las que se encuentra la industria naval al borde de la extinción en el país, contando con más de 2.718 kilómetros de costa, una zona económica exclusiva de 200 millas náuticas generadas por las más de 314 islas, soberanía sobre aproximadamente 98.500 km de plataforma continental , a lo que se suma bordes con 18 países lo que le genera 5500 kilómetros de límites marítimos; son pocos los espacios que se utilizan y nulos los esfuerzos por reactivar la poca actividad naval que aún queda en el país.

El avance en los procesos de soldadura no ha sido constante en el país por lo que utilizar herramientas computacionales que permiten a los ingenieros y científicos investigar estos métodos, comprender el grado en que podría producirse corrosión durante la vida útil de una estructura e implementar medidas preventivas para inhibir la corrosión electroquímica o galvánica a fin de proteger sus estructuras es fundamental. En consideración a lo antes mencionado el determinar si una junta soldada en el casco de algún buque o barco fallará en algún momento al estar tanto tiempo sin mantenimiento y con un notable deterioro por corrosión en su superficie es crucial para los dueños de estos equipos es importante alargar la vida útil de los componentes lo máximo posible y es por ello que los nuevos software brindan esa confianza y seguridad, en este mismo orden de ideas dicho conocimiento permitirá a muchos operarios continuar sus operaciones marítimas con tranquilidad sin poner en riesgo las personas que se encuentren a bordo permitiendo a su vez mitigar los efectos

ambientales que una fuga por una soldadura en mal estado podría generar al medio marino que ya se ha visto afectado en muchas ocasiones.

Con esta investigación se desea generar un aporte a la industria naval venezolana, estudiando de forma exhaustiva el proceso de soldadura por arco eléctrico aplicada en aceros navales ASTM A131 en ambientes marinos mediante procesos de simulación, para conocer propiedades mecánicas de estas uniones soldadas y brindar información a los entes que necesiten verificar si su equipo puede seguir funcionando luego de haber sufrido corrosión.

1.5. Alcance

Para el presente proyecto de investigación se evalúan cuatro fases específicas permitiendo alcanzar el objetivo principal, para ello se dispondrá de una herramienta computacional en la que se modelará respetando la normativa internacional para el estudio de probetas metálicas y ensayos destructivos y no destructivos las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 para luego realizar el análisis de esfuerzos estándar para comparar con los resultados obtenidos de la simulación de corrosión electroquímica realizada en el software, con el objetivo de proporcionar una guía de comparación y observar cómo se generará la falla en la junta soldada.

1.6. Limitaciones

- La posibilidad de desarrollar el trabajo de investigación y cumplir con todos los objetivos planteados en un tiempo igual a 2 periodos lectivos máximo.
- Conseguir el hardware recomendado para la utilización de los programas a utilizar.
- La adquisición del software necesario para realizar las simulaciones dentro del proyecto de investigación.
- Falta de recursos económicos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Sabino, C. (1996), señala que el marco teórico, marco referencial o marco conceptual tiene el propósito de dar a la investigación un sistema coordinado y coherente de conceptos y proposiciones que permitan abordar el problema. "Se trata de integrar al problema dentro de un ámbito donde éste cobre sentido, incorporando los conocimientos previos relativos al mismo y ordenándolos de modo tal que resulten útil a nuestra tarea" (p.48). Así pues, atendiendo a estas orientaciones, este estudio tiene como referentes elementales del marco teórico: los antecedentes de la investigación, las bases teóricas y el glosario de términos básicos.

2.1 Antecedentes de la investigación

Los antecedentes son estudios previos a esta investigación que relatan experiencias dentro del área de la factibilidad así como con plantas desalinizadoras solares, a fin de considerar elementos de interés que sirvan de orientación para este trabajo. Para tal efecto se presentan tres antecedentes nacionales.

En primer lugar, se tiene la investigación de la Universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físico - Químicas, por Montilla P. David A. (2017) presentada como trabajo de grado denominado "**Simulación del fenómeno de corrosión externa y protección catódica en una tubería prototipo utilizada para el transporte de crudo en sistemas submarinos aplicando la herramienta Comsol Multiphysics**" como trabajo de investigación para optar al título profesional de Ingeniero Metalúrgico.

En este trabajo se evaluó la corrosión externa de una tubería de acero con recubrimiento y con un sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio de una aleación de aluminio, utilizada para el transporte de hidrocarburos y sus derivados, en una solución compuesta de sal marina mediante técnicas electroquímicas. Además, se realizó una simulación con el software COMSOL Multiphysics.

En el análisis de las pruebas electroquímicas se evaluó el comportamiento de los sistemas (tubería de acero sin recubrimiento, tubería de acero con recubrimiento anticorrosivo y tubería de acero con recubrimiento epóxico-bituminoso), estos sistemas muestran que la velocidad de corrosión varía dependiendo del tipo de recubrimiento utilizado y los días de exposición. Una forma de evitarlo es con el uso de recubrimientos, en este caso se evaluaron dos recubrimientos. Se determinó que el recubrimiento anticorrosivo posee mejores características de protección que el epóxico. Con respecto a las simulaciones, el COMSOL es una herramienta bastante útil para mostrar el comportamiento del acero en ambientes marinos. Consideramos dicha investigación valiosa ya que se realizó una simulación de corrosión electroquímica en ambiente marino, haciendo uso de sus resultados y procesos como aporte para nuestro trabajo de grado.

En segundo lugar, en la Universidad José Antonio Páez, Bencomo B. Kevin D. y Molina M. Robert F. (2019) presentaron el trabajo de grado "**Modelo para la predicción del comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (SMAW) afectado por un defecto para un acero AISI 1010**" como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

El estudio tuvo como propósito el modelado para la predicción del comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (SMAW) afectado por un defecto para un acero AISI 1010, siendo este un acero clasificado como acero de bajo carbono, el cual es una de las aleaciones metálicas más usadas en la industria, gracias a la tecnología moderna y automatización de la mano de obra. En la actualidad es uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil y adaptable a un precio económico, combinando la resistencia y trabajabilidad. El tipo de investigación fue descriptivo, con un diseño experimental, donde la población y muestra fue un acero AISI 1010.

Se evaluaron los resultados mediante análisis microscópicos y macroscópicos para obtener el comportamiento de la resistencia del cordón y el defecto predominante, finalmente los resultados obtenidos fueron analizados y modelados mediante un

software matemático con la finalidad de obtener un modelo, mediante una regresión lineal, para la predicción del comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura en función de los parámetros establecidos y el defecto más predominante. Al analizar este proyecto como aporte para la investigación se deduce que hay relación con el tema de estudio, ya que en este trabajo se estudian las propiedades mecánicas de juntas soldadas de acero haciendo uso de ensayos y software computacional.

Por otra parte, en la ilustre Universidad José Antonio Páez, Toro R. Manuel A. (2019) presentó el trabajo de grado denominado "**Desarrollo de un sistema de detección y prevención de patologías en sistemas estructurales utilizados en la infraestructura urbana e industrial.**" como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

La metodología de esta investigación se basa en el estudio documental en temas de durabilidad, diagnóstico y simulación de corrosión por medio de la herramienta de simulación computacional COMSOL Multiphysics, el cual tiene como fin la aplicación de los módulos de física acoplada que contiene el software para analizar temas en el área de pregrado de ingeniería mecánica. Se plantea un procedimiento sistematizado, que sirve de guía práctica para el uso del ingeniero que desee simular la corrosión siguiendo lineamientos y parámetros que recrean condiciones de realidad generando resultados confiables.

Para este sistema de detección y prevención se presentan una serie de recomendaciones la cuales pueden ser aplicada en un futuro o en otro tipo de investigación. Así como también fomentar el uso de la herramienta COMSOL Multiphysics para analizar distintos tipos de estudios. Llevar un control más detallado de las estructuras nuevas que están en servicio para recolectar información que de verdad sea útil a la hora de predecir el comportamiento de estas. Este trabajo de grado sirvió como modelo ya que hace uso de la simulación de corrosión. Los conceptos utilizados son igualmente aplicables y adaptables a todo tipo de estructuras metálica y no metálica o combinación de las mismas.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Introducción histórica a la soldadura

Hasta el final del siglo XIX, el único proceso de soldadura era la soldadura de fragua, que los herreros han usado por siglos para juntar metales calentándolos y golpeándolos. La soldadura por arco y la soldadura a gas estaban entre los primeros procesos en desarrollarse tardíamente en el siglo, siguiendo poco después la soldadura por resistencia. La tecnología de la soldadura avanzó rápidamente durante el principio del siglo XX mientras que la Primera Guerra Mundial y la Segunda Guerra Mundial condujeron la demanda de métodos de unión confiables y baratos. Después de las guerras, fueron desarrolladas varias técnicas modernas de soldadura, incluyendo métodos manuales como la Soldadura manual de metal por arco, ahora uno de los más populares métodos de soldadura, así como procesos semi-automáticos y automáticos tales como Soldadura GMAW, soldadura de arco sumergido, soldadura de arco con núcleo de fundente y soldadura por electroescoria.

Los progresos continuaron con la invención de la soldadura por rayo láser y la soldadura con rayo de electrones a mediados del siglo XX. Hoy en día, la ciencia continúa avanzando. La soldadura robotizada está llegando a ser más corriente en las instalaciones industriales, y los investigadores continúan desarrollando nuevos métodos de soldadura y ganando mayor comprensión de la calidad y las propiedades de la soldadura.

Bolaños et al, (2005), estudiaron la Caracterización de las propiedades mecánicas y micros estructurales de soldaduras empleadas en la recuperación de ejes. En este trabajo Se analizaron las propiedades mecánicas y las características microestructurales de los materiales de aporte y la zona afectada térmicamente (ZAT) de tres procedimientos de soldadura de arco eléctrico, usados para la recuperación de ejes desgastados de molinos de caña de azúcar. De los resultados obtenidos, se desprende que el revenido a 200°C después del temple es beneficioso ya que la energía absorbida en el ensayo de impacto es el doble de la obtenida en probetas con solo temple, conservando las propiedades de dureza y resistencia a la abrasión.

2.2.2. Soldadura por arco eléctrico

La soldadura manual por arco eléctrico con electrodo revestido es la forma más común de soldadura. El soldeo por arco con electrodo revestido es un proceso, en el que la fusión del metal se produce gracias al calor generado por un arco eléctrico establecido entre el extremo de un electrodo revestido y el metal base de una unión a soldar.(ver figura 1)

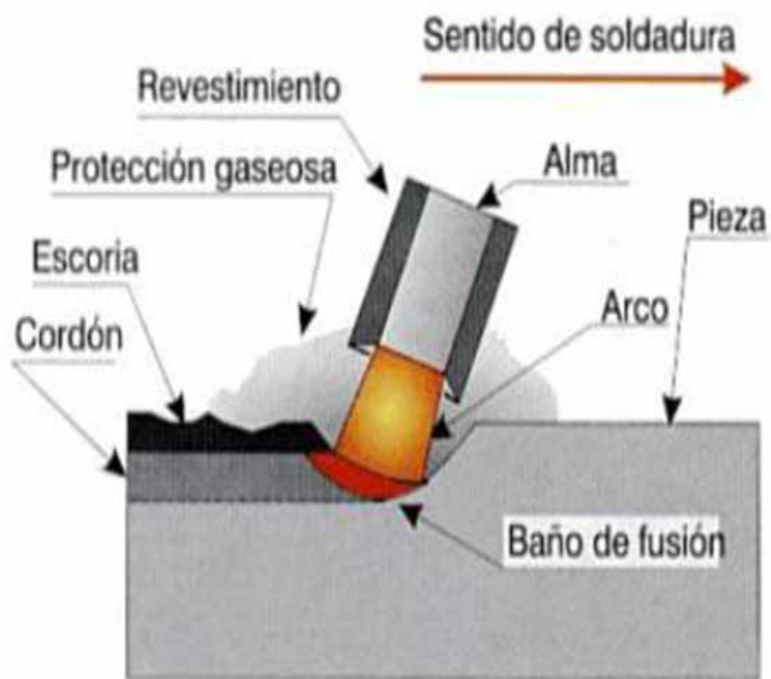


Figura 1: Soldadura por Arco Eléctrico.

Fuente: I.E.S. "Cristóbal de Monroy". Dpto. de Tecnología (2020).

El material de aporte se obtiene por la fusión del electrodo en forma de pequeñas gotas. En la figura 1 se observa el proceso en el que la protección se obtiene por la descomposición del revestimiento en forma de gases y en forma de escoria líquida que flota sobre el baño de fusión y, posteriormente solidifica.

El soldeo por arco con electrodo revestido puede realizarse tanto en corriente alterna (AC) como en corriente continua (DC). La elección del tipo de corriente

dependerá del tipo de equipo disponible, del electrodo a utilizar y del material a ser soldado. La polaridad de la corriente eléctrica afecta la transferencia de calor a las piezas unidas. Normalmente el polo positivo (+) se conecta al electrodo, aunque, para soldar materiales muy delgados se conecta al electrodo el polo negativo (-) de una fuente de corriente continua.

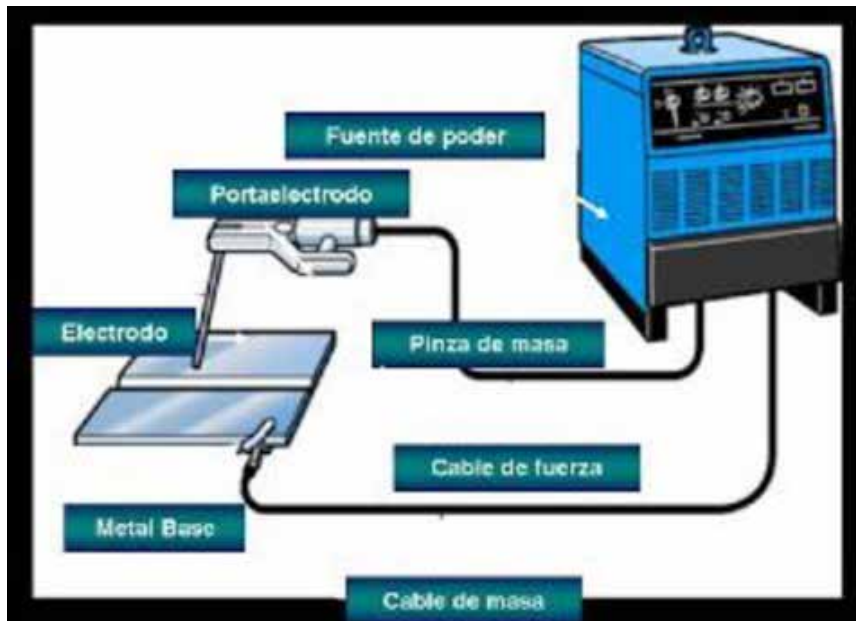


Figura 2: Equipo de soldadura SMAW

Fuente: I.E.S. "Cristóbal de Monroy". Dpto. de Tecnología (2020).

El equipo que se utiliza en el proceso de soldadura SMAW como el que se muestra en la figura 2, es una fuente de energía que modifica los parámetros necesarios para que el electrodo funda correcta y homogéneamente; las partes más importantes de un equipo de soldadura SMAW son:

Transformadores: Modifican los parámetros voltaje (V) e intensidad (A) pero continúa suministrando corriente alterna (AC)

Rectificadores: Consumen corriente alterna, y a la vez que modifican los parámetros voltaje (V) e intensidad (A), también rectifican la corriente que pasa de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC).

Pinza porta-electrodos: Tiene la función de conducir la electricidad al electrodo y sujetarlo. Se debe seleccionar siempre el porta-electrodos en función del electrodo a utilizar y la intensidad de soldadura.

Pinza de masa: La conexión correcta de la pinza de masa es una consideración de importancia. La situación del cable es de especial relevancia en el soldeo. La zona de contacto de la pinza de masa debe estar totalmente limpia sin sustancias que puedan dificultar su correcto contacto como pinturas, barnices, aceites, etc.

2.2.2.1. Selección del electrodo

Los electrodos usualmente son de acero de bajo carbono, y están recubiertos con un material fundente que crea una atmósfera protectora que evita que se oxide el metal fundido y favorece la operación de soldeo.

Para escoger el electrodo adecuado es necesario analizar las condiciones de trabajo en particular y luego determinar el tipo y diámetro de electrodo que más se adapte a estas condiciones.

Este análisis es relativamente simple, si el operador se habitúa a considerar los siguientes factores:

1. Naturaleza del metal base.
2. Dimensiones de la sección a soldar.
3. Tipo de corriente que entrega su máquina soldadora.
4. En qué posición o posiciones se soldará.
5. Tipo de unión y facilidad de fijación de la pieza.
6. Si el depósito debe poseer alguna característica especial, como son: resistencia a la corrosión, gran resistencia a la tracción, ductilidad, etc.
7. Si la soldadura debe cumplir condiciones de alguna norma o especificaciones especiales.
8. Tipo de proceso de soldadura dependiendo de las necesidades del trabajo a realizar.

ESPECIFICACIÓN DE ACERO	R. DE CEDENCIA		R. A LA TENSIÓN		ELECTRODO SUGERIDO
	ksi	MPa	ksi	MPa	
ASTMA 36 ^f	36	250	58-80	400-550	TODOS
ASTMA 53 Grado B	35	240	60 min.	415 min.	1,2,3
ASTMA 106 Grado B	35	240	60 min.	415 min.	8
ASTMA 131 Gr A, B, CS, D, DS, E	34	235	58-71	400-490	8
ASTMA 139 Grado B	35	240	60 min.	415 min.	8
ASTMA 381 Grado Y35	35	240	60 min.	415 min.	TODOS
ASTMA 500 Grado A	33	228	45 min.	310 min.	TODOS
Grado B	42	290	58 min.	400 min.	8
ASTMA 501	36	250	58 min.	400 min.	1,2,3,8
ASTMA 516 Grado 55	30	205	55-75	380-515	8
Grado 60	32	220	60-80	415-550	8
ASTMA 524 Grado I	35	240	60-85	415-586	1,2,3,4,5,6,8
Grado II	30	205	55-80	380-550	1,2,3,4,5,6,8
ASTMA 529	42	290	60-85	415-550	1,2,3,4,5,6,8
ASTMA 570 Grado 30	30	205	49 min.	340 min.	1,2,3,4,5,6
Grado 33	33	230	52 min.	360 min.	1,2,3,4,5,6
Grado 36	36	250	53 min.	365 min.	1,2,3,4,5,6
Grado 40	40	275	55 min.	380 min.	1,2,3,4,5,6
Grado 45	45	310	60 min.	415 min.	1,2,3,4,5,6
Grado 50	50	345	65 min.	450 min.	1,2,3,4,5,6,8
ASTMA 709 Grado 36 ^f	36	250	58-80	400-550	TODOS
API 5L Grado B	35	240	60	415	1,2,3,4,5,6
Grado X-42	42	290	60	415	1,2,3,4,5,6

Figura 3: Especificación de aceros de uso frecuente.

Fuente: Electrodo INFRAS S.A. (2009)

Según la figura 3 el electrodo recomendado para aceros ASTM A131 es el 8. Siendo este un electrodo de bajo hidrógeno con polvo de hierro y revestimiento para soldar en todas posiciones. Tiene altas propiedades mecánicas a temperaturas bajo cero, es recomendable para depósitos en los cuales se desee minimizar el riesgo de fracturas y poros. Para soldadura de aceros con alto contenido de azufre. El más versátil en la industria metalmecánica, de la construcción y mantenimiento.

En el sector naviero se utiliza en la construcción y reparación de embarcaciones, buques y barcasas, secciones pesadas y gruesas en astilleros.

2.2.2.2. Ventajas del uso de la soldadura SMAW

- El equipo es relativamente simple, económico y portátil.
- El electrodo es el encargado de suministrar el metal de aporte y la protección del arco.
- No requiere de flux adicional ni de gases de protección.
- El proceso es menos sensible al viento y corrientes de aire que los protegidos por gas.
- Permite su uso en áreas de acceso limitado.
- Es adecuado para la mayoría de los metales y aleaciones.

2.2.2.3. Limitaciones del uso de la soldadura SMAW

- No pueden soldarse metales o aleaciones de bajo punto de fusión Ej. Plomo, Estaño.
- No pueden soldarse metales reactivos Ej. Titanio, Zirconio. Tantalio y Columbio.
- Alta dependencia del soldador.
- Bajo rendimiento y velocidad de deposición.
- Alto nivel de desperdicio (Quesada).

2.2.3. Soldabilidad

La soldabilidad es la capacidad que tienen los materiales, de la misma o de diferente naturaleza, para ser unidos de manera permanente mediante procesos de soldadura, sin presentar transformaciones estructurales perjudiciales, tensiones o deformaciones que puedan ocasionar alabeos. La soldabilidad de un material constituye una propiedad muy compleja y en muchas ocasiones queda condicionada a variaciones metalúrgicas y sus propiedades. Esto significa que un material puede tener buena soldabilidad, cuando se puede lograr una unión soldada con propiedades mecánicas y físico-químicas adecuadas, por cualquiera de los procesos de soldadura y sin necesidad de utilizar técnicas auxiliares.

2.2.3.1. Soldabilidad de aceros al carbono

La soldabilidad de los aceros al carbono es determinada principalmente por la cantidad de carbono presente en estos y su sensibilidad al agrietamiento por hidrógeno, aunque la tendencia al agrietamiento en caliente y las prácticas de desoxidación también pueden afectar la soldabilidad de algunos grados.

2.2.4. Selección del tipo de corriente

2.2.4.1. Arco con corriente continua

La polaridad recomendada en corriente continua (CC) es la directa, ya que si se suelda con polaridad inversa se tienen que utilizar intensidades tan bajas para que no se sobrecaliente el electrodo que resulta impracticable el soldar.

2.2.4.2. Arco con corriente alterna

La corriente alterna (CA) aún, aunque reducidas, las ventajas de las dos polaridades el buen comportamiento durante el semiciclo de polaridad directa y el efecto decapante del baño durante el semiciclo de polaridad inversa, por lo que suele emplearse en el soldeo de aleaciones ligeras, tales como las de aluminio y magnesio.

2.2.5. Microestructura de los aceros

La metalografía tiene como fin mostrar microscópicamente las características del acero, estudiando su microestructura, microrechupes, tratamientos térmicos, inclusiones, con el objetivo de determinar si dicho material cumple con los requisitos para los cuales ha sido diseñado. La microestructura se caracteriza por el número de fases y por la proporción y distribución que se puede encontrar en ellas. Algunas de las fases que se pueden encontrar en las estructuras de los aceros son la martensita, perlita, ferrita, vainita, austenita, cementita, entre otras.

2.2.5.1. Acero al carbono ASTM A131

La ASTM (American Society for Testing and materials) es una organización internacional que crea y publica normas dirigidas a materiales, productos, sistemas y servicios, que representa la sociedad académica internacionalmente en la que se encuentran inscritos más de 100 países que desarrollan documentos técnicos que son el principio y fundamento de fabricación de productos, su adquisición y gestión.

El acero nava ASTM A131 es utilizado casi exclusivamente en la industria de la construcción naval. Entre sus aplicaciones se incluyen barcasas, equipos marinos y construcción de buques. El acero naval lo podemos conseguir en grado A y B, estos grados también tienen certificación de la American Bureau of Shipping (ABS).

En el caso de materiales esta norma es utilizada para la fabricación de láminas como el acero ASTM A 131 de uso naval que es producida como lámina estructural de mediana resistencia, donde su mayor característica es la soldabilidad y maleabilidad. A continuación se presentan las propiedades mecánicas del acero ASTM A 131.

2.2.5.2. Propiedades del acero ASTM A131

Este acero se obtiene por medio de un proceso de manufactura y es previamente calentado a una temperatura de 125

2.2.6. Corrosión

Entre las definiciones de corrosión podemos encontrar una de las más comúnmente aceptadas “La Corrosión es un término que se utiliza para describir el proceso de deterioro de materiales metálicos (incluyendo tanto metales puros, como aleaciones de estos), mediante reacciones químicas y electroquímicas (Revie y Uhlig, 2008). Para el caso del deterioro relacionado con otros tipos de materiales, como los polímeros y cerámicos, se utiliza el término degradación”.

2.2.6.1. Mecanismos Electroquímicos de la Corrosión

Una celda electroquímica como la mostrada en la figura 5 es una combinación del tipo siguiente: un conductor electrolítico (metal), un conductor iónico (electrolito) y un conductor. (Ver figura 5)

En ella pueden tener lugar procesos electroquímicos con el paso de una corriente eléctrica. Si la celda electroquímica produce energía eléctrica, causada por el consumo de energía química, se dice que es una celda galvánica o pila. Si, en cambio, la celda electroquímica consume corriente de una fuente de corriente externa, almacenando como consecuencia energía química, se dice que es una celda electrolítica. Algunas celdas galvánicas reciben nombres especiales.

Una celda de corrosión es una celda o pila galvánica en la cual las reacciones electroquímicas que tienen lugar conducen a la corrosión. Una celda de corrosión de dimensiones muy pequeñas (por ejemplo $< 0,1\text{mm}$) se conoce como celda de acción localizada o microcelda galvánica. Las celdas locales o micrópilos se dan, por ejemplo, en aleaciones multifásicas o en metales con recubrimientos que presentan buena conductividad eléctrica o en inclusiones de óxidos, sulfuros, carbón, entre otros. La acción de estas celdas a menudo conduce a un ataque localizado, tal como picaduras o corrosión bajo tensión.

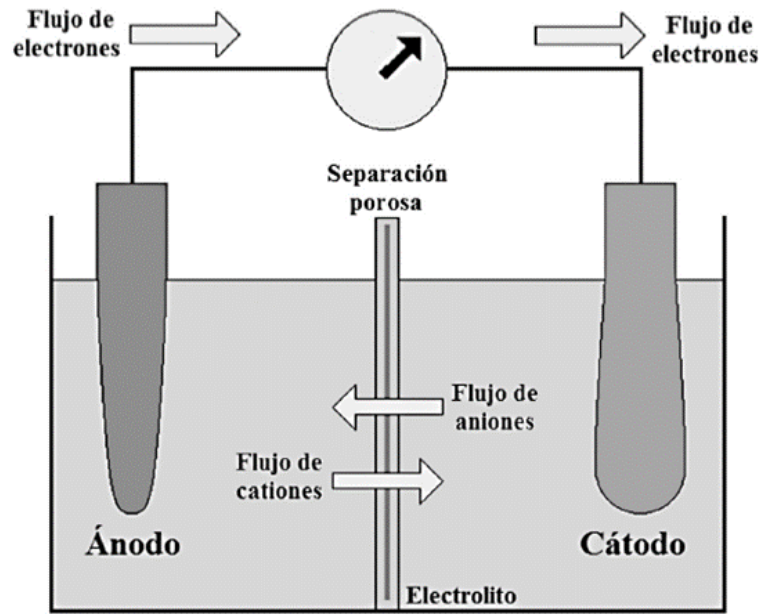


Figura 5: Representación de una celda electroquímica

Fuente: ECCA (2011)

2.2.6.2. Tipos de corrosión

Existen varios tipos de corrosión y se caracterizan dependiendo tanto de la naturaleza del material y de las condiciones del medioambiente, donde se desarrollen.

2.2.6.3. Corrosión generalizada

La corrosión generalizada, también nombrada como corrosión uniforme, ocurre sobre toda la superficie del material de forma homogénea, deteriorándolo completamente. Este tipo de corrosión es el que mayor pérdida de material provoca, pero es relativamente fácil de predecir y controlar, por lo que un accidente producido por este es de rara ocurrencia, la figura 6 muestra un ejemplo real de la corrosión generalizada. (Ver figura 6)



Figura 6: Corrosión Generalizada.

Fuente: ECCA (2011)

2.2.6.4. Corrosión localizada

La corrosión localizada, al contrario de la corrosión uniforme, representa un mayor riesgo potencial, debido a su difícil detectabilidad ya que se manifiesta en zonas específicas en el material, determinadas tanto por la naturaleza del material, la geometría de este, y las condiciones del medio al que se somete.

2.2.6.5. Corrosión galvánica

La corrosión galvánica ocurre cuando existe una unión, física o eléctrica, entre metales de diferente naturaleza, lo cuales, en la presencia de un electrolito, forman una celda electroquímica, donde el material de menor potencial electroquímico es el que se corroe, la figura 7 muestra un caso muy común de este tipo de corrosión cuando se encuentran en contacto tornillos y tuercas de acero.

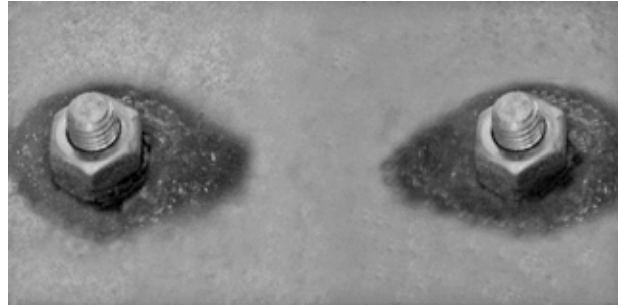


Figura 7: Corrosión galvánica sobre una placa de acero (ánodo) en contacto con unos tornillos y tuercas de acero.

Tomada de http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Galvanic_corrosion-1b.jpg

2.2.6.6. Corrosión por fisuras

Este tipo de corrosión es similar a la corrosión galvánica, que se produce en zonas estrechas donde la concentración de oxígeno es mucho menor que en el resto del sistema, y cuyo efecto induce a que estas zonas de menor concentración de oxígeno actúen como un ánodo, propiciando el proceso de corrosión, en las fisuras. La figura 8 representa un esquema didáctico sobre el proceso que ocurre en este tipo de corrosión.

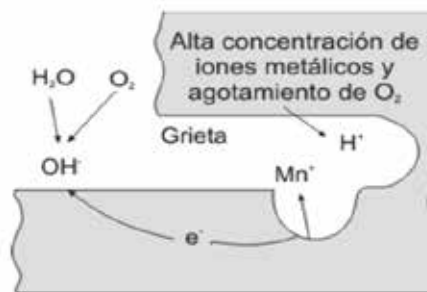


Figura 8: Corrosión por fisuras.

Fuente: Revie R. W. y Uhlig H. H. (2008)

2.2.6.7. Corrosión por picaduras

La corrosión por picadura, conocida también como pitting se presenta en materiales pasivados, debido a las características geométricas del sistema, existe una acumulación de agentes oxidantes y un incremento del pH del medio, lo que propicia

el deterioro de la capa pasivada, permitiendo que la corrosión se desarrolle en éstas zonas puntuales.

2.2.6.8. Corrosión por cavitación

La corrosión por cavitación ocurre en sistemas de transporte de líquidos, hechos de materiales pasivados, donde por cambios de presión en el sistema, se producen flujos turbulentos que forman burbujas de aire, las cuales implosionan contra el material del sistema, deteriorando la capa de pasivación, facilitando el desarrollo del proceso de corrosión, de forma similar a la corrosión por picaduras, cuya diferencia se observa, en que el efecto de la cavitación es de mayor tamaño.

2.2.6.9. Corrosión microbiológica

La corrosión microbiológica, en realidad no es un tipo de corrosión en sí, sino que más bien es un fenómeno que facilita el desarrollo de otros procesos de corrosión. Las bacterias son los microorganismos más influyentes en este caso, por lo que también es conocida como corrosión bacteriana y se produce en sistemas de transporte de líquido, facilitando la corrosión por picaduras.

2.2.6.10. Corrosión salina neutra

Es aquella producida por un ambiente marino sin presencia de componentes ácidos (ph balanceado; alrededor de 7). Es fácilmente reproducible en cámaras de ensayos de corrosión acelerada.

2.2.6.11. Corrosión salina ácida

Este tipo de corrosión se produce por ambientes activos en los cuales, además de la presencia de sales diversas tales como cloruro de sodio (NaCl), sulfato de cobre (SO₄Cu), entre otras, pueden existir concentraciones de ácidos, tales como ácido acético procedente de las siliconas empleadas en la carpintería, ácido úrico en las granjas, entre otros. Este tipo de corrosión es muy común en las estructuras construidas en zonas costeras.

2.2.7. Simulación

Simulación es el desarrollo de un modelo lógico matemático de un sistema, de tal forma que se tiene una imitación de la operación de un proceso de la vida real o de

un sistema a través del tiempo. La simulación involucra la generación de una historia artificial de un sistema y la observación de ésta mediante la manipulación experimental.

2.2.7.1. Simulación de la corrosión

Hoy en día los avances en la tecnología y el desarrollo de software han sido de gran ayuda para comprender y controlar fenómenos de corrosión. En la mayoría de industrias son usados sistemas capaces de simular las condiciones requeridas. Hoy en día los avances en la tecnología y el desarrollo de software han sido de gran ayuda para comprender y controlar fenómenos físicos.

Tenemos varios métodos de simulación para obtener resultados:

- **Método de elementos finitos:** La teoría en la cual se basa el método de los elementos finitos, es la que utiliza los métodos numéricos para integrar las ecuaciones diferenciales que resultan de la aplicación de modelos de comportamiento físico, también conocidos como modelos constitutivos de cada problema en particular, los cuales son alimentados con parámetros representativos de la caracterización físico mecánica de cada uno de los elementos de tamaño finito en los que se divide una superficie, o de un volumen, ya sea que se trate de casos de deformación plana (2D en los que basta con analizar superficies), o casos en los que es necesario considerar el comportamiento tridimensional (3D). El resultado de tal integración parcial de cada elemento, es luego aplicada al ensamble de todos ellos para obtener las ecuaciones globales que van a servir para obtener el comportamiento del material.
- **Método de diferencias finitas:** El Método consiste en una aproximación de las derivadas parciales por expresiones algebraicas con los valores de la variable dependiente en un limitado número de puntos seleccionados. Como resultado de la aproximación, la ecuación diferencial parcial que describe el problema es reemplazada por un número finito de ecuaciones algebraicas, en términos de los valores de la variable.

- **Método de elementos de contorno:** El Método de los Elementos de Contorno se ha implantado firmemente en numerosos campos de la ingeniería como una competitiva técnica numérica alternativa a métodos tales como el Método de los Elementos Finitos o el Método de las Diferencias Finitas.

El planteamiento numérico que aquí se propone, como posteriormente se verá, se basa en la idea de utilizar la ecuación integral de contorno en tracciones en combinación con la ecuación integral de contorno clásica para obtener, de este modo, una aproximación mixta de elementos de contorno muy apropiada para tratar problemas con dos superficies coplanarias en los que la aplicación del MEC da lugar a una degeneración matemática en la formulación numérica.

2.2.7.2. Modelado de sistemas electroquímicos

Básicamente es el estudio de la relación entre el cambio químico y el trabajo eléctrico, y En estos sistemas el cambio químico se hace en dispositivos llamados celdas electroquímicas y en ellos ocurre una reacción óxido-reducción ya sea:

- Produciendo energía eléctrica (si la reacción es espontánea) CELDA VOLTAICA.
- Consumiendo energía eléctrica (si la reacción es no espontánea) CELDA ELECTROLÍTICA.

La mayoría de problemas electroquímicos están descritos matemáticamente por la ecuación de Laplace utilizando condiciones de frontera determinadas por las curvas de polarización, lo que es una relación no lineal entre dos variables principales, el potencial electroquímico y la densidad de corriente.

La ecuación que gobierna la distribución de corriente y potencial para sólidos o soluciones con resistividad uniforme en cual los gradientes de concentración pueden ser omitidos es la ecuación de Laplace.

2.2.7.3. Simulación de soldadura por arco eléctrico

Todos los complejos procesos físicos del proceso de soldadura por arco son considerados en la mecánica computacional, permitiendo modelar de manera eficaz las

distorsiones y las tensiones residuales, así como de la resistencia, las microestructuras y la dureza resultantes de la soldadura. Esto tiene aplicaciones en el ámbito de la automoción y de la producción de energía, en el sector naval, el aeroespacial y el del petróleo y el gas y en el área de la maquinaria pesada. La simulación puede utilizarse para perfeccionar las secuencias de soldadura antes de la fabricación o para conocer los efectos de la soldadura en estructuras existentes. El modelado de soldadura también puede utilizarse en el ámbito de la fabricación aditiva para perfeccionar la fabricación de componentes metálicos.

2.2.7.4. Comsol multiphysics

COMSOL Multiphysics® es una herramienta de modelado y análisis para prototipaje virtual de fenómenos físicos. COMSOL Multiphysics puede modelar virtualmente cualquier fenómeno físico que un ingeniero o científico pueda describir con ecuaciones diferenciales parciales, incluyendo corrosión, transferencia de calor, movimiento de fluidos, electromagnetismo y mecánica estructural, soportando la integración de problemas de diferentes campos - Multifísica.

Las prestaciones de multifísica integradas en COMSOL Multiphysics capacitan al usuario para simultáneamente modelar cualquier combinación de fenómenos. A través de estas prestaciones, COMSOL Multiphysics integra las dos formas posibles de modelar (a través de aplicaciones predefinidas que permiten crear el modelo fijando las cantidades físicas que caracterizan el problema, y a través de las ecuaciones que modelan el problema) y permite combinarlas.

2.2.7.5. Módulo de corrosión

El módulo de corrosión permite a los ingenieros simular la electroquímica de la corrosión y la protección contra la corrosión de estructuras metálicas. Los modelos 1D, 2D y 3D se configuran para incluir la corrosión relevante y otras reacciones dentro del electrolito y en la interfaz de la superficie del metal utilizando una serie de interfaces de usuario predefinido. Estos se resuelven mientras se considera el transporte de iones y de especies neutras en la solución, la conducción de corriente en la estructura del metal, y otros fenómenos como flujo de fluidos y transferencia de calor.

2.3. Definición de términos

Arco eléctrico: se denomina arco eléctrico o también "arco voltaico" a la descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial y colocados en el seno de una atmósfera gaseosa enrarecida, normalmente a baja presión, o al aire libre.

Cordón de soldadura: Llamamos cordón al depósito continuo de metal de soldadura formado sobre la superficie del metal base. El cordón o una serie de cordones, compuesto de metal base y metal de aportación proveniente del electrodo, es propiamente la soldadura.

Electroquímica: La electroquímica, es uno de los campos de la química que considera las reacciones químicas, que producen energía eléctrica, o son ocasionadas por ellas.

Velocidad de corrosión: Consiste en determinar la pérdida de peso que ha experimentado un determinado metal o aleación e un tiempo expuesto a un medio corrosivo.

Software: es un término informático que hace referencia a un programa o conjunto de programas de cómputo, así como datos, procedimientos y pautas que permiten realizar distintas tareas en un sistema informático.

Pitting: Término inglés, generalizado para designar un tipo de desgaste especial de las superficies metálicas sometidas a condiciones de trabajo rigurosas.

Flux: El fundente es un producto químico usado en proceso de soldar y en la fabricación de placas y otros componentes electrónicos.

Metalografía: La metalografía es la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación, con el fin de determinar si el material cumple con los requisitos para los cuales ha sido diseñado.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Una vez formulado y desglosado el problema de investigación y asumidas las bases teóricas necesarias que guiaran el camino a recorrer del presente proyecto de investigación de forma clara y precisa, es necesario señalar el tipo de datos que se requiere indagar, para ello se han seleccionado los distintos métodos y técnicas que permiten obtener la información requerida. A fin de cumplir con este importante aspecto en todo proceso de investigación, se elaboró el Marco Metodológico, brevemente Tamayo y Tamayo (2003) lo define como “Un proceso que, mediante el método científico, procura obtener información relevante para entender, verificar, corregir o aplicar el conocimiento” (p. 37)

3.1 Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación al realizar un análisis del problema en la realidad con el propósito de describir, interpretar y entender su naturaleza se fundamenta en una investigación de tipo de campo en la cual se recogen los datos directamente del entorno explicando sus causas y efectos. En este sentido Arias (2006) señala que “La investigación de campo es aquella que consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos (datos primarios), sin manipular o controlar variable alguna, es decir, el investigador obtiene la información pero no altera las condiciones existentes. De allí su carácter de investigación no experimental.” (p. 31)

3.2 Nivel de investigación

Los niveles de estudio son primordiales para dar respuesta a la problemática planteada por lo que para efectos de esta investigación y atendiendo a sus objetivos, se definió el diseño experimental debido a la necesidad de recrear y simular un ambiente corrosivo para el acero naval bajo condiciones controladas de salinidad y tiempo, mediante el análisis y procesamiento de datos. Por otro lado la investigación es

explicativa; Arias (2006) la define como “La encargada de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. En este sentido, los estudios explicativos pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas (investigación post facto), como de los efectos (investigación experimental), mediante la prueba de hipótesis. Sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos.” (p. 26).

En este orden de ideas se pretende entender el comportamiento de las variables y su interrelación y de esta forma una vez finalizado el estudio de la corrosión del acero naval en las condiciones antes descritas se pueda conocer extensamente el fenómeno ocurrido y bajo qué condiciones este se produce.

3.3 Diseño de investigación

El diseño de investigación se refiere a la estrategia metodológica que se pretende seguir a cabalidad con fines de alcanzar los objetivos del proyecto, ahora bien, Arias (2006), menciona que “El diseño de investigación es la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado. (p. 27). Asimismo las estrategias de investigación fueron en base a un diseño experimental el cual Sabino (1992) explica que consiste en “Someter el objeto de estudio a influencia de ciertas variables, en condiciones controladas y conocidas, para observar los resultados que cada variable produce en el objeto.” En atención a lo planteado, la presente investigación científica experimental se ha desarrollado conforme a un enfoque cuantitativo al necesitar de escalas, simulación de ensayos y comparaciones para la obtención de resultados la cual a su vez consta de una finalidad aplicada.

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

Arias (2006) expresa que la población, o en términos más precisos población objetivo, es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Ésta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio. (p.81), para el presente trabajo de investigación la población consiste de los distintos tipos de soldadura que se podrían

emplear para trabajar con los aceros navales, dentro de los que se encuentran soldaduras tipo MIG MAG que pueden utilizar gas y distintas soldaduras por arco eléctrico.

3.4.2. Muestra

Según Tamayo y Tamayo (2003), afirma que la muestra “es el grupo de individuos que se toma de la población, para estudiar un fenómeno estadístico” (p.38), en este caso el muestreo empleado fue de tipo intencional al solo incluir la soldadura SMAW por arco eléctrico con electrodos revestidos en aceros navales.

3.5. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

La buena selección de las técnicas e instrumentos de recolección de datos permite verificar las hipótesis respondiendo de forma concreta a algunas de las interrogantes formuladas, por su parte Arias (2006) define técnica de investigación como “Se entenderá por técnica de investigación, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información.” (p. 67), para el presente proyecto de investigación se utilizara la técnica de revisión bibliográfica y recursos electrónicos, para la recolección de datos.

Arias (2006, p 67) expresa que “Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información”, por lo que el instrumento a utilizar será la computadora en conjunto con las herramientas computacionales necesarias para la simulación de las juntas soldadas antes y después del proceso corrosivo, con la finalidad de realizar las comparaciones que permitan evaluar el funcionamiento del material.

3.6. Fases del Proyecto

Fase I. Establecer las variables que componen las juntas soldadas de acero naval ASTM A131.

En la fase I, se realizará la caracterización a las juntas soldadas de acero naval ASTM A131, por lo cual es necesario conocer en detalle las características del proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodos revestidos, valores de voltaje, amperaje, profundidad, velocidad de pasada, tipo de electrodo, forma de la soldadura, entre otras.

Así como también, en el acero naval conocer las propiedades, mecánicas, físicas, electroquímicas, entre otras, y de esta forma lograr obtener resultados confiables para lograr una aproximación a la realidad.

Fase II. Modelar las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico mediante una herramienta computacional.

En esta fase se procederá a realizar el modelado de las juntas soldadas de acero naval ASTM A131, para ello se utilizará la herramienta computacional COMSOL Multiphysics, donde se controlarán todas las variables necesarias pre-definidas. Dicho programa comprende un paquete de software de análisis y resolución por elementos finitos para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, también ofrece una amplia y bien gestionada interfaz a MATLAB que suministran una extensa variedad de posibilidades de programación.

Fase III. Realizar la simulación de la corrosión mediante una herramienta computacional a las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico.

En la fase III, es importante resaltar la necesidad de utilizar medidas estándares y normativa internacional como la utilizada para la elaboración del ensayo de niebla salina (ASTM B-117), en la que se describe como se debe controlar el ambiente corrosivo al que se encontraran expuestas las probetas, dicho esto, el módulo de corrosión incluido en la software COMSOL Multiphysics, permite controlar suficientes variables operaciones como para simular el proceso de corrosión electroquímico al que si ven sometidas las muestras.

Fase IV. Evaluar los resultados obtenidos de la herramienta computacional.

En la fase final se evalúan los resultados obtenidos del ensayo corrosivo para determinar las condiciones operacionales en las que se encuentra el material comparando sus propiedades mecánicas con las obtenidas antes del proceso de corrosión y de esta forma conocer si dicho material puede seguir operando de forma regular o si es necesario reemplazar la pieza.

CAPITULO IV

RESULTADOS

El presente capítulo tiene como finalidad desarrollar las fases de la investigación descritas anteriormente con el propósito de cumplir con el objetivo general de la misma, el cual consiste en predecir el comportamiento de las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico expuestas a ambientes marinos mediante una herramienta computacional.

4.1. Fase I. Establecer las variables que componen las juntas soldadas de acero naval ASTM A131.

4.1.1. Variables que componen las propiedades mecánicas del material utilizado y los materiales de aporte.

En el cumplimiento y desarrollo de la primera fase del presente trabajo fue necesario investigar y tabular el compendio de variables y valores que componen las juntas soldadas, para ello se recopilaron los datos del acero naval ASTM A131 (Figura 4. Propiedades mecánicas del acero ASTM A 131). En cuanto a las consideraciones tomadas para las especificaciones del procedimiento de soldadura encontramos: tipo de proceso de soldadura, el diseño de la unión, el metal base, el metal de aporte, la posición de la soldadura, la protección catódica contra la acción del medio atmosférico, las técnicas para realizar el cordón, las características eléctricas con las cuales se suelde (voltaje, amperaje, etc.).

Adicionalmente es importante mencionar que dependiendo del espesor del metal base se determina si es necesario el precalentamiento, siguiendo la normativa AWS (American Welding Society) Structural Welding Code – Steel ANSI/AWS D1.1) para la preparación de probetas las cuales serán sometidas a ensayos destructivos no fue necesario el precalentamiento. En el cuadro 1 se muestran las especificaciones del procedimiento de soldadura y en la tabla 1 se refleja el procedimiento de soldadura el cual para efectos de este proyecto de investigación utiliza dos materiales de aporte

(E6011 y E7018) los cuales se caracterizan en las tablas 2 y 3 siendo recomendados por la normativa AWS y sugeridos por el fabricante INDURA para trabajar con aceros estructurales y navales del mismo modo se representa en detalle la unión formada y la secuencia de soldadura utilizada.

Cuadro 1. Especificaciones del procedimiento de soldadura.

ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	
Proceso(s) de soldadura: SMAW	Tipo: MANUAL
<p style="text-align: center;">DISEÑO DE UNIÓN</p> <p>Tipo de unión: A tope Tipo de soldadura: Ranura en V (Simple) Abertura de Raíz: 3.2 mm Longitud de cara de Raíz: 3.2 mm Ángulo de ranura: 60° Soporte: No Limpieza de raíz: Si (esmeril)</p>	<p style="text-align: center;">METAL BASE</p> <p>Especificación del acero: ASTM A131 Espesor de plancha: 10mm (3/8")</p>
<p style="text-align: center;">METAL DE APORTE</p> <p>Especificaciones AWS: A 5.1 Clasificación AWS: E6011 y E7018 Marca: INDURA Tamaño del electrodo: 3.2 mm</p>	<p style="text-align: center;">PROTECCIÓN</p> <p>Fundente: Revestimiento</p>
<p style="text-align: center;">POSICIÓN</p> <p>Ranura: 3G (Plancha)</p>	<p style="text-align: center;">CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS</p> <p>Corriente: Electrodo positivo de corriente directa (DCEP)</p>

TÉCNICA Aportación: OSCILANTE Pase: MÚLTIPLE Limpieza entre pases: Si (esmeril)	PRECALENTAMIENTO NO APLICA
--	---

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Tabla 1. Procedimiento de soldadura.

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	PASE	1	2	3	
	PROCESO	SMAW	SMAW	SMAW	
	PROGRESIÓN	ASCENDENTE	DESCENDENTE	ASCENDENTE	
	METALES DE APORTE	CLASE	E6011	E7018	E7018
		D (mm)	3.2	3.2	3.2
	CORRIENTE	TIPO Y POLARIDAD	DCEP	DCEP	DCEP
		AMPERAJE (A)	105	140	140
		VOLTAJE (V)	17-19	19-21	19-21
		VELOCIDAD DE AVANCE (mm/min)	84	127	64
	DETALLES DE LA UNIÓN Y SECUENCIA DE SOLDADURA	<p>El diagrama muestra un soldado de tres pases en una junta de soldadura. El ángulo de apertura del soldado es de 60°. Los pases están etiquetados como 1, 2 y 3. El espesor de la placa base es de 1/8".</p>			

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Tabla 2. Características típicas del metal depositado (E6011 Y E7018).

CARACTERÍSTICAS	E-6011	E-7018
Límite de fluencia	424 Mpa	445 Mpa
Resistencia a la Tracción	495 Mpa	535 Mpa
Agrietamiento en 50mm	27%	30%
Energía absorbida	34 J a -30°C	130 J a -30°C

Fuente: INDURA (2010)

Tabla 3. Composición química del metal depositado.

COMPOSICIÓN	E-6011	E-7018
C	0,11%	0,06%
Mn	0,41%	1,05%
Si	0,23%	0,49%
P	0,010%	0,015%
S	0,017%	0,010%

Fuente: INDURA (2010)

Los electrodos empleados como material de aporte brindan a la soldadura una buena resistencia y una gran penetración al ser los recomendados por el fabricante INDURA y su uso es muy diverso en la fabricación de cascos de embarcaciones por lo que poseen una resistencia mayor a la corrosión. En cuanto a la posición de clasificación 3G (soldadura vertical a tope) genera mayor libertad de trabajo al soldador.

Para finalizar con el apartado de las propiedades mecánicas se encuentran las variables introducidas por los esfuerzos residuales los cuales son consecuencia de dilataciones y contracciones que aparecen como producto de un calentamiento local del material, así como por cambios dimensionales causados por diversas

transformaciones microestructurales que se presentan. Pueden ser macroscópicas o microscópicas.

4.1.2. Ensayos mecánicos de la soldadura.

De los parámetros que aún faltan por definir se inicia con los ensayos de evaluación de la soldadura realizada y su comportamiento mecánico, donde la inspección visual lidera, por lo que una vez realizado el cordón siguiendo los parámetros definidos anteriormente, es necesario que el mismo cumpla con los siguientes requerimientos: la soldadura deberá estar libre de grietas, en caso de existir deberán rellenarse a través de toda la sección soldada, la cara de la soldadura deberá estar al ras con la superficie del metal base, y el cordón deberá fusionarse suavemente con el metal base. El socavamiento no deberá exceder 1mm (1/32”), la raíz de la soldadura será inspeccionada y no deberá haber evidencia de grietas, fusión incompleta, o penetración inadecuada en la unión. Para efectos de este proyecto se aplicarán los parámetros establecidos en el cuadro 1 y tabla 1 respectivamente para generar mediante el software escogido el cordón de soldadura.

4.1.2.1. Ensayo de Tensión.

Los ensayos mecánicos tipo destructivos por aplicarse son: el ensayo de tracción con sección reducida y el ensayo de doblado, cara, raíz y lado. En los cuales el criterio de aceptación según la normativa AWS D1.1 2002 para el ensayo de tensión es que el esfuerzo de fluencia de las probetas ensayadas sea mayor o igual al del metal base.

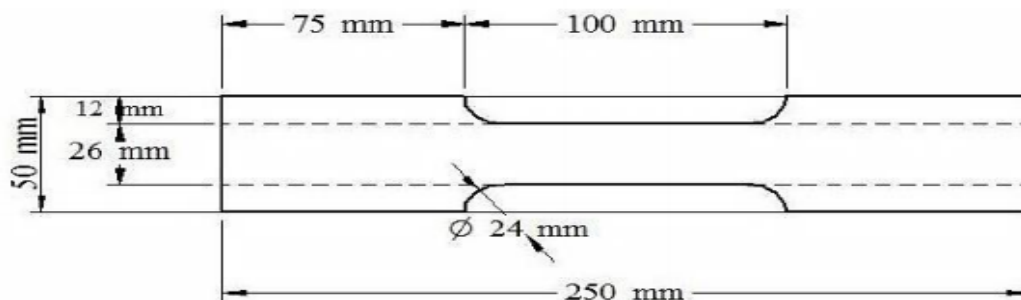


Figura 9. Dimensionamiento (Cortes probetas de tensión).

Fuente: AWS Welding Handbook (2002)

4.1.2.2. Ensayo de doblado.

El criterio de aceptación del ensayo de doblado según la normativa AWS D1.1 2002, es que la superficie convexa de los especímenes doblados deberá analizarse buscando discontinuidades que podrán exceder las siguientes dimensiones: ninguna discontinuidad deberá exceder de 3mm (1/8") medidos en cualquier dirección de la superficie, la suma de las dimensiones más grandes de todas las discontinuidades que excedan 1/32 pulgadas (1 mm), pero, menores que o iguales a 1/8 pulgada (3mm), el máximo agrietamiento de esquina, excepto cuando éste fuera el resultado de la acumulación visible de escoria o de otro tipo de discontinuidad de fusión; entonces deberá aplicarse el máximo de 1/8 pulgada (3 mm). (ver figura 10 y 11)

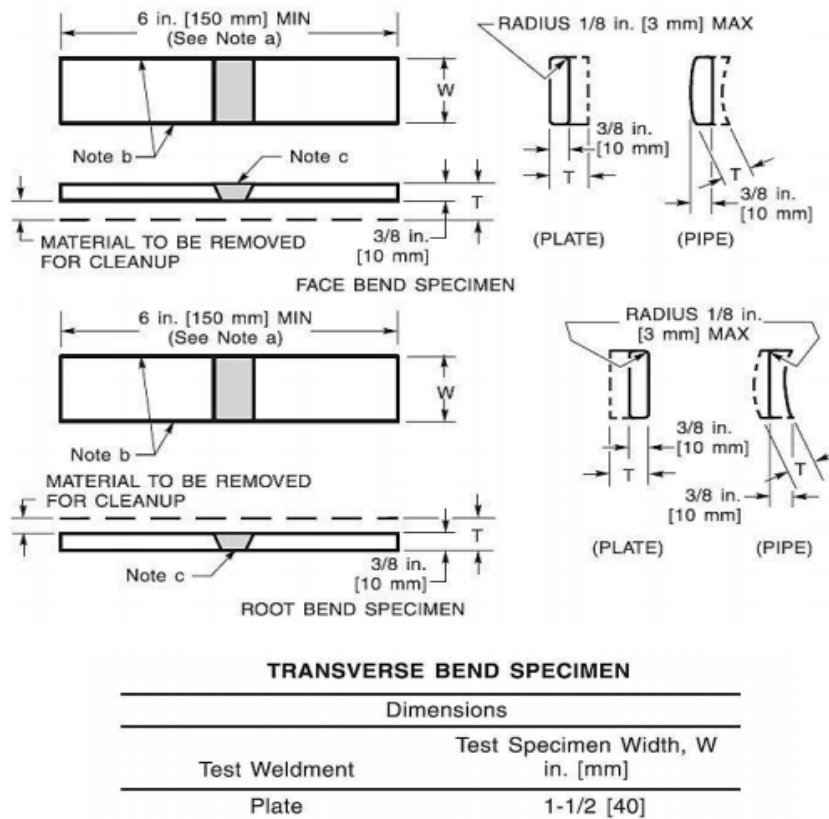


Figura 10. Muestra espécimen transversal de doblado.

Fuente: AWS Welding Handbook (2002)

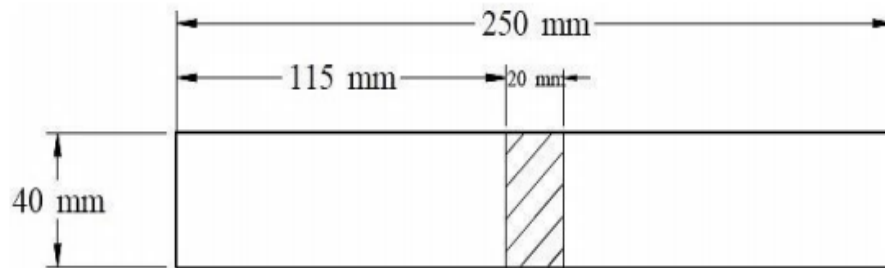


Figura 11. Dimensionamiento de los cortes de las probetas de doblado.

Fuente: AWS Welding Handbook (2002)

4.1.3. Variables que definen las herramientas computacionales.

4.1.3.1. SolidWorks® en su versión 2018.

La siguiente herramienta computacional se utilizará para la creación de las probetas necesarias para posteriormente hacer el modelado la soldadura, una de las variables más importantes en el proceso de soldadura ocurre con las variaciones en función del tiempo de la temperatura (calentamientos y enfriamientos que se generan en el proceso de soldadura) esto origina que, debido al calentamiento y posterior enfriamiento, el metal sufra transformaciones metalúrgicas que afectarán su microestructura y ésta, a su vez, sus propiedades mecánicas, además de cambios dimensionales en la pieza que provocarán distorsiones y esfuerzos residuales, por este motivo, es importante la correcta selección del material y materiales de aporte al igual que conocer el procedimiento de soldadura para evitar este tipo de problemas. (Ver figura 12)

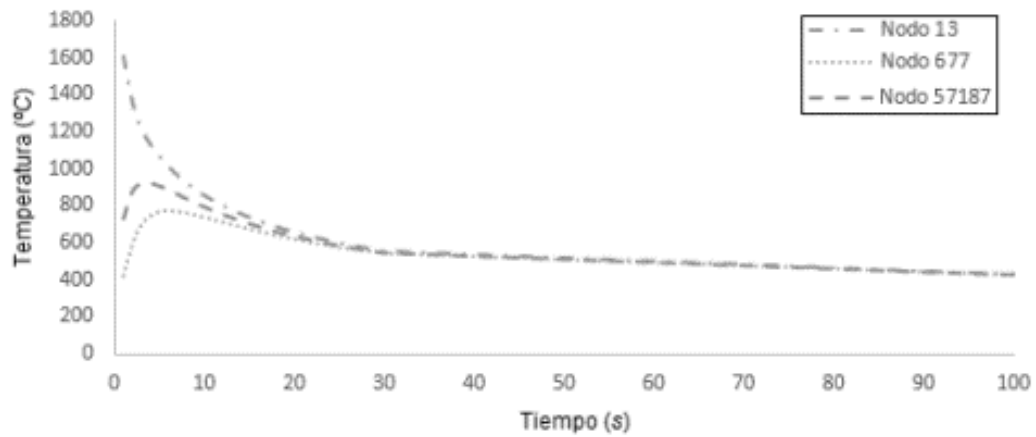


Figura 12. Curvas de variación de temperatura en nodos ubicados en la zona de afectación térmica.

Fuente: Almaguer P, Estrada R, Pérez R. 2016

4.1.3.2. Comsol Multiphysics® en su versión 5.4.

Comsol Multiphysics utiliza los parámetros más completos de modelaje de espacio de la corrosión al igual que de los modelos actuales de protección entendiendo el diseño y optimización de los sistemas protectores. . (ver figura 13)

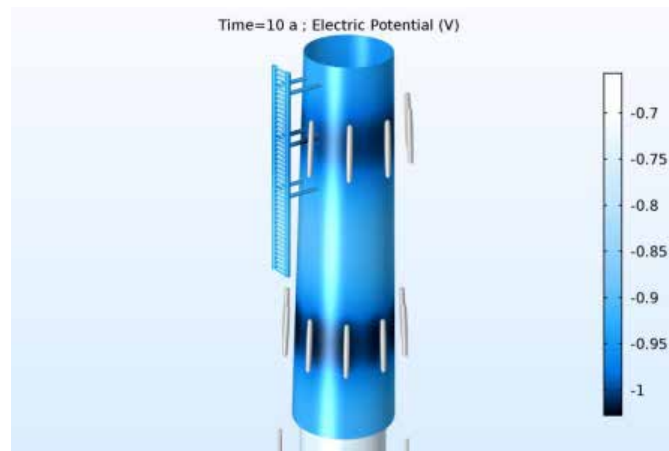


Figura 13. Potencial electrolítico en el agua de mar que rodea un soporte monopila. Estructura utilizada para turbinas eólicas en alta mar protegidas por ánodos de sacrificio representada en Comsol.

Fuente: Cai A. y Kan D. (2015).

Para la descripción del proceso de los modelos espacio-dependientes de estructuras metálicas en un electrolito Comsol tiene la capacidad de representar: corrosión galvánica, atmosférica, debido a corrientes parásitas, por grietas, por picaduras, por esfuerzos inducidos entre otras. Para ello utiliza distintos modelos numéricos y tecnológicos que permiten una aproximación más exacta: método de elementos finitos (FEM), método de fronteras (BEM), ánodos de sacrificio disueltos con el tiempo, depósito superficial y disolución con malla móvil entre otros. . (ver figura 14)

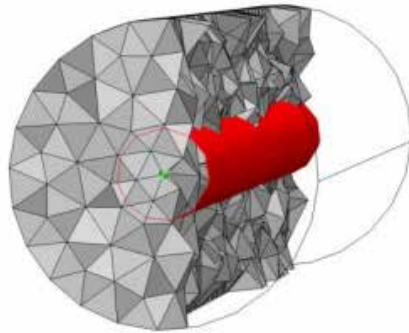


Figura 14. Mallado FEM mostrando los bordes de los ánodos de sacrificio con su respectivo radio virtual representado en rojo.

Fuente: Cai A. y Kan D. (2015).

Ahora bien la forma de configurar un modelo electroquímico consta de una sintaxis clara en el software lo cual permite organizar las variables a utilizar:

- Electrolito (transporte de carga iónica).
- Electrodo (transporte de carga de electrones)
- La interfaz entre el electrodo y el electrolito.
 - a) Superficie plana o electrodo poroso
 - b) Reacciones de electrodos.
- El transporte de masa.
- Transferencia de momento.

- Transferencia de calor, Software de dinámica de fluidos computacionales CFD, Modelos electromagnéticos EM, estructuras, entre otros.

4.2 Fase II. Modelar las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico mediante una herramienta computacional.

En esta fase se presenta el modelado tridimensional de las juntas soldadas y la selección del software computacional a utilizar. En diseño de las juntas se hará considerando: los datos recolectados respecto al proceso real de la soldadura, sistemas de unidades a utilizar, creación del modelado 3D, propiedades de los materiales, condiciones de frontera y mallado.

4.2.1 Planteamiento del modelado.

Para realizar la simulación de corrosión en COMSOL Multiphysics requiere que se elabore un modelo 3D de la junta incluyendo el material de trabajo. El modelo puede ser elaborado en el mismo COMSOL Multiphysics o en un programa externo para luego ser importado; debido a la complejidad del modelo las tres juntas a simular son dibujadas en el software Solidworks 2018. Se realizarán dos probetas para ensayos de tracción y doblado, las juntas soldadas se harán mediante el proceso de SMAW.

4.2.2 Modelado 3D

El modelado de una pieza consiste en la suma de los elementos 2D que genera una probeta en 3D. Dichos elementos están conformados por aristas, vértices y superficies. Todas las geometrías son elaboradas en un software CAD. Primero se realiza el croquis es 2D de las probetas de doblado y tracción cada una con sus parámetros preestablecidos, para luego emplear la plataforma de diseño en 3D en la cual se utilizan operaciones croquizadas y operaciones aplicadas, tales como; extrusión, extrusión de corte, barrido, revolución, chaflanes, redondeos, etc. Después estas serán usadas para hacer el análisis de deformación, esfuerzo y el ensayo de corrosión.

El ensamble se compone por una junta soldada de una probeta que es dividida por la mitad, con una preparación de la normativa AWS D1.1 . (Ver figura 15) con un

ángulo de ranura de 60 grados de apertura, 3.2mm de longitud de cara y abertura de raíz de 3.2mm. Haciendo uso de la herramienta de relación de posición se pone cada parte de la probeta en su lugar para llevar a cabo la soldadura. La soldadura se modela con tres pasadas una pasada entre la longitud de cara y la apertura de raíz y las otras dos pasadas en el ángulo de ranura como muestra la figura 13. Al modelo de la junta soldada con la zona afectada por el calor y el cordón de soldadura se le aplicaran los parámetros de los materiales, restricciones y cargas para hacer la simulación

ASTM A131 GRADO EH32		
Térmicas	Mecánicas	Resistencia
Conductividad Térmica: 0,0006366 —————	Comportamiento Isotrópico Módulo de Young: 31180 ksi	Límite elástico: 456,9 ksi
Calor específico: 0,024 —	Radio de Poisson: 0,29 Módulo Shear: 72520 ksi	Resistencia a la tracción: 746,9 ksi
Coef. De expansión term. _____	Densidad: 0,282 —	

Figura 15. Propiedades físicas del acero ASTM A131 cargadas en el software.

Fuente: Matmatch GmbH C.A. (2020)

Para realizar el modelado de las probetas de tracción vamos a tomar en cuenta tres condiciones importantes de 250mm de largo, 10 mm de espesor y 40mm de ancho respectivamente. Además, se hace la caracterización del material a las probetas para obtener las propiedades mecánicas con la normativa del ensayo. . (Ver figuras de la 17 a la 19)

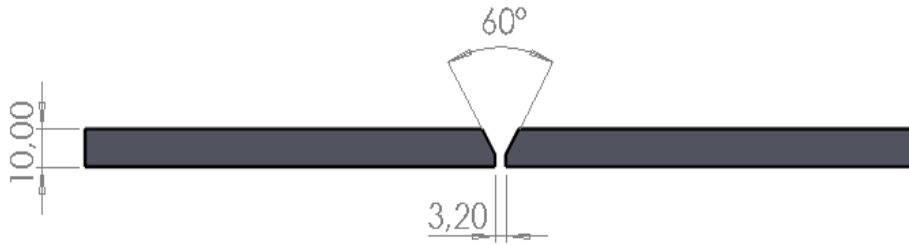


Figura 16. Bisel y espaciamento de la probeta de doblado utilizado para la soldadura en V (Unidades en mm) utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)



Figura 17. Vista superior de la probeta de doblado utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

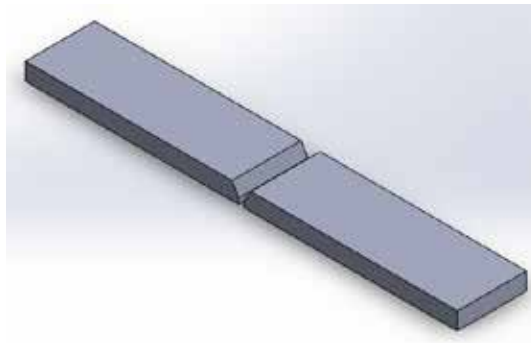


Figura 18. Esquema 3D de la probeta de doblado utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

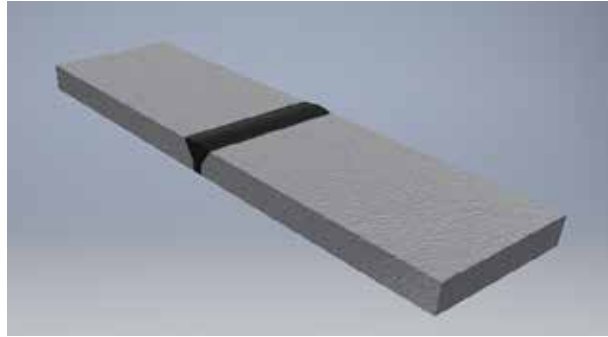


Figura 19. Esquema 3D de la probeta de doblado con el cordón de soldadura utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Para realizar el modelado de las probetas de tracción vamos a tomar en cuenta 3 condiciones importantes de 250mm de largo, 10 mm de espesor y 50mm de ancho respectivamente. Además, se hace la caracterización del material a las probetas para obtener las propiedades mecánicas con la normativa del ensayo. . (Ver figuras de la 20 a la 22)

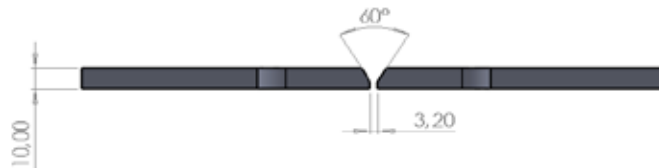


Figura 20. Bisel y espaciamento de probeta de tracción utilizado para la soldadura en V (Unidades en mm) utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

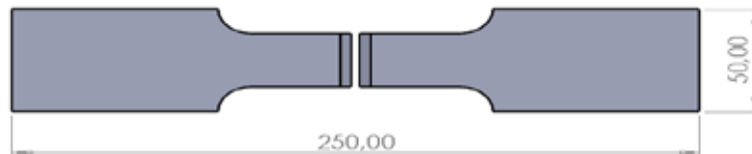


Figura 21. Vista superior de la probeta de tracción utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

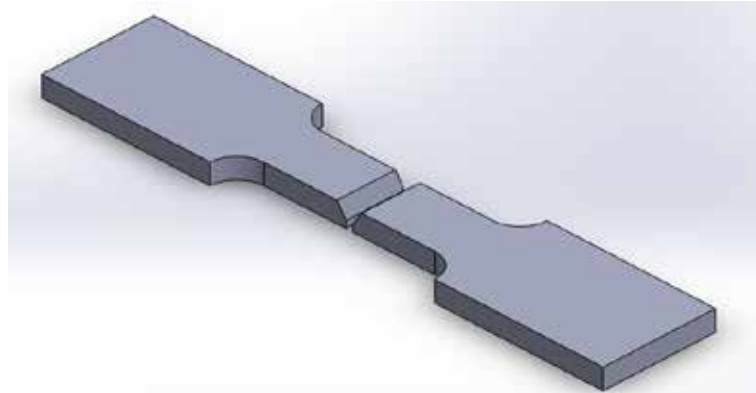


Figura 22. Esquema 3D de la probeta de tracción utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

4.2.3. Cargas y sujeciones.

Para indicar los parámetros del ensayo en el software controlador del equipo. La carga se estableció en 98000 N tomando en cuenta la carga mínima recomendada por la normativa AWS D1.1.

4.2.3.1. Ensayo de Tensión.

Se establecieron restricciones de movimiento que permitieron fijar la pieza de un extremo como se muestra en la figura 23. (Ver tablas 4, 5 y figura 24)

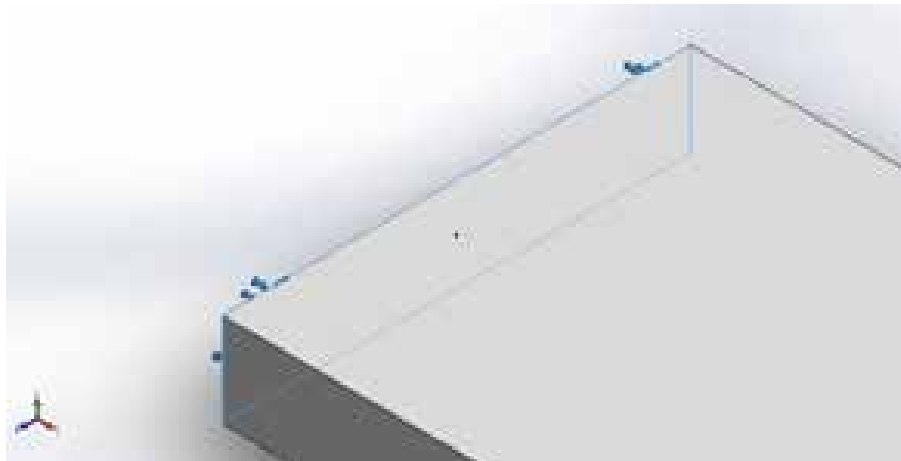


Figura 23. Sujeción realizada a la probeta de tracción utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Tabla 4. Fuerzas resultantes generadas por SolidWorks.

Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	97991.9	-0.539246	2.32446	97991.9

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Tabla 5. Información de malla generada por SolidWorks.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño de elementos	4.6824 mm
Tolerancia	0.23412 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	14222
Número total de elementos	8675
Cociente máximo de aspecto	3,1289
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	100

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

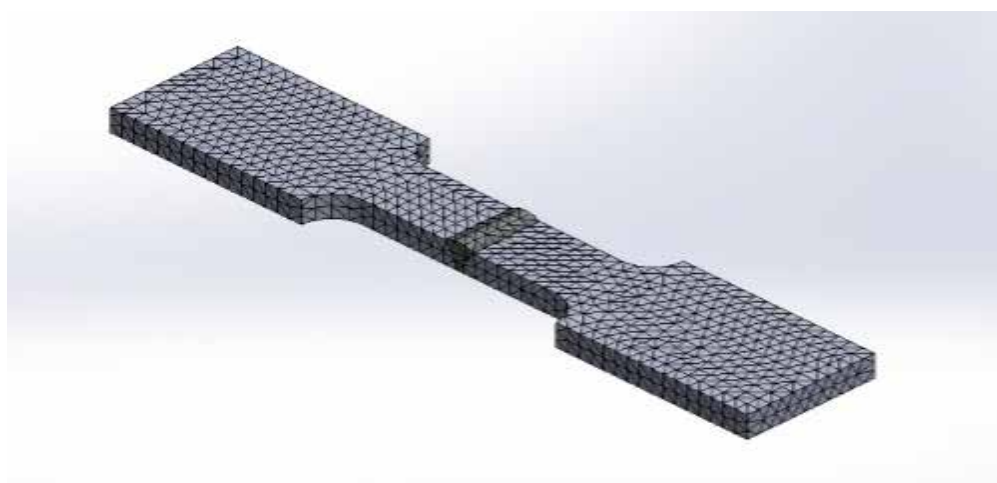


Figura 24. Mallado de la probeta sometida a tracción utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Esfuerzos alcanzados.

En el estudio del ensayo a tensión, la ruptura de la probeta se realizó fuera del cordón de soldadura y el esfuerzo máximo de tensión alcanzado fue de 558.475 MPa fue mayor al del metal base ASTM A131 grado EH32 de 315 MPa. . (Ver figura 25 y 26)

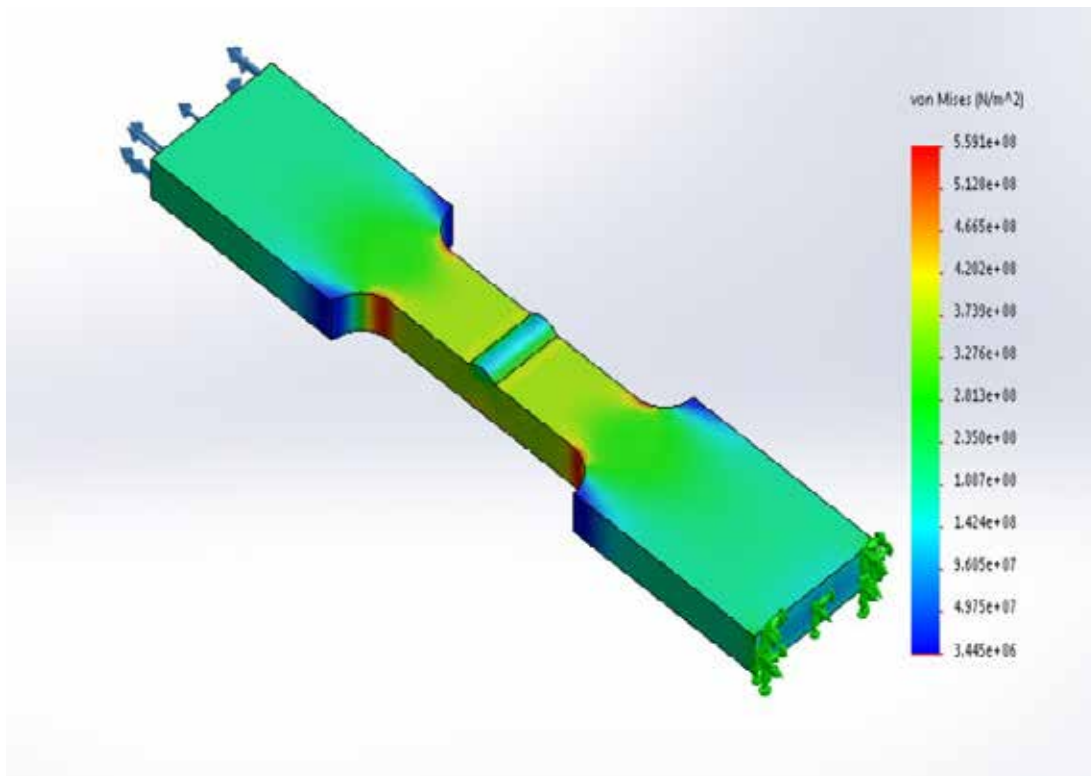


Figura 25. Ensayo de tensión (Tensión de von Mises) utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

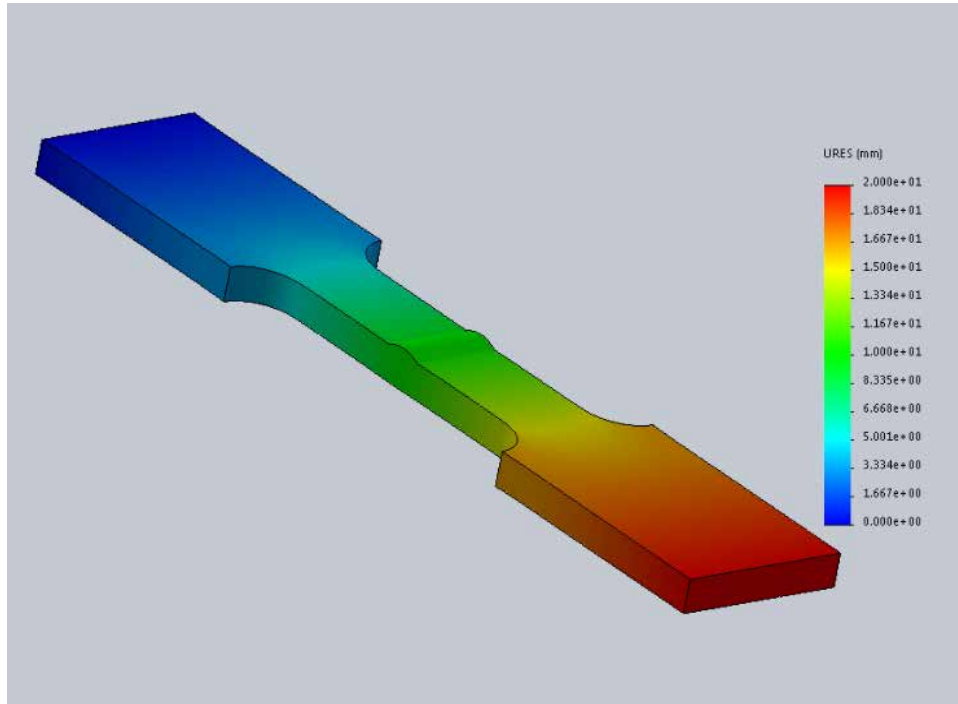


Figura 26. Deformación unitaria equivalente utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

4.2.3.2. Ensayo de Doblado imiento que permitieron fijar la pieza de un extremo como se muestra en la figura 23, en este caso se trabajó con una carga de 94000N.(ver figuras 27 y 28, tablas 6 y 7)

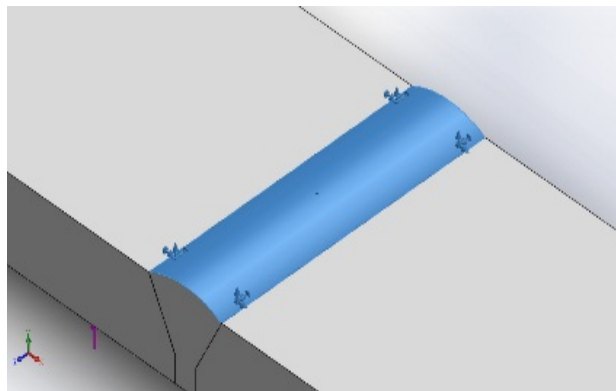


Figura 27. Sujeción realizada a la probeta de tracción.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Tabla 6. Fuerzas resultantes generadas por SolidWorks.

Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	0.141113	-94002	-0.177124	94002

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Tabla 7. Información de malla generada por SolidWorks.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño de elementos	4.6824 mm
Tolerancia	0.23412 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	12912
Número total de elementos	7773
Cociente máximo de aspecto	3,6161
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	100

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

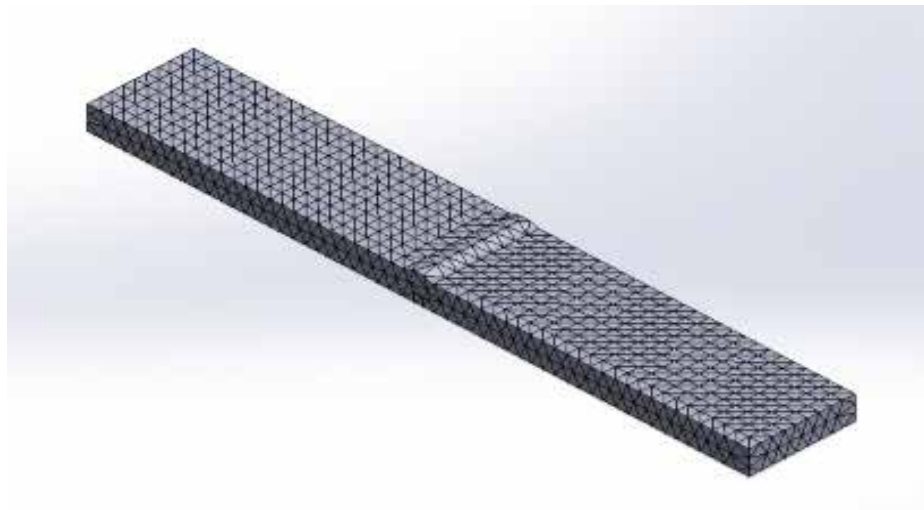


Figura 28. Mallado de la probeta sometida a tracción utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

En el caso de la muestra sometida al ensayo de doblado, fue aprobada ya que no hubo grietas en la probeta. Por consiguiente, no exceden el máximo tamaño permitido individual de 3mm, ni la suma de ellas es mayor a 10mm. (Ver figura 29 y 30)

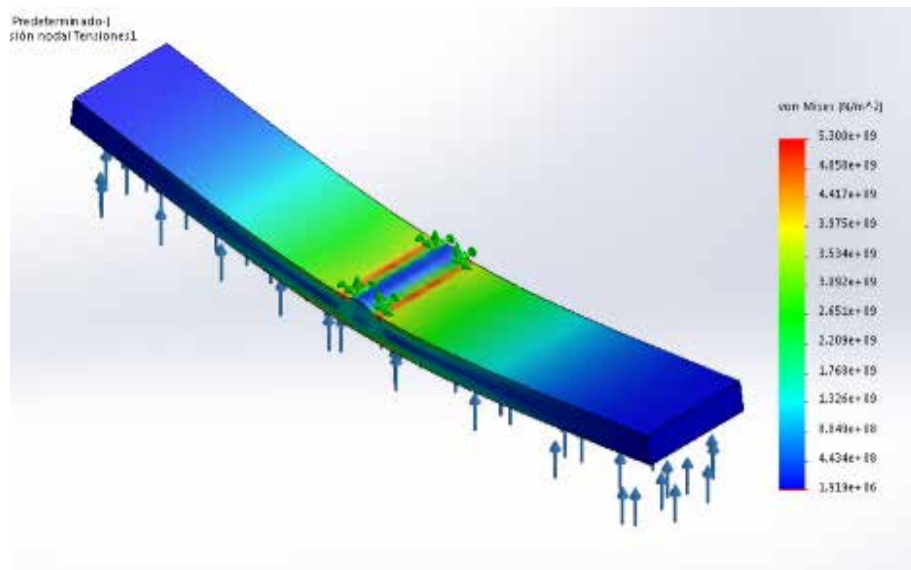


Figura 29. Ensayo de doblado (Tensión de von Mises) utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

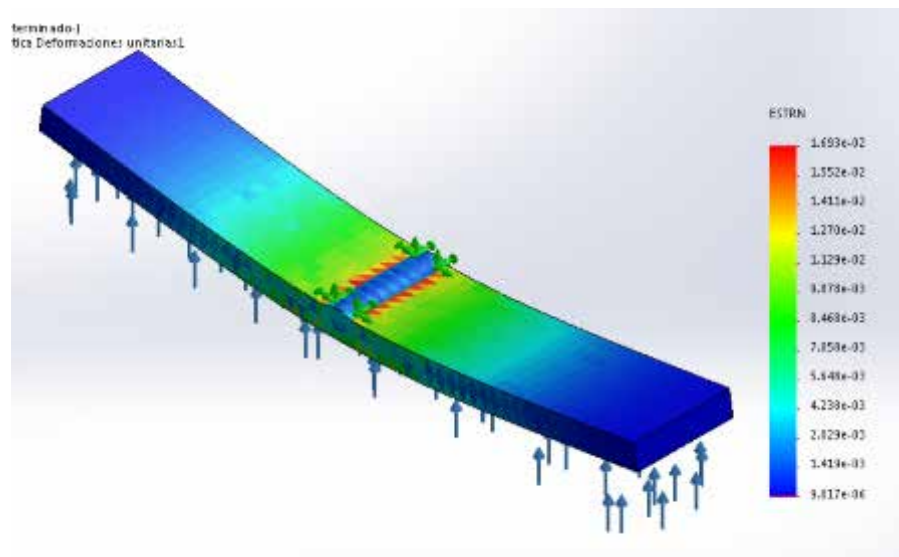


Figura 30. Deformación unitaria equivalente utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

4.3 Realizar la simulación de la corrosión mediante una herramienta computacional a las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico.

4.3.1. Evaluación de parámetros previos.

Una vez realizados los ensayos de tracción y doblado a las probetas, se procede a realizar la simulación del proceso corrosivo tomando en cuenta algunas consideraciones, en primer lugar es esencial conocer la característica del ataque atmosférico al que se someten los buques y barcos reposados en las costas venezolanas ya que en ellos se basaran los estudios desarrollados a continuación, en la tabla 11 se muestra la información recopilada de distintas páginas meteorológicas sobre la temperatura, la humedad relativa, el tiempo de humectación, la velocidad del dióxido de azufre y la velocidad de los electrolitos de cloro.

Mes	Temp(°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 ($\frac{mg}{m^2 \cdot d}$)	CL ($\frac{mg}{m^2 \cdot d}$)
Enero	26	81	0,04965753	0	42
Febrero	25,5	82	0,01426940	2,136	22
Marzo	26,5	83,5	0,00753424	2,136	22
Abril	26,5	84	0,01038812	2,136	22
Mayo	27	84,5	0,02773972	0,417	8
Junio	27	83,7	0,04794520	0,417	8
Julio	27,5	83	0,05479452	0,417	8
Agosto	27	82,5	0,05753424	0,67	14
Septiembre	28	82	0,05445205	0,67	14
Octubre	28	82,2	0,06324200	2,681	24
Noviembre	27	82,4	0,05981735	1,721	46
Diciembre	26,5	82,2	0,05331050	0,191	47

Figura 31. Datos recopilados para la ciudad de Puerto Cabello.

Fuente: D'Santiago B. (2019).

Siguiendo los parámetros de la normativa ASTM B 117-11 y las variables necesarias para generar el ambiente marino en Comsol Multiphysics se obtuvo el promedio de los siguientes valores para la ciudad de Puerto Cabello.



Adicionalmente fue necesario obtener el valor conductividad eléctrica del agua de mar para generar el flujo de electrones en el proceso electrolito, el cual es de 5 S/m, en este mismo orden de ideas en el cuadro 2 se muestra la composición de del agua de mar.

Cuadro 2. Composición iónica principal del agua de mar (mg/L)

COMPONENTE DISUELTO	AGUA DE MAR
Chloride (Cl ⁻)	18980
Sodium (Na ⁺)	10556
Sulfate (SO ₄ ²⁻)	2649
Magnesium (Mg ²⁺)	1262
Calcium (Ca ²⁺)	400
Potassium (K ⁺)	380
Bicarbonate(HCO ₃ ⁻)	140
Strontium (Sr ²⁺)	13
Bromide (Br ⁻)	65
Borate (BO ₃ ³⁻)	26
Fluoride (F ⁻)	1
Silicate (SiO ₃ ²⁻)	1
Iodide (I ⁻)	<1
Others	0
Total	34483

Fuente: Lenntech USA LLC (2019).

4.3.2. Simulación en Comsol Multiphysics.

Se utilizó Comsol Multiphysics en su versión 5.4. En el cual se implementó el módulo de electroquímica que permite realizar distintos estudios siendo la interfaz de distribución de corriente primaria la escogida para representar el proceso corrosivo al que están sometidas las probetas, dicha interfaz define el transporte de iones cargados en un electrolito de composición uniforme, así como la conducción de corriente en electrodos utilizando la ley de Ohm en combinación con un equilibrio de carga. Utilizando esta interfaz física para estimar las pérdidas óhmicas en modelos simplificados de células electroquímicas, donde los sobre potenciales de las reacciones de los electrodos son pequeños en comparación con las caídas de tensión óhmica en el electrolito y los electrodos.

4.3.2.1. Diseño del ambiente marino.

Se diseñó el ambiente marino utilizando una cama de agua salina en la que se sumergieron las probetas, para dichos espacios se cargaron al sistema las variables promedio recopiladas de la figura 31 y el valor de conductividad eléctrica necesarias que recrear condiciones marinas. . (ver figura 32 y 33)

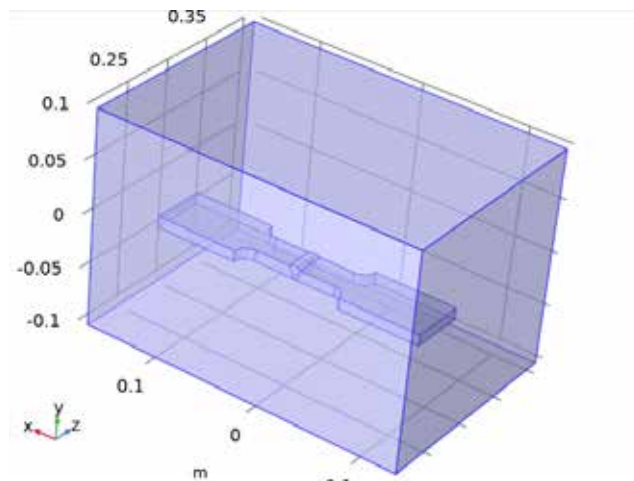


Figura 32. Representación del agua de mar para la probeta de tracción utilizando Comsol Multiphysics v. 5.4

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

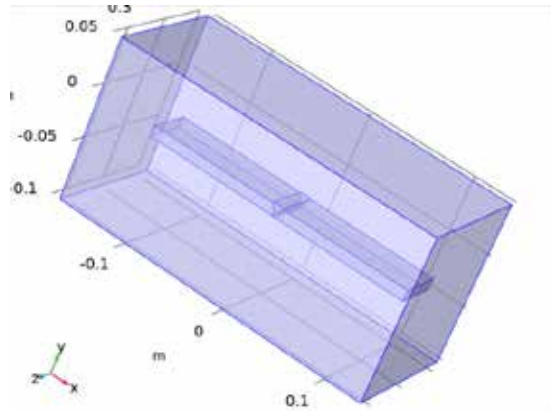


Figura 33. Representación del agua de mar para la probeta de doblado utilizando Comsol Multiphysics v. 5.4

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

En la configuración de Comsol, para construir el ambiente marino al que se someten las probetas, la conductividad del agua de mar se establece en un valor fijo dependiente de la temperatura y la salinidad, para ello utilizando los datos de la tabla 10, se obtuvo la temperatura promedio de las costas de puerto cabello y la salinidad, para utilizar una conductividad de 5 S/m.

Comsol Multiphysics permite crear una superficie que contenga las probetas, y su herramienta de particiones, sustrae el contenido interno de la superficie para crear un dominio de volumen cerrado que con el número correcto de fronteras y cargando los parámetros del agua de mar generara las condiciones marinas necesitadas.

4.3.2.2. Superficie anódica.

La mayoría de embarcaciones no solo en Venezuela sino en el mundo cuentan con protecciones catódicas, las cuales actúan como ánodos de sacrificio para prevenir la corrosión exponencial del buque, por lo que fue de suma importancia definir cuál sería el ánodo en la simulación que iniciaría el proceso corrosivo al comenzar con la electrolisis. Siguiendo además con los parámetros descritos en la normativa ASTM B117-11 (ensayo de niebla salina), el mismo no describe la utilización de ánodos de sacrificio u otra superficie corrosible en el proceso por lo cual tomando en

consideración la electronegatividad. (ver figura 34) de los elementos que componen las juntas soldadas tanto para la muestra de tracción y doblado se escogieron como superficies anódicas las partes del acero ASTM A131 para proteger la soldadura realizada intentando recrear lo normalmente ocurrido en condiciones reales.

ELEMENTO	POTENCIAL
MAGNESIO (Mg)	- 2,38 MÁS ELECTRONEGATIVO
ALUMINIO (Al)	- 1,68
MANGANESO (Mn)	- 1,18
ZINC (Zn)	- 0,76
CROMO (Cr)	- 0,74
HIERRO (Fe)	- 0,44
COBALTO (Co)	- 0,28
NÍQUEL (Ni)	- 0,23
PLOMO (Pb)	- 0,12
HIDRÓGENO (H)	0,00 VALOR DE REFERENCIA
COBRE (Cu)	+ 0,34
PLATA (Ag)	+ 0,80
ORO (Au)	+ 1,50 MAS ELECTROPOSITIVO

Figura 34. Electronegatividad de algunos elementos.

Fuente: Lenntech USA LLC (2019).

En las figuras 35 y 36 se muestra tanto para la probeta a tracción como para la de doblado la selección y carga de valores anódicos para su estudio.

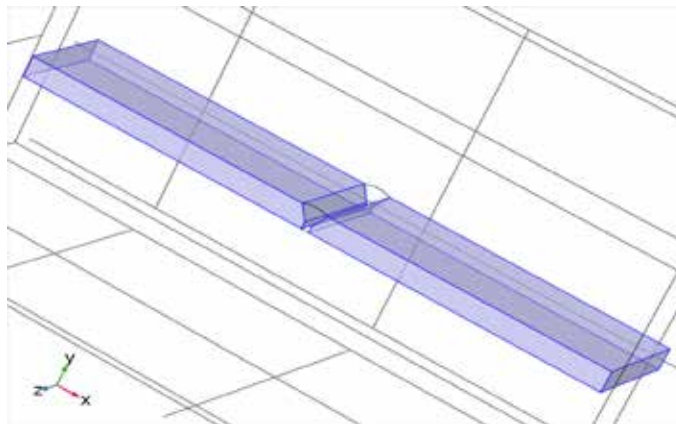


Figura 35. Representación de la superficie anódica en el programa Comsol Multiphysics para la probeta de doblado.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

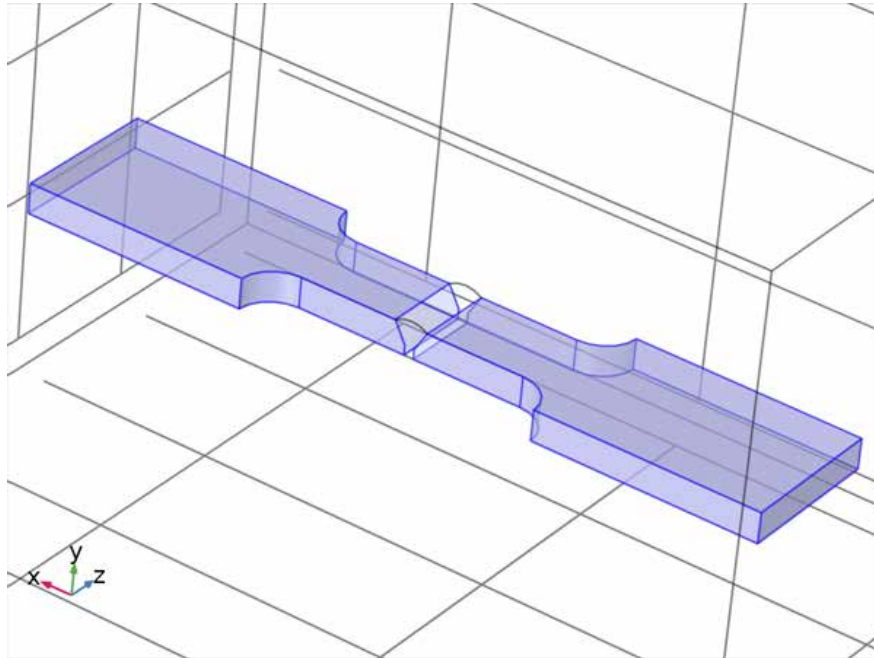


Figura 36. Representación de la superficie anódica en el programa Comsol Multiphysics para la probeta de tracción.
Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Y la configuración general utilizada en el programa fue la mostrada en la tabla 8 y 9.

Tabla 8. Descripción de la configuración utilizada para cargar los valores de la superficie anódica en el programa Comsol Multiphysics.

Descripción	Valor
Solve para variables de concentración de superficie	Encendido
Resistencia de la película	Sin resistencia de película
Amplitud de perturbación	0[V]
Condición límite	Electric potential
Potencial eléctrico externo	0[V]
Potencial de equilibrio	-1.05 [V]
Temperatura	300.3 [K]

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Tabla 9. Variables asignadas por el programa para definir la superficie anódica.

Nombre COMSOL	Unidad	Descripción variable
cd.Ect	V	Potencial eléctrico
cd.nil	A/m ²	Densidad de corriente electrolítica interna
cd.phisext0	V	Potencial eléctrico externo
cd.dvolfactor	1	Factor de volumen diferencial
cd.Area_eebii1	m ²	Área
cd.itotavg_eebii1	A/m ²	Densidad de corriente promedio total de la interfaz
cd.Temp	K	Temperatura
cd.Evsref	V	Potencial de electrodo versus referencia adyacente
cd.Eeq	V	Potencial de equilibrio
cd.nreac	1	Numero de reacciones
cd.itot	A/m ²	Interfaz total densidad de corriente
cd.rhos	kg/m ³	Densidad
cd.Ms	kg/mol	Masa molar

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

4.3.2.3. Superficie catódica.

Para la superficie catódica se asignó al cordón de soldadura el cual no forma parte de una clasificación exacta de algún material sino que por su naturaleza de electrodo, en este caso E-6011 y E-7018, siguiendo lo descrito por el fabricante INDURA (el fabricante de los electrodos utilizados para la soldadura SMAW), se le estableció una densidad de corriente electrolítica interna de $-0.1[A/m^2]$. (Ver figura 38 y tabla 10)

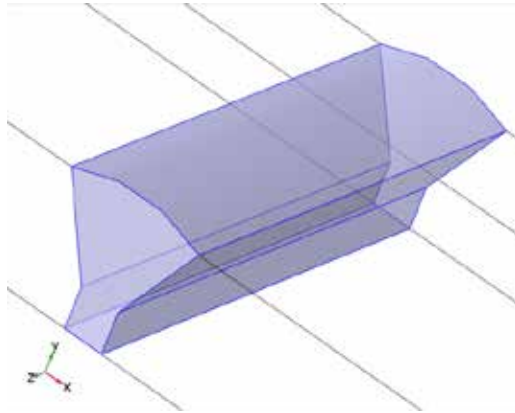


Figura 37. Representación de la superficie catódica en el programa Comsol Multiphysics para la probeta de doblado y tracción.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Tabla 10. Variables asignadas por el programa para definir la superficie catódica.

Nombre COMSOL	Unidad	Descripción variable
cd.nil	A/m ²	Densidad de corriente electrolítica interna
cd.nil_icd1	A/m ²	Densidad de corriente electrolítica interna

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

4.3.2.4. Selección del estudio.

El estudio del efecto de la corrosión en las juntas soldadas depende del tiempo de exposición, para hacer este análisis seleccionamos un estudio dependiente del tiempo en el software COMSOL Multiphysics. Ya que al incrementar el tiempo de exposición se observa como incrementa la tasa de corrosión y como afecta a lugares sectorizados que se pueden ver en la Figura 33.

Se definieron los lapsos de tiempo usando como base los tiempos de exposición del ensayo de niebla salina que se rige por la normativa ASTM B117-11, tomando en cuenta que 24h de ensayo es equivalente entre 20 y 40 días bajo el mar. En COMSOL Multiphysics se creó una cama de agua que simula un ambiente sub marino y se tomó intervalos de tiempo de 40, 80 y 120 día.

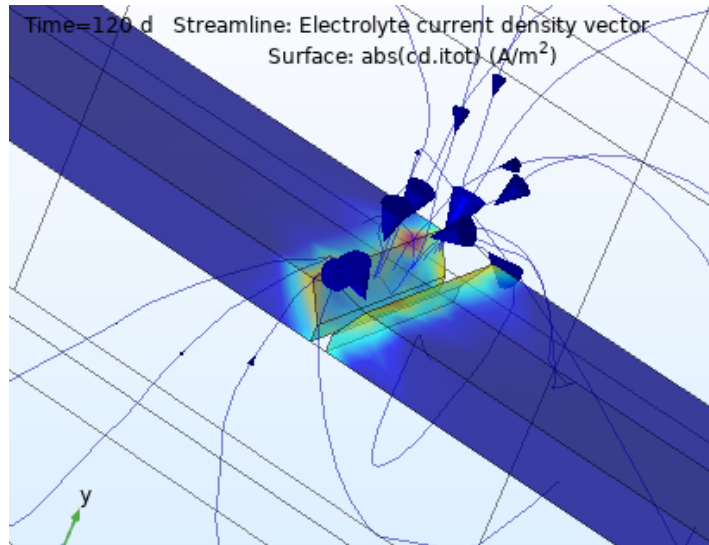


Figura 38. Representación de la superficie afectada por la corrosión utilizando Comsol Multiphysics v. 5.4.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

4.3.2.5. Mallado.

La definición del mallado en la simulación de la corrosión viene dada por la herramienta Mesh en el software COMSOL Multiphysics, define la malla con datos que proporciona el estudio físico seleccionado. (Ver tabla 11 y 12) En cada ensayo arrojo valores diferente por la diferencia en la geometría del modelo de ambiente submarino. (Ver figura 39 y 40)

Tabla 11. Variables asignadas para el mallado de la probeta de tracción.

Descripción	Valor
Calidad mínima del elemento	0.2008
Calidad media del elemento	0.6508
Tetraedro	10360
Triangulo	1576
Elemento de borde	260

Elemento de vértice	44
---------------------	----

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

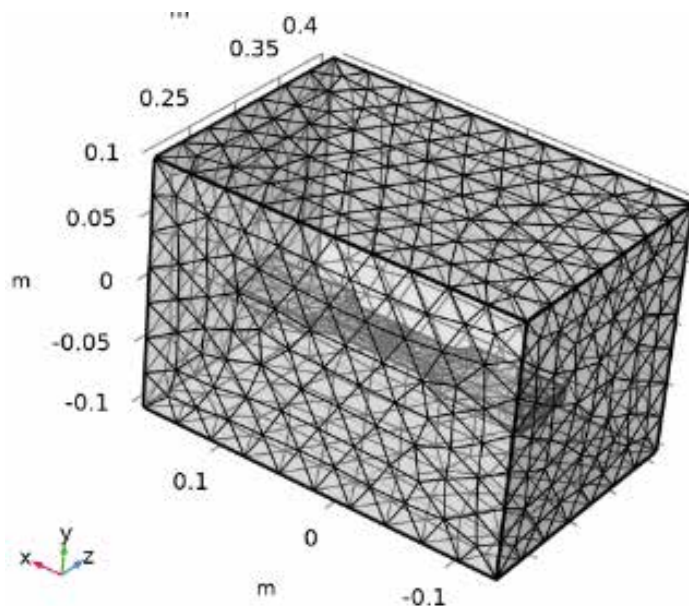


Figura 39. Representación del mallado en la probeta de tracción utilizando Comsol Multiphysics v. 5.4.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Tabla 12. Variables asignadas para el mallado de la probeta de doblado

Descripción	Valor
Calidad mínima del elemento	0.2113
Calidad media del elemento	0.6516
Tetraedro	5185
Triangulo	1026
Elemento de borde	200
Elemento de vértice	28

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

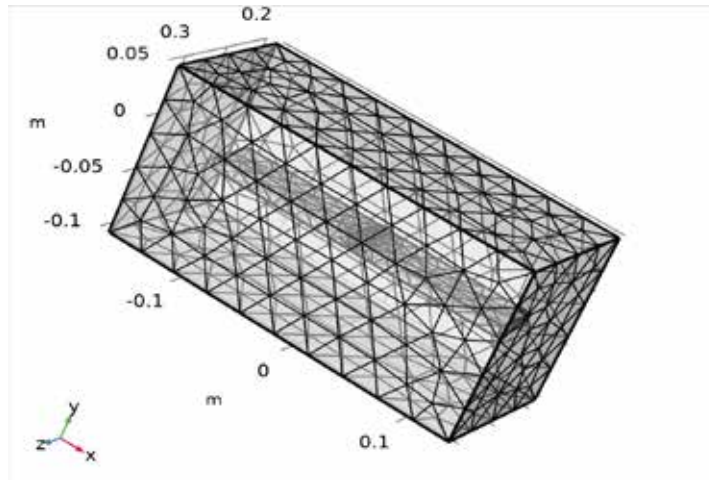


Figura 40. Representación del mallado en la probeta de doblado.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

4.3.3. Resultados de la simulación.

Comsol Multiphysics presenta dos resultados principales, la distribución del potencial electrolítico en la zona estudiada y la densidad del vector de corriente electrolítica, lo cuales se representan en las figuras de la 41 a la 44.

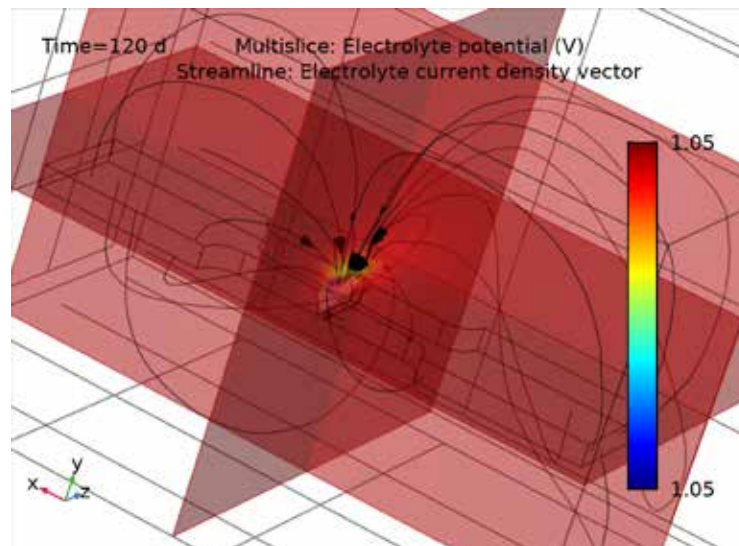


Figura 41. Distribución del potencial electrolítico en la probeta de tracción. Caso de estudio, 120 días utilizando Comsol Multiphysics v. 5.4.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

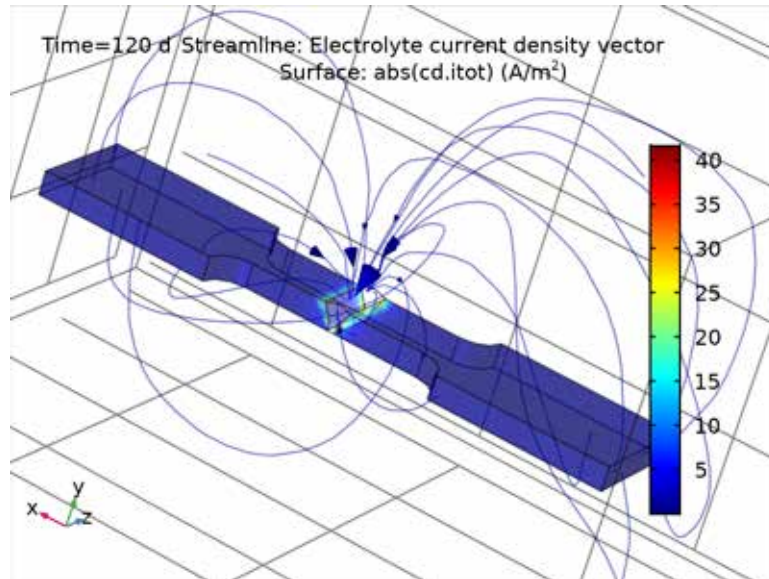


Figura 42. Distribución de la densidad del vector de corriente electrolítica en la probeta de tracción. Caso de estudio, 120 días utilizando Comsol Multiphysics v. 5.4.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

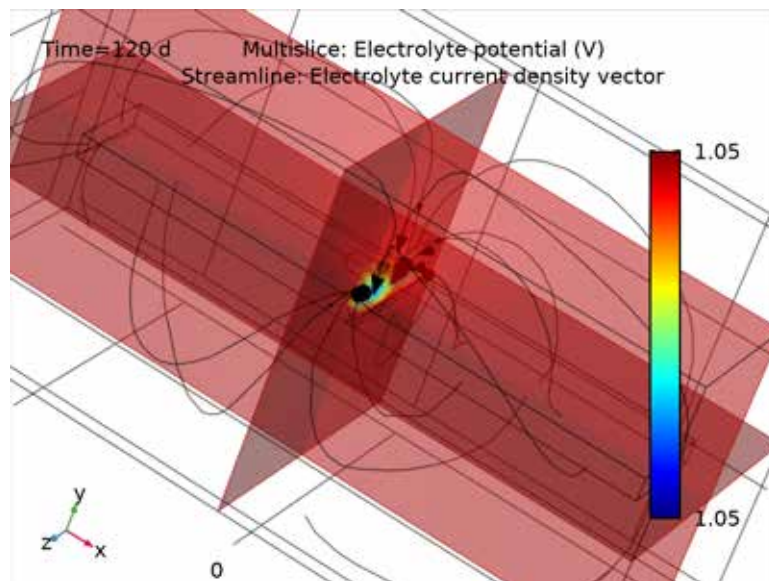


Figura 43. Distribución del potencial electrolítico en la probeta de doblado. Caso de estudio, 120 días utilizando Comsol Multiphysics v. 5.4.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

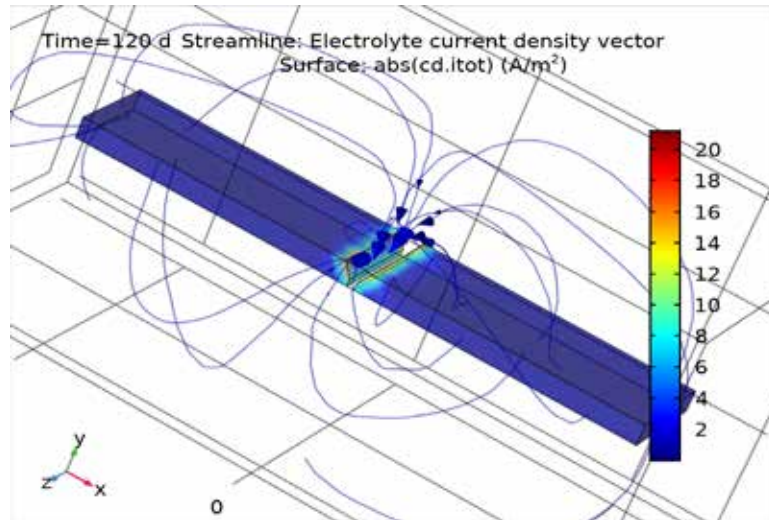


Figura 44. Distribución de la densidad del vector de corriente electrolítica en la probeta de doblado. Caso de estudio, 120 días utilizando Comsol Multiphysics v. 5.4.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

4.3.3.1. Cálculo de la velocidad de corrosión.

Para el cálculo de la velocidad de corrosión se utilizó la ley de Faraday ya que permite calcular la masa perdida en el electrodo de acuerdo a la ecuación 1.

$$\text{---} \quad (1)$$

Donde:

I_{cor} = corriente de corrosión (A/cm²)

t = tiempo (s)

M = masa molar del metal del electrodo (g/mol)

n = número de electrones transferidos

F = constante de Faraday (96500 C/mol)

Considerando además que la velocidad de corrosión se define como la variación de masa (m) en gramos, por unidad de tiempo en segundos y área expuesta en centímetros cúbicos al medio corrosivo de acuerdo a la ecuación 2.

$$\text{---} \quad (2)$$

Reemplazando la ecuación 1 en la ecuación 2, se obtiene la ecuación 3.

$$\text{---} \quad (3)$$

Ahora considerando que I_{cor}/A , se puede definir como i_{cor} , nos genera la ecuación 4.

$$\text{---} \quad (4)$$

Dividiendo ambos lados de la ecuación 4 por la densidad del metal del electrodo expresado en g/cm^3 se obtiene la ecuación 5.

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (5)$$

Reestructurando la ecuación 5 y definiendo la velocidad de corrosión (CR) como $CR = V_{cor}/d$ se obtiene.

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (6)$$

Utilizando en la ecuación 6 el valor contante de Faraday e introduciendo la constante K1 para el ajuste de las unidades, finalmente se obtiene la ecuación 7.

$$\text{---} \quad (\text{---}) \quad (7)$$

Donde:

$K1 = 3,28 \text{ mm mol/A cm año}$ (Normativa ASTM G102-89, 1999 Tabla 2. Pág. 419).

$M = \text{peso atómico del hierro}$ ($Fe = 55,85 \text{ g/mol}$).

$n = \text{número de electrones transferidos}$ (2 electrones).

$d = \text{densidad del hierro}$ ($7,88 \text{ g/cm}^3$)

$i_{cor} = \text{densidad de corriente electrolítica}$ ($0,25 \text{ A/m}^2$ doblado), ($0,5 \text{ A/m}^2$ tracción)
obtenidas de los resultados de la simulación en Comsol Multiphysics.

La ecuación 7 se puede verificar en la normativa ASTM G102-89 “Práctica estándar para el cálculo de tasas de corrosión e información relacionada a las mediciones electroquímicas”

$$\frac{W}{A \cdot t} = \frac{Q}{n \cdot F} \cdot \frac{M}{W} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{t}$$

4.3.3.2. Ensayo de tracción luego del proceso corrosivo.

Después del ensayo en ambiente marino se calculó la velocidad de corrosión del material estándar en mm por año usando la Ley de Faraday. Teniendo en cuenta este parámetro se hizo una modificación en los planos del software CAD para observar el comportamiento de las probetas después de la corrosión simulada en Comsol Multiphysics. (Ver tablas 13 y 14)

La fuerza aplicada en el ensayo fue la misma de 98000 N tomando en cuenta la carga mínima recomendada por la normativa AWS D1.1. Las condiciones del material también se mantuvieron acero naval ASTM A131 grado EH32 para el metal base y para el cordón las del electrodo 7018.

Tabla 13. Fuerzas resultantes.

Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	97991.9	-0.539246	2.32446	97991.9

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Tabla 14. Información del mallado.

Número total de nodos	14222
Número total de elementos	8675
Cociente máximo de aspecto	3.1289
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	100
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

En el ensayo a tensión después de la corrosión, la ruptura de la probeta se realizó fuera del cordón de soldadura donde se presentaron las mayores tensiones y el esfuerzo máximo de tensión alcanzado fue de 530.6 MPa siendo este menor al obtenido antes del ensayo de corrosión que fue de 558.475 MPa. (Ver figura 45)

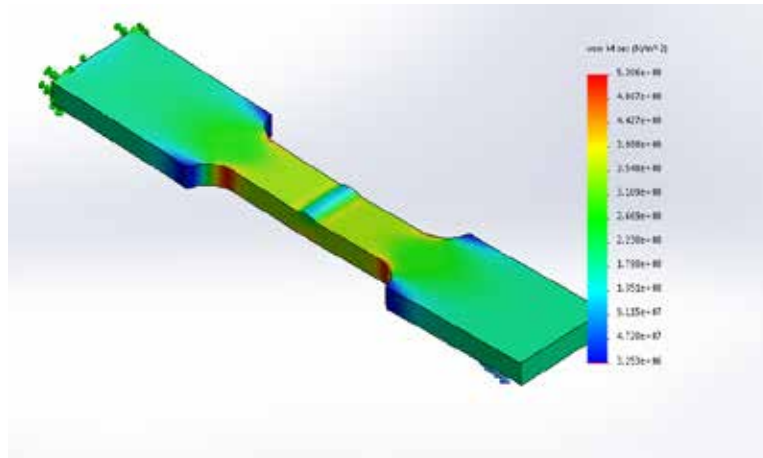


Figura 45. Ensayo de tensión después de la corrosión en Comsol Multiphysics (Tensión de von Mises) utilizando SolidWorks.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

4.4 Evaluar los resultados obtenidos de la herramienta computacional.

4.4.1. Evaluación de las propiedades mecánicas antes del ensayo de corrosión.

En base los resultados obtenidos de los ensayos de tracción antes del proceso corrosivo se recopila la siguiente información del material soldado. (Ver tabla 15)

Tabla 15. Valores característicos de las probetas soldadas.

PROPIEDADES MECÁNICAS	VALORES
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	368,55
Esfuerzo de tracción (MPa)	558,475
Esfuerzo de Ruptura (MPa)	474,703
Elongación e(%)	20

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

Como se evidencia en la tabla 16, el valor de elongación obtenido anteriormente es el característico del material ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura SMAW, pero en procesos industriales dicho valor puede variar dependiendo de la calidad de la soldadura utilizada. En cuanto a los cálculos de resiliencia y tenacidad para las probetas se utilizaron las siguientes ecuaciones.

$$- \tag{8}$$

$$\text{---} \tag{9}$$

Donde:

So = Esfuerzo de fluencia/ingenieril

eo = Elongación del 0,2%

ef = Elongación final

Su = esfuerzo de tracción/último

Sustituyendo los valores en la ecuación 8. Se calcula el valor de resiliencia.

$$\text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 9. Se calcula el valor de tenacidad.

$$\text{---} \text{---} \text{---}$$

Tabla 16. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas.

PROPIEDADES MECÁNICAS	VALORES
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	368,55
Esfuerzo de tracción (MPa)	558,475
Esfuerzo de Ruptura (MPa)	474,703
Elongación e(%)	20
Resiliencia —	
Tenacidad —	92702.5

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

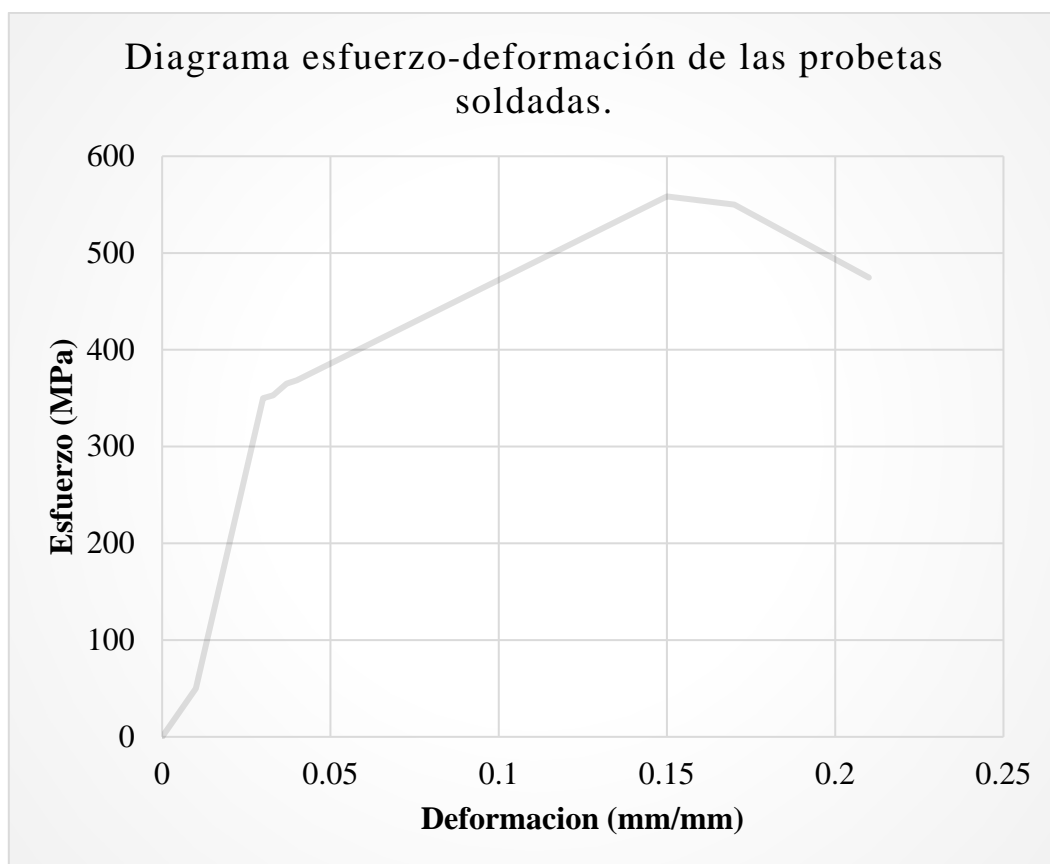


Gráfico 1. Diagrama esfuerzo vs deformación de las probetas soldadas.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020)

4.4.2. Evaluación de las propiedades mecánicas después del ensayo de corrosión.

En base los resultados obtenidos de los ensayos de tracción después del proceso corrosivo se recopila la siguiente información del material soldado. . (ver tabla 17 y gráfico 2)

Tabla 17. Valores característicos de las probetas soldadas.

PROPIEDADES MECÁNICAS	VALORES
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	324,324
Esfuerzo de tracción (MPa)	530,6
Esfuerzo de Ruptura (MPa)	408,244
e(%)	22

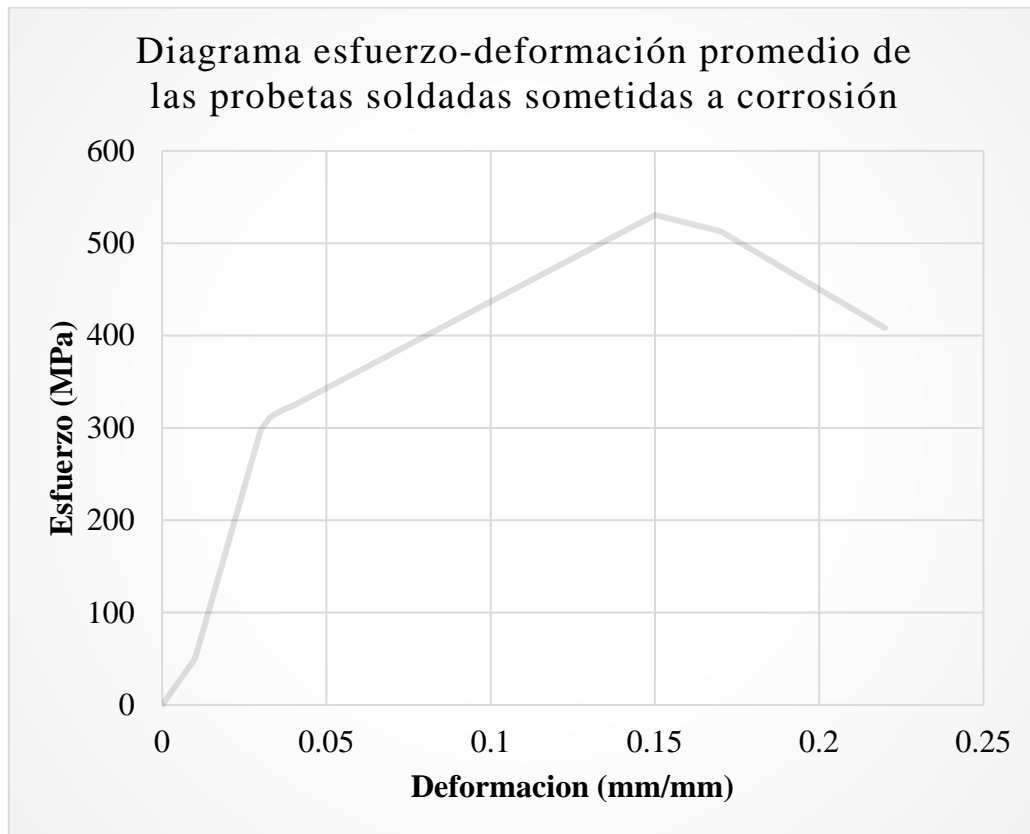


Gráfico 2. Diagrama esfuerzo vs deformación de las probetas soldadas después del ensayo de corrosión.

Fuente: Ibarra E. Scioscia L. (2020).

4.4.3. Análisis de resultados.

El ataque electroquímico del agua marina genera la reducción de área, la cual está asociada al uso del material, por lo que podemos concluir que el material, en términos generales no varía su propiedad de ductilidad. El porcentaje de área que disminuyó fue mínimo, ya que los primeros días el comportamiento del material fueron afectadas las propiedades mecánicas, pero para los periodos siguientes los valores se mantuvieron casi igual, a lo que se puede atribuir que el material formó una capa de óxido protectora, la cual rebaja el efecto corrosivo del ambiente.

Los esfuerzos de fluencia, esfuerzo máximo y esfuerzo de ruptura se vieron afectados después de someterse las probetas a la corrosión lo podemos notar en la tabla 23, donde luego de un lapso de 120 días algunas propiedades en la probeta a tracción, desmejoraron entre 5% y 15% sus valores. El efecto de la corrosión en las propiedades mecánicas es notorio dado a que las propiedades mecánicas y los esfuerzos tienen una tendencia decreciente a medida que se incrementan las horas de exposición en ambiente marino. Las juntas soldadas en el ensayo no presentaron zonas de fractura y la gráfica nos permite deducir que la posible falla es fuera del cordón de soldadura.

En cuanto a las probetas sometidas al ensayo de doblado, evaluar el impacto de la corrosión en el cordón de soldadura generaría una discrepancia significativa sobre los resultados debido a que dicho proceso depende de la calidad del cordón de soldadura y por ende de las habilidades del soldador.

Ahora bien en la mayoría de embarcaciones se utiliza la protección catódica para proteger las zonas más expuestas al agua de mar como los cascos y hélices para ello se emplean ánodos de sacrificio que debido a su mayor facilidad para corroerse protegen al metal noble, para efectos de esta investigación no se estudió la implementación de protección galvánica al intentar recrear condiciones de intensa corrosión en el cordón de soldadura observando su comportamiento y variaciones en las propiedades mecánicas. Asimismo en la actualidad existen avanzados sistemas de protección catódica por corrientes impresas (ICCP) que a pesar de sus componentes protectores una vez el barco entra en contacto con el agua de mar, debido a poros, grietas o la más

pequeña imperfección en la aplicación de la pintura generan micro partículas galvánicas en el acero del casco del barco.

En conclusión, la utilización de refuerzos como medida de protección en el estudio de las juntas soldadas del acero naval aplicado en el presente proyecto de investigación, mejorarían significativamente la resistencia al fenómeno de corrosión electroquímica que se presenta en las probetas alterando los análisis mecánicos desviando el objetivo principal de la investigación el cual nos plantea predecir el comportamiento de las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico expuestas a ambientes marinos mediante una herramienta computacional.

CONCLUSIONES

El uso de la herramienta computacional Comsol Multiphysics brindó una alternativa viable proporcionando una gran variedad de opciones que permitieron el cumplimiento de los objetivos planteados en el capítulo I, su módulo de electroquímica cuenta con suficientes parámetros para controlar de forma cercana a la realidad procesos corrosivos como el estudiado en el presente proyecto adicionalmente su integración con otros software como SolidWorks permitió importar la soldadura conservando las propiedades físicas que la caracterizan, asimismo el vaciado de datos para el cumplimiento de la normativa AWS para procesos de soldadura por eléctrico en este caso SMAW fue fructífero consiguiendo un cordón uniforme y estable, el cual para efectos de la investigación no fue sometido a ninguna mejora o recubrimiento como medida de protección al medio corrosivo para de esta forma predecir su comportamiento y resistencia entregando resultados que pueden ser aprovechados para futuros estudios entendiendo que en la realidad las embarcaciones utilizan suficientes mecanismo de protección galvánica como ánodos de sacrificio o pinturas especiales para maximizar la eficiencia y vida útil de la embarcación.

Es importante mencionar que en cuanto a los ensayos mecánicos a los que se sometieron las probetas en muchos casos se pueden evidenciar muescas o perforaciones en los extremos de la soldadura lo cual se vuelve muy notable al realizar el ensayo de tensión o doblado, dichas imperfecciones evidencian una grave falta de penetración del cordón de soldadura de la zona las cuales dependiendo del electrodo seleccionado se pueden minimizar. Las mismas actúan como un concentrador de corrosión desmejorando notablemente el comportamiento del cordón soldado, acotando que bajo suficientes estándares de calidad la soldadura SMAW proporciona la suficiente robustez y resistencia a medios corrosivos como para implementarse en la construcción de barcos y buques.

En los 120 días de estudio de corrosión no se presentó ningún efecto perjudicial en el área del cordón de soldadura, observando la gráfica de la pérdida de peso podemos

concluir que la falla será en la zona afectada por el calor en el mismo. Sin embargo, someter las probetas a periodos aún más largos de tiempo podría generar corrosión localizada en algunos puntos débiles del cordón. Este fenómeno ocurre principalmente en zonas donde no hubo suficiente penetración de la soldadura o el recubrimiento protector no fue uniforme en toda la superficie, por lo que se reitera la importancia de contratar un soldador capacitado a realizar un excelente proceso de soldadura para prevenir estos fallos.

En la lámina del barco el material en general se ve más afectado por el proceso de corrosión en el tiempo definido, pero sin fallas, por otro lado aumentando el tiempo de exposición la pérdida de peso se hace visible llegando a afectar la embarcación y se deberá realizar el mantenimiento requerido.

Finalmente siguiendo los lineamientos descritos en las fases planteadas se alcanzó el objetivo de la investigación al predecir el comportamiento de las juntas soldadas del acero naval ASTM A131 utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico SMAW expuestas a ambientes marinos, en este mismo orden de ideas se recalca la importancia de la utilización de la herramienta computacional Comsol Multiphysics para la simulación del proceso corrosivo con lo que se obtuvo resultados veraces mostrando que si se puede utilizar dicho proceso de soldadura en la industria naval sin comprometer la vida útil de la embarcación y con la debida utilización de mecanismos de protección se pueden obtener resultados aún más favorables.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda someter las probetas a un mayor tiempo de exposición para de esta forma obtener un mejor criterio de evaluación y estudiar la resistencia total del material a degradarse por efectos corrosivos.
- Realizar estudios más profundos como análisis de temperatura, estudios metalográficos y ensayos de impacto para obtener una imagen más completa del comportamiento de las juntas soldadas a distintos efectos y fenómenos.
- Realizar un estudio similar a probetas soldadas bajo otro proceso de soldadura con la intención de determinar sus propiedades mecánicas y comportamiento corrosivo de modo de establecer la correspondiente comparación y generar tablas de datos que se puedan utilizar en estudios físicos.
- Aplicar otro método de ensamblado a la soldadura en Solidworks permitiendo que el cálculo de desplazamientos, fuerzas de reacción, deformaciones unitarias, tensiones y la distribución del factor de seguridad se aproximen aún más a la realidad generando resultados más exactos.
- Simular el proceso corrosivo con otras herramientas computacionales y establece una tabla comparativa que permita testear los resultados.
- A la Universidad José Antonio Páez, se le recomienda adaptar la materia electiva “Corrosión” para impartir conocimientos de simulaciones computarizadas de procesos corrosivos.
- Realizar simulaciones tomando en consideración la protección catódica como ánodos de sacrificio y pinturas protectoras utilizando los otros componentes incluidos en el paquete de análisis electroquímico de Comsol para recrear condiciones más adaptadas a la realidad de las embarcaciones y observar su comportamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Acerind, S.C. (2011). **Soldadura de los aceros inoxidable** Sección I: Para el soldador. ACERIND S.C., 1.
- Alfaro. M, Alfaro. I (2018). **Using the Excel Solver function to calculate the corrosion rate of carbon steel in a 3.5% O₂ -saturated NaCl solution: a practical tutorial** Departamento de Química, Campus Andrés Bello, Facultad de Ciencias, Universidad de La Serena. Chile.
- Almaguer. P, Estrada. R, Pérez. R (2016). **Evaluación por el método de los elementos finitos de la influencia de las tensiones residuales en la fatiga de uniones soldadas** Universidad de Holguín. Centro de Estudios CAD/CAM. Holguín, Cuba.
- Arias. C, Calvo. E, Ochoa. J. (2007). **Diseño y construcción de una cámara de niebla salina para ensayos de corrosión** Scientia et Technica Año XIII, No 36. Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia).
- Arias, Fidias. (2006). **Proyecto de Investigación: Introducción a la Metodología**. Edición 5. Caracas. Editorial Episteme.
- AWS Welding Handbook. Ninth Edition volumen 2. Welding Process (2002). American Welding Society. 550. N.W. LeJeane Road Miami. FL 33126.
- Banks. J. (2005). **System Simulation**. Edición 4. Estados Unidos. Editorial Prentice Hall.
- Bencomo. K, Molina. R. (2017). **Modelo para la predicción del comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (smaw) afectado por**

un defecto para un acero AISI 1010. Trabajo de grado especial, para optar al título de ingeniero Mecánico. Universidad José Antonio Páez. Valencia.

Bencomo. N. (2009). **Soldadura disímil entre los aceros AISI/SAE 304 y ASTM A36 mediante el proceso de GMAW-P.** Trabajo de grado especial, para optar al título de ingeniero Mecánico. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Bizquerra. R. (1998). **Modelos de orientación e intervención psicopedagógica** España. Editorial Ciss Praxis.

Bolaños et al. (2005). **Caracterización de las propiedades mecánicas y microestructurales de soldaduras empleadas en la recuperación de ejes.** Universidad Tecnológica Nacional (Colombia).

Cai. A, Kan, D (2019). **Corrosion Modeling: Mechanisms, Challenges and Numerical Solutions.** COMSOL.

Chan. M (2015). **Calificación de procedimientos de soldadura, operadores y soldadores en procesos de SMAW Y GMAW, de acuerdo al código AWS D1.1 para Aceros estructurales.** Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Litoral.

COMSOL Multiphysics®. (2019). Recuperado de:
<https://www.comsol.com/corrosion-module>

D'Santiago. B (2019). **Modelo de predicción de la corrosividad en estructuras ubicadas en la costa de los estados Carabobo y falcón implementando la herramienta de redes neuronales artificiales.** Universidad José Antonio Páez.

ECCA (2011). **The Basics of Corrosion. TechnicalPaper.** Obtenido desde:
[http://www.prepaintedmetal.eu/repository/Annina/Basic%20of%20corrosion%](http://www.prepaintedmetal.eu/repository/Annina/Basic%20of%20corrosion%20)

20021211.pdf.

ELECTRODOS INFRA S.A. (2009). **Manual de electrodos para soldar** Edición 2. México. Recuperado de: http://www.infrasur.com.mx/uploads/manuales/soldadura/manual_electrodos/introduccion.pdf

Hernández. Guillermo. **El método de diferencias finitas** Recuperado de: http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/hidrogeologia/NotasCurso/1-MDF1_1-10.pdf

Hernández. R, Fernández. C, Baptista. P. (1998). **Metodología de la investigación**. Edición 3. México D.F. Editorial McGraw-Hill.

INDURA S.A., Industria y Comercio. (2010). **Manual de sistemas y materiales de soldadura**. Recuperado de: <http://www.indura.cl/Descargar/Manual%20de%20Soldadura%20INDURA?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fcl%2Fbiblioteca%2F00da6ac5e6754e428ecd94f1c78711cb.pdf>

Iriza C. (2008). **Manual de prácticas de Laboratorio de Materiales**. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.

LANCASTER J.F. (1993) **Metallurgy of Welding**. Chapman & Hall. Edición 5. Londres.

L.C.Wrobel. (2002). **The Boundary Element Method**. Vol 1 Applications in Thermo-Fluids and Acoustics. Baffinss Lane, Chichester, Inglaterra: WILEY.

Lenntech USA LLC C.A. (2019). **Composition of Seawater**. 407 Lincoln Road, Suite 11-C Miami Beach, FL 33139.

Matmatch GmbH C.A. (2020). Recuperado de: <https://matmatch.com>

Montilla. D. (2017). **Simulación del fenómeno de corrosión externa y protección catódica en una tubería prototipo utilizada para el transporte de crudo en sistemas submarinos aplicando la herramienta comsol multiphysics**. Trabajo de grado especial, para optar al título de ingeniero Metalúrgico. Universidad Industrial de Santander. Colombia.

Norma ASTM, American Society for testing and materials. **Standard specification for structural steel for ships a 131/a131m – 94**. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/116135510/astm-a131>

Revie R. W. y Uhlig H. H. (2008). **Corrosion and Corrosion Control – An Introduction to Corrosion Science and Engineering**. Wiley & Sons, Inc.: USA.

Sabino, C. (1996). **El proceso de investigación**. Edición 1. Caracas. Editorial Panapo.

Saitti. Patricia. (2012). **Electroquímica**. Buenos Aires Argentina. Ediciones Universidad Nacional de Río Negro.

Salazar. J. (2015) **Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales** Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Volumen 28 N° 3. Costa Rica.

Sánchez. B, Guarisma. J. (1995). **Métodos de Investigación** Maracay. Ediciones Universidad Bicentenario de Aragua.

SCI S.A. (2015). **Ensayos mecánicos: tipos y funciones** Recuperado de: <https://scisa.es/ensayos-mecanicos-tipos/>

Tamayo. M. (2003). **El proceso de la investigación científica.** Edición 4. México. Editorial Limusa.

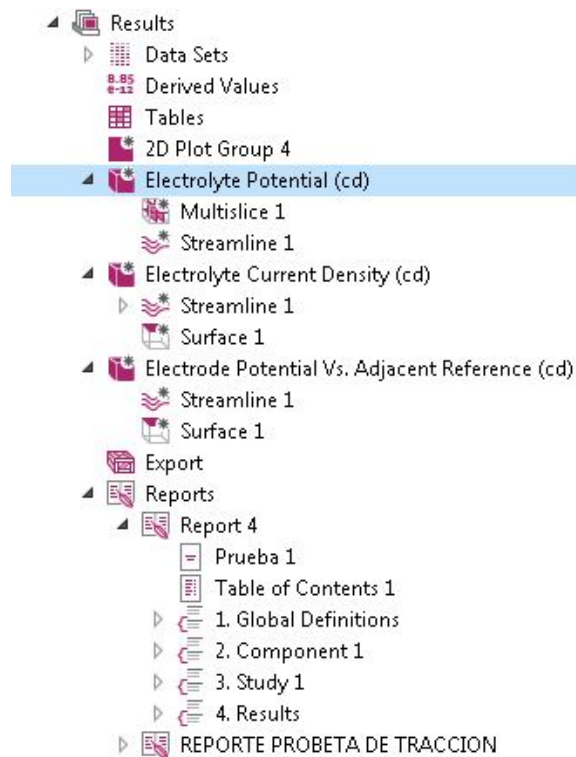
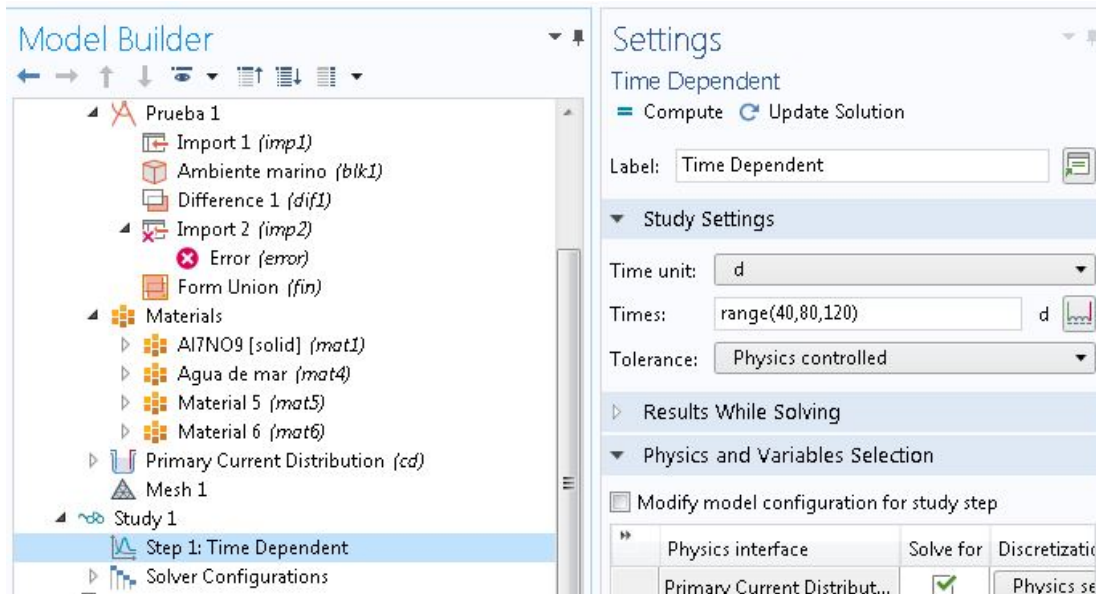
Toro. M. (2019). **Desarrollo de un sistema de detección y prevención de patologías en sistemas estructurales utilizados en la infraestructura urbana e industrial.** Trabajo de grado especial, para optar al título de ingeniero Mecánico. Universidad José Antonio Páez. Valencia.

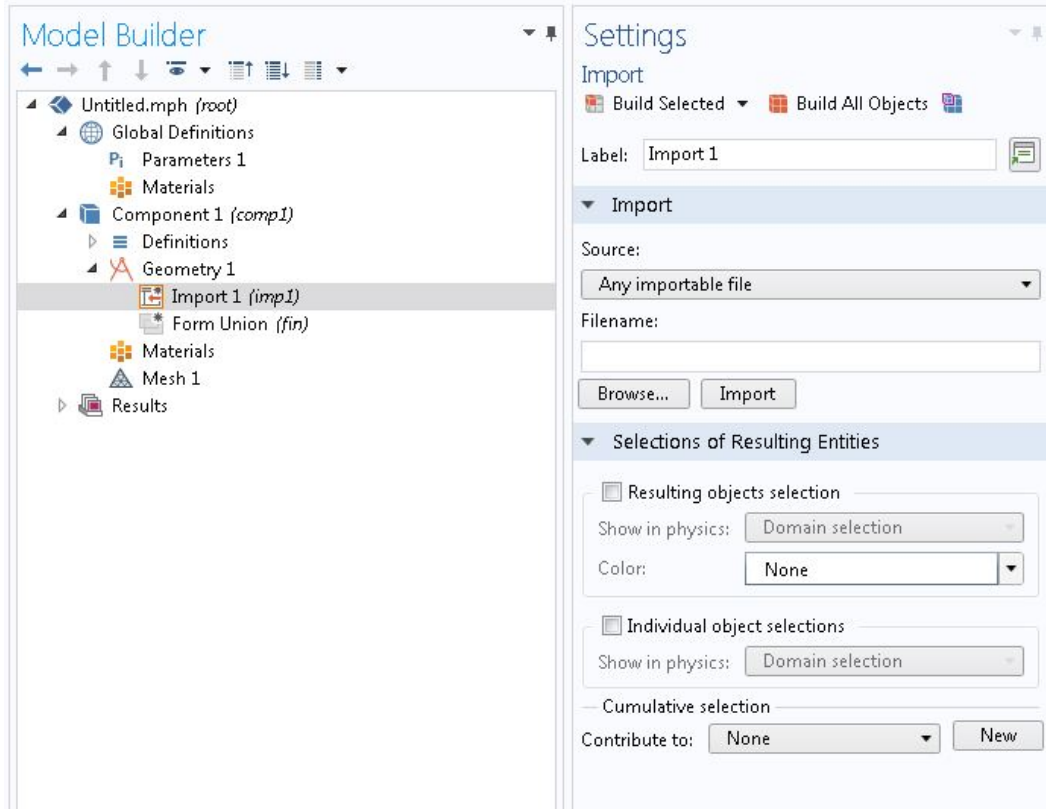
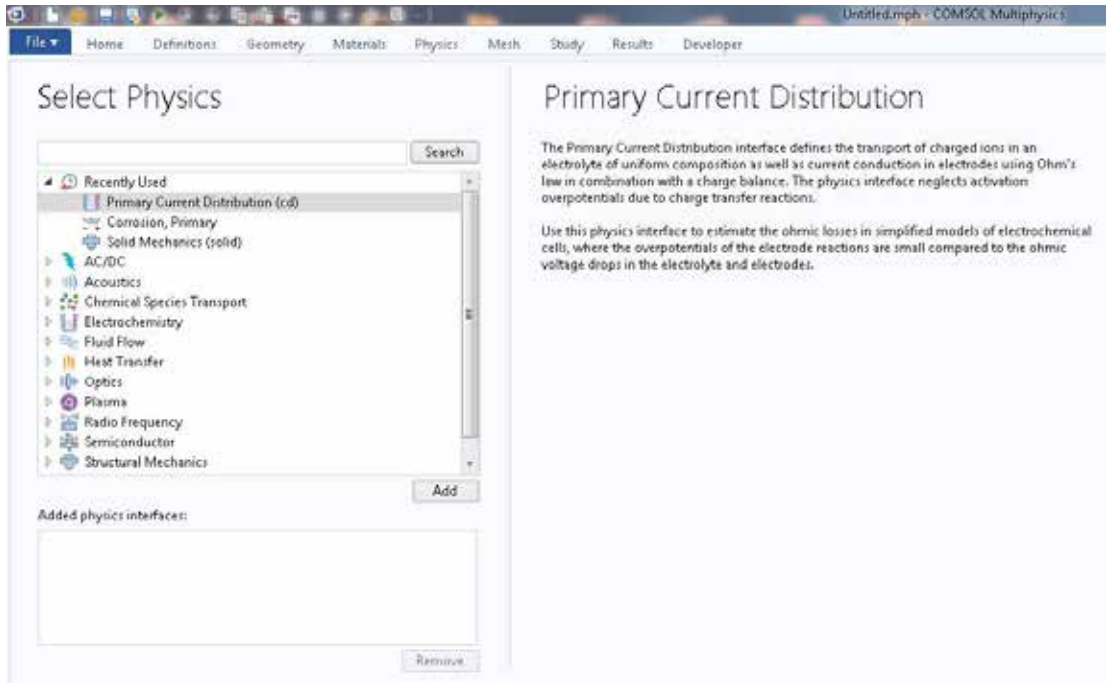
Zapata. J (2013). **Using the Excel Solver function to calculate the corrosion rate of carbon steel in a 3.5% O₂ -saturated NaCl solution: a practical tutorial** Universidad Nacional de Piura.

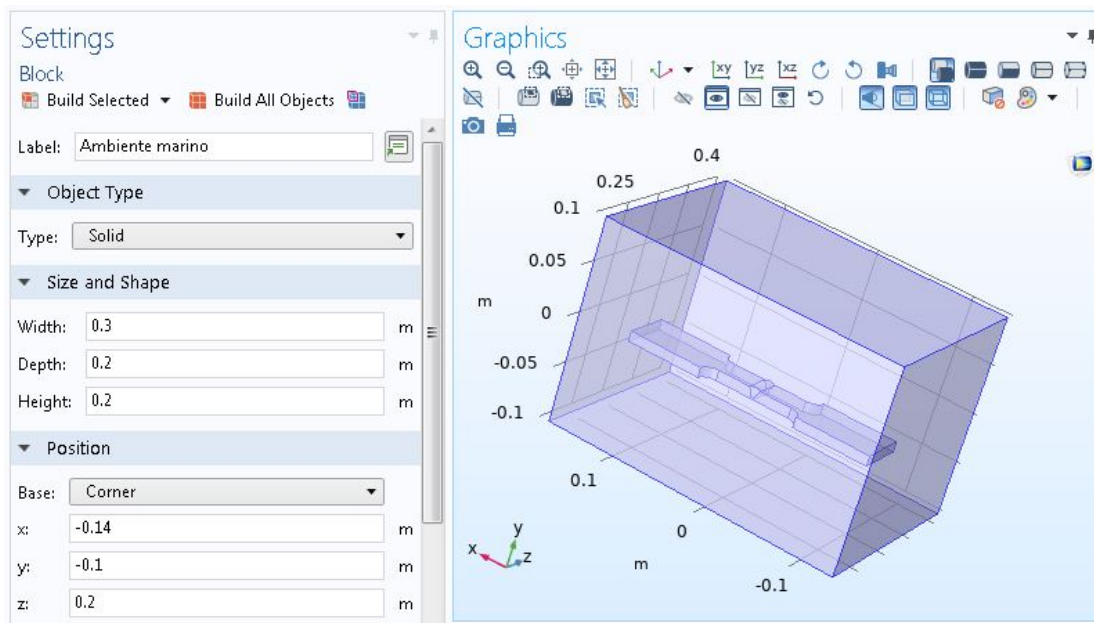
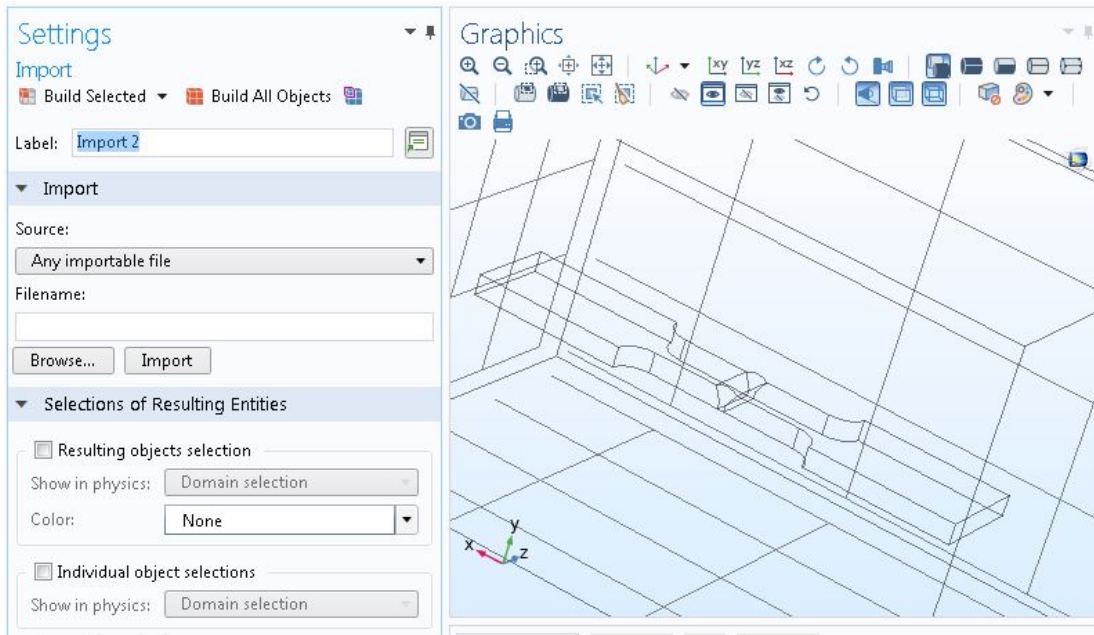
ANEXOS

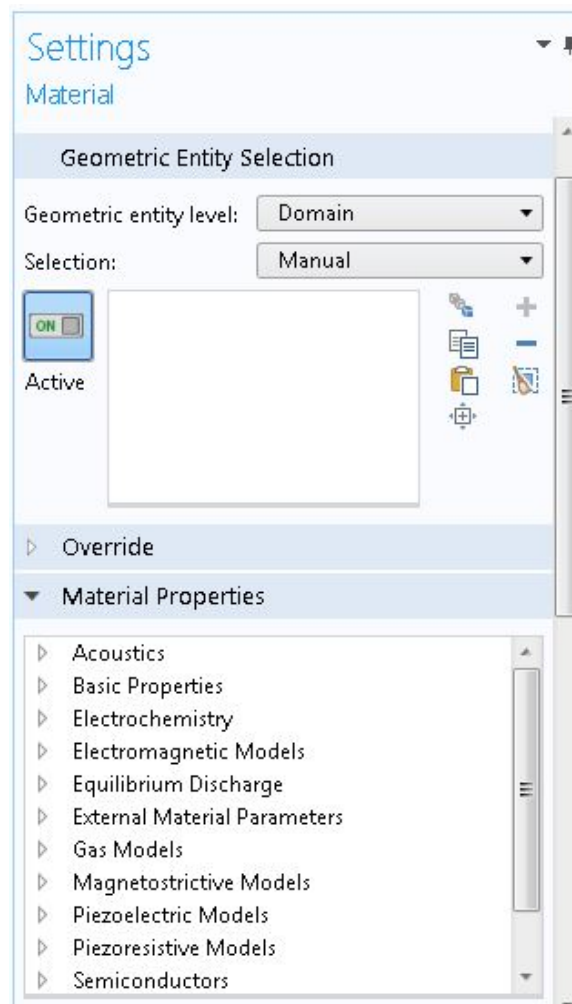
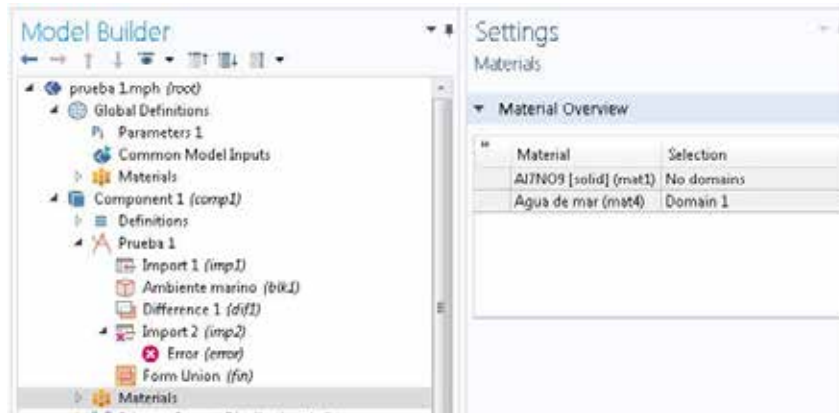
APENDICE A

SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS









ANEXO A
CONSTANTES USADAS PARA LA ECUACIÓN DE FARADAY

TABLE 2 Values of Constants for Use in Faraday's Equation Rate

A				
Penetration Rate Unit (CR)	I_{cor} Unit	ρ Unit	K_1	Units of K_1^A
mpy	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	g/cm^3	0.1288	mpy $\text{g}/\mu\text{A cm}$
mm/yr^B	A/m^{2B}	kg/m^{3B}	327.2	$\text{mm kg}/\text{A m y}$
mm/yr^B	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	g/cm^3	3.27×10^{-3}	$\text{mm g}/\mu\text{A cm y}$
B				
Mass Loss Rate Unit	I_{cor} Unit	K_2	Units of K_2^A	
$\text{g}/\text{m}^2\text{d}^B$	A/m^{2B}	0.8953	g/Ad	
$\text{mg}/\text{dm}^2\text{d}$ (mdd)	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.0895	$\text{mg cm}^2/\mu\text{A dm}^2 \text{d}$	
$\text{mg}/\text{dm}^2\text{d}$ (mdd)	A/m^{2B}	8.953×10^{-3}	$\text{mg m}^2/\text{A dm}^2 \text{d}$	

^AEW is assumed to be dimensionless.

^BSI unit.