

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño del sistema de sujeción de ánodos galvánicos para
el sistema de protección catódica en un muelle portuario”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Joseph Armando Calle Acosta

Jorge Isaac Paredes Cedeño

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres, Mirelly y Jorge, porque son los artífices de este gran logro. A mi hermana Jeanneth, por quien me inspiré para entrar a Espol. A mis ex compañeros del seminario de teología y a esos amigos que me creyeron capaz de lograr muchas cosas más; aquí está el resultado, ¡lo logré!

Jorge Paredes Cedeño

El presente proyecto lo dedico a mis Padres, los pilares de mi vida, que estuvieron presente en cada momento de lucha para alcanzar el objetivo y llegar a ser un gran profesional. A mis hermanos por motivarme siempre a no desistir en este largo camino. A todos los profesores que formaron mis criterios y carácter como profesional.

Joseph Calle Acosta

AGRADECIMIENTO

Haré un reconocimiento especial a mis padres, por demostrarme con su ejemplo que no hay mala noche que duela para conseguir los sueños, y por enseñarme a ser exigente conmigo mismo y no rendirme jamás. A mi compañero de tesis, Joseph, por su esfuerzo incansable, y por demostrarme que ninguna adversidad puede detener los sueños establecidos.

Jorge Paredes Cedeño.

Un agradecimiento especial a mi padre, por todo el apoyo, las malas noches que me acompañó, las incontables veces que se entusiasmaba al escucharme hablar de mi carrera. Sin él este logro no hubiera sido posible. Partiste de este mundo faltando tan poco para tener un hijo profesional, pero me enseñaste a terminar lo que se empieza. Grito al cielo.

¡Lo logramos Papá, tu hijo te cumplió!

A mi compañero de tesis por el apoyo incondicional a lo largo de este trabajo y a los excelentes amigos que esta vida académica me brindó.

Joseph Calle Acosta.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Joseph Armando Calle Acosta* y *Jorge Issac Paredes Cedeño* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Joseph Calle Acosta

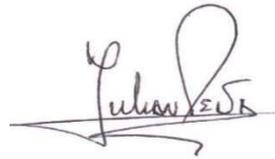


Jorge Paredes Cedeño

EVALUADORES

RODOLFO
EZEQUIEL PAZ
MORA

Digitally signed by
RODOLFO EZEQUIEL PAZ
MORA
Date: 2021.06.30 08:17:09
-05'00'



.....
Ing. Rodolfo Paz Mora, Msc.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Ing. Julian Peña Estrella, Msc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Se tiene en consideración un muelle portuario de 1300 metros de longitud, cuya cimentación esta realizada sobre pilotes metálicos afianzados en el lecho marino. Estos pilotes metálicos están expuestos a la corrosión que les produce el medio marino, por no tener instalado el sistema de protección catódica planificado para esta estructura. El objetivo principal de este proyecto es diseñar el sistema de sujeción de los ánodos galvánicos del sistema de protección catódica de este muelle portuario en cuestión.

Este proyecto se logró estructurar por medio del proceso de diseño conceptual y sus herramientas de análisis, en donde se detalló específicamente el problema a tratar. También, se desarrolló por medio del proceso de diseño detallado, en donde se realizaron cálculos necesarios para ser verificados por medio de los de factores de *seguridad* validados con las normas AISC360 para la estructura y la AWS D1.1, para la soldadura.

Se diseñó una placa curva con diámetro de curvatura de 1.2 metros, con dimensiones de 25cm x 20cm para longitud y altura, con un ancho de 10mm. El diseño del cordón de soldadura tuvo una garganta de 5 mm sobre esta placa rectangular fue en forma de C, cubriendo la línea superior de 25 cm, y las dos longitudes horizontales de los lados de 20 cm cada una.

La junta soldada cumple con los requerimientos de duración de 20 años de servicio y soporte de los ánodos galvánicos frente a las corrientes marinas. El desarrollo de este proyecto solucionó un problema que abarca un área económica grande, dentro del contexto de lo que un muelle de las características mencionadas corresponde.

Palabras Clave: Ánodo, pilotes, soldadura, protección catódica, normas.

ABSTRACT

A port dock of 1,300 meters in length is taken into consideration, the foundations of which are made on metal piles anchored on the seabed. These metallic piles are exposed to the corrosion produced by the marine environment, due to not having installed the cathodic protection system planned for this structure. The main objective of this project is to design the fastening system for the galvanic anodes of the cathodic protection system of this port dock considered.

This project was structured through the conceptual design process and its analysis tools, here the problem to be treated was specifically detailed. Also, it was developed through a detailed design process, where necessary calculations were made to be verified by means of the safety factors validated with the AISC360 standards for the structure and AWS D1.1, for the welding.

A curved plate with a curvature diameter of 1.2 meters was designed, with dimensions of 25cm x 20cm for length and height, with a width of 10mm. The weld bead design had a 5 mm throat on this rectangular plate was C-shaped, covering the top line of 25 cm, and the two horizontal lengths of the sides of 20 cm each.

The welded joint meets the 20-year service and support requirements of galvanic anodes against marine currents. The development of this project solved a problem that encompasses a large economic area, within the context of what a pier with the characteristics corresponds to...

Keywords: Anode, columns, welding, cathodic protection, standards.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	X
SIMBOLOGÍA.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVIII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XXII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Definición del Problema.....	2
1.2 Justificación del proyecto.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	5
1.4.1 Pilotes metálicos de cimentación.....	5
1.4.2 Corrosión en el acero.....	5
1.4.3 Protección Catódica.....	6
1.4.4 Ánodos galvánicos de sacrificio.....	7
1.4.5 Sistema de sujeción para ánodos galvánicos.....	8
1.4.5.1 Galvotec Corrosion Service.....	9
1.4.5.2 Blue Logic.....	10
1.4.6 Soldadura subacuática.....	11
1.4.6.1 Soldadura SMAW.....	11
1.4.6.2 Características de esta soldadura.....	12

1.4.6.3	Materiales para la soldadura subacuática.....	13
1.4.7	Equipos de soldadura.....	14
1.4.8	Instalación subacuática.....	14
1.4.9	Instalación y ensamble de equipos en medios marinos.....	15
1.4.10	Condiciones ambientales: Marea y Corrientes marinas.....	16
1.4.10.1	Velocidades.....	17
1.4.10.2	Nivel de Mar.....	18
CAPÍTULO 2.....		20
2.	Metodología.....	20
2.1	Definición del soporte de sujeción mecánica.....	20
2.1.1	Formulación y análisis del problema.....	20
2.1.2	Requerimientos del diseño.....	20
2.1.3	Planteamiento de objetivos.....	21
2.1.3.1	Árbol de objetivos.....	21
2.1.4	Objetivos ponderados.....	23
2.1.5	Métricas.....	25
2.1.6	Restricciones.....	25
2.1.7	Establecimiento de funciones.....	26
2.1.7.1	Caja negra.....	26
2.1.7.2	Caja transparente.....	27
2.1.8	Especificaciones de diseño.....	28
2.1.8.1	Dimensiones y cantidad de ánodos.....	28
2.1.8.2	Altura de ubicación de ánodos.....	29
2.1.8.3	Soldadura.....	30
2.2	Diseño conceptual.....	31
2.2.1	Generación de alternativas de diseño.....	31
2.2.2	Esquema gráfico de las alternativas de diseño.....	33

2.2.2.1	Esquema gráfico del sistema de las partes del sistema de protección catódica.	33
2.2.2.2	Alternativa 1.	35
2.2.2.3	Alternativa 2.	36
2.2.2.4	Alternativa 3.	37
2.2.3	Evaluación de alternativas de diseño.....	38
2.3	Diseño preliminar.....	39
2.3.1	Selección del sistema de sujeción.	39
2.3.1.1	Soldadura.....	39
2.3.1.2	Placa-Pilote.	40
2.3.1.3	Alma de ánodo-Placa.	42
2.3.2	Análisis de conexiones tubulares.....	42
2.3.2.1	Combinaciones de cargas.....	43
2.3.2.2	Resistencia de flexión disponible.	43
2.4	Diseño detallado.....	44
2.4.1	Ánodos considerados en el sistema de soldadura.....	44
2.4.2	Estrategia de cálculo.....	44
2.4.3	Puntos de apoyo.....	45
2.4.4	Sistema de referencia.	45
2.5	Tipos de fuerzas aplicadas sobre el sistema.....	46
2.5.1	Fuerza hidrostática.	47
2.5.1.1	Cálculo de áreas.	48
2.5.1.2	Cálculo de la presión hidrostática.	51
2.5.1.3	Para el cálculo de la fuerza hidrostática.....	52
2.5.2	Fuerza de arrastre de las olas.	53
2.5.3	Fuerza de arrastre de las corrientes marinas.	53
2.5.3.1	Corrientes laterales.	54

2.5.3.2	Corrientes frontales.....	59
2.5.4	Peso de los ánodos.....	62
2.6	Cálculo de centroides.....	62
2.6.1	Centroide x para la parte lateral.....	64
2.6.2	Centroide x para la parte superior.....	65
2.7	Fuerzas resultantes y reacciones.....	65
2.7.1	Descripción de las Reacciones.....	66
2.7.2	Puntos críticos.....	67
2.7.3	Fuerza cortante y axial.....	67
2.7.4	Momento flector.....	68
2.8	Diseño del cordón de soldadura.....	69
2.8.1	Fatiga en la unión soldada.....	69
2.8.2	Soldadura como línea.....	70
2.8.3	Metodología de diseño.....	70
2.8.4	Diseño de cordón de soldadura: Placa – Pilote.....	71
2.8.4.1	Sección por soldar.....	72
2.8.4.2	Secciones Normalizadas.....	72
2.8.5	Diseño de cordón de soldadura: Alma del ánodo – Placa.....	73
2.8.5.1	Sección por soldar.....	74
2.8.5.2	Secciones Normalizadas.....	74
2.8.6	Rediseño del cordón de soldadura: Alma del ánodo – Placa.....	75
2.8.6.1	Sección por soldar.....	75
2.8.6.2	Secciones Normalizadas.....	76
2.8.7	Ecuaciones para la soldadura en las juntas.....	78
2.8.7.1	Cargas Normalizadas.....	78
2.8.7.2	Fuerza Resultante.....	79
2.8.7.3	Esfuerzo permisible.....	80

2.8.7.4	Factor de seguridad.	80
2.8.7.5	Espesor de placa.	81
2.8.8	Ecuaciones para análisis de alma para conexión tubular.	81
2.9	Proceso de manufactura.	82
2.9.1	Equipos, maquinaria y accesorios para el montaje del soporte de los ánodos de la protección catódica.	83
2.9.1.1	Eslingas y 'Ratches'.	83
2.9.1.2	Bolsa de elevación profesional (Lift bags).	85
2.9.1.3	Forma de uso.	86
2.9.1.4	Amarre de la carga.	87
2.9.2	Metodología de descenso y ubicación de la carga.	87
2.9.2.1	Consideraciones de altura para la instalación.	87
2.9.2.2	Consideraciones de orientación del conjunto AAP.	88
2.9.2.3	Mediciones y marcas de posición.	89
2.9.2.4	Descenso del conjunto.	90
2.9.2.5	Cambio de sujeción.	91
2.9.2.6	Manipulación del conjunto AAP.	92
2.9.2.7	Fijación del conjunto AAP.	94
2.9.3	Parámetros para la calificación de la soldadura subacuática.	94
2.9.3.1	Profundidad.	94
2.9.3.2	Amperajes.	95
2.9.3.3	Polaridad.	95
2.9.4	Documentación del procedimiento de soldadura.	96
2.9.4.1	Metodología para la elaboración de WPS.	97
CAPÍTULO 3.		99
3.	Resultados y análisis.	99
3.1	Fuerza Hidrostática.	99

3.1.1	Áreas de aplicación de fuerza hidrostática y arrastre.	99
3.1.2	Cálculo de presión hidrostática.	100
3.1.3	Cálculo de fuerza hidrostática.	101
3.2	Fuerza de Arrastre.	102
3.2.1	Número de Reynolds y Coeficiente de Arrastre.	102
3.2.2	Áreas de incidencia lateral.	103
3.2.3	Área de incidencia frontal.	104
3.2.4	Arrastre lateral.	104
3.2.5	Arrastre frontal.	105
3.3	Peso de los ánodos.	106
3.4	Centroides.	107
3.5	Fuerzas resultantes y reacciones en los apoyos.	109
3.6	Análisis de la afectación de la instalación en el proceso de diseño de la placa. 110	
3.6.1	Análisis de topes.	110
3.6.2	Uso de eslingas.	111
3.6.3	Uso de bolsas de elevación.	111
3.6.4	Análisis de la orientación.	111
3.6.5	Análisis de la metodología de descenso y fijación.	112
3.7	Dimensión del cordón de soldadura.	112
3.7.1	Cordón de soldadura circular (Junta AP).	112
3.7.2	Rigidizadores (Rediseño).....	113
3.7.3	Análisis en conexión tubular (Junta AP).	115
3.7.4	Cordón de soldadura de la placa (Junta RAP).....	116
3.7.4.1	Completa.....	116
3.7.4.2	Tipo C.....	117
3.8	Modelado y simulación.	119

3.8.1	Reacciones.....	119
3.8.2	Soldadura Completa junta PP.....	120
3.8.3	Soldadura Tipo C junta PP.....	120
3.8.4	Soldadura en alma con rigidizadores para la junta AP.....	121
3.9	Resumen de resultados PP.....	122
3.10	Análisis de Costos.....	123
3.11	Tiempo de duración del proyecto.....	124
CAPÍTULO 4.....		126
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	126
4.1	Conclusiones.....	126
4.2	Recomendaciones.....	128

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
NACE	National Association of Corrosion Engineer
SSC	Electrodo de Plata Cloruro de Plata
CSE	Electrodo de Cobre Sulfato de Cobre
HWL	High Water Level
LWL	Low Water Level
CIS	Inspección pasó a paso, medición de potenciales de encendido
MPY	Milésimas de pulgadas por año
AWS	American Welding Society
AISC	American Institute of Steel Construction
WPS	Welding Procedure Specification
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
PJP	Soldadura de ranura en junta de penetración parcial
ASD	Allowable strength design
INOCAR	Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada del Ecuador
PP	Junta placa – pilote
AP	Junta ánodo – placa
RAP	Junta rigidizador – ánodo – placa
AA	Conjunto Ánodo – Placa
AAP	Conjunto Ánodo – Placa – Pilote

SIMBOLOGÍA

mil	Milésima de pulgada
mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
m	Metro
mV	Milivoltio
MPa	MegaPascales
Cu	Cobre
Ni	Níquel
C	Carbono
Mn	Manganeso
P	Fósforo
W	Pierna para soldadura de filete
J	Momento polar
Sw	Módulo seccional

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Descripción del estado de corrosión sufrido por el pilote de acero del muelle portuario a consideración.....	6
Figura 1.2 Descripción de la protección catódica instalada sobre un material de acero sumergido en un medio salino.....	7
Figura 1.3 Circuito electroquímico de protección catódica (Salazar-Jiménez, 2015)	7
Figura 1.4 Sistema soporte de Galvotec (<i>Galvotec Corrosion Service</i> , n.d.).....	9
Figura 1.5 Sistema soporte de Blue Logic (<i>Blue Logic</i> , 2016).....	10
Figura 1.6 Electrodo para Proceso SMAW subacuático. A la izquierda, la dimensión del electrodo de soldadura. A la derecha, la descripción del electrodo (Naval Sea System Comand, 2002).	13
Figura 1.7 Resumen de los equipos recomendados para soldadura húmeda (Naval Sea System Comand, 2002).	14
Figura 1.8 Principales elementos que intervienen en el proceso de soldadura subacuática (Symbols & Metals, 2006).	15
Figura 1.9 ilustración grafica del modo de instalación de ánodos galvánicos de la protección catódica en el muelle portuario.	16
Figura 1.10 Tabla de velocidad máximas (Vera et al., 2009a).....	18
Figura 1.11 Marea anuales predichas (INOCAR,2021)	18
Figura 1.12 Valores de Nivel de Mar en Monteverde (INOCAR 2021).	19
Figura 2.1 Ilustración de Estados A y Estado B.....	20
Figura 2.2 Árbol de objetivos de diseño del Sistema de sujeción mecánica. Fuente: Elaboración propia.....	23
Figura 2.3 Representación de la herramienta 'Caja Negra'.....	27
Figura 2.4 Representación de la herramienta 'Caja Transparente'.	28
Figura 2.5 Descripción de un ánodo galvánico para protección catódica con alma de acero recta en los extremos.	33
Figura 2.6 Descripción de un ánodo galvánico para protección catódica con alma de acero curva en los extremos.....	34

Figura 2.7 Ejemplo de una sección longitudinal de un pilote acero de cimentación para el muelle portuario.	34
Figura 2.8 Detalle de partes para el ensamble del sistema de soporte de ánodos galvánicos de la alternativa 1. Perfiles en L unidos con pernos, Ganchos en forma de J para la sujeción del alma de los ánodos galvánicos.	35
Figura 2.9 Esquema de alternativa 1. Estructura con barras articuladas y gancho J. A. Vista en estructura alámbrica. B. Vista en escala de grises.	35
Figura 2.10 Detalle de partes para el ensamble del sistema de soporte de ánodos galvánicos de la alternativa 2. Anillo en forma de abrazadera con brazos de soporte para los ánodos galvánicos.	36
Figura 2.11 Esquema de alternativa 2. Estructura con brazos y anillos. A. Vista en estructura alámbrica. B. Vista en escala de grises.	36
Figura 2.12 Detalle de partes para el ensamble del sistema de soporte de ánodos galvánicos de la alternativa 3. Placa de soporte de los ánodos a modo de unión soldada simple. El alma de los ánodos va conectada a la placa, la cual se une al pilote.	37
Figura 2.13 Esquema de alternativa 3. Estructura con placa. A. Vista en estructura alámbrica. B. Vista en escala de grises. Los ánodos deben ir sujetos a la placa curva. A su vez, la placa curva va sujeta al pilote metálico. El tipo de unión es por soldadura.	37
Figura 2.14 Restricción para aplicar el análisis de conexión en T. Fuente: AISC360-16.	43
Figura 2.15 Puntos de apoyo del conjunto 'Alma-Ánodo'	46
Figura 2.16 Sistema de coordenadas para el cálculo de fuerzas y reacciones en una la junta superior del conjunto AA.	47
Figura 2.17 Vista simplificada de las fuerzas aplicadas sobre el conjunto de protección catódica (pilote-alma-ánodo). (1) Amarilla: Fuerza 1 y 2, (2) Rojo y Lila: Fuerza 3 y, (3) Verde y Turquesa: Fuerza 4.	48
Figura 2.18 Vista superior del alma del ánodo, donde L_b describe la longitud del alma expuesta a la columna de agua medida desde la placa curva del pilote hasta el centro del cuerpo del ánodo y; D describe el diámetro del alma del ánodo.	48

Figura 2.19 Vista superior del alma del ánodo, donde D es el diámetro del alma del ánodo, h describe la altura de la base cuadrada de la superficie superior del ánodo galvánico, mientras que b describe la longitud de la base cuadrada de la superficie superior del ánodo galvánico.	49
Figura 2.20 Especificación de la dirección de los flujos de agua y la superficie sobre la cual actúan. (A) Corriente y contracorriente perpendicular al eje axial del alma, (2) Selección de área del ánodo expuesta a las corrientes laterales.....	55
Figura 2.21 Valores para la selección del coeficiente de arrastre para la resistencia en cuerpos bidimensionales prismáticos (White, 2003).....	56
Figura 2.22 Coeficiente de arrastre para la resistencia de los cuerpos bidimensionales cilíndricos (White, 2003).	56
Figura 2.23 Longitud del cuerpo del ánodo.	57
Figura 2.24 Áreas laterales del alma del ánodo para la ecuación de arrastre por corriente y contracorriente lateral.	58
Figura 2.25 Especificación de la dirección de los flujos de agua y la superficie sobre la cual actúan. (A) Corriente y contracorriente paralela al eje axial del alma, (2) Selección de área del ánodo expuesta a las corrientes laterales.....	59
Figura 2.26 Área frontal del alma del ánodo desde la placa del pilote hasta la parte superior del ánodo galvánico.....	61
Figura 2.27 Ilustración de los centroides para la aplicación de las fuerzas. Cs: centroide superior, CL: centroide lateral, CF: centroide frontal.....	63
Figura 2.28 Esquema de áreas para el cálculo de centroide sobre el conjunto AA para las fuerzas laterales de arrastre por corriente y contracorriente.....	63
Figura 2.29 Esquema de áreas para el cálculo de centroide sobre el conjunto AA para las fuerzas frontal de arrastre por corriente y contracorriente.	64
Figura 2.30 Reacciones y Momentos causado por el peso y presión hidrostática	66
Figura 2.31 Reacciones y momentos causada por las corrientes marinas.....	66
Figura 2.32 Ubicación de los puntos críticos para el análisis de soldadura.....	67
Figura 2.33 Configuraciones del cordón de soldadura sobre la junta soldada 'placa-pilote'.....	71

Figura 2.34 Variables de dimensión de la placa de unión entre el alma del ánodo con el pilote del muelle.	72
Figura 2.35 Variables de dimensión para la unión entre el alma del ánodo y la placa curva.	74
Figura 2.36 Variables de dimensión para la unión entre el alma del ánodo y la placa curva.	76
Figura 2.37 Tamaño mínimo de soldadura de filete (American Welding Society, 2015)	81
Figura 2.38 Ilustración de variables en conexión en T. Fuente: AWS D1.1M/D1.1:2015	82
Figura 2.39 Eslinga con sujeción tipo canasta (Continental, 2020b).	84
Figura 2.40 Comparación entre los materiales de las eslingas de izaje frente a las mismas condiciones de aplicación (Continental, 2020b).	84
Figura 2.41 Tipos de conexiones y ‘ratches’ de sujeción. Tipos RSF, RRS y RSD con capacidades de 3,300lb hasta 10,000lb (Continental, 2020b).	85
Figura 2.42 Diferentes categorías de bolsas de elevación profesión de la marca Subsalve (Subsalve, 2020).	86
Figura 2.43 Incidencia de la corriente marina sobre la instalación de los ánodos galvánicos en el pilote metálico del muelle portuario.	88
Figura 2.44 Ilustración del ‘tope’ colocado bajo la medición establecida en el pilote	89
Figura 2.45 Ilustración del proceso de izaje del conjunto AAP sobre el agua desde una barcaza grúa.	90
Figura 2.46 Ilustración de la distancia de descenso sugerida de la carga para el posterior uso de la bolsa de elevación.	91
Figura 2.47 Ilustración del cambio de sujeción de la carga desde las eslingas de la grúa hacia las eslingas de la bolsa de elevación.	92
Figura 2.48 Ilustración de la manipulación del conjunto AAP hasta el tope soldado en el pilote metálico.	93
Figura 2.49 Ilustración de la carga fijada al pilote con las eslingas de nylon.	94

Figura 2.50 Configuración recomendada de amperaje para soldadura húmeda en presiones de profundidad de hasta 22.2Psi (Naval Sea System Comand, 2002)	95
Figura 2.51 Arreglo para soldadura húmeda en polaridad directa (Naval Sea System Comand, 2002).....	96
Figura 3.1 Cargas, sistema de referencia y punto de análisis	119
Figura 3.2 Resultados de reacciones	119
Figura 3.3 Esfuerzo en soldadura para tipo completa	120
Figura 3.4 Esfuerzo en soldadura para tipo completa	121
Figura 3.5 factor de seguridad en la soldadura	121
Figura 3.6 Esfuerzo sobre la conexión	122
Figura 4.1 Parámetros de soldadura tubulares. Fuente: Fuente: AWS D1.1/D1.1M:2015	133
Figura 4.2 Gráfica de categorías para Fatiga en conexiones tubulares. Fuente:Norma AWS D1.1M/D1.1:2015	134
Figura 4.3 Resistencia para conexión en T flexión en el plano. Fuente: AISC360-16 .	134
Figura 4.4 Resistencia para conexión en T flexión fuera del plano. Fuente: AISC360-16.....	135
Figura 4.5 Validación para conexión en T en flexión en el plano. Fuente: AISC360-16.....	135
Figura 4.6 Factor Q para flexión en cargas combinadas	136
Figura 4.7 Gráfica de categorías para Fatiga para placa. Fuente:Norma AWS D1.1M/D1.1:2015	137
Figura 4.8 Soldadura Precalificadas filete para placa base. Fuente: AWS D1.1/D1.1M:2015	137
Figura 4.9 Electrodo de acuerdo con el proceso y grupo para metal base. Fuente: AWS D1.1M/D1.1	138
Figura 4.10 Soldadura Precalificadas PJP ranura parcial para conexiones tubulares. Fuente: AWS D1.1/D1.1M:2015.....	138

Figura 4.11 Posiciones válidas de acuerdo con la junta y elementos por soldar.
Fuente: AWS3.6M 139

Figura 4.12 Limite de profundidad de acuerdo con el proceso de soldadura 139

Figura 4.13 Aumento de nivel para temporada de vientos fuertes. (Pourrut, 1983).....140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Resumen de la Tabla 1 de Posibles Procesos de Soldadura en medios acuáticos. (Fydrych et al., 2015).....	12
Tabla 2.1 Requerimientos del usuario. (O) Objetivo, (R) Restricciones, (F) Funciones y (M) Medios.	21
Tabla 2.2 Objetivos ponderados. Detalle del deseo del cliente.	24
Tabla 2.3 Métrica de los objetivos del soporte.....	25
Tabla 2.4 Lista de restricciones A: Acciones que el diseño debe cumplir.	26
Tabla 2.5 Lista de restricciones B: Acciones que el diseño debe impedir.	26
Tabla 2.6 Dimensiones y cantidad de ánodos(Del & Protecci, 2017).	29
Tabla 2.7 Especificación de altura y cantidad de filas de los ánodos (Del & Protecci, 2017).	30
Tabla 2.8 Parámetros técnicos para soldadura.	30
Tabla 2.9 Tabla morfológica para selección de la mejor alternativa del soporte de ánodos.....	31
Tabla 2.10 Detalle de alternativas de diseño.....	32
Tabla 2.11 Matriz de evaluación numérica para el problema de diseño del soporte de ánodos galvánicos para el sistema de protección catódica de los pilotes de un muelle portuario.....	38
Tabla 2.12 Electrodo compatible según material base. Fuente: AISC360-16.	40
Tabla 2.13 Parámetros de Diseño en soldadura subacuática. Fuente: resumen AWS D1.1/D1.1M, AWS D3.6M:2017.....	40
Tabla 2.14 Parámetros de Diseño Soldadura Placa-Pilote, Fuente: Resumen AWS D1.1/D1.1M, E90 estructuras metálicas.	41
Tabla 2.15 Parámetros de Diseño de soldadura Alma-Placa. Fuente: Resumen AWS D1.1/D1.1M:2015, AISC360-16.....	42
Tabla 2.16 Especificaciones de medidas del sistema ‘alma – ánodo’ (Del & Protecci, 2017)	49

Tabla 2.17 Dimensiones verticales a considerar para la presión hidrostática sobre el sistema ‘ánodo – alma’ (Del & Protecci, 2017).	52
Tabla 2.18 Datos de densidad y gravedad para el cálculo de presión hidrostática (White, 2003).	52
Tabla 2.19 Datos de velocidad y viscosidad cinemática para el cálculo de la fuerza de arrastre sobre el conjunto ‘alma – ánodo’(Vera et al., 2009b).	54
Tabla 2.20 Especificaciones técnicas de la bolsa de elevación Subsolve EFB1000 (Subsolve, 2020).	86
Tabla 2.21 Secciones importantes en un WPS.	97
Tabla 3.1 Resultados de los cálculos de área de la superficie superior de cada tipo de ánodo.	99
Tabla 3.2 Resultado de los cálculos de área de la superficie superior e inferior del alma para los dos diámetros de alma utilizados.	100
Tabla 3.3 Presión hidrostática en instalación crítica: Primera fila, ánodo tipo1.	100
Tabla 3.4 Presión hidrostática en instalación crítica: Segunda fila, ánodo tipo1.	100
Tabla 3.5 Fuerza hidrostática en instalación crítica: Segunda fila, ánodo tipo1.	101
Tabla 3.6 Resultados N° Reynolds para flujo de corriente sobre el conjunto AA. Cálculos sobre la geometría cilíndrica del alma y sobre el prisma de base cuadrada que representa al ánodo.	102
Tabla 3.7 Resultados N° Reynolds para flujo de contracorriente sobre el conjunto AA. Cálculos sobre la geometría cilíndrica del alma y sobre el prisma de base cuadrada que representa al ánodo.	102
Tabla 3.8 Selección de coeficientes de arrastre para Flujo y Contraflujo para las geometrías del conjunto AA.	103
Tabla 3.9 Resultados del área lateral del ánodo y área de la proyección lateral del alma del ánodo.	103
Tabla 3.10 Resultados del área frontal del ánodo y área de la proyección frontal del alma del ánodo.	104
Tabla 3.11 Resultados de fuerza de arrastre lateral sobre conjunto AA para las condiciones de corriente.	104

Tabla 3.12 Resultados de fuerza de arrastre lateral sobre conjunto AA para las condiciones de contracorriente.....	105
Tabla 3.13 Resultados de fuerza de arrastre frontal sobre conjunto AA para las condiciones de corriente.....	105
Tabla 3.14 Resultados de fuerza de arrastre frontal sobre conjunto AA para las condiciones de contracorriente.....	106
Tabla 3.15 Peso del conjunto AA para cada tipo de ánodo.....	106
Tabla 3.16 Resultados del esquema de cálculo para la coordenada en x del centroide C_L para las fuerzas de arrastre laterales.....	107
Tabla 3.17 Centroides C_L para la aplicación de fuerzas laterales sobre el conjunto AA.....	107
Tabla 3.18 Resultados del esquema de cálculo para la coordenada en x del centroide C_s para la fuerza hidrostática.....	108
Tabla 3.19 Centroides C_s para la aplicación de fuerzas superiores sobre el conjunto AA.....	108
Tabla 3.20 Centroides C_F para la aplicación de fuerzas frontales sobre el conjunto AA.....	108
Tabla 3.21 Resultados de las reacciones sobre un brazo del conjunto AA para el caso crítico: Segunda fila, ánodo tipo 1.....	109
Tabla 3.22 Resultados de los factores geométricos para el cálculo de esfuerzos en soldadura en el alma del ánodo.....	112
Tabla 3.23 Valores de factores de carga por unidad de longitud para el cálculo del cordón de soldadura en el alma del ánodo.....	113
Tabla 3.24 Esfuerzo permisible y factores de seguridad para la soldadura y el material base para tres opciones de garganta (American Welding Society, 2015).....	113
Tabla 3.25 Resultados de los factores geométricos para el cálculo de esfuerzos en soldadura en el alma del ánodo con rigidizadores.....	114
Tabla 3.26 Valores de factores de carga por unidad de longitud para el cálculo del cordón de soldadura en el alma del ánodo con rigidizadores.....	114

Tabla 3.27 Conjunto con rigidizadores para tres opciones de garganta: Esfuerzo permisible y factores de seguridad para la soldadura y el material base (American Welding Society, 2015).....	114
Tabla 3.28 Factores para análisis de conexión tubular.	115
Tabla 3.29 Resultados para resistencia disponible en conexión en T.....	115
Tabla 3.30 Resultados de los factores geométricos para el cálculo de esfuerzos en soldadura completa en la placa.	116
Tabla 3.31 Valores de factores de carga por unidad de longitud para el cálculo del cordón de soldadura completa en la placa.	116
Tabla 3.32 Resultados de factores de carga por unidad de longitud para el cálculo del cordón de soldadura completa en la placa.	117
Tabla 3.33 Resultados de los factores geométricos para el cálculo de esfuerzos en soldadura tipo C en la placa.	117
Tabla 3.34 Resultados de factores de carga por unidad de longitud para el cálculo del cordón de soldadura tipo C en la placa.....	118
Tabla 3.35 Resultados de factores de carga por unidad de longitud para el cálculo del cordón de soldadura tipo C en la placa.....	118
Tabla 3.36 Resumen de conjunto PP.	122
Tabla 3.37 Cantidad de soldadura por placa.....	123
Tabla 3.38 Aproximación de precio en trabajo anterior. Fuente: Jupesa.....	123
Tabla 3.39 Precio aproximado de materiales en soldadura subacuática.....	123
Tabla 3.40 Estimación de cotización en elementos para instalación.....	124
Tabla 3.41 Tiempo estimado de cordón de soldadura por conjunto de protección catódica.	124
Tabla 3.42 Duración del proceso de soldadura para la instalación del sistema de protección catódica en los pilotes del muelle portuario.	125
Tabla 4.1 Esfuerzos permisibles para soldadura PJP. Fuente: AWS D1.1/D1.1M:2015	133

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1	Placa curva
PLANO 2	Rigidizadores
PLANO 3	Alma de ánodo galvánico
PLANO 4	Ensamble de Alma - Pilote
PLANO 5	Ensamble Alma - Placa

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN.

Un muelle portuario es una estructura de concreto que parte desde la orilla del mar en tierra firme y se extiende sobre la superficie de éste sostenida por pilotes metálicos. Este muelle permite a los barcos la función de carga y descarga de productos desde la estructura principal hasta el lecho marino. La Guía de Diseño, Construcción, Operación de Obras Marítimas de la Dirección de Obras Portuarias de Chile, define que un muelle portuario es una terminal de atraque de penetración en el mar para embarcaciones marinas. También establece que un muelle tiene la función de proveer una estructura de soporte para el tráfico de carga (Tejada, 2011).

Debido a esta naturaleza de trabajo, los muelles portuarios deben funcionar con pilotes de soporte afianzados tanto en tierra firme como en el lecho marino, situación que expone, no solo a los pilotes de cimentación, sino también a la estructura completa al desgaste proporcionado por la salinidad del medio. Muchas estructuras construidas sobre el lecho marino, similares a los muelles portuarios, como bases militares o puentes, están actualmente construidas con perfiles de acero sumergidos en el mar. Todas estas estructuras cuentan con la protección adecuada que preserva o mantiene el funcionamiento óptimo de sus perfiles de acero y del sistema completo frente al desgaste del medio marino (Global, 2020).

Dependiendo del grado de exposición al medio ambiente de cada uno de estos perfiles, existen métodos específicos de protección anticorrosiva. De todos éstos, se destaca la protección catódica, sea por corriente impresa o por ánodos de sacrificio, siendo este último como el método más común usado para estructuras sumergidas. (Global, 2020). Este trabajo se centrará en la protección catódica por ánodos de sacrificio, sistema que requiere, entre otras cosas, colocarlos correctamente junto a los pilotes del muelle. Los ánodos son elementos compuestos con cantidades considerables de un metal que impedirá la corrosión del pilote a costa de corroerse a sí mismo. La cantidad de ánodos y peso por unidad será considerable dependiendo del tiempo de protección y cantidad de acero que se quiera proteger. Estos ánodos deben estar conectados a cada pilote de tal manera que ejerzan su trabajo de

protección sin interrupciones, pero, sobre todo, deben ser soportados por una buena estructura debido a su gran peso. Por esta razón, para garantizar que un sistema de protección catódica está cumpliendo su trabajo, es importante contar con un diseño apropiado de la estructura de soporte para los ánodos de cada pilote del muelle. Además, contar con un proceso óptimo de instalación que mantenga las cualidades esperadas para el diseño de dicho sistema.

1.1 Definición del Problema.

Se tiene en consideración el caso de un muelle portuario de 1.300 metros de longitud medidos de manera perpendicular desde la orilla del mar, sostenido con 458 pilotes metálicos cimentados tanto en la orilla de la playa como sobre el lecho marino. Este muelle fue construido hace 10 años, en 2010 y, desde ese entonces, no ha tenido instalado el sistema de protección anticorrosivo adecuado que permita garantizar la durabilidad de sus pilotes.

El método anticorrosivo que se planificó para este proyecto fue la protección catódica por ánodos galvánicos; sin embargo, aún no se finaliza este proyecto por la trascendental necesidad del diseño para el sistema de soporte para los ánodos de cada pilote.

El sistema de soporte de los ánodos de la protección catódica debe:

- Garantizar, al menos, 20 años de vida útil.
- Debe utilizar soldadura como modo de fijación en los pilotes del muelle.
- No representar un peligro para la vida marina del sector

Requerimientos.

Se necesita implementar un sistema de protección catódica para este muelle portuario en cuestión. Por lo tanto, se requiere:

- Diseñar un sistema mecánico que este adherido a los pilotes del muelle portuario y que sostenga correctamente los ánodos galvánicos para garantizar el funcionamiento correcto del sistema de protección catódica sobre el muelle.

- Aplicar matemáticas y ciencias de ingeniería mecánica para dimensionar de manera adecuada las secciones del soporte que va a sostener el peso de los ánodos galvánicos por medio de soldadura junto a cada pilote del muelle.
- Identificar las condiciones ambientales que puedan provocar la falla de la estructura de soporte de ánodos para mantener su funcionamiento adecuado.
- Usar software de diseño CAD y simulación para comprobar los análisis matemáticos del soporte de los ánodos galvánicos.

1.2 Justificación del proyecto.

Este muelle portuario en específico es una construcción de gran beneficio para el Ecuador. Fue construido como único punto nacional de abastecimiento de un producto de primera necesidad nacional que, para fines prácticos, se denominará solamente 'producto'.

Este muelle cumple la función de abastecer con 61.000 toneladas métricas de dicho producto a una planta en tierra, permitiendo también lograr reservas de hasta 20 días. Además, es el único muelle capaz de recibir buques de hasta 75 mil toneladas de peso.

De su correcto funcionamiento depende la economía del sector productivo del país referente a este producto.

Este trabajo de investigación y diseño es importante para salvaguardar la integridad estructural del muelle y sus respectivos beneficios para el país, por medio de la correcta instalación del sistema mecánico de sujeción para la protección catódica.

Previo a la existencia de una planta de almacenamiento en tierra de dicho producto, existían otros métodos de almacenamiento en mar que, por el hecho de ser imprácticos, aumentaban el costo final de este producto para la población ecuatoriana. Al lograr la instalación adecuada de la protección catódica que requieren los pilotes del muelle, se detendría el proceso de deterioro de éstos y se garantizaría su continuo funcionamiento para el país.

De esta manera, se mantendría el sistema de almacenamiento actual, el cual permite la asequibilidad de dicho producto para las familias ecuatorianas.

Por no haber tenido la protección catódica durante el tiempo de existencia del muelle, el espesor del alma se ha reducido al 60% debido a la corrosión. Si este escenario continúa la estructura completa podría colapsar, representando no solo un peligro para los habitantes que estén en los alrededores, sino también un daño grave para la fauna del sector.

Sin embargo, el daño profundo que se desataría en caso de quedar inutilizado este muelle sería regresar al método antiguo de almacenamiento de este producto. Esta situación significa que el costo final del producto que se admite por este muelle aumentaría y así, comienza un problema económico para el país, puesto que, al ser un producto de primera necesidad, existe la posibilidad de que el estado lo asuma como gasto público.

Este proyecto, entonces, busca detallar un procedimiento óptimo para la instalación del sistema de protección catódica contra la corrosión mediante un diseño adecuado del sistema de sujeción de los ánodos galvánicos a los pilotes del muelle, asegurando su operatividad en el tiempo de vida útil de los ánodos galvánicos.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo General.

Diseñar un sistema de sujeción mecánica de ánodos galvánico para incrementar la durabilidad de los pilotes de un muelle portuario mediante la incorporación de un sistema de protección catódica.

1.3.2 Objetivos Específicos.

En esta sección, en el caso de proyecto multidisciplinario se incluirán todos los objetivos específico que aportarán cada uno de los grupos de cada carrera participante, identificando entre paréntesis la carrera que está a cargo de ese objetivo. Ejemplo:

- Desarrollar el diseño conceptual del sistema de sujeción de la protección catódica.
- Analizar cargas y esfuerzos para dimensionar el sistema de sujeción.
- Especificar las características técnicas de soldadura subacuática para la instalación del sistema.
- Establecer la metodología de instalación del sistema de sujeción mecánica.

1.4 Marco teórico.

1.4.1 Pilotes metálicos de cimentación.

Los pilotes de cimentación son usados para soportar estructuras completas o grandes plataformas, incluso las que están afianzadas en el lecho marino. Entre las estructuras marinas se encuentran los muelles portuarios; cuyos pilotes de cimentación sostienen toda la estructura completa. Son comunes por soportar los grandes impactos que se producen a la llegada de buques u objetos que flotan en el mar y también por sostener firme al muelle frente a las fuerzas de las olas y las corrientes marinas. El muelle considerado en este proyecto tiene pilotes metálicos en forma de cilindros huecos hincados en el suelo duro del lecho marino.

Los pilotes metálicos están sujetos a corrosión por estar hechos de acero y por encontrarse en un medio salino sin una protección adecuada contra la corrosión (Urbina Palacios, 2004).

1.4.2 Corrosión en el acero.

La corrosión tiene como principales autores al ánodo, cátodo y medio electrolito, en donde el ánodo protege al cátodo al ceder electrones, es decir, al oxidarse. La corrosión en el mar, como medio electrolito, es un proceso natural y peligroso para el acero, puesto que, llega a producir pequeñas grietas y pérdida de espesor en el acero. (Salazar-Jiménez, 2015). Para el caso de los pilotes de un muelle portuario, el medio electrolítico es el mar, el ánodo es el acero de los pilotes, y el cátodo es el mismo metal en unión iónica con el agua.

1.4.3 Protección Catódica.

Respecto a esta situación presentada, la protección catódica es el método más comúnmente usado contra la corrosión (Global, 2020). La protección catódica consiste en colocar un nuevo metal en el medio para reemplazar la función del acero de cimentación como agente reductor y así, este metal nuevo cumple la función de agente reductor en beneficio del acero para protegerlo de la corrosión. Sin embargo, la protección catódica requiere de colocar cantidades considerables de este metal de reemplazo sostenido a los pilotes del muelle, cantidad de metal que tendrá un peso considerable dependiendo del tiempo de protección que se quiera dar al acero (Szabó & Bakos, 2006; Tamayo Gutierrez, 2009).



Figura 1.1 Descripción del estado de corrosión sufrido por el pilote de acero del muelle portuario a consideración.

El funcionamiento de la protección catódica se ilustra en la Figura 1.1, indicando el estado previo y la Figura 1.2 para indicar la protección catódica instalada. Mientras que, la forma técnica en la que funciona la protección catódica se muestra en la Figura 1.3.

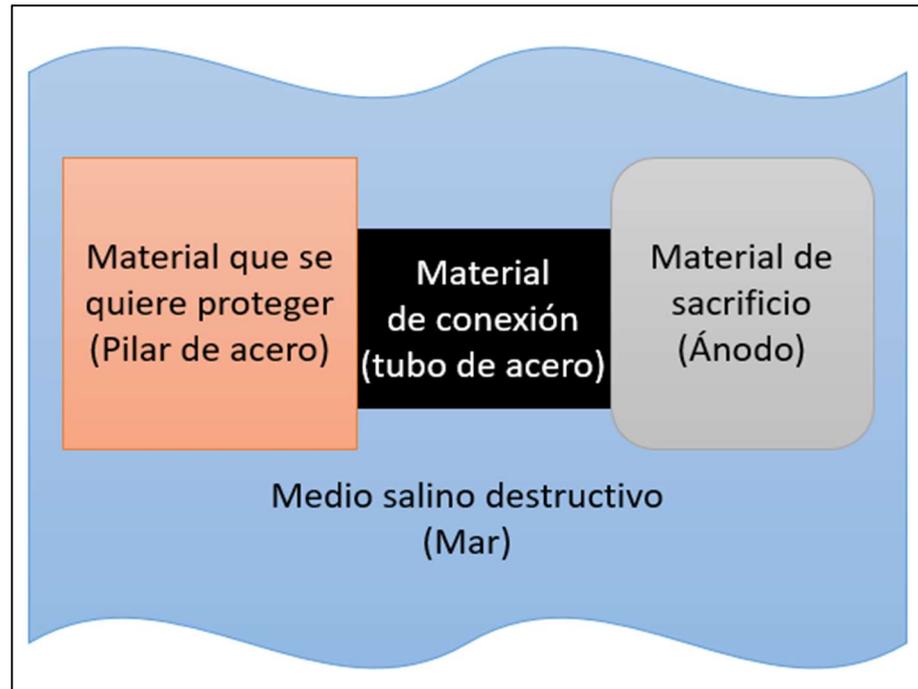


Figura 1.2 Descripción de la protección catódica instalada sobre un material de acero sumergido en un medio salino.

El método de protección catódica por instalar es por ánodos galvánicos o de sacrificio, de esta forma se podrá salvaguardar la integridad del muelle portuario (Del & Protecci, 2017).

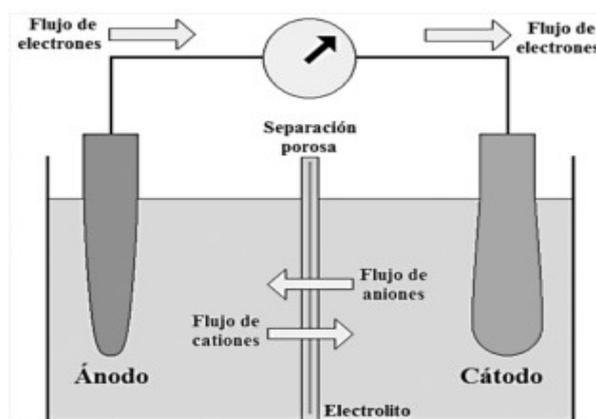


Figura 1.3 Circuito electroquímico de protección catódica(Salazar-Jiménez, 2015).

1.4.4 Ánodos galvánicos de sacrificio.

Se tiene en consideración el muelle portuario de la sección 1.1, para el cual se planificó una protección catódica según en el estudio (Morken S.A., 2015). Dicha protección consistió en el dimensionamiento de los ánodos

galvánicos que serían instalados en cada pilote del muelle. Este dimensionamiento de ánodos se desarrolló a partir del flujo de corriente necesario para proteger a los pilotes, por lo tanto, dependiendo del pilote a proteger tendrán diferente masa y dimensión (Morken S.A., 2015). El sistema de protección catódica no requiere de energización externa y su puesta en marcha inicia una vez completada la instalación.

Por esta razón, ya que el ánodo tiene una aleación específica diferente al metal protegido, muchos de ellos incluyen una placa en sus extremos o un alma y así poder ser instalados. (*Sistemas de Protección Catódica 1*, n.d.). Para la protección del muelle se tiene ánodos galvánicos con las siguientes características (Del & Protecci, 2017):

- 20 años de vida útil en el sistema de protección de catódica,
- Temperatura de servicio menor a 25°C, con alma de acero
- Calidad del alma del acero: API 5L Grado B, ASTM A106 GRADO A, en 10025- Grado S235 O S275.

El problema planteado en la sección 1.1, resalta la dificultad de la instalación de la protección catódica, no solo por el requerimiento de un sistema de sujeción adecuado para los ánodos de este sistema, sino también, por la dificultad del trabajo con éstos bajo el agua. Por lo tanto, se hace importante también, detallar información sobre los modelos de estructuras más comunes para la instalación de ánodos galvánicos, y los modos establecidos para la instalación de estos en el medio marino. De esta manera, el diseño conceptual para el desarrollo de la estructura de soporte y la metodología de instalación de éstos puede desarrollarse de manera más óptima y competitiva.

1.4.5 Sistema de sujeción para ánodos galvánicos

Los sistemas de sujeción para los ánodos galvánicos de la protección catódica son variados en el mercado, sin embargo, dependerá de su aplicación y lo que requiera el cliente. Este presente proyecto está centrado

en ánodos de sacrificio para estructuras marinas, donde el pilote será protegido por el periodo de tiempo indicado en la sección 1.4.4. Se destaca, sobre todas las cosas, que el sistema de sujeción debe asegurar la fijación de los ánodos, sin intervenir en el circuito electroquímico que se dará lugar entre el ánodo galvánico y el pilote como cátodo. (Aquantica proyectos marinos, 2020).

Empresas dedicadas al diseño de ánodos para estas aplicaciones cuentan también con un sistema de soporte y sujeción. Estos soportes se revisan en las secciones 1.4.5.1 y 0 para lograr una idea general de éstos.

Cada soporte tiene su estilo e instalación, entre los cuales se revisa a Galvotec Corrosion Service y Blue Logic.

1.4.5.1 Galvotec Corrosion Service.

Presenta un soporte con perno en U para afianzar los ánodos al pilote, y posteriormente ser ajustado con pernos y tuercas. También presentan perfiles como base inferior y superior que dan estabilidad al soporte. Además, ubican un perno en cada perfil para fijarlo aún más al pilote. (Galvotec Corrosion Service, n.d.)

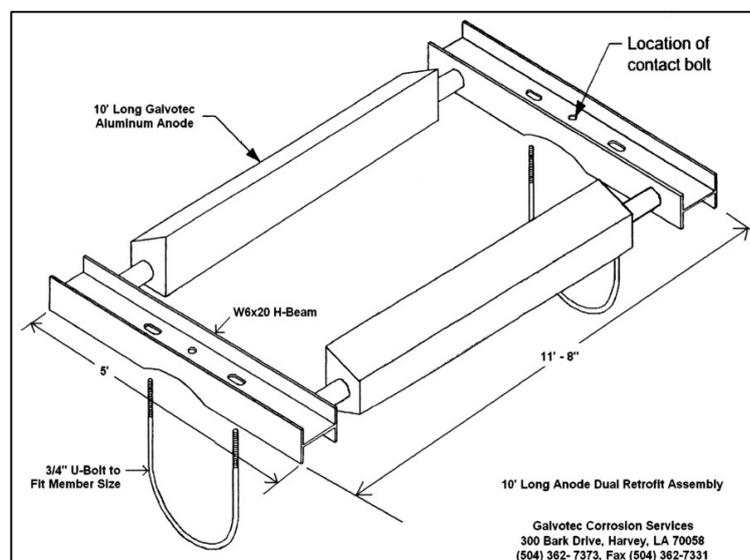


Figura 1.4 Sistema soporte de Galvotec (Galvotec Corrosion Service, n.d.).

1.4.5.2 Blue Logic.

El soporte es fijado en la parte superior e inferior por la penetración de 4 pernos, una vez que la estructura haya abrazado al pilote. Para su instalación cuenta con un agarre que permitirá su descenso una vez enganchado. (*Blue Logic*, 2016).

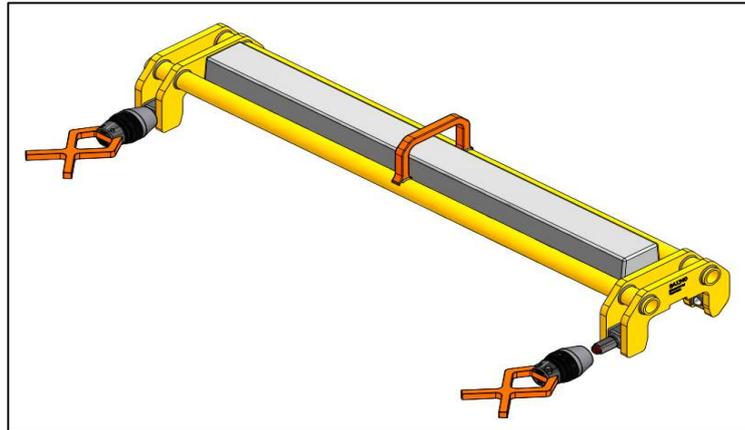


Figura 1.5 Sistema soporte de Blue Logic (*Blue Logic*, 2016).

Estos sistemas presentados requieren gran elaboración de estructuras para el soporte de los ánodos. Sin embargo, su aplicación no es del todo mala, puesto que son orientados a pequeños ánodos instalados para tiempos de reemplazo cortos.

No son aplicaciones útiles para ánodos de gran peso y tamaño cuya instalación sea fijada para un lapso de hasta veinte años. Por otra parte, también son equipos que pueden ser ensamblados tanto en la superficie como en el medio marino, además de ser obligatoriamente instalados por medio de pernos y soldadura en el medio marino, situación que no representaría gran problema para dimensiones de ánodos más comunes y pesos más ligeros.

Si embargo, para ánodos de gran peso y tamaño como los que se detallan en la sección 2.1.8.1, cuya instalación debe realizarse con un método diferente ser por medio de una unión soldada, requiere de procesos subacuáticos planificados de mejor manera y con menos accesorios.

1.4.6 Soldadura subacuática.

Una condición importante para lograr la sujeción mecánica de los ánodos galvánicos junto a los pilotes metálicos es la soldadura. Ésta es muy conocida en casi todos los procesos de ingeniería, sin embargo, la soldadura subacuática es la que requiere de especial atención al momento de ser especificada.

La soldadura subacuática es el método de unión fija al que más se le dedica espacio en este proyecto. Esta forma de soldadura está dividida en dos categorías: Soldadura húmeda y Soldadura seca (Nixon et al., 1982; Sundarapandiyam et al., 2017). La soldadura seca es aquella donde el área a ser soldada se envuelve en una cámara hiperbárica, proceso con el cual se expulsa el agua usando un gas especial para realizar el proceso de soldado. La soldadura húmeda es la que se realiza dentro del agua sin eliminación de ésta.(Orr, 2006).

En el documento de la Soldabilidad del Acero en Condiciones Subacuáticas (Fydrych et al., 2015), se resume una tabla de los posibles procesos de soldadura en condiciones subacuáticas. El resumen de esta tabla se detalla en la Tabla 1.1. En esta tabla se detallan los procesos MMA, SAW, MIG/MAG, FCAW, (arco de metal manual, soldadura de arco sumergido, gas inerte metálico o gas activo metálico, soldadura de arco con núcleo fundente, respectivamente).

1.4.6.1 Soldadura SMAW.

De todos los procesos mencionados en la Tabla 1.1, se especifica que el método MMA (Manual Metal Arc, por sus siglas en inglés), es el proceso manual más comente usado.

Cabe destacar que este método de soldadura se desarrolla con electrodos recubiertos (Fydrych et al., 2015). Esta información se corrobora con el documento Revisión de los Procesos de Soldadura Subacuática (Sundarapandiyam et al., 2017), en donde se especifica que

la soldadura por arco protegido (SMAW) es el método más comúnmente usado en soldadura subacuática.

Tabla 1.1 Resumen de la Tabla 1 de Posibles Procesos de Soldadura en medios acuáticos. (Fydrych et al., 2015).

Proceso	Soldadura Húmeda
MMA (111)	Si
SAW (121)	Si
MIG/MAG (131/135)	Posible
FCAW (136/138)	Si

Para el proceso de soldadura subacuática por arco protegido se sigue el mismo proceso que la soldadura de arco protegido en superficie. Este consiste en colocar la pieza a soldar a un lado de un circuito mientras que el ánodo metálico en el otro lado. Al unir estas piezas ocurre una chipa, la cual produce un arco eléctrico que derrite el metal base formando una especie de piscina de soldadura.

Mientras esto ocurre, la punta del ánodo también se derrite sobre este espacio logrando que el metal de aporte se una al metal base. Es importante mencionar que, durante este proceso, la cubierta del fundente del electrodo se derrite para producir un gas de protección del arco eléctrico, para así, proteger también la transferencia de metal (Sundarapandiyan et al., 2017).

1.4.6.2 Características de esta soldadura.

Las soldaduras realizadas bajo esta categoría ayudan a conseguir uniones con las mismas características y propiedades que aquellas que se realizan en la superficie. Si se realiza una comparativa de estos dos sistemas de soldadura las diferencias más significativas radican en la aplicación de corriente directa, y el aislamiento del cableado, siendo doblemente aislado en el caso de la soldadura húmeda.

En cuanto al circuito eléctrico básico se usa el mismo en ambas categorías (Orr, 2006). Otro aspecto que se debe considerar dentro de la soldadura submarina son las profundidades a la cuales se desarrolla el trabajo.

Estas son frecuentemente utilizadas a profundidades no mayores a 100 metros, puesto que, la presión hidrostática vuelve compleja la estabilidad del arco eléctrico y, por ende, la calidad de dicha soldadura tiende a reducirse, situación que es adicional a las capacidades físicas de los buzos (Garašić et al., 2010).

1.4.6.3 Materiales para la soldadura subacuática.

Los materiales consumibles requeridos para el proceso SMAW consisten en electrodos de soldadura húmeda impermeabilizados producidos normalmente de manera comercial.

En la Figura 1.6 se muestra un resumen la lista de electrodos seleccionados de los procesos de soldadura húmeda y pruebas de certificación realizadas por la armada norteamericana, según el Manual de Corte y Soldadura Submarina de la Marina Estadounidense (Naval Sea System Comand, 2002), seleccionando los electrodos E7014 como mayormente usados para aceros al carbono.

Size	Description
Commercially Prepared Waterproof Electrodes	
1/8" Andersen Easy ¹ Weld #1	Carbon Steel (E7014)
1/8" BROCO Sof-Touch ¹	Carbon Steel (E7014)
1/8" BROCO SS	Stainless Steel (E3XX)

Figura 1.6 Electrodos para Proceso SMAW subacuático. A la izquierda, la dimensión del electrodo de soldadura. A la derecha, la descripción del electrodo (Naval Sea System Comand, 2002).

1.4.7 Equipos de soldadura.

¿Por qué se deben utilizar los equipos de soldadura? Estos equipos intervienen en el proceso de instalación, por esta razón, podrían representar cierta orientación en cuando al diseño o dimensiones del soporte. Los equipos utilizados para soldadura subacuática se detallan en la Figura 1.7. Desde la parte superior hasta la parte inferior, se detallan: el porta electrodo, cepillo de alambre, martillo cincelador, lija, equipo ultrasónico para la detección de grosores y defectos y, por último, el kit de prueba de tinta penetrante (American Welding Society, 2017; Naval Sea System Comand, 2002). Estos equipos se usan tanto para el proceso de soldadura en superficie, como para la soldadura húmeda.

Welding equipment	Electrode holder
	Weighted wire brush
	Chipping hammer
	Scraper
	Ultrasonic thickness and flaw detection device
	Dye Penetrant test kit

Figura 1.7 Resumen de los equipos recomendados para soldadura húmeda (Naval Sea System Comand, 2002).

Una vez desarrollado el concepto general de la soldadura subacuática, se desarrolla el modo de instalación de ésta en un medio marino, ampliado en el Capítulo 2.9, sección 2.9.1. Por lo cual, primero se debe detallar el marco teórico correspondiente a los procesos de instalación submarina y soldadura subacuática como se especifica a continuación en la sección 1.4.8 para, de manera posterior, considerar si afectan al diseño del soporte.

1.4.8 Instalación subacuática.

Para el proceso de soldadura en el medio marino se deben considerar, al menos, tres factores: la el buque de carga, los buzos y los equipos para la soldadura (Pardo Ordoñez & Valdiviezo Vilema, 2016). Esta información se corrobora con el documento de Teoría y Aplicaciones de la Soldadura

(Symbols & Metals, 2006), en donde se detallan los elementos principales que intervienen en el proceso de soldadura subacuática.

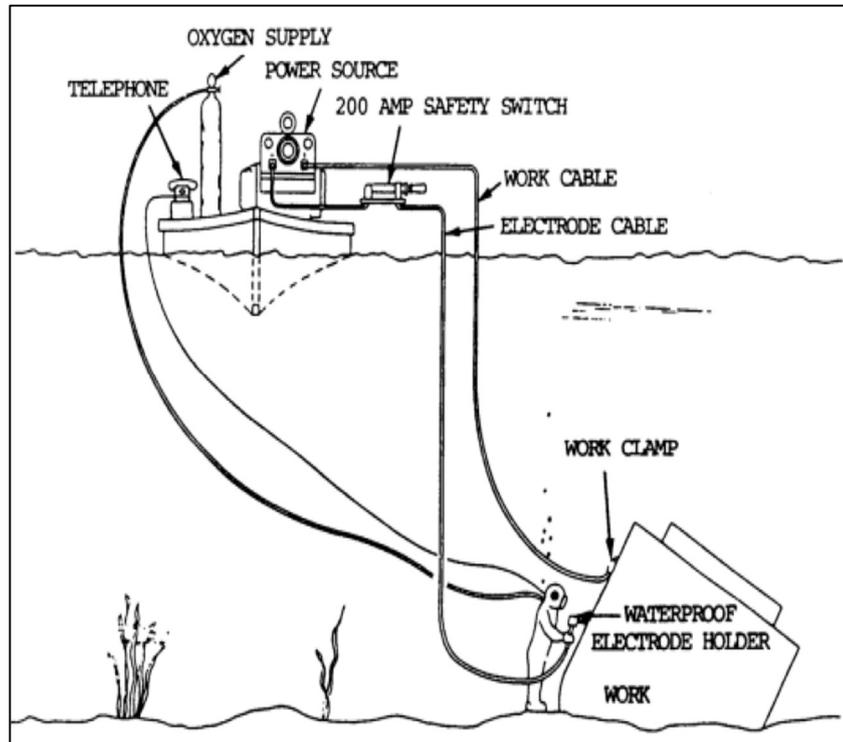


Figura 1.8 Principales elementos que intervienen en el proceso de soldadura subacuática (Symbols & Metals, 2006).

En la Figura 1.8 se observan estos elementos, entre los cuales se consideran dos grupos: (1) los equipos para el buzo, como el tanque de oxígeno y el medio de comunicación y; (2), los equipos para la soldadura, como el cable del electrodo, el cable de trabajo y la fuente de poder. Se considera importante para este proceso de soldadura contar con un buque de carga para los equipos de trabajo. Los parámetros para la ejecución de la soldadura subacuática se analizan detalladamente en el Capítulo 4, en la sección 2.9.3.

1.4.9 Instalación y ensamble de equipos en medios marinos.

En la sección 1.4.8 se detallan los equipos o componentes a considerar en la soldadura subacuática. Aquí, en esta sección se consideran los equipos para la instalación de sistema de protección catódica. Para toda instalación submarina se debe utilizar un buque de instalación, o un buque grúa.

En un proyecto de grado realizado por estudiantes de la Universidad Católica Andrés San Bello en Venezuela, referente a la Instalación de tuberías submarinas desde una embarcación de ensamblaje, se indica que, para instalar estas tuberías en el fondo marino se requiere del remolque del sistema completo a instalar o el tendido de estas en el suelo marino a partir de un buque de instalación (Alkhouri Issa & Da Costa Arnald, 2018). La Figura 1.9 detalla la instalación final de los ánodos galvánicos en el muelle portuario.

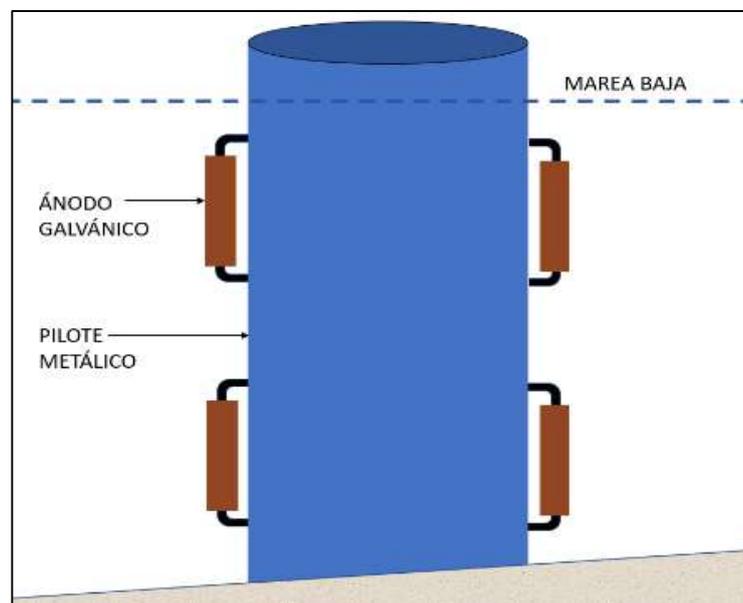


Figura 1.9 ilustración grafica del modo de instalación de ánodos galvánicos de la protección catódica en el muelle portuario.

Se puede considerar, entonces, que para los procesos de instalación en medios subacuáticos en donde se involucre también un proceso de soldadura, se debe considerar un buque grúa para la sujeción de los componentes de la protección catódica y un equipo que considere los componentes para el proceso de soldadura.

1.4.10 Condiciones ambientales: Marea y Corrientes marinas.

Además de conocer sobre la protección catódica y las posibles formas de instalarla en los pilotes del muelle portuario, se requiere también considerar las condiciones ambientales para dicha instalación, en este caso, las corrientes marinas. Esta información de las condiciones de marea y

corrientes no es únicamente útil para el proceso de instalación, sino también para el cálculo de fuerzas sobre el cordón de soldadura que se realizará sobre el soporte de ánodos galvánicos.

La corriente marina es un fenómeno de la naturaleza originada por la rotación de la tierra, y sus cambios dependen de la ubicación geográfica según la temporada del año. La circulación de las corrientes en el océano Pacífico disminuyen conforme nos acercamos a la profundidad, hasta considerarse despreciable.

Para las costas Ecuatoriales las corrientes toman dirección única y su magnitud aumenta cuando se dirigen hacia el oeste, además, dispone de una contracorriente en dirección opuesta. (Wolfgang Schneider, 2007) .El régimen del viento está involucrado con el aumento de velocidad de las corrientes.

En Ecuador un cambio en la velocidad de este fenómeno involucra variaciones en la corriente marinas del océano Pacífico. Siendo Julio, Agosto y Septiembre los meses donde las condiciones climáticas y corrientes marinas se consideran estables.(Pourrut, 1983).

1.4.10.1 Velocidades.

Las mediciones son obtenidas mediante sensores que validan profundidades entre 10 y 20 metros. De acuerdo con la zona costanera, el flujo y contraflujo varía en magnitud y dirección para la temporada de año censada.

A partir del estudio de INOCAR se presenta los valores máximos en todo el año, como se muestra en la Figura 1.10. (Vera et al., 2009a). Siendo las velocidades máximas para Monteverde 0.32 y 0.31 para flujo y reflujos respectivamente.

Lugar	magnitud (m/s)		dirección (grados)	
	flujo	reflujo	flujo	reflujo
Salinas	0.29	0.27	NE - E - SE	NW - N
Sta Rosa.	0.5	0.42	SE	NW
La Libertad	0.3	0.15	E - NE	W - N - NE
Ballenita	0.21	0.15	NE	N - NE
Pta. Blanca	0.2	0.15	E	E
Monteverde	0.32	0.31	NE - E - SE	NE - E - SE
Valdivia	0.23	0.13	E	SE - NE
Montañita	0.35	0.19	SE	SE
La Entrada	0.22	0.11	NW	SW
Puerto Rico	0.73	0.42	NW	NW

Figura 1.10 Tabla de velocidad máximas (Vera et al., 2009a).

1.4.10.2 Nivel de Mar

El nivel de la marea se obtiene del INOCAR para mediciones pronosticadas durante el año, siendo Monteverde un sitio por evaluar por la existencia de un Muelle portuario. (*Estación MONTEVERDE - Pleamar y Bajamar, 2021*). En la Figura 1.11, se observa la variación promedio del nivel del mar que se espera en el 2021, sin embargo, solo da una predicción.

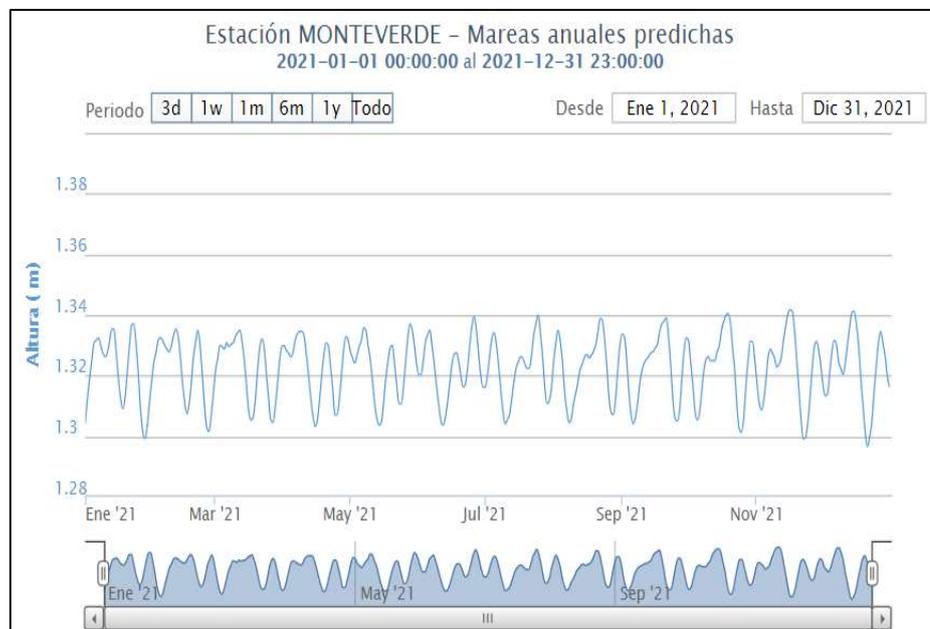


Figura 1.11 Marea anuales predichas (INOCAR,2021)

En la Figura 1.12 muestra la variación de la marea para días puntuales dentro del mes de enero, de esta forma se obtiene un plano más abierto del nivel del mar.

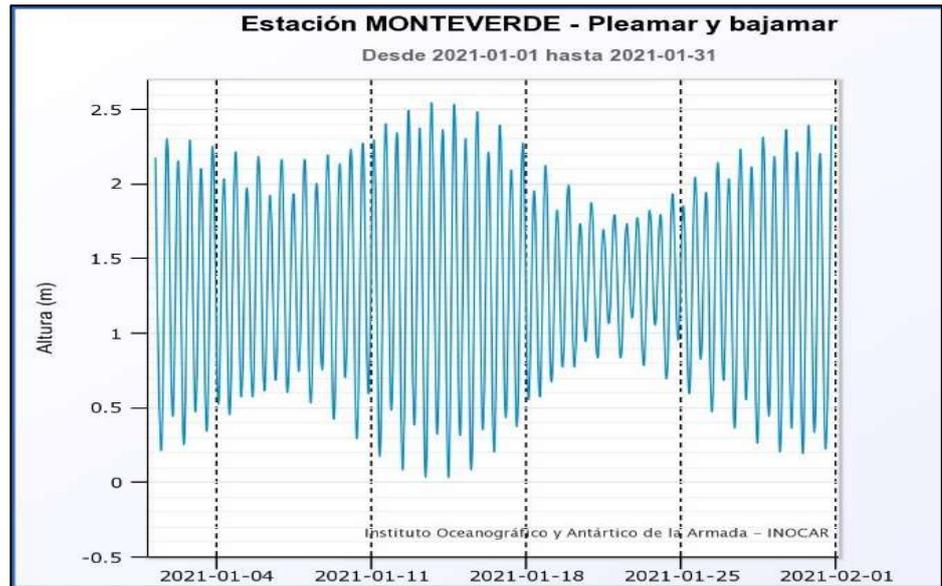


Figura 1.12 Valores de Nivel de Mar en Monteverde (INOCAR 2021).

La altura máxima que se consideró se presenta con un valor de 2.53. Sin embargo, suele presentar variaciones por el cambio climático de acuerdo a la costa de América entre 40 a 50 cm (Pourrut, 1983) según la Figura 4.13. Finalmente, se espera que la mayor altura de la ronda por los 3 m por encima de la marea baja.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Definición del soporte de sujeción mecánica.

2.1.1 Formulación y análisis del problema.

Después de haber definido un problema junto con los requerimientos del usuario y sus restricciones fue importante conocer qué se debe hacer para llevar a dicha situación hasta el estado de solución. En cualquier problema, durante la etapa del análisis, siempre se debe establecer un estado inicial del cual se parte y un estado posterior esta al cual se quiere llegar.

El método adecuado para visualizar esta situación de manera gráfica fue el establecimiento de los estados A y B como puntos de arranque y llegada respectivamente, aclarándole así, al diseñador, cuál es la situación a la cuál debe apuntar como solución. Los estados A y B se ilustran en la Figura 2.1.

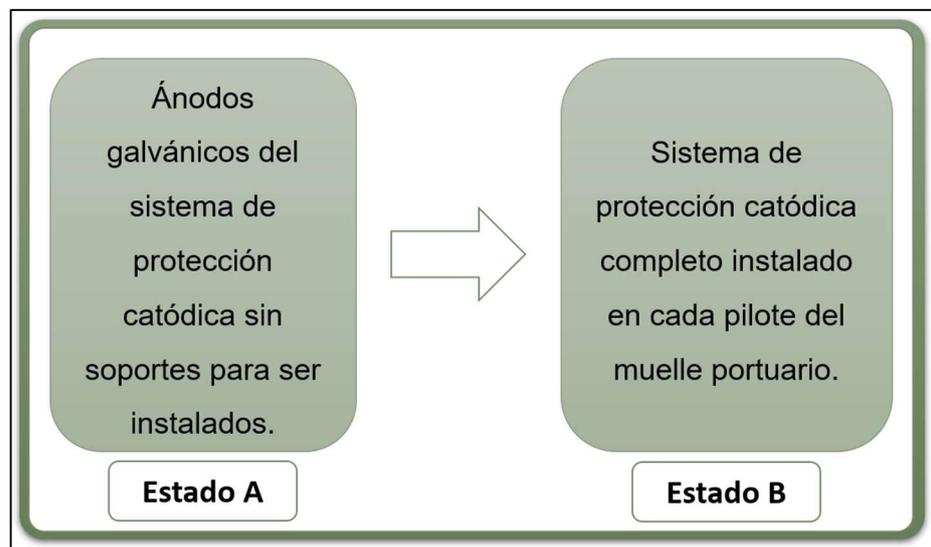


Figura 2.1 Ilustración de Estados A y Estado B.

2.1.2 Requerimientos del diseño.

Una vez claro el punto al cual se quiere llegar, se tuvo que detallar los requerimientos del diseño, sin los cuales el proyecto no hubiera acertado a la aplicación deseada.

Estos requerimientos se redactaron en forma de lista, como se muestra en la Tabla 2.1. Lista que también clasifica dichos requerimientos en objetivos, restricciones, funciones y medios, para entender las metas del diseño. Los requerimientos del diseño son las cualidades, funciones, métodos, limitaciones y otros elementos que se describen para el proyecto.

Tabla 2.1 Requerimientos del usuario. (O) Objetivo, (R) Restricciones, (F) Funciones y (M) Medios.

Necesidades del cliente	O	R	F	M
Sostener el peso de los ánodos			x	
Crear o formar un circuito eléctrico			x	
Conductor		x		
Estar fijo a la bancada	x			
Relativamente barato (Material comercial)	x			x
Soldable	x			
Resistente a carga cíclicas (olas)	x			
No deformarse plásticamente	x			x
Fácil ensamble e instalación	x			x
Bajo costo de ensamble e instalación	x			
Durabilidad	x			
Bajo costo de Manufactura	x			
No actuar como ánodo en el circuito cerrado	x			
Mantener fijos y estables a los ánodos			x	
Rígido	x			
Ligero	x			x
Estar soldado a la bancada		x		x

2.1.3 Planteamiento de objetivos.

2.1.3.1 Árbol de objetivos.

El árbol de objetivo es el paso adecuado del proceso de diseño para entender las metas del objeto que se va a diseñar. Es una descripción gráfica de las metas del artefacto a diferencia de las metas del proyecto.

El árbol de objetivos se presenta como una estructura jerárquica, en donde el objetivo principal se encuentra en la cúspide del árbol y la submetas en diferentes niveles de importancia, como se muestra en la Figura 2.2.

Los objetivos son expresiones de los atributos y del comportamiento que tanto el cliente como los usuarios encontrarían atractivos.

Los atributos que se consideraron para el Sistema de Soporte se especifican de la siguiente manera:

El soporte debe ser útil para:

- Conducir electricidad.
- No deformarse plásticamente por el peso de los ánodos.
- No actuar como ánodo en el circuito cerrado.
- Permitir el cambio de ánodos fácilmente.

Además, el soporte debe ser:

- Fijo y estable frente a la corriente marina.
- Rígido.
- Ligero.
- Durable.
- Soldable.
- Resistente a cargas cíclicas (olas).
- Relativamente barato en construcción (apunta a material nacional para hacer del soporte).
- De fácil ensamble e instalación.
- Relativamente barato en el proceso de ensamblado (apunta a los medios nacionales para el proceso de ensamble del soporte con los ánodos en los pilotes del muelle).

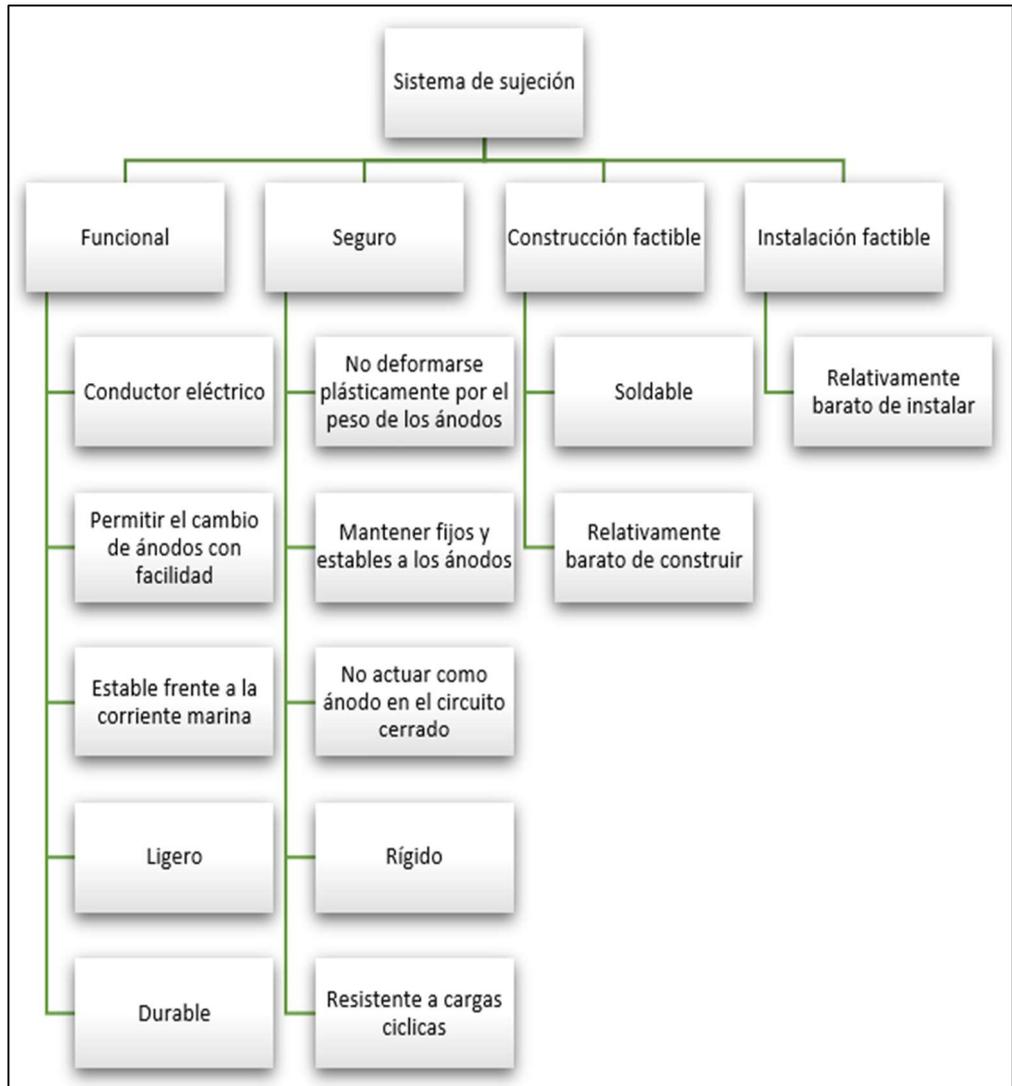


Figura 2.2 Árbol de objetivos de diseño del Sistema de sujeción mecánica. Fuente: Elaboración propia.

2.1.4 Objetivos ponderados.

Los objetivos ponderados sirven para detallar la importancia de los deseos del cliente, es decir, establecer qué realmente desea este. Por esta razón, darles una calificación a los objetivos es muy importante para, de manera posterior, elegir una alternativa de diseño de entre las opciones ya establecidas durante el proceso de diseño conceptual.

Los objetivos para este diseño se ponderaron acorde a la importancia que tenía uno sobre otro. Se analizaron de izquierda a derecha entre sí, como se muestra en la Tabla 2.2. Es decir, si el objetivo 'Estar fijo a la bancada' era más importante que el objetivo 'Costo de manufactura', se colocaba el

número 1. Lo mismo se hizo al comparar el objetivo 'Costo de manufactura' con el objetivo 'Estar fijo a la bancada', para cuyo caso la calificación será 0, puesto que no es más importante el uno que el otro; así, sucesivamente para cada objetivo.

Tabla 2.2 Objetivos ponderados. Detalle del deseo del cliente.

	Estar fijo a la bancada	Bajo costo de manufactura	Soldable	Resistente a carga cíclicas (olas)	No deformarse plásticamente	Fácil ensamble e instalación	Instalación relativamente barata	Durabilidad	No actuar como ánodo en el circuito cerrado	Rígido	Ligero	TOTAL	PONDERACIÓN
Estar fijo a la bancada		1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	5	0.091
Bajo costo de manufactura	0		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0.018
Soldable	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	10	0.182
Resistente a carga cíclicas	1	1	0		1	1	1	0	0	1	1	7	0.127
No deformarse plásticamente	1	1	0	0		1	1	0	0	1	1	6	0.109
Fácil ensamble e instalación	0	1	0	0	0		1	0	0	0	1	3	0.055
Instalación relativamente barata	0	1	0	0	0	0		0	0	0	0	1	0.018
Durabilidad	1	1	0	1	1	1	1		0	1	1	8	0.145
No actuar como ánodo	1	1	0	1	1	1	1	1		1	1	9	0.164
Rígido	0	1	0	0	0	1	1	0	0		1	4	0.073
Ligero	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		1	0.018
												55	1

2.1.5 Métricas.

Previo al detalle de las restricciones fue importante establecer la métrica de los objetivos, como se muestra en la Tabla 2.3. De esta manera, se logró esclarecer su intervención en el diseño. La métrica detalla y explica el alcance de cada objetivo.

Tabla 2.3 Métrica de los objetivos del soporte.

Objetivos	Métrica
Estar fijo a la bancada	Tipo de unión.
Bajo costo de manufactura	Manufactura nacional.
Soldable	Composición química del material.
Resistente a carga cíclicas (olas)	Esfuerzo ultimo de tensión.
No deformarse plásticamente	Esfuerzo de fluencia.
Fácil ensamble e instalación	Número de piezas.
Instalación relativamente barata	Número de piezas, Manufactura nacional.
Durabilidad	Esfuerzo ultimo de tensión.
No actuar cómo ánodo en el circuito cerrado	Composición química del material.
Rígido	Módulo de Young.
Ligero	Peso.

2.1.6 Restricciones.

El desarrollo de la métrica respecto a los objetivos sirvió para entender cómo éstos se pueden lograr con la aplicación de la ingeniería, sin embargo, dicha aplicación no es infinitamente libre.

La identificación de restricciones para el diseño permitió delimitar a los objetivos y rechazar alternativas que fuesen inaceptables. Estas restricciones del diseño se detallan de acuerdo con los objetivos. El diseño permite que:

Tabla 2.4 Lista de restricciones A: Acciones que el diseño debe cumplir.

Restricción	Objetivo
Material conductor	Forme un circuito cerrado.
Material con mayor nobleza que el ánodo.	No actúe como ánodo.
Pocas piezas.	Fácil ensamble e instalación.
Soldado a la bancada.	Soldable.

El diseño no permite que:

Tabla 2.5 Lista de restricciones B: Acciones que el diseño debe impedir.

Restricción	Objetivo
Fallar en tiempo menor a 20 años.	Durabilidad.
Dificultad de manipulación.	Ligero.

2.1.7 Establecimiento de funciones.

2.1.7.1 Caja negra.

El modelo de datos especificado como “caja negra” es una representación gráfica que relaciona los datos de entrada de un sistema en proceso de diseño con los datos de salida de este, como se ilustra en la Figura 2.3. En muchos casos, este modo de análisis puede ayudar a identificar funciones o datos de entrada y salida al sistema que pudieron haber sido omitidos en el análisis inicial.

Entrada: Ánodos galvánicos; Pilotes de acero; Medio electrolítico (mar).

Salida: Sistema de protección catódica en marcha.

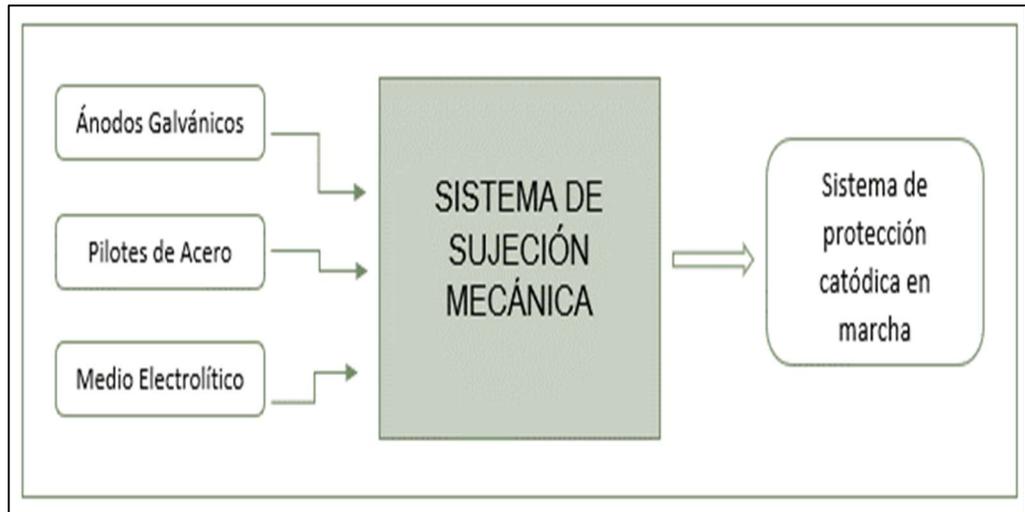


Figura 2.3 Representación de la herramienta 'Caja Negra'.

Funciones Principales:

El Sistema de Sujeción Mecánica debe:

- Sustener el peso de los ánodos (recibir el peso de éstos).
- Crear un circuito cerrado.
- Impedir que el ánodo tenga movimiento respecto al soporte.

2.1.7.2 Caja transparente.

Este modelo de análisis de funciones es una variación de la caja negra que permite revelar varias funciones que entran en juego al momento de lograr un resultado o cambio del estado A al estado B. Ésta se ilustra en la Figura 2.4.

Elementos de la Caja Transparente.

- Soporte de ánodos.
- Fijador de ánodos.
- Conductor eléctrico.
- Conexión "ánodo – soporte".
- Conexión "cátodo – conductor".
- Conexión "soporte – conductor".

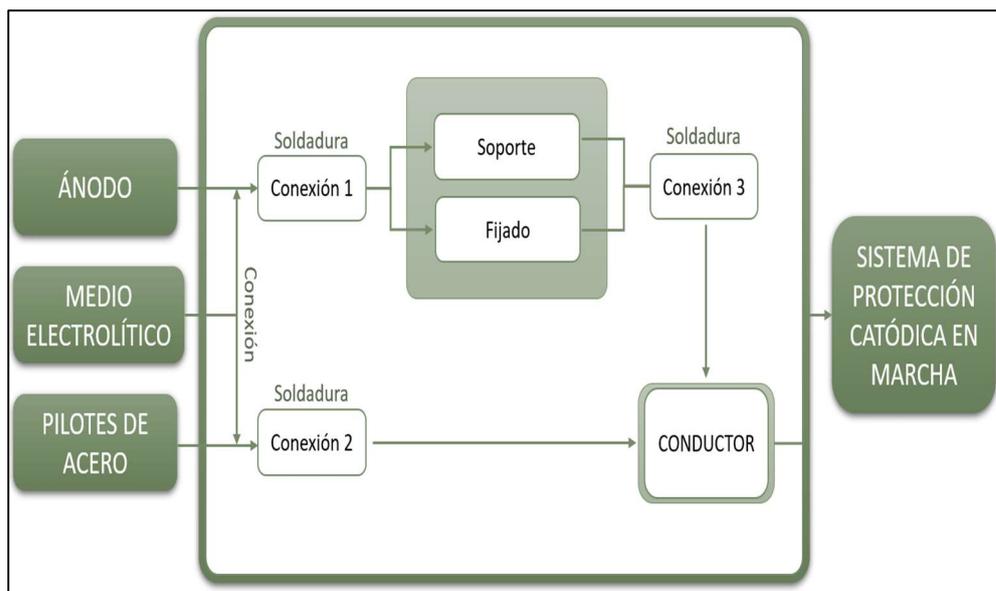


Figura 2.4 Representación de la herramienta 'Caja Transparente'.

2.1.8 Especificaciones de diseño.

Las especificaciones del diseño son parámetros sobre los cuales se debe establecer el diseño. No son alternativas, sino más bien, un camino establecido para diseñar sobre él. Estos parámetros se especificaron por parte del cliente, puesto que, es quien conoce el contexto sobre el cual se establecerá el producto final.

Sin estas especificaciones, el diseño final, no solo pudo haberse enfrentado a varios obstáculos al momento de ser aplicable, sino que también, estaría fuera de la aplicación deseada por el cliente por no considerar el contexto del estudio indicado por él. Los parámetros considerados fueron la cantidad de ánodos y sus dimensiones, la altura de instalación de cada ánodo, y el uso de soldadura como método de unión entre los ánodos y el pilote.

2.1.8.1 Dimensiones y cantidad de ánodos.

En la Tabla 2.6 se detallan las dimensiones y cantidades de cada tipo de ánodo por pilote. En la primera columna se especifican los pilotes el número de pilotes sobre los cuales se planificó instalar cada tipo de ánodo.

Tabla 2.6 Dimensiones y cantidad de ánodos(Del & Protecci, 2017).

Pilotes	Ánodo Tipo	Peso neto	Cantidad	Largo	Ancho	Alto	Especificaciones del alma	Largo del alma
N°		Kg	N°	cm	cm	cm		cm
262 a 246	1	410	350	335	23	23	4" Schedule 80	366
208 a 261	2	375	108	335	21	23	4" Schedule 80	366
160 a 207	3	333	96	335	22	20	4" Schedule 80	366
114 a 159	4	295	92	335	20	18	4" Schedule 80	366
64 a 113	5	261	100	254	20	20	3" Schedule 80	284
28 a 63	6	203	72	335	15	17	3" Schedule 80	366
14 a 27	7	45	140	210	9	9	Barra de acero ¾"	270
1 a 13	8	31	130	145	9	9	Barra de acero ¾"	205

2.1.8.2 Altura de ubicación de ánodos.

El segundo parámetro considerado fue la altura de instalación de los ánodos. Se estableció por parte del cliente que el peso del ánodo debía estar repartido de forma regular a lo largo de la parte sumergida de los pilotes. El número de filas de los ánodos debía estar en función únicamente de la longitud sumergida.

La primera fila de ánodos se debía colocar a dos metros por debajo del nivel de la marea baja y la última fila se debía colocar en contacto con el fondo marino. La separación planificada entre cada fila de ánodos fue de 4 metros.

Tabla 2.7 Especificación de altura y cantidad de filas de los ánodos (Del & Protecci, 2017).

L_i Largo sumergido [m]	N° de la fila	Espacio entre ánodos [m]	Detalle
$L_i < 0,02$	1	-	Enterrado en el lecho marino
$0,02 < L_i < 8$	1	-	A dos metros por debajo del nivel de la marea baja.
$4 < L_i < 8$	2	4	-
$L_i > 8$ $L_r = L_i - 6$	$2 + L_r / 10$	4	-

2.1.8.3 Soldadura.

El tercer parámetro por considerar antes de bosquejar el soporte de ánodos fue la soldadura. Para lograr un soporte dentro de las especificaciones del cliente se planificó que el soporte mecánico debía ser fijado por soldadura a los pilotes. Su diseño consideraría los siguientes parámetros:

Tabla 2.8 Parámetros técnicos para soldadura.

Parámetro	Especificación
Ubicación	Se suelda a una profundidad máxima de 9m bajo el nivel del mar.
Espesor mínimo de la base	De acuerdo con esfuerzos y criterios de diseño.
Material Fundente	Propiedades mecánicas y composición química de la soldadura.
Material de los elementos interventores	Propiedades mecánicas y composición química del alma del ánodo, pilote y soporte mecánico.

Las condiciones y criterios de diseño para establecer la soldadura dependerán de las normas técnicas: AWS D1.1/D1M:2015, AWS D3.6M:2017, AISC 360-16.

2.2 Diseño conceptual.

2.2.1 Generación de alternativas de diseño.

La generación de las alternativas de diseño se logró mediante una lluvia de ideas con base en los criterios de diseño del capítulo anterior y se detalló en una tabla morfológica. Las partes y formas de acuerdo de cada diseño alternativos se describieron de acuerdo con cada función definida para el soporte de ánodos galvánicos del sistema de protección catódica o con cada objetivo ponderado que implique geometría de diseño. De esta manera, se formó una tabla de ideas de alternativas denominada tabla morfológica como se indica en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Tabla morfológica para selección de la mejor alternativa del soporte de ánodos.

Opciones	1	2	3	4
Función				
Sostener el peso de los ánodos	Brazo	Plataforma	Gancho	...
Mantener fijos y estables a los ánodos	Tenazas	Abrazaderas	Armadura articulada	Estructura empotrada
Resistente a carga cíclicas (olas)	Geometría simple	Materiales de alta ductilidad	Estructura reforzada	...
Estar fijo a la bancada	Anillo soldado	Gancho soldado	Junta soldada	
Crear un circuito cerrado	Conexión por articulación	Cables	Conexión sencilla	...
Fácil ensamble	Pocas piezas	Pieza única		
Fácil instalación	Armazón	Individual

Es importante indicar que, la Tabla 2.6 y la Tabla 2.8 establecen las especificaciones de diseño para profundidad a la cual estarán ubicados los ánodos, indicaciones del número de filas de ánodos instalados, y la indicación del redireccionamiento hacia las normas y estándares pertinentes para las diferentes secciones del futuro diseño, respectivamente.

Sin embargo, estas especificaciones de diseño no fueron determinantes para proponer ideas de diseño o formas geométricas para el concepto del artefacto a diseñar, sino más bien para considerarlas posteriormente en el diseño específico del sistema de sujeción como tal.

Para establecer las formas geométricas del concepto establecido se requirió considerar las funciones y objetivos del diseño. Por ejemplo, para mantener estables a los ánodos se utiliza armaduras articuladas. Para mantener fijo al sistema de sujeción se utiliza ganchos J o simplemente se suelda la estructura a la bancada.

Tabla 2.10 Detalle de alternativas de diseño.

Opción	Descripción
1	Gancho, Armadura articulada, Estructura reforzada, Gancho soldado, Conexión por articulación, Pocas piezas, Individual.
2	Brazo, Abrazaderas, Estructura reforzada, Anillo soldado, Conexión por articulación, Pocas piezas, Armazón.
3	Plataforma, Estructura empotrada, Geometría simple, Junta soldada, Conexión sencilla, Pieza única, Individual.

Para mantener un circuito cerrado, basta con tener un material conductor,

en este caso, si la estructura es de un material conductor, basta como medio para crear el circuito cerrado.

Una vez establecidas las diferentes opciones de geometría, forma o accesorios, fue importante detallar alternativas de un diseño completo para el sistema de soporte de los ánodos. Estas alternativas dependen de las partes principales del sistema, representadas gráficamente en el capítulo 2.2.2.1

2.2.2 Esquema gráfico de las alternativas de diseño.

2.2.2.1 Esquema gráfico del sistema de las partes del sistema de protección catódica.

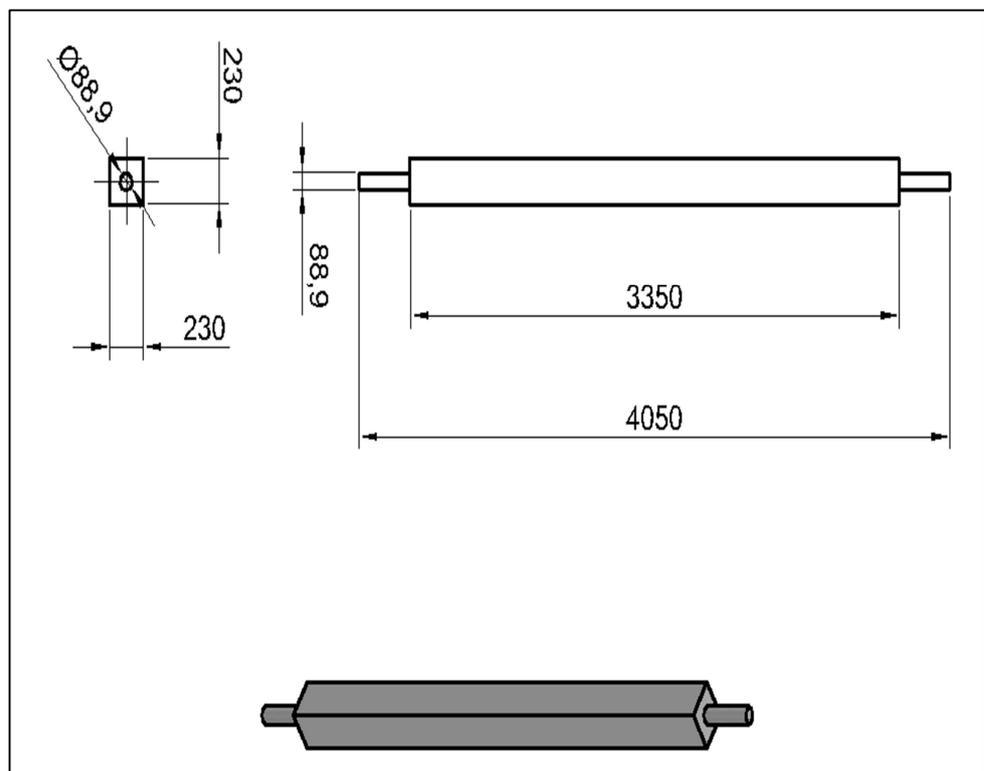


Figura 2.5 Descripción de un ánodo galvánico para protección catódica con alma de acero recta en los extremos.

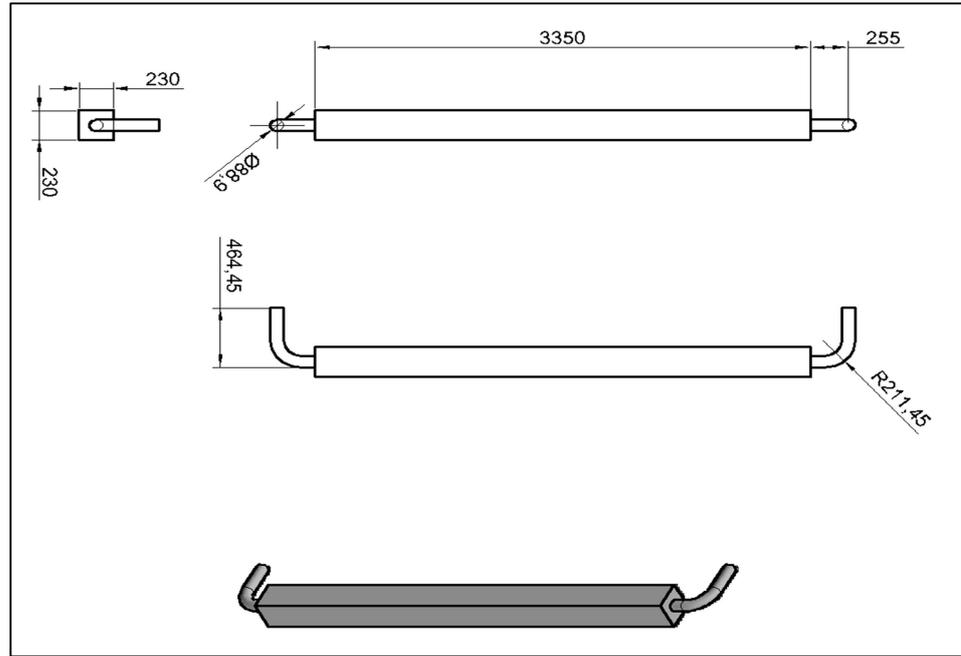


Figura 2.6 Descripción de un ánodo galvánico para protección catódica con alma de acero curva en los extremos.

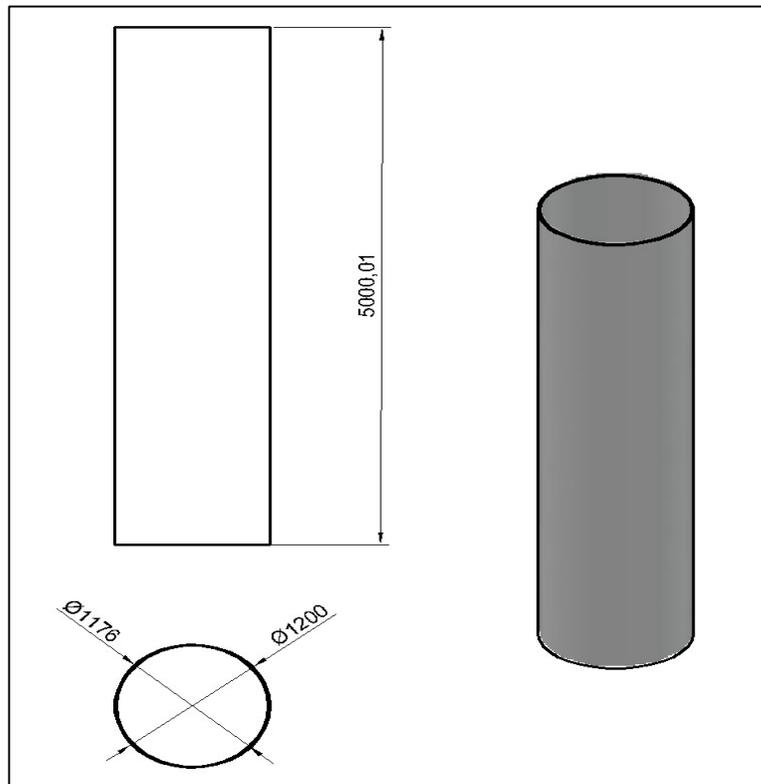


Figura 2.7 Ejemplo de una sección longitudinal de un pilote acero de cimentación para el muelle portuario.

2.2.2.2 Alternativa 1.

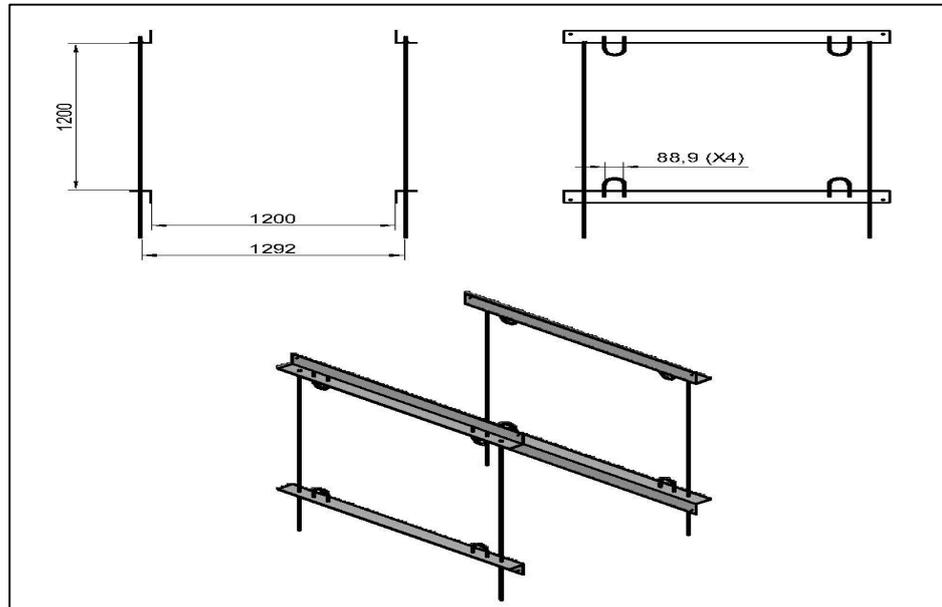


Figura 2.8 Detalle de partes para el ensamble del sistema de soporte de ánodos galvánicos de la alternativa 1. Perfiles en L unidos con pernos, Ganchos en forma de J para la sujeción del alma de los ánodos galvánicos.

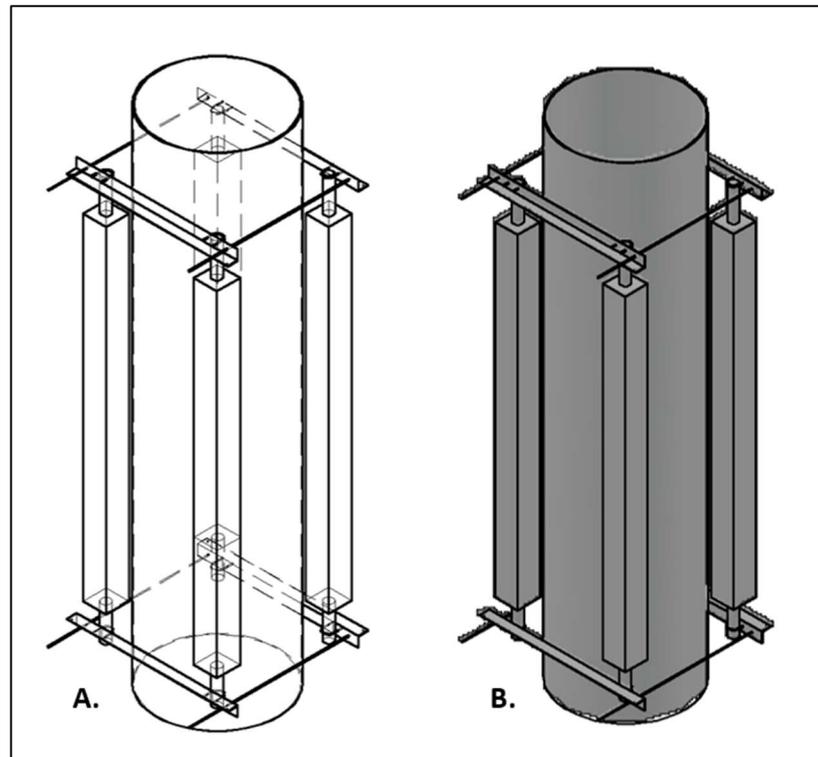


Figura 2.9 Esquema de alternativa 1. Estructura con barras articuladas y gancho J. A. Vista en estructura alámbrica. B. Vista en escala de grises.

2.2.2.3 Alternativa 2.

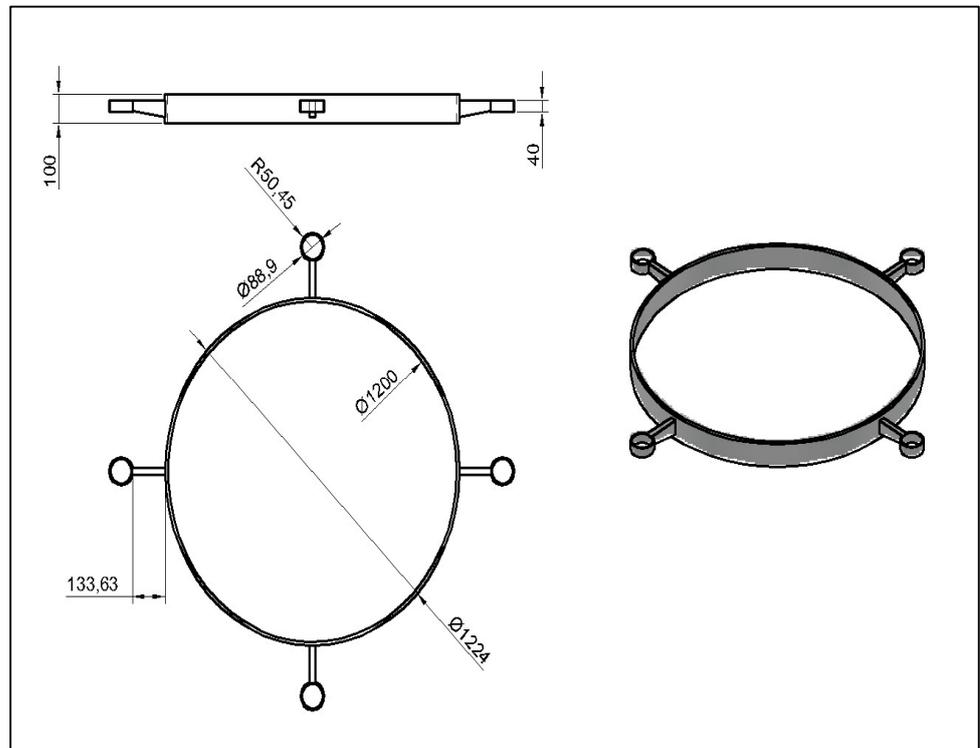


Figura 2.10 Detalle de partes para el ensamble del sistema de soporte de ánodos galvánicos de la alternativa 2. Anillo en forma de abrazadera con brazos de soporte para los ánodos galvánicos.

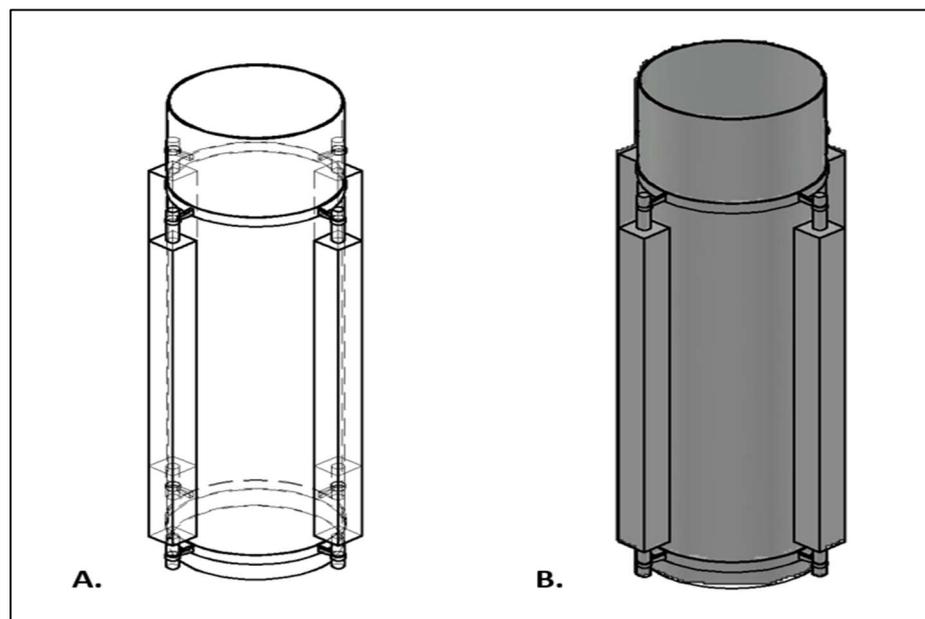


Figura 2.11 Esquema de alternativa 2. Estructura con brazos y anillos. A. Vista en estructura alámbrica. B. Vista en escala de grises.

2.2.2.4 Alternativa 3.

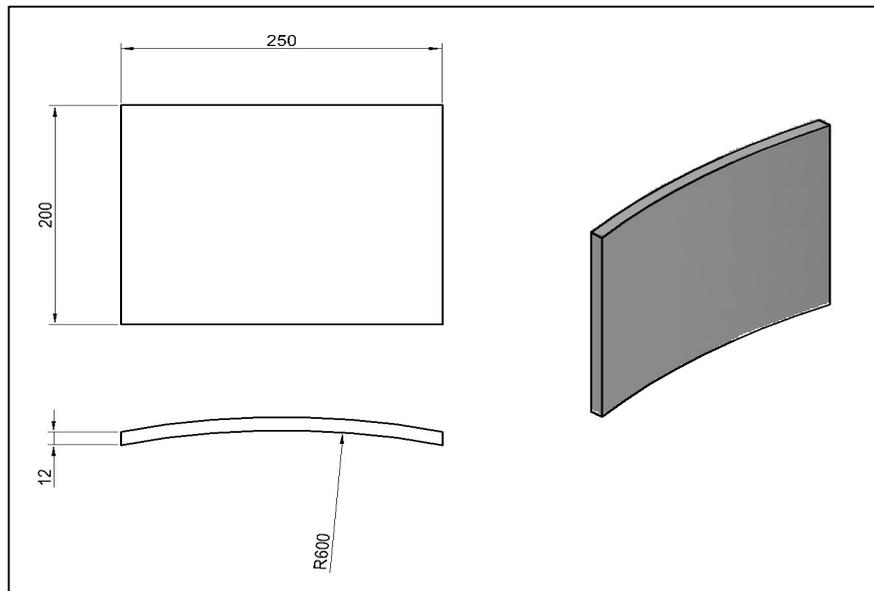


Figura 2.12 Detalle de partes para el ensamble del sistema de soporte de ánodos galvánicos de la alternativa 3. Placa de soporte de los ánodos a modo de unión soldada simple. El alma de los ánodos va conectada a la placa, la cual se une al pilote.

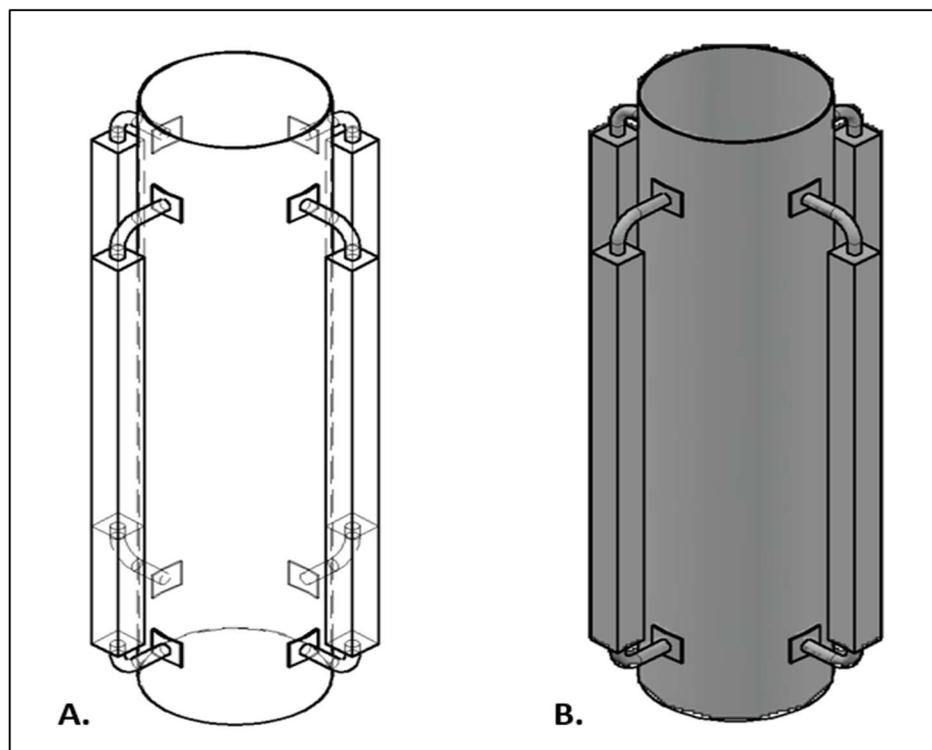


Figura 2.13 Esquema de alternativa 3. Estructura con placa. A. Vista en estructura alámbrica. B. Vista en escala de grises. Los ánodos deben ir sujetos a la placa curva. A su vez, la placa curva va sujeta al pilote metálico. El tipo de unión es por soldadura.

2.2.3 Evaluación de alternativas de diseño.

Para la selección de la mejor alternativa se eligió usar una herramienta denominada matriz de evaluación numérica como se especifica en la Tabla 2.11. En esta matriz se analiza primero cuál de las alternativas no se sale de lo establecido por las restricciones del diseño.

Luego, con base en los objetos ponderados especificados en la Tabla 2.2 se califica, a criterio del diseñador, cuál de las alternativas cumple mejor cada objetivo.

Tabla 2.11 Matriz de evaluación numérica para el problema de diseño del soporte de ánodos galvánicos para el sistema de protección catódica de los pilotes de un muelle portuario.

	Ponderación	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Calificación	Total	Calificación	Total	Calificación	Total
RESTRICCIONES							
Material conductor		✓✓		✓✓		✓✓	
Material con mayor nobleza que el ánodo		✓✓		✓✓		✓✓	
Pocas piezas		✓		✓		✓✓	
Soldado a la bancada		✓		✓✓		✓✓	
Falle en tiempo no menor a 20 años		✓✓		✓✓		✓✓	
OBJETIVOS							
Estar fijo a la bancada	0.09	7	0.64	10	0.91	10	0.91
Bajo costo de manufactura	0.02	8	0.15	5	0.09	10	0.18
Soldable	0.18	10	1.82	10	1.82	10	1.82

Resistente a carga cíclicas	0.13	7	0.89	9	1.15	8	1.02
No deformarse plásticamente	0.11	8	0.87	9	0.98	8	0.87
Fácil ensamble e instalación	0.05	5	0.27	5	0.27	9	0.49
Instalación relativamente barata	0.02	7	0.13	6	0.11	9	0.16
Durabilidad	0.15	10	1.45	10	1.45	10	1.45
No actuar como ánodo	0.16	10	1.64	10	1.64	10	1.64
Rígido	0.07	5	0.36	10	0.73	9	0.65
Ligero	0.02	9	0.16	6	0.11	10	0.18
TOTAL	1.00		8.38		9.25		9.38

2.3 Diseño preliminar.

2.3.1 Selección del sistema de sujeción.

La matriz de evaluación numérica otorgó mayor puntaje a la tercera alternativa de diseño establecida en la sección 2.2.3. Por lo cual, este fue el diseño sobre el cual se consideraron las especificaciones de cargas, esfuerzos y dimensionamientos.

El diseño consta de una plataforma para el soporte del peso del sistema de protección catódica. Esta plataforma consiste en una base a la cual se suelda el alma del ánodo. Para el sistema de sujeción general se eliminó cualquier complejidad en la estructura de soporte, para reemplazarla por una unión empotrada, en este caso con soldadura. En cuanto al sistema de conexión utilizado para crear el circuito cerrado se consideró una 'conexión sencilla', pues la conexión por medio de soldadura es realizada con material conductor garantizando así la conducción de corriente.

2.3.1.1 Soldadura.

El sistema de sujeción fue planificado para ser fijado o conectado al pilote mediante soldadura. Las cargas que se ejercen sobre el sistema, los esfuerzos a los cuales estará sometido y las dimensiones que se le dará a éste están detallados en la sección de Diseño Específico.

Además, todos los criterios de diseño utilizados fueron validados por las normas correspondientes. Además, de acuerdo con el material de aporte, se detalla el metal base precalificado por la AWS D1.1/D1.1M.

Tabla 2.12 Electrodo compatible según material base. Fuente: AISC360-16.

Metal Base	Metal de Aporte Compatible
A36, espesor ≤ 19 mm	Electrodos E60 y E70
A36, espesor > 19 mm, A588 ^[a] , A1011, A572(Gr.50 y 55), A913(Gr.50), A992, A1018	SMAW: E7015, E7016, E7018, E7028 Otros procesos: Electrodo E70
A913 (Gr.60 y 65)	Electrodos E80
A913 (Gr.70)	Electrodos E90
^[a] Para resistencia a la corrosión y color similar a la base ver la Sección 3.7.3 de AWS D1.1/D1.1M. Notas: En juntas con metales base de diferente resistencia se debe utilizar cualquiera de los metales de aporte compatibles con la mayor resistencia del metal base o un metal de aporte compatible con la menor resistencia y produzca un pequeño depósito de hidrógeno, los que pueden ser usados cuando se requiera de resistencias compatibles.	

Por esta razón, con base en la Tabla 2.12 , y según el Manual de Soldadura subacuática de la Marina Estadounidense especificado en la sección 0, el uso del electrodo E7014 será considerado en los procesos de soldadura del soporte de ánodos galvánicos para el sistema de protección catódica del muelle portuario en consideración.

2.3.1.2 Placa-Pilote.

El cordón de soldadura se diseñó para condiciones bajo el agua según directrices de la Figura 4.12. Se considera un proceso de soldadura SMAW para filete y su electrodo será seleccionado respecto con la especificación AWS A5.1. (López et al., 2016).

Tabla 2.13 Parámetros de Diseño en soldadura subacuática. Fuente: resumen AWS D1.1/D1.1M, AWS D3.6M:2017.

Parámetro	Especificación
Validación (prueba)	Si la soldadura de filete no sobrepasa los 200 mm de longitud deberá ajustarse a los requisitos del ítem 7.10.7, AWS D3.6M:2017.

Tipo de soldadura	La soldadura corresponde al tipo A porque el sistema de sujeción tendrá un acero de ductilidad moderada. La carga mayor y crítica se encuentra en una sola dirección para fijar los ánodos, además, una cíclica perpendicular a ella. Por lo tanto, su aplicación es convencional como estar fuera del agua. ítem 9.1, AWS D3.6M:2017.
Dimensión placa base	El espesor de la base deberá tener 10 mm mínimo en su espesor, para asegurar prueba de confirmación, ítem 5.4.2 AWS D3.6M:2017.
Configuración del cordón	Para el diseño del cordón deberá ajustarse a la norma AWS D1.1/D1.1M:2015. Para todos los aceros de baja aleación válidos para el ítem 7.5.1.3 AWS D3.6M:2017.

Tabla 2.14 Parámetros de Diseño Soldadura Placa-Pilote, Fuente: Resumen AWS D1.1/D1.1M, E90 estructuras metálicas.

Parámetro	Especificación
Resistencia de la soldadura	La tensión admisible para las distintas configuraciones de soldadura, se determinan a partir de la fórmula (2) del ítem 2.6.4.4, AWS D1.1/D1.1M:2015. Resistencia mecánica de la soldadura inferior o igual a la resistencia de la placa base. Tabla 2.3 AWS D1.1/D1.1M:2015.
Dimensión placa base	La longitud de los cordones no será menor a la distancia entre ellos, y su espaciamento transversal no deberá exceder $16t$ (t espesor menor). Para soldaduras intermedias es válido. 2.9.2 de AWS D1.1/D1.1M:2015.
Área efectiva	Se limita al espesor de garganta por la longitud del cordón 2.4.2.10 de AWS D1.1/D1.1M:2015 El área efectiva deberá tomarse a partir del producto de la garganta por la longitud del filete, norma E90 estructuras metálicas
Configuración del cordón	El mínimo espesor de soldadura por filete según el espesor de placa se describe en la tabla 5.7. El tamaño del cordón no puede exceder el espesor del elemento más delgado, AWS D1.1/D1.1M:2015. La soldadura de filete deberá ser mayor o igual a 5 mm por seguridad, 2.18.3 AWS D1.1/D1.1M:2015.

2.3.1.3 Alma de ánodo-Placa.

El cordón de soldadura se diseñó para condiciones en la superficie. Se considera un proceso de soldadura SMAW para PJP y su electrodo será seleccionado respecto con la especificación AWS A5.1. (López et al., 2016).

Tabla 2.15 Parámetros de Diseño de soldadura Alma-Placa. Fuente: Resumen AWS D1.1/D1.1M:2015, AISC360-16.

Parámetro	Especificación
Resistencia de la soldadura	Resistencia mecánica de la soldadura inferior o igual a la resistencia de la placa base. Tabla 2.3 AWS D1.1/D1.1M:2015. El criterio para validar la soldadura de ángulo de ranura debe tener 2.67 veces la tensión admisible para electrodos E60 – E70 según ítem 9.6.1.3. AWS D1.1/D1.1M:2015. Los valores admisibles para fatiga según el tipo de conexión en T para tipo FT en soldadura y E para los rigidizadores se describen en la Figura 4.2.
Dimensión y Resistencia del alma	El espesor está establecido según el tipo de ánodo, siendo cédula 80 para diámetro 3 in y 4 in. El detalle se encuentra en la Tabla 2.6. Se verifica la resistencia para conexiones tubulares según capítulo K tabla K4.1 para conexión en T de AISC360-16.
Configuración del cordón	Los esfuerzos presentes en el sistema dependerán de la geometría de la conexión y resistencia del material de aporte según ítem 9.6.1. y AWS D1.1/D1.1M:2015.
Material del Alma	Las conexiones circulares para la sección 6.1 de diseño deben tener un máximo esfuerzo permisible para tubos huecos de 60 Kpsi., según ítem 9.8.1.1 para soldaduras precalificadas.

2.3.2 Análisis de conexiones tubulares.

Los factores fueron seleccionados a partir del diseño por resistencia al corte según la Norma AISC360-16 para los parámetros de la Tabla 2.15. La resistencia admisible fue considerada por el método ASD y de esta forma asegurar que la resistencia requerida por combinaciones de carga no exceda la resistencia de los conectores. (Asociación Latinoamericana del Acero, 2016).

$$R_a = R_n / \Omega \quad (2.1)$$

Siendo R_n la resistencia nominal, y Ω el factor de seguridad propuesto según los esfuerzos y aplicación de la conexión.

2.3.2.1 Combinaciones de cargas.

Se observó si los elementos que intervienen en la conexión no fallaran mediante la Figura 4.5 que detalla el límite de aceptación. Donde P_n se toma para un acero estructural. Las variables se obtienen de la resistencia de flexión disponible en el ítem 2.3.2.2. del diseño preliminar con las restricciones de la Figura 2.14.

TABLA K4.1A	
Límites de Aplicabilidad de la Tabla K4.1	
Esbitez de la pared del cordón	$D/t \leq 50$ para conexiones en T y en Y $D/t \leq 40$ para conexiones en Cruz
Esbitez de la pared de la rama	$D_b/t_b \leq 50$ para la rama en tracción $D_b/t_b \leq 0,05E / F_{yb}$ para conexiones en K excéntricas
Razón de Ancho	$0.2 < D_p / D \leq 1,0$
Resistencia del material	F_y and $F_{yb} \leq 3660 \text{ kgf/cm}^2$ (360 MPa)
Ductilidad	F_u and $F_{yb}/F_{ub} \leq 0,8$ Nota: ASTM A500 Grado C es aceptable.

Figura 2.14 Restricción para aplicar el análisis de conexión en T. Fuente: AISC360-16.

2.3.2.2 Resistencia de flexión disponible.

Se analizó la flexión porque es la reacción más relevante, puesto que nace de fuerzas de mayor incidencia como el peso y la fuerza hidrostática. Su valor dependerá si la flexión ocurre en el plano del elemento base o fuera de dicho plano según indica la Figura 4.5 y Figura 4.4 respectivamente. Se tiene como elemento base la placa sobre el pilote. El detalle de las variables se encuentra en el Capítulo 3 ítem 2.8.8

2.4 Diseño detallado.

Una vez formado el concepto del diseño, y establecidas también las directrices para la construcción geométrica de dicho trabajo, se recurrió a refinar la geometría resultante por medio del proceso denominado Diseño Detallado. Este proceso se desarrolla por medio de cálculos matemáticos de cargas y esfuerzos para permitir al diseño funcionar bajo las condiciones de servicios establecidas. Estas condiciones de servicio son las diferentes fuerzas a las cuales estará sometido el conjunto soldado debajo del agua una vez que sea instalado, como también las condiciones ambientales del medio marino.

2.4.1 Ánodos considerados en el sistema de soldadura.

En la Tabla 2.6 se especificaron las dimensiones y cantidades de los 8 tipos de ánodos que serán instalados. De estos 8 tipos de ánodos, se dispuso que, los seis primeros tipos estuvieran colgados sobre los pilotes metálicos del muelle según la numeración establecida, mientras que, los dos últimos tipos de ánodos queden enterrados sobre la arena en la orilla de la playa. El sistema de sujeción por soldadura fue realizado para los seis primeros tipos de ánodos (Del & Protecci, 2017).

2.4.2 Estrategia de cálculo.

Existen fuerzas, como la realizada por la columna de agua sobre el sistema a soldar, que tendrán varios puntos de aplicación sobre el cuerpo. Sería un poco complicado calcular la reacción que produce cada fuerza sobre los puntos de apoyo del conjunto a soldar.

Por esta razón, una estrategia de cálculo fue considerar la suma de cada fuerza hidrostática aplicada sobre las diferentes áreas de sistema como una única fuerza hidrostática total aplicada sobre un centroide general para esta fuerza. La misma situación se dio para la fuerza de arrastre, puesto que,

ésta se aplica sobre el cuerpo del ánodo y sobre el alma de éste, no solo de manera lateral, sino también, de manera frontal.

Por lo cual, se consideró también una sumatoria total de todas las fuerzas de arrastre que inciden de manera lateral y de manera frontal, como una única fuerza de arrastre aplicadas sobre un centroide lateral y sobre un centroide frontal respectivamente. También se hizo lo mismo para las reacciones en los apoyos producidas por el peso.

2.4.3 Puntos de apoyo.

En la Figura 2.15, se señalan los apoyos del sistema correspondientes a las juntas soldadas. Debido a que, los apoyos son simétricos respecto al punto de aplicación de cada fuerza, la magnitud de las reacciones sobre cada punto de apoyo será equivalente en ambos; es decir, serán iguales, pero con ciertas variaciones en las direcciones y sentidos.

Este análisis se desarrolla en la sección 3.4, del Capítulo 3; mientras que, el cálculo de los centroides se desarrolló en la sección 2.6 de este capítulo. Estos apoyos se describieron con la finalidad de facilitar los cálculos, puesto que, al estar colocados a distancias iguales respecto al punto de aplicación de las fuerzas, basta haber seleccionado uno de los dos puntos para poder desarrollar las ecuaciones. El conjunto 'alma-ánodo' se escribirá como conjunto AA de aquí en adelante en este documento para facilidad de escritura.

2.4.4 Sistema de referencia.

El sistema de referencia se estableció con el fin de establecer correctamente la dirección y el sentido de las fuerzas que se ejercen sobre el conjunto AA.

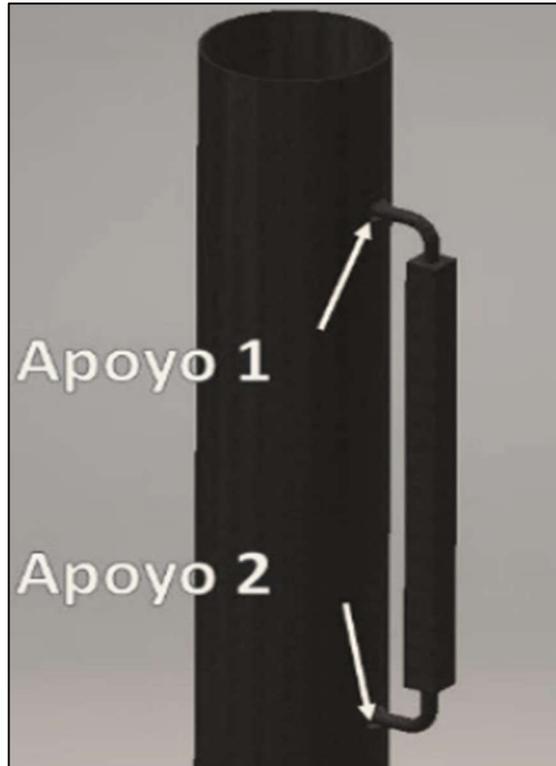


Figura 2.15 Puntos de apoyo del conjunto 'Alma-Ánodo'.

En la Figura 2.16, se muestra el sistema de referencia, en donde, el eje x es aquel que sale de la superficie que representa el área frontal del ánodo descrita en la sección 2.5.3.2; mientras que el eje y es el eje que marca la profundidad a la cual estará instalado el sistema y; por último, el eje z es el eje que sale de la superficie lateral del ánodo.

2.5 Tipos de fuerzas aplicadas sobre el sistema.

Quedó establecido en el diseño conceptual que los ánodos vayan conectados en forma de C sobre los pilotes del muelle por medio de los extremos de las almas, como se muestra en la Figura 2.13; por lo cual, esta sujeción reparte sobre sus dos puntos de apoyo las fuerzas aplicadas sobre el conjunto AA.

Estas fuerzas se describen en la Figura 2.17 y se resalta que, las ecuaciones desarrolladas y el análisis posterior de los resultados, se establecieron sobre las condiciones más críticas para la soldadura en profundidad de aplicación

de la fuerza, ánodo de mayor peso, o mayor área de incidencia de fuerza hidrostática o arrastre. Estas condiciones se especifican para en cada sección de fuerza. Estas fuerzas son:

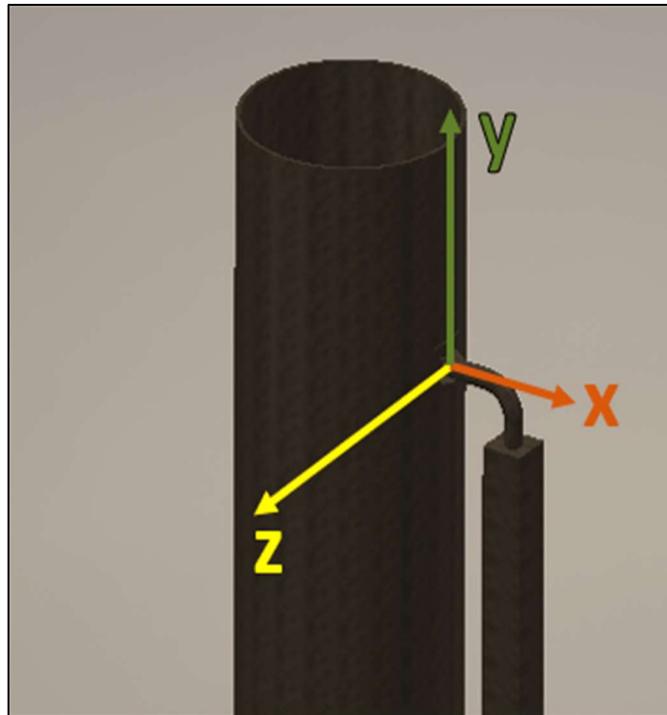


Figura 2.16 Sistema de coordenadas para el cálculo de fuerzas y reacciones en una la junta superior del conjunto AA.

(1) la Fuerza Hidrostática debida al peso de la columna de agua sobre los ánodos y el alma, (2) Fuerza del Peso de los ánodos, (3) La Fuerza de arrastre de la Corriente y la Contracorriente con consideraciones de fatiga debida a la variación continua de las corrientes marinas y, (4) la Fuerza de arrastre de la Corriente y Contracorriente que se aplica de manera frontal hacia la playa, también con consideraciones de fatiga.

2.5.1 Fuerza hidrostática.

La metodología para el cálculo de la fuerza hidrostática consistió en obtener primero las áreas sobre las cuales se va a ejercer el peso de la columna de agua. Y, una vez obtenidas estas áreas, se calculó la ecuación de presión hidrostática y luego, la fuerza hidrostática sobre el conjunto AA.

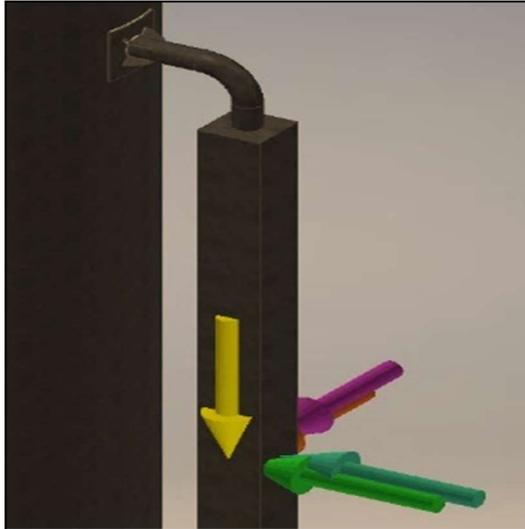


Figura 2.17 Vista simplificada de las fuerzas aplicadas sobre el conjunto de protección catódica (pilote-alma-ánodo). (1) Amarilla: Fuerza 1 y 2, (2) Rojo y Lila: Fuerza 3 y, (3) Verde y Turquesa: Fuerza 4.

Es importante mencionar que se buscó extraer tres presiones hidrostáticas diferentes, (1) La presión a la altura del brazo superior, (2) la presión a la altura del brazo inferior y, (3) la presión sobre la base superior del ánodo.

2.5.1.1 Cálculo de áreas.

Las áreas sobre las cuales se ejerce la presión hidrostática son:

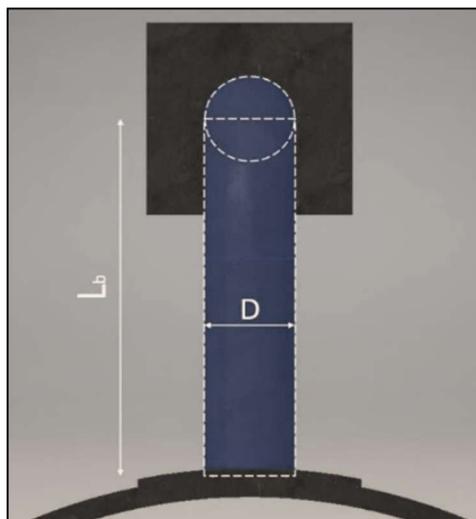


Figura 2.18 Vista superior del alma del ánodo, donde L_b describe la longitud del alma expuesta a la columna de agua medida desde la placa curva del pilote hasta el centro del cuerpo del ánodo y; D describe el diámetro del alma del ánodo.

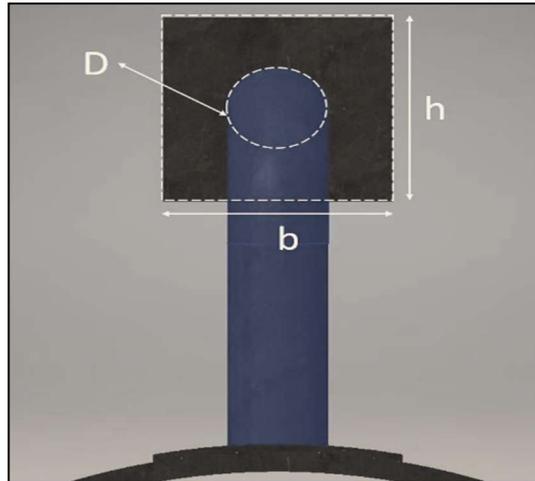


Figura 2.19 Vista superior del alma del ánodo, donde D es el diámetro del alma del ánodo, h describe la altura de la base cuadrada de la superficie superior del ánodo galvánico, mientras que b describe la longitud de la base cuadrada de la superficie superior del ánodo galvánico.

- (1) La proyección del área longitudinal superior del alma del ánodo que va conectada de manera horizontal desde el ánodo hasta el pilote del muelle, especificada en Figura 2.18, tanto para el apoyo superior como para el apoyo inferior de cada ánodo.
- (2) El área superior del ánodo en forma de base cuadrada, menos el área de la proyección del diámetro del alma de cada ánodo, como se observa en la Figura 2.19.

Las dimensiones del alma de cada tipo de ánodo y las dimensiones de los lados de la base de los ánodos se especifican en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16 Especificaciones de medidas del sistema ‘alma – ánodo’ (Del & Protecci, 2017)

Dimensiones de los ánodos			
Tipo de ánodo	Base (b) [m]	Altura (h) [m]	Diámetro [m]
1	0.230	0.230	0.114
2	0.210	0.230	0.114

3	0.220	0.200	0.114
4	0.200	0.180	0.114
5	0.200	0.200	0.089
6	0.150	0.170	0.089

Para el cálculo del área de la proyección del brazo superior del ama A_o , se utilizó la ecuación (2.2):

$$A_o = \left[(D * L_b) + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{4} * D^2 \right) \right] \quad (2.2)$$

Y, para el cálculo del área de la proyección del brazo inferior del alma A_a , se utilizó la ecuación (2.3):

$$A_a = \left[(D * L_b) - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{4} * D^2 \right) \right] \quad (2.3)$$

Donde:

D = Diámetro del alma.

L_b = Longitud del brazo medida desde el pilote hasta el centro del alma vertical.

Para obtener el área A_{\blacksquare} de la proyección de la base cuadrada del ánodo se consideró una base de lados b y h como se especifica en la ecuación (2.4):

$$A_{\blacksquare} = (b * h) - \left(\frac{\pi}{4} * D^2 \right) \quad (2.4)$$

Donde:

b = Base del cuadrado de la base del ánodo.

h = Altura del cuadrado de la base del ánodo.

Los resultados de los cálculos de áreas de los distintos tipos de ánodos se muestran en el Capítulo 3, en la sección 3.1.1.

2.5.1.2 Cálculo de la presión hidrostática.

Una vez obtenidas las áreas de cada ánodo, se calcularon las presiones sobre dichas áreas. Para el cálculo de la presión hidrostática se consideró la altura de columna de agua máxima a la cual estarán sometidos los ánodos como se indica en la Tabla 2.17, la densidad del agua del mar y el valor de la gravedad como se muestra en la Tabla 2.18.

También, es importante mencionar que este caso se hizo para la segunda fila de ánodos a instalar. La distancia L_m entre marea alta y marea baja fue determinada según el pronóstico del INOCAR para el año 2021, especificado en la sección 1.4.10. La distancia mínima por debajo de la marea y la distancia entre filas de ánodos son especificaciones de instalación determinadas por el estudio Morken S.A. Y, la longitud del ánodo y del alma están especificadas en los planos en ANEXOS (Del & Protecci, 2017).

El valor de la presión hidrostática se encontró con la ecuación (2.5) (White, 2003).

$$P_H = \rho * g * H \quad (2.5)$$

Donde:

P_H = Presión hidrostática del fluido en una superficie plana.

ρ = Densidad del fluido (agua de mar).

g = Gravedad [9,81 m/s²]

H = Altura de la columna de agua.

Donde H es la suma de la distancia entre marea alta y marea baja, la distancia mínima por debajo de la marea baja y la distancia planificada

de separación entre la primera y segunda fila de ánodos instalados según se indica en la Tabla 2.17.

Tabla 2.17 Dimensiones verticales a considerar para la presión hidrostática sobre el sistema ‘ánodo – alma’ (Del & Protecci, 2017).

Referencia de altura	Nomenclatura	Dimensión [m]
Distancia entre marea alta y baja.	L_m	3.000
Distancia mínima por debajo de la marea baja.	L_i	2.000
Distancia de separación con la segunda fila de ánodos.	L_{aa}	4.000
Distancia de Brazo-brazo.	L_{bb}	3.660
Longitud del ánodo.	L_{cn}	3.350
Distancia de la base superior del ánodo respecto al brazo superior del alma.	L_{ba}	0.155

Tabla 2.18 Datos de densidad y gravedad para el cálculo de presión hidrostática (White, 2003).

Densidad [kg/m ³]	Gravedad [m ² /s]
1026	9.810

Los resultados de los cálculos de Presión Hidrostática para cada tipo de ánodo se muestran en el Capítulo 3, en la sección 3.1.2.

2.5.1.3 Para el cálculo de la fuerza hidrostática.

Para el cálculo de la fuerza hidrostática se utilizó la ecuación (2.6) (White, 2003):

$$P_H = F_H * A_T \quad (2.6)$$

La ecuación (2.6) fue reordenada para tener despejada la fuerza hidrostática como se especifica finalmente en la ecuación (2.7):

$$F_H = \frac{P_H}{A_T} \quad (2.7)$$

Donde:

F_H = Fuerza Hidrostática sobre el alma y la base superior ánodo.

P_H = Presión hidrostática del fluido en una superficie plana.

A_T = Área total de aplicación del fluido.

Los resultados de los cálculos de Fuerza Hidrostática para cada tipo de ánodo se muestran en el Capítulo 3, en la sección 3.1.3.

2.5.2 Fuerza de arrastre de las olas.

En estudio Morken (Del & Protecci, 2017) se detalla que los ánodos tipo 7 y 8 van enterrados en la arena para los pilotes del 1 al 37; mientras que, a partir del pilote 38 en adelante, sobre todos los aproximadamente 1300 metros de longitud del muelle, los ánodos irán colgados sobre el pilote a dos metros por debajo de la marea baja.

Esta situación permite que los ánodos cercanos a la orilla de la playa no experimenten la fuerza de las olas sobre ellos. Mientras que el resto ánodos están por detrás de la línea de las olas.

2.5.3 Fuerza de arrastre de las corrientes marinas.

Para el cálculo de la fuerza de arrastre se utiliza la ecuación (2.12). Sin embargo, para el uso de esta ecuación fue importante el uso de otros parámetros y cálculos previos. Primero, se calculó el número de Reynolds para considerar si el flujo de agua sobre el alma y el cuerpo del ánodo era laminar o turbulento. Una vez con ese resultado, se escogió el coeficiente de arrastre adecuado para la condición y geometría del conjunto AA.

De acuerdo con esos datos, se procedió a calcular la fuerza de arrastre sobre los cuerpos. Los datos de viscosidad cinemática, coeficientes de arrastre y velocidad del fluido utilizados en la ecuación (2.12), se encuentran en la Tabla 2.19.

Tabla 2.19 Datos de velocidad y viscosidad cinemática para el cálculo de la fuerza de arrastre sobre el conjunto ‘alma – ánodo’(Vera et al., 2009b).

Tipo de Flujo	Nomenclatura	Velocidad [m/s]	Viscosidad [m ² /s]
Flujo directo	Vc	0.32	1.02E-06
Contraflujo	Vcc	0.31	1.02E-06

Cabe destacar que, aunque las corrientes marinas no se dan exactamente de manera perpendicular o axial en el mar, como se especifica en la sección 1.4.10, fue importante considerar dos escenarios posibles sobre una orientación particular para un ánodo instalado.

Es decir, un flujo de corriente y contracorriente incidiendo de manera perpendicular respecto al eje axial del alma del ánodo, como se muestra en la Figura 2.20; y, otro flujo de la misma corriente y contracorriente incidiendo ahora de manera paralela al eje axial del alma del ánodo, como se muestra en la Figura 2.25. Al primer caso se le llamó ‘corrientes laterales’, al segundo caso se le llamó ‘corrientes frontales’.

2.5.3.1 Corrientes laterales.

Para el cálculo del número de Reynolds se utilizó la ecuación (2.8) (White, 2003) para la superficie rectangular del ánodo. Para este cálculo se eligió el área lateral del cuerpo del ánodo cuya longitud de cara expuesta a la corriente se ilustra en la Figura 2.20.

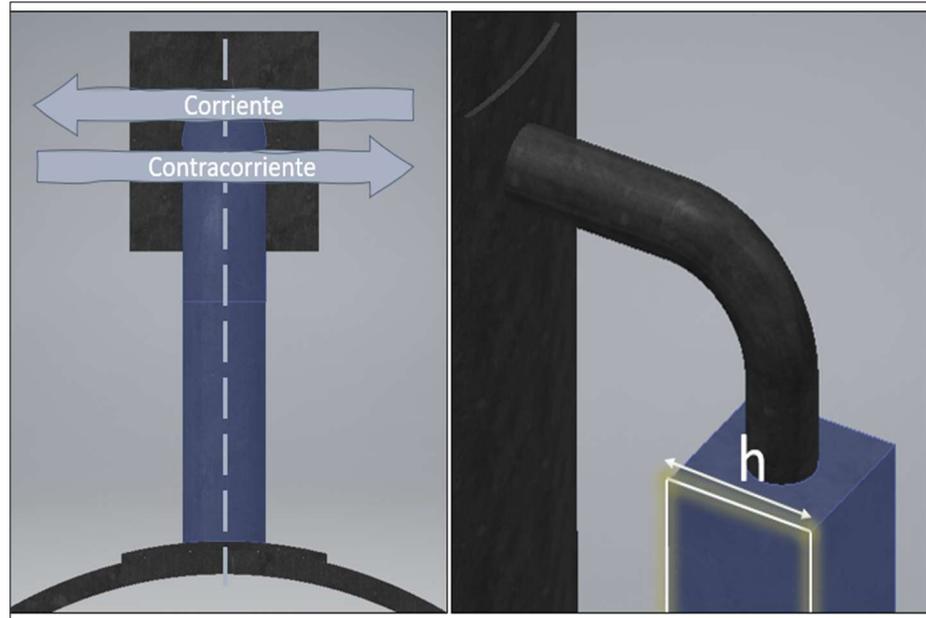


Figura 2.20 Especificación de la dirección de los flujos de agua y la superficie sobre la cual actúan. (A) Corriente y contracorriente perpendicular al eje axial del alma, (2) Selección de área del ánodo expuesta a las corrientes laterales.

$$Re = \frac{Vh}{\nu} \quad (2.8)$$

Mientras que, para la superficie cilíndrica (alma del ánodo) se utilizó la ecuación (2.9) (White, 2003):

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2.9)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds.

V = Velocidad de flujo o contraflujo.

D = Diámetro del alma del ánodo.

h = Altura de la base cuadrada del ánodo galvánico.

ν = Viscosidad cinemática.

Los resultados de los cálculos del número de Reynolds para los fluidos de corriente y contracorriente sobre el cuerpo del ánodo y el alma de éste se detallan en el Capítulo 3, sección 3.2.1.

Para la selección del coeficiente de arrastre se utilizó la Figura 2.21 (White, 2003) para la base cuadrada del ánodo. Es importante recordar

que el ánodo es un prisma de base cuadrada, y este coeficiente es para geometrías en dos dimensiones.

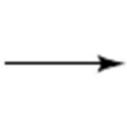
Forma	C_D basado en el área frontal
Cilindro cuadrado:	
	2,1
	1,6

Figura 2.21 Valores para la selección del coeficiente de arrastre para la resistencia en cuerpos bidimensionales prismáticos (White, 2003).

Para la selección del coeficiente de arrastre para el alma del ánodo, cuya forma es cilíndrica como se muestra en Figura 2.20, se utilizó la Figura 2.22 (White, 2003), para la condición adecuada al flujo calculado con la ecuación (2.9). este resultado se muestra en la sección 3.2.1.

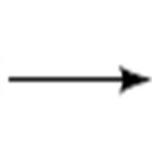
Cilindro elíptico:		Laminar	Turbulento
1:1		1,2	0,3

Figura 2.22 Coeficiente de arrastre para la resistencia de los cuerpos bidimensionales cilíndricos (White, 2003).

Para el cálculo del área de arrastre lateral sobre el cuerpo del ánodo, se utilizaron las dimensiones de la Figura 2.20 y la Figura 2.23 referentes al cuerpo del ánodo, y se realizó el cálculo de área con la ecuación (2.10):

$$A_{cnL} = h * l_{cn} \quad (2.10)$$

Donde:

A_{cnL} = Área lateral del cuerpo del ánodo.

h = Ancho de la base cuadrada del ánodo.

L_{cnL} = Longitud del cuerpo del ánodo según la Tabla 2.17.

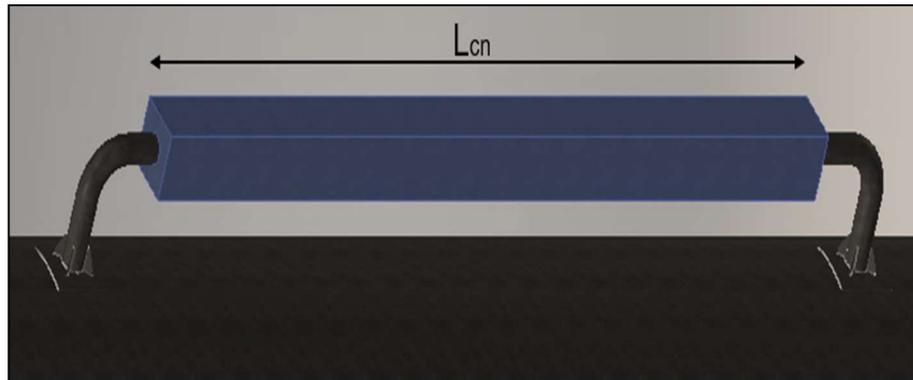


Figura 2.23 Longitud del cuerpo del ánodo.

Mientras que, para el cálculo del área de arrastre sobre el alma del ánodo, se consideraron algunos parámetros más. Primero, se hizo una suma de áreas, puesto que cada brazo está doblado 90° desde el ánodo hasta el pilote metálico. Por esta razón, se sumó el área de la sección horizontal con la sección vertical.

Para la simplificación de los datos del área, y para maximizar los valores de área en caso de modificaciones de campo se consideró el área lateral del alma como la unión de dos rectángulos como se muestra en Figura 2.24.

Para el cálculo del área de la proyección lateral del alma del ánodo, como se indica en Figura 2.24, se utilizó la ecuación (2.11). Los datos para los cálculos de estas áreas se encuentran en la Tabla 2.17. Mientras que, resultados de todas las áreas para el cálculo de la fuerza de arrastre lateral se encuentran en el Capítulo 3, en la sección 3.2.2.

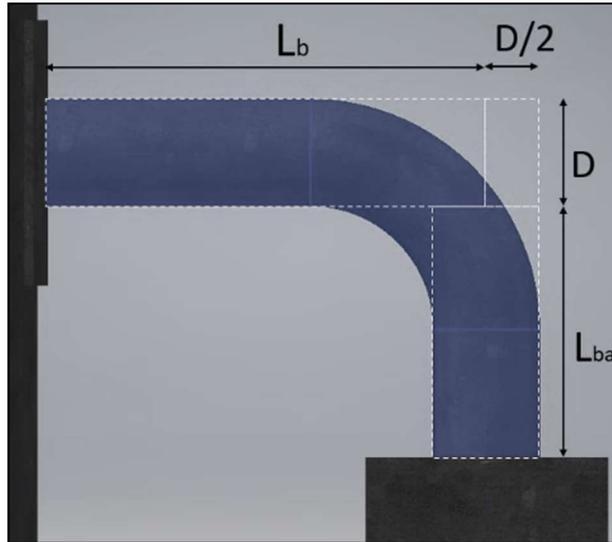


Figura 2.24 Áreas laterales del alma del ánodo para la ecuación de arrastre por corriente y contracorriente lateral.

$$A_{laL} = 2 \left[\left[\left(L_b + \frac{D}{2} \right) * D \right] + [(L_{ba} - D) * D] \right] \quad (2.11)$$

Donde:

A_{laL} = Área lateral del cuerpo del ánodo.

L_b = Longitud del brazo medida desde el pilote hasta el centro del alma vertical.

D = Diámetro del alma.

L_{ba} = Distancia de la base superior del ánodo respecto al brazo superior del alma.

Finalmente, para el cálculo de la Fuerza de arrastre lateral de la corriente marina, se utilizaron los datos obtenidos desde la ecuación (2.8) hasta la ecuación (2.11), según se establece en la ecuación (2.12) (White, 2003)

$$F_{DL} = \frac{1}{2} \rho V_c^2 (C_{Dc} A_{cnL} + C_{Dp} A_{laL}) \quad (2.12)$$

Donde:

F_{DL} = Fuerza de arrastre lateral.

C_{Dc} = Coeficiente de arrastre para el cilindro.

C_{Dp} = Coeficiente de arrastre para el prisma.

ρ = Densidad del fluido.

V_c = Velocidad del flujo para corriente según la Tabla 2.19.

Para la fuerza de arrastre de contracorriente se cambia la velocidad V_c de la ecuación (2.12), por la velocidad V_{cc} de la Tabla 2.19, utilizando los mismos valores de número de Reynolds y áreas especificados para la ecuación (2.12). Los resultados de fuerza de arrastre lateral para corriente y contracorriente se encuentran en el Capítulo 3, en la sección 3.2.4.

2.5.3.2 Corrientes frontales.

Para el cálculo de las fuerzas de arrastre frontal sobre el conjunto AA, se consideró el área frontal, tanto del alma como del cuerpo del ánodo, así como se indica en la Figura 2.25B y Figura 2.26 respectivamente. La ecuación de fuerza de arrastre fue la misma la ecuación (2.12) ahora modificada para corrientes frontales. La dirección de la corriente considerada para este caso se especifica en la Figura 2.25, como paralela al eje axial del alma del ánodo, incidiendo de manera frontal sobre éste.

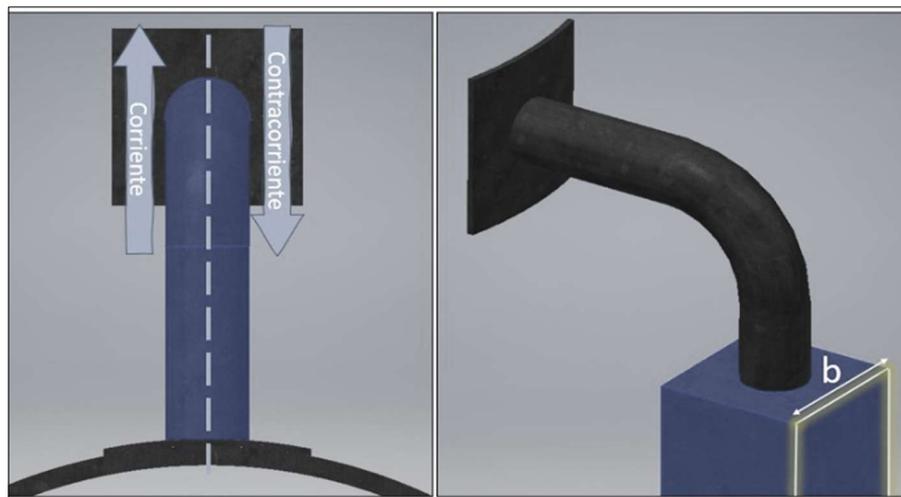


Figura 2.25 Especificación de la dirección de los flujos de agua y la superficie sobre la cual actúan. (A) Corriente y contracorriente paralela al eje axial del alma, (B) Selección de área del ánodo expuesta a las corrientes laterales.

El número de Reynolds para la corriente frontal sobre el cuerpo del ánodo se calculó con la ecuación (2.13) (White, 2003):

$$Re = \frac{Vb}{\nu} \quad (2.13)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds.

V = Velocidad de flujo o contraflujo.

b = Base del cuadrado formado por la base del ánodo galvánico.

ν = Viscosidad cinemática.

El número Reynolds para la sección frontal del alma se calculó con la ecuación (2.9). Los resultados para los fluidos de corriente y contracorriente frontal se detallan en el Capítulo 3, sección 3.2.1.

Para el cálculo del área de arrastre frontal sobre el cuerpo del ánodo, se utilizaron las dimensiones de la Figura 2.25 para la base y la Figura 2.23 para la longitud del cuerpo del ánodo. Este cálculo se realizó con la ecuación (2.14).

$$A_{cnF} = b * l_{cn} \quad (2.14)$$

Donde:

A_{cnF} = Área frontal sobre el cuerpo del ánodo.

h = Ancho de la base cuadrada del ánodo.

L_{cnF} = Longitud del cuerpo del ánodo según la Tabla 2.17.

Para el cálculo del área frontal de arrastre de la Figura 2.26 se consideraron las especificaciones de longitudes de las Tabla 2.16 y Tabla 2.17, para dimensiones geométricas del alma del ánodo y dimensiones verticales de posición del conjunto AA, respectivamente.

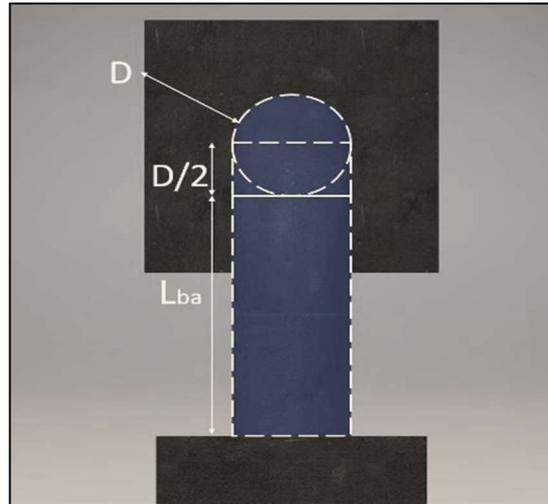


Figura 2.26 Área frontal del alma del ánodo desde la placa del pilote hasta la parte superior del ánodo galvánico.

Para el cálculo del área de la proyección frontal del alma del ánodo de la Figura 2.26, se utilizó la ecuación (2.15).

$$A_{IaF} = 2 \left[\left(\frac{1}{2} * \frac{\pi}{4} * D^2 \right) + [(L_{ba} + D) * D] \right] \quad (2.15)$$

Donde:

A_{IaF} = Área lateral del cuerpo del ánodo.

L_b = Longitud del brazo medida desde el pilote hasta el centro del alma vertical.

D = Diámetro del alma.

L_{ba} = Distancia de la base superior del ánodo respecto al brazo superior del alma.

Los coeficientes de arrastre para los cuerpos de las Figura 2.25 y Figura 2.26, son los mismo especificados en las Figura 2.21 para la forma cilíndrica del alma del ánodo y Figura 2.22 para la forma prismática del cuerpo del ánodo.

Finalmente, para el cálculo de la Fuerza de arrastre lateral de la corriente marina, se utilizaron los datos obtenidos desde la ecuación (2.13) hasta

la ecuación (2.15), según se establece en la ecuación (2.16) (White, 2003):

$$F_{DF} = \frac{1}{2} \rho V_c^2 (C_{Dc} A_{cnF} + C_{Dp} A_{laF}) \quad (2.16)$$

Donde:

F_{DF} = Fuerza de arrastre frontal.

C_{Dc} = Coeficiente de arrastre para el cilindro.

C_{Dp} = Coeficiente de arrastre para el prisma.

ρ = Densidad del fluido.

V_c = Velocidad del flujo para corriente según la Tabla 2.19.

Para la fuerza de arrastre de contracorriente se cambia la velocidad V_c de la ecuación (2.16), por la velocidad V_{cc} de la Tabla 2.19 utilizando los mismos valores de número de Reynolds y áreas especificados para la ecuación (2.16). Los resultados de fuerza de arrastre se encuentran en el Capítulo 3, en la sección 3.2.4.

2.5.4 Peso de los ánodos.

Para obtener los valores de los pesos de los ánodos se multiplicó el valor de la masa de estos obtenidos de la Tabla 2.6 por el valor de la gravedad. El valor de la aceleración de gravedad considerado fue $g=9,81\text{m/s}^2$. Los resultados de la fuerza del peso de los ánodos se encuentran en el Capítulo 3, en la sección 3.3.

2.6 Cálculo de centroides.

Como se explicó en la sección 2.4.2, la estrategia de cálculo para obtener las reacciones que ejercen las fuerzas sobre un cuerpo es necesario conocer el punto de aplicación de estas respecto a su punto de giro o pivote, es decir, su denominado brazo de palanca. Por lo cual, una vez especificada la metodología para el cálculo de las fuerzas, se especificó también la metodología para el cálculo de los centroides.

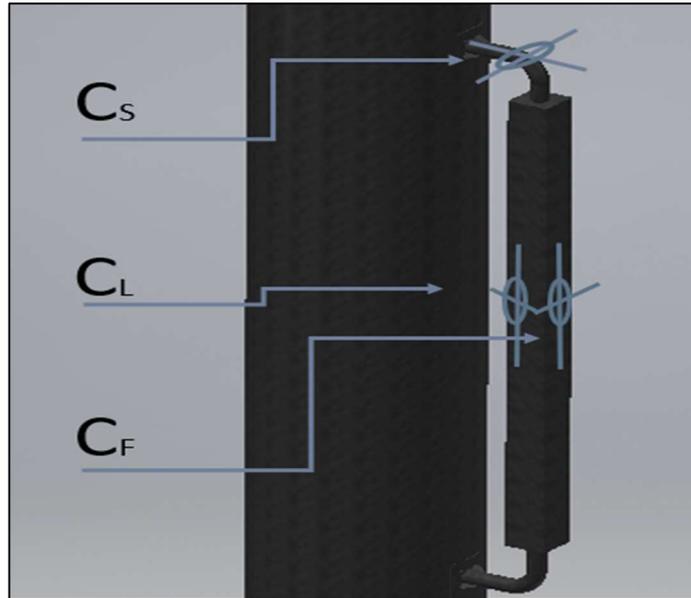


Figura 2.27 Ilustración de los centroides para la aplicación de las fuerzas. C_S : centroide superior, C_L : centroide lateral, C_F : centroide frontal.

Se desarrollaron, entonces, tres centroides: (1) el centroide C_L que representa las coordenadas xy para la aplicación de la fuerza de arrastre lateral; (2) el centroide C_S que representa las coordenadas xz para la aplicación de la fuerza hidrostática sobre el conjunto AA y; (3) el centroide C_F que representa las coordenadas yz para la aplicación de las fuerzas de arrastre frontal.

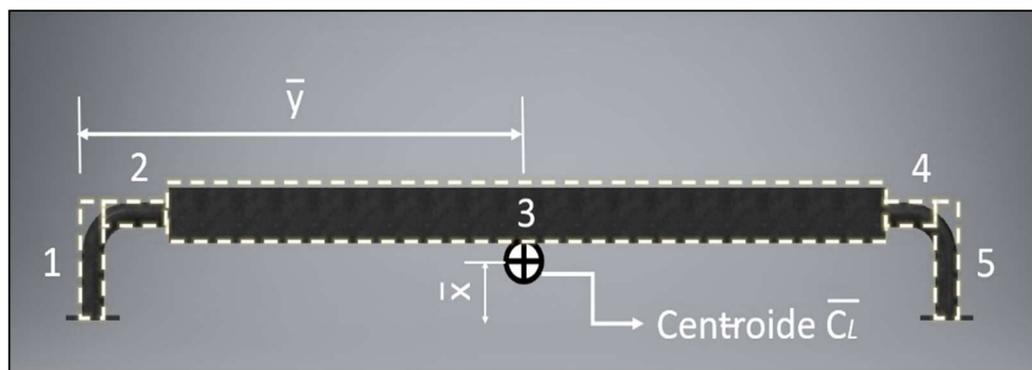


Figura 2.28 Esquema de áreas para el cálculo de centroide sobre el conjunto AA para las fuerzas laterales de arrastre por corriente y contracorriente.

Para el cálculo de estos centroides se utilizó la ecuación (2.17) (Singer & Pytel, 2008a), donde la cantidad n de áreas o elementos a considerar en la sumatoria se especifican en la Figura 2.28 y Figura 2.29, tanto para el centroide de las fuerzas laterales, como para el centroide de las fuerzas verticales sobre el conjunto AA, respectivamente.

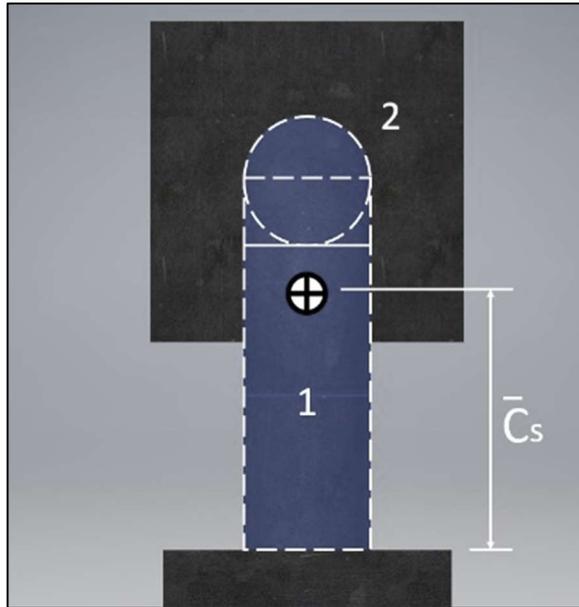


Figura 2.29 Esquema de áreas para el cálculo de centroide sobre el conjunto AA para las fuerzas frontal de arrastre por corriente y contracorriente.

La metodología para encontrar este centroide dividió el conjunto total AA en varias secciones como se muestra en la Figura 2.28, de esta manera, el cálculo del centroide se logró de manera más sencilla.

$$\bar{X}_{L,S} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.17)$$

Donde:

A_i = Áreas consideradas en la sumatoria, donde $i=1,2,3 \dots n$.

\bar{x}_i = Centroides considerados en el eje x, donde $i=1,2,3 \dots n$.

$\bar{X}_{L,F,S}$ = Centroide calculado para el eje z, x y y respectivamente.

2.6.1 Centroide \bar{x} para la parte lateral.

Las áreas consideradas en para las fuerzas laterales fueron: (1) El área 1, 2, 4 y 5 de la Figura 2.28. Las dimensiones de estas secciones geométricas están especificadas en la Figura 2.24, y se calcula mediante la ecuación (2.11). La distancia en x para la aplicación de la fuerza de arrastre lateral sobre estos cuerpos en las áreas 1 y 5 es $L_b/2$ y, para las áreas 2 y 4 es L_b .

Y (2), El área 3 de la Figura 2.28. Las dimensiones de esta sección geométrica están especificadas en la y la Figura 2.20, y Figura 2.23 y se calcula mediante la ecuación (2.10). La distancia en x para la aplicación de la fuerza de arrastre lateral sobre este cuerpo es L_b . Los resultados del cálculo de la coordenada \bar{x} , para el centroide C_L se encuentran en el Capítulo 3, en la sección 3.4.

2.6.2 Centroide \bar{x} para la parte superior.

Las áreas consideradas en para las fuerzas verticales fueron: (1) El área de la proyección cilíndrica del alma del ánodo especificada en la Figura 2.18, y se calcula mediante la ecuación (2.2). La distancia en x para la aplicación de la fuerza hidrostática sobre la parte superior del alma es $L_b/2$. Y (2), el área de la parte superior del ánodo galvánico.

Las dimensiones de esta sección geométrica están especificadas en la Figura 2.19 y se calcula mediante la ecuación (2.4). La distancia en x para la aplicación de la fuerza de arrastre lateral sobre la superficie superior del ánodo es L_b . Los resultados del cálculo de la coordenada \bar{x} , para el centroide C_s se encuentran en el Capítulo 3, en la sección 3.4.

Cabe destacar que, para las fuerzas laterales, el centroide en \bar{x} es el único que varía sobre el cuerpo, puesto que, el centroide en \bar{y} está exactamente en el centro del conjunto AA por ser simétrico respecto al eje x. Un caso similar fue el del centroide en yz, puesto que, el cuerpo es simétrico tanto en el eje y como en el eje z.

2.7 Fuerzas resultantes y reacciones.

Una vez calculados los centroides sobre los cuales se ejerce cada fuerza detallada en la sección 2.5, se procedió a obtener el valor de las reacciones que estas fuerzas ejercen sobre los puntos de apoyo del sistema.

2.7.1 Descripción de las Reacciones.

En la Figura 2.30 se observan tres de las reacciones sobre el apoyo superior de alma del ánodo. La primera de ellas, en la dirección negativa del eje y , es la fuerza cortante V_y debida al peso del ánodo junto con la fuerza ejercida por el peso de la columna de agua sobre este.

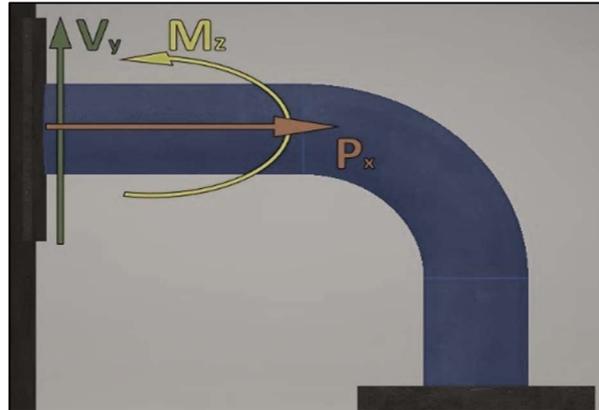


Figura 2.30 Reacciones y Momentos causado por el peso y presión hidrostática.

La segunda reacción, realizada sobre el eje z , es el momento flector M_z debido a las dos fuerzas antes mencionadas que pivotean sobre el centroide X_L . Y la tercera reacción, en la dirección positiva del eje x , es debida a la fuerza axial P_x debida a la corriente sobre el área frontal del ánodo galvánico.

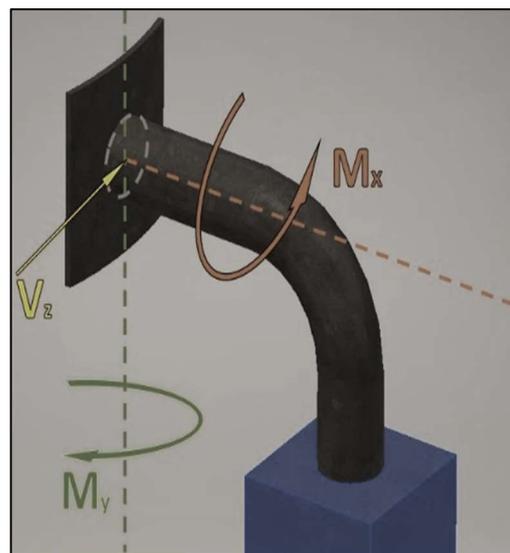


Figura 2.31 Reacciones y momentos causada por las corrientes marinas

En la Figura 2.31 se observan otras tres reacciones sobre el mismo apoyo superior de las juntas soldadas. La primera reacción es el momento flector M_x debido a la fuerza de arrastre lateral sobre el ánodo.

La segunda reacción, en la dirección negativa del eje z , es la fuerza cortante V_z debida a la corriente lateral mencionada anteriormente. Y, el momento flector M_x , realizado sobre el eje x , se debe también a la fuerza de arrastre lateral mencionada en esta sección.

2.7.2 Puntos críticos.

Según la Figura 2.32 se muestran los puntos A y B como puntos críticos a considerar en el diseño de la soldadura. Los cálculos se realizaron para ambos puntos, para poder dimensionar la soldadura acorde al esfuerzo máximo en la fibra más crítica.



Figura 2.32 Ubicación de los puntos críticos para el análisis de soldadura.

2.7.3 Fuerza cortante y axial.

Para el cálculo de la fuerza cortante que se ejerce sobre el punto crítico A, se utilizó la ecuación (2.18) y, para el cortante sobre el punto B se utilizó la ecuación (2.19). La reacción de la fuerza axial producida por la corriente marina frontal al ánodo se especifica en la ecuación (2.20).

$$V_y = \frac{F_H + W}{2} \quad (2.18)$$

Donde:

F_H = Fuerza hidrostática sobre el conjunto AA.

W = Peso del conjunto AA.

V_y = Fuerza cortante ejercida en el eje y .

$$V_z = \frac{F_{DL}}{2} \quad (2.19)$$

Donde:

F_{DL} = Promedio entre la fuerza de arrastre de corriente y contracorriente ejercida sobre el conjunto AA.

V_z = Fuerza cortante ejercida en el eje z .

$$P_x = \frac{F_{DF}}{2} \quad (2.20)$$

Donde:

F_{DF} = Promedio entre la Fuerza de arrastre de corriente y contracorriente ejercida sobre el conjunto AA.

P_x = Fuerza axial ejercida en el eje x .

2.7.4 Momento flector.

Para el cálculo del momento de torsión sobre las reacciones se utiliza la ecuación (2.21).

$$T = M_x = F_{DL} \cdot \bar{y} \quad (2.21)$$

Donde:

T = Momento de torsión.

F_{DL} = Fuerza de arrastre debida a la corriente lateral.

\bar{y} = Distancia en el eje y desde el punto de reacción hasta el centroide xy .

Para el cálculo del momento flector ejercido sobre el eje y se utiliza la ecuación (2.22).

$$M_y = F_{DL} \cdot \bar{C}_S \quad (2.22)$$

Donde:

M_y = Momento flector.

F_{DL} = Fuerza de arrastre debida a la corriente lateral.

\bar{C}_S = Centroide xz .

Para el cálculo del momento flector ejercido sobre el eje z se utiliza la ecuación (2.23).

$$M_z = F_H \cdot \bar{C}_S + F_{DL} \cdot \bar{y} + W \cdot \bar{C}_S \quad (2.23)$$

Donde:

M_z = Momento flector en el eje z .

W = Peso del conjunto 'alma-ánodo'.

F_{DL} = Fuerza de arrastre debida a la corriente lateral.

F_H = Fuerza hidrostática.

\bar{y} = Distancia en el eje y desde el punto de reacción hasta el centroide xy .

\bar{C}_S = Centroide xz .

2.8 Diseño del cordón de soldadura.

2.8.1 Fatiga en la unión soldada.

El análisis por fatiga se realiza para aquellas cargas que sobrepasan $2e4$ ciclos. Dicho análisis se estableció respecto a la Tabla A-3.1 de la norma AISC360-16 (Asociación Latinoamericana del Acero, 2016). Se descarta, entonces, la consideración de fatiga para la fuerza hidrostática por no alcanzar el límite mínimo establecido de ciclos en los veinte años de funcionamiento.

Únicamente se consideró fatiga para la fuerza de arrastre realizada por las corrientes laterales y frontales sobre el conjunto ánodo-alma. Los cálculos para dimensionar el cordón de soldadura bajo consideraciones de fatiga se realizaron desde en la sección 2.8.5.

2.8.2 Soldadura como línea.

Existe un método para dimensionar el cordón de una soldadura que consiste en considerarla a ésta como una línea (Robert L. Norton, 2006a). Este método entrega información de carga aplicada por unidad de longitud de un cordón de soldadura, con la cual, se puede hallar el área de la sección transversal de la soldadura especificada para las condiciones de servicio establecidas. Este método es sencillo y directo, y no requiere de continuas iteraciones para encontrar una longitud adecuada de cordón y garganta.

Por esta razón, se consideró adecuado utilizarlo para dimensionar la soldadura de la unión del alma del ánodo con la placa de soporte y, también, la placa de soporte con el pilote del muelle portuario.

Es importante recalcar que se designaron dos procesos de soldadura para el sistema de sujeción de la protección catódica del muelle portuario: El primero, une el alma del ánodo con la placa metálica, trabajo que se debe realizar en superficie como se especifica en la sección 2.3.1.2, y cuyo cálculo se detalla en la sección 2.8.4.2.

Mientras que, el segundo proceso, consiste en unir la placa metálica al pilote del muelle portuario, trabajo que se debe realizar con soldadura subacuática como se especifica en la sección 2.3.1.3, y cuyo proceso de cálculo se detalla en la sección 2.8.4.

2.8.3 Metodología de diseño.

Para encontrar la dimensión de la garganta del cordón de soldadura se siguió tres pasos (Robert L. Norton, 2006a) :

(1) Se encontró los valores normalizados por unidad de longitud de área, módulo de sección y momento polar de la geometría del elemento a soldar.

(2) Se determinó las cargas y la fuerza resultante de esta junta.

Y, (3) Con estos valores se estableció el esfuerzo permisible del material para, de manera posterior, encontrar el factor de seguridad de la junta soldada.

2.8.4 Diseño de cordón de soldadura: Placa – Pilote.

Se consideró dos configuraciones para realizar el cordón de soldadura sobre la geometría especificada en la Figura 2.34: la soldadura tipo C y la soldadura completa. Estas configuraciones fueron dimensionadas para lograr un factor de seguridad superior a 2.67 (American Welding Society, 2015), ítem 9.6.1.3 para PJP.

De esta forma, disminuir el costo en material de soldadura como cantidad de electrodos y horas de trabajo del soldador. En la Figura 2.33 se ilustran estas dos configuraciones. La junta soldada ‘placa-pilote’ será abreviada como junta PP de aquí en adelante para facilidad de redacción.

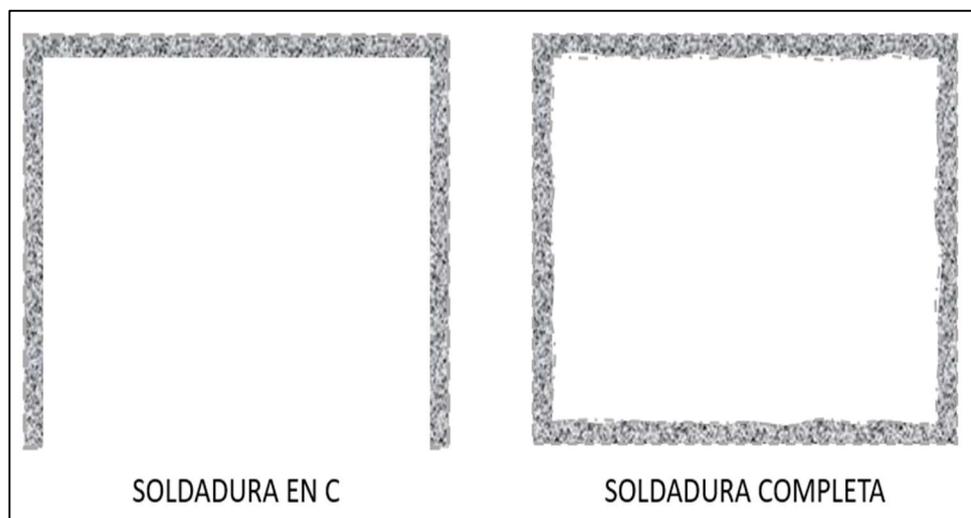


Figura 2.33 Configuraciones del cordón de soldadura sobre la junta soldada PP.

2.8.4.1 Sección por soldar.

La placa considerada para la junta PP se ilustra en la Figura 2.34, en donde también se especifican los parámetros para los cálculos del cordón de soldadura.

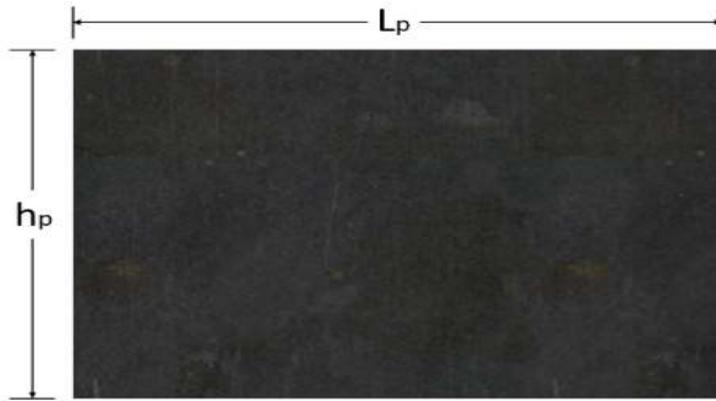


Figura 2.34 Variables de dimensión de la placa de unión entre el alma del ánodo con el pilote del muelle.

2.8.4.2 Secciones Normalizadas.

Para encontrar el valor de área/longitud de la configuración tipo C en la junta PP se utilizó la ecuación (2.24) ; mientras que, para la configuración de soldadura completa se utilizó la ecuación (2.25) (Robert L. Norton, 2006a)

$$A_w = L_p + 2h_p \quad (2.24)$$

$$A_w = 2L_p + 2h_p \quad (2.25)$$

Donde:

A_w = Sección normalizada de área/longitud.

h_p = Altura de la placa.

L_p = Longitud de la placa.

Para encontrar el valor del módulo de sección de la configuración tipo C en la junta PP se utilizó la ecuación (2.26); mientras que, para la configuración de soldadura completa en la misma junta, se utilizó la

ecuación (2.27) (Robert L. Norton, 2006a).

$$S_w = \frac{2h_p L_p + h_p^2}{3} \quad (2.26)$$

$$S_w = (h_p \cdot L_p) + \frac{h_p^2}{3} \quad (2.27)$$

Donde:

S_w = Modulo de sección.

h_p = Altura de la placa.

L_p = Longitud de la placa.

Para encontrar el valor del momento polar de inercia de la configuración tipo C en la junta PP se utilizó la ecuación (2.28); mientras que, para la configuración de soldadura completa en la misma junta, se utilizó la ecuación (2.29) (Robert L. Norton, 2006a).

$$J_w = \frac{(L_p + 2h_p)^3}{12} - \frac{h_p^2(L_p + h_p)^2}{(L_p + 2h_p)} \quad (2.28)$$

$$J_w = \frac{(h_p + L_p)^3}{6} \quad (2.29)$$

Donde:

J_w = Momento polar de inercia de área.

h_p = Altura de la placa.

L_p = Longitud de la placa.

2.8.5 Diseño de cordón de soldadura: Alma del ánodo – Placa.

Se consideró una sola configuración para realizar el cordón de soldadura sobre la geometría especificada en la Figura 2.35. Esta configuración fue

dimensionada para lograr un factor de seguridad superior a 2.67 (Robert L. Norton, 2006a). La junta soldada 'alma-placa' será abreviada como junta AP de aquí en adelante para facilidad de redacción.

2.8.5.1 Sección por soldar.

La junta AP se ilustra en la Figura 2.35, en donde también se especifica el diámetro para el cálculo del cordón de soldadura. Esta junta consiste en la unión del alma del ánodo de diámetro D , en unión a la placa curva calculada en la sección 2.8.4.

El proceso de cálculo para dimensionar la junta entre el alma del ánodo y la placa curva se presenta a continuación:

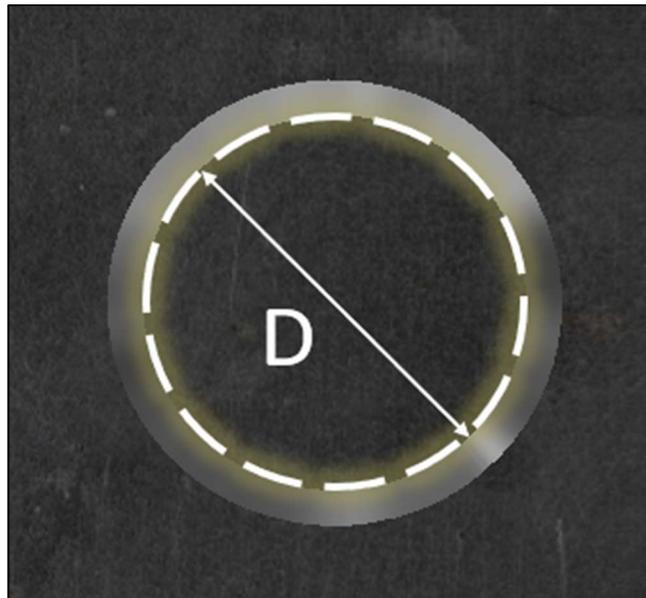


Figura 2.35 Variables de dimensión para la unión entre el alma del ánodo y la placa curva.

2.8.5.2 Secciones Normalizadas.

Para encontrar el valor de la sección de área/longitud en la junta AP se utilizó la ecuación (2.30) (Robert L. Norton, 2006a).

$$A_w = \pi D \quad (2.30)$$

Donde:

A_w = Sección normalizada de área/longitud.

D = Diámetro del alma.

Para encontrar el valor del módulo de sección en la junta AP se utilizó la ecuación (2.31) (Robert L. Norton, 2006a).

$$S_w = \pi \frac{D^2}{4} \quad (2.31)$$

Donde:

S_w = Modulo de sección.

D = Diámetro del alma.

Para encontrar el momento polar de inercia de área en la junta AP se utilizó la ecuación (2.32) (Robert L. Norton, 2006a).

$$J_w = \pi \frac{D^3}{4} \quad (2.32)$$

Donde:

J_w = Momento polar de inercia de área.

D = Diámetro del alma.

2.8.6 Rediseño del cordón de soldadura: Alma del ánodo – Placa.

Una alternativa de diseño para miembros de estructuras cuyas secciones transversales están sometidos a grandes esfuerzos debido a los momentos y las fuerzas cortantes, es aumentar su área de soldadura. Una forma de aumentar el área de soldadura es insertando otro cuerpo en el conjunto.

El nuevo conjunto, con la presencia de rigidizadores en el alma del ánodo, será denominado junta RAP (rigidizadores - alma - placa) para mayor facilidad.

2.8.6.1 Sección por soldar.

La junta RAP se ilustra en la Figura 2.36, en donde también se especifican los parámetros para los cálculos del cordón de soldadura.

Esta junta consiste en la unión del alma del ánodo de diámetro D , junto con rigidizadores de longitud L_R y espesor A_R , a la placa curva calculada en la sección 2.8.4. El proceso de cálculo para dimensionar la junta entre el alma del ánodo y la placa curva se presenta a continuación:

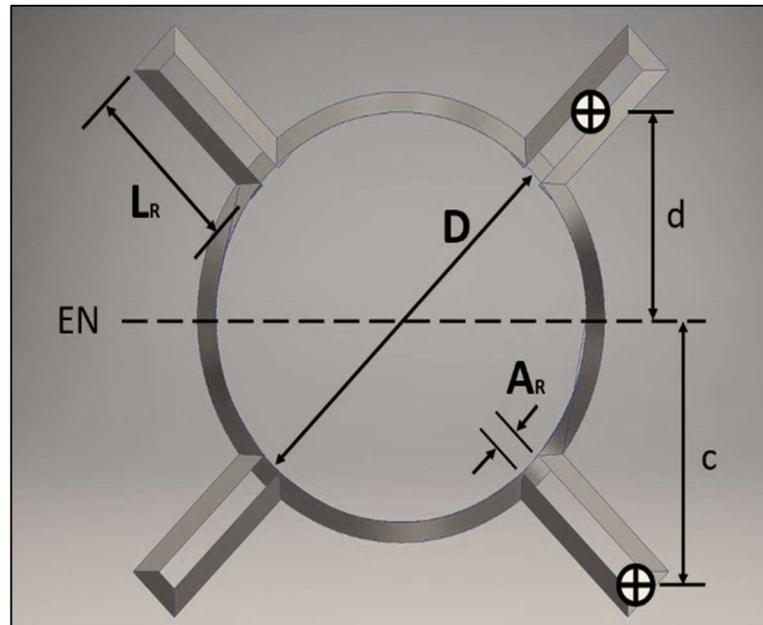


Figura 2.36 Variables de dimensión para la unión entre el alma del ánodo y la placa curva.

2.8.6.2 Secciones Normalizadas.

Para encontrar el valor de área/longitud de la Figura 2.36 se suman los cordones de los rigidizadores a la ecuación (2.42) (Robert L. Norton, 2006a).

$$A_w = \pi D + 4L_R \quad (2.33)$$

Donde:

A_w = Sección normalizada de área/longitud.

D = Diámetro del alma.

L_R = Longitud del rigidizador.

Para encontrar el valor del módulo de sección, primero se encontró la inercia del conjunto con la ecuación (2.35) (Hibbeler, 2011).

Además, con la ayuda del Teorema de Steiner en los rigidizadores calculado con la ecuación (2.34) y, posteriormente, se aplicó la ecuación (2.36) (Robert L. Norton, 2006b).

$$I_f = I_l + d'^2 \quad (2.34)$$

Donde:

I_f = Inercia desplazada (Teorema de Steiner).

I_l = Inercia centroidal de los rigidizadores.

d' = Distancia del centroide al eje neutro (EN).

$$I_t = I_0 + 4I_f \quad (2.35)$$

Donde:

I_T = Inercia del conjunto

I_l = Inercia de la sección circular.

I_f = Inercia de los rigidizadores.

$$S_w = \frac{I_T}{c} \quad (2.36)$$

Donde:

S_w = Modulo de sección.

I_T = Inercia del conjunto.

c = Distancia a la fibra más lejana.

Para encontrar el momento polar de los rigidizadores J_l de la Figura 2.36, se utilizó la ecuación (2.37) (Singer & Pytel, 2008a).

$$J_l = \sum L \left(\frac{1}{12} L^2 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2 \right) \quad (2.37)$$

Donde:

J = Momento polar en rigidizadores.

\bar{X} = Distancia X entre centroide del rigidizador al centroide del conjunto.

\bar{Y} = Distancia Y entre centroide del rigidizador al centroide del conjunto.

Por último, para obtener el momento polar total J_T del conjunto, se utilizó la ecuación (2.38) (Singer & Pytel, 2008b). Donde J_o es el momento polar de una sección polar para una línea (Robert L. Norton, 2006a), capítulo 12.

$$J_T = 4J_L + J_o \quad (2.38)$$

Donde:

J_T = Momento polar en todo el conjunto.

J_L = Momento polar de un rigidizador.

J_o = Momento polar de la sección circular.

2.8.7 Ecuaciones para la soldadura en las juntas.

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de las cargas normalizadas, fuerza resultante, esfuerzo permisible y factor de seguridad en las juntas PP, AP y RAP, serán iguales en los tres casos.

2.8.7.1 Cargas Normalizadas.

Para el cálculo de cargas normalizadas como fuerza/longitud se utilizan las ecuaciones especificadas en esta sección para el diseño de soldadura como línea según el método de Blodgett (Robert L. Norton, 2006b).

Posteriormente, para el cálculo de compresión directa sobre la junta soldada, se utilizó la ecuación (2.39).

$$f_n = \frac{P_x}{A_w} \quad (2.39)$$

Donde:

f_n = Compresión directa por unidad de longitud.

P_x = Fuerza Axial.

A_w = Sección normalizada de área/longitud.

Para el cálculo del cortante directo sobre la junta soldada, se utilizó la ecuación (2.40).

$$f_s = \frac{V_z}{A_w} \quad (2.40)$$

Donde:

f_s = Cortante directo por unidad de longitud.

A_w = Sección normalizada de área/longitud.

Para el cálculo de la flexión sobre la junta soldada, se utilizó la ecuación (2.41).

$$f_b = \frac{M_z}{S_w} \quad (2.41)$$

Donde:

f_b = Flexión por unidad de longitud.

S_w = Modulo de sección.

Para el cálculo de torsión sobre la junta soldada, se utilizó la ecuación (2.42).

$$f_t = \frac{M_x}{J_w} \quad (2.42)$$

Donde:

f_t = Torsión por unidad de longitud.

J_w = Momento polar de inercia de área.

2.8.7.2 Fuerza Resultante.

Para el cálculo de la fuerza resultante que se ejerce sobre cada junta soldada se utilizó la ecuación (2.43).

$$F_R = \sqrt{f_n^2 + f_s^2 + f_b^2 + f_t^2} \quad (2.43)$$

Donde:

f_n = Compresión directa por unidad de longitud.

f_s = Cortante directo por unidad de longitud.

f_b = Flexión por unidad de longitud.

f_t = Torsión por unidad de longitud.

2.8.7.3 Esfuerzo permisible.

Para el cálculo del esfuerzo permisible se utiliza la ecuación (2.44). Este esfuerzo permisible es el máximo soportado por la junta soldada y con el valor obtenido se puede encontrar el factor de seguridad de cada junta.

Es importante mencionar que las unidades para el esfuerzo permisible son finalmente Newtons/metros cuadrados, debido a que la fuerza normalizada por unidad de longitud se divide para la longitud de la garganta de la soldadura Blodgett (Robert L. Norton, 2006b).

$$\tau_{\text{permisible}} = \frac{|F_R|}{t} \quad (2.44)$$

Donde:

t = Garganta del cordón de soldadura.

$|F_R|$ = Modulo de la fuerza resultante.

$\tau_{\text{permisible}}$ = Esfuerzo permisible para el sistema.

2.8.7.4 Factor de seguridad.

El factor de seguridad para el área de fusión se calculó con la ecuación (2.45) (Robert L. Norton, 2006b)

$$N_{fr} = \frac{S_{ers}}{\tau_{\text{permisible}}} \quad (2.45)$$

Donde:

N_{fr} = Factor de seguridad del ensamble soldado.

$\tau_{permissible}$ = Esfuerzo permisible para el sistema.

S_{ers} = El intervalo de esfuerzo cortante de la resistencia en el límite de fatiga.

2.8.7.5 Espesor de placa.

El espesor se seleccionó acorde a la Norma AWS D1.1M/D1.1 según el tamaño mínimo de filete para la placa base. Además, para la norma subacuática AWS D3.6M se restringió para espesores de placa no menores a 10mm según ítem 5.4.2.

Base Metal Thickness (T) ^a		Minimum Size of Fillet Weld ^b	
in	mm	in	mm
$T \leq 1/4$	$T \leq 6$	$1/8^c$	3^c
$1/4 < T \leq 1/2$	$6 < T \leq 12$	$3/16$	5
$1/2 < T \leq 3/4$	$12 < T \leq 20$	$1/4$	6
$3/4 < T$	$20 < T$	$5/16$	8

Figura 2.37 Tamaño mínimo de filete (American Welding Society, 2015).

2.8.8 Ecuaciones para análisis de alma para conexión tubular.

El valor de θ es 90° para unión en T y las expresiones se redujeron para la Flexión en plano y fuera de él, con la ecuación (2.46) dependiendo la fuerza aplicada (Asociación Latinoamericana del Acero, 2016).

$$M_{n-ip} = 0.6 F_y t D_b^2 \quad (2.46)$$

El momento soportado en el plano por el cordón según la ecuación (2.47).

$$M_{n-ip} = 5.39F_y t^2 \gamma^{0.5} \beta D_b Q_f \quad (2.47)$$

El momento soportado fuera del plano por el cordón según la ecuación (2.48)

$$M_{n-op} = 0.6F_y t^2 D_b \left(\frac{3}{1 - 0.81\beta} \right) Q_f \quad (2.48)$$

Donde:

F_y = Es la resistencia admisible según el material del alma. [N/m²]

D_b = Diámetro exterior del alma conectora. [m]

t = El espesor del alma [m]

β = razón de ancho D_b/D .

Los resultados se encuentran en el ítem 3.7.3. Además, se estable el origen de las variables para proceder al análisis en la Figura 2.15

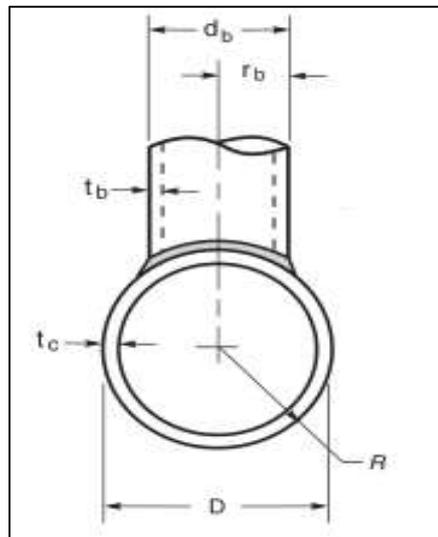


Figura 2.38 Ilustración de variables en conexión en T. Fuente: AWS D1.1M/D1.1:2015

2.9 Proceso de manufactura.

Una de las condiciones que puede modificar el cordón de soldadura tanto en longitud como en área, es el modo de instalación. Este modo de instalación puede modificar incluso las dimensiones de la placa, dependiendo de cuántos

usos más deba tener ésta al momento de ser instalada, o de cuáles requerimientos demande el conjunto a soldar al ser instalado.

Por esta razón, en esta sección se propuso una metodología de instalación con el fin de verificar que el diseño del soporte de ánodos galvánicos sea realmente viable y fácil de instalar como se lo propuso en el Capítulo 1.

Es importante mencionar que no se intentó proponer un método innovador o diferente, sino todo lo contrario, considerar los procesos más sencillos y comunes de cada etapa de la instalación para analizar qué variables podrían considerarse al dimensionar la placa de soporte del ánodo galvánico, o que accesorios podrían agregarse al sistema para una instalación segura.

Esta metodología de instalación consideró tres etapas: primero, el izaje de carga desde un medio de transporte marino; segundo, la manipulación de esta carga dentro del medio marino y; por último, la colocación de ésta junto al pilote metálico en donde será soldado.

2.9.1 Equipos, maquinaria y accesorios para el montaje del soporte de los ánodos de la protección catódica.

El conjunto soldado ‘alma-ánodo-placa’ especificado en este proyecto será denominado conjunto AAP de aquí en adelante, para facilidades de escritura. A continuación, se detallan los diversos equipos y parámetros que fueron considerados en las alternativas de instalación para este conjunto mencionado.

2.9.1.1 Eslingas y ‘Ratches’.

Las eslingas son una alternativa al uso de cadenas o cuerdas de acero para el izaje de carga. Estas eslingas permiten sujetar una carga sin requerir puntos específicos de sujeción en la estructura, o candados para el aseguramiento de ésta. Tampoco produce descamación en la superficie del material al ser sujetado (Continental, 2020a). Por esta razón, se definió el uso de eslingas como método de izaje de la carga desde la barcaza grúa.

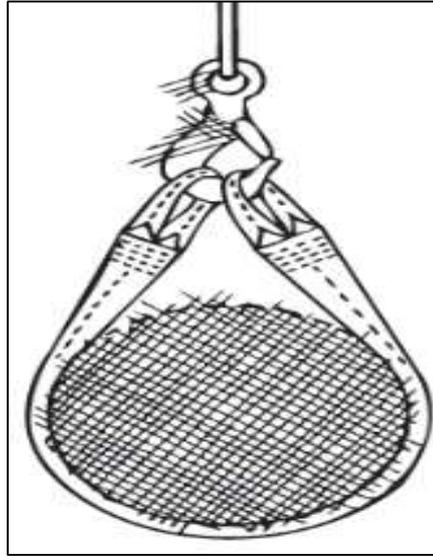


Figura 2.39 Eslinga con sujeción tipo canasta (Continental, 2020b).

Las eslingas se las escoge por el tipo de enganche, dependiendo de la carga que se quizá movilizar. Entre los tipos de enganche está el 'tipo canasta', ilustrado en la Figura 2.39, el cual consiste en una correa con apoyo en dos puntos de sujeción. También, en cuanto al material, las eslingas suelen fabricarse en nylon o material de polyester (Continental, 2020b).

Estabilidad en la exposición a muchas sustancias químicas comunes.		
Químico	Nylon	Polyester
Éteres	OK	NO
Hidrocarburos Halogenados	OK	OK
Hidrocarburos	OK	OK
Acetonas	OK	OK
Petróleo crudo	OK	OK
Aceite Lubricante	OK	OK
Jabones, detergentes	OK	OK
Agua de mar	OK	OK
Álcalis débiles	OK	OK

Figura 2.40 Comparación entre los materiales de las eslingas de izaje frente a las mismas condiciones de aplicación (Continental, 2020b).

Esta selección requiere del tipo de uso que se le vaya a dar a la correa. Las aplicaciones o diferencias entre ambos materiales se describen en la Figura 2.40. Por último. Los ratches de seguridad, permiten lograr amarres de carga sin necesidad de hacer ajustes externos por parte de los operadores, sino solamente, por medio de este dispositivo, como se ilustra en la Figura 2.41.



Figura 2.41 Tipos de conexiones y 'ratches' de sujeción. Tipos RSF, RRS y RSD con capacidades de 3,300lb hasta 10,000lb (Continental, 2020b).

La selección o uso de estos elementos estará sometida a la evaluación del personal de instalación o manipulación de la grúa, sin embargo, este método se utiliza para ejemplificar la forma posible de sujeción para el proceso de instalación de los ánodos galvánicos. El análisis de este elemento se realizará en el Capítulo 3, en la sección 3.6.

2.9.1.2 Bolsa de elevación profesional (Lift bags).

Estas bolsas de elevación profesionales son flotadores que permiten la manipulación de cargas en el medio marino. Se utilizan para trabajos de construcción, salvamento pesado y ligero y varias tareas en alta mar.

Estos equipos permiten movilizar una carga en profundidad de acuerdo con la distancia requerida de manipulación, sea cual fuere el peso de ésta. Por esta razón, se hace un medio útil para la instalación del conjunto AAP, en las posiciones de cada pilote (Subsalve, 2020).

Tienen diferentes formas que pueden variar según el tipo de trabajo que se requiera hacer. Tienen también, varias configuraciones respecto a sus puntos de agarre pueden ser de un solo punto de agarre o múltiple punto.

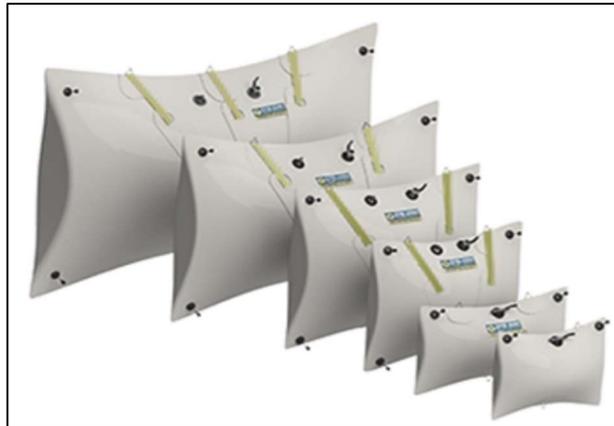


Figura 2.42 Diferentes categorías de bolsas de elevación profesión de la marca Subsolve (Subsolve, 2020).

Para la manipulación del conjunto soldado AAP considerado en este proyecto, cuyo peso se define en la sección 3.3, se definió una bolsa de elevación con capacidad de carga de hasta 500kg (Subsolve, 2020). Las especificaciones técnicas de este producto se detallan en la Tabla 2.20. Para este ejemplo de izaje se consideró una bolsa de la marca Subsolve.

Tabla 2.20 Especificaciones técnicas de la bolsa de elevación Subsolve EFB1000 (Subsolve, 2020).

Modelo	Capacidad de elevación	Díámetro	Altura	Dimensiones del paquete	Peso
	[Kg]	[m]	[m]	[m ³]	[Kg]
EFB-1000	500	1.13	1.31	0.46x0.33x0.26	14.5

2.9.1.3 Forma de uso.

Para el movimiento vertical de la carga por medio del flotador, el equipo cuenta con una válvula de émbolo en la parte superior de la bolsa para el control de aire.

La introducción del aire o la variación de este permite el control de la elevación de carga, o la manipulación de ésta.

2.9.1.4 Amarre de la carga.

Este equipo cuenta con correas de elevación de nailon conectadas en la parte inferior de la bolsa. Estas correas de nailon soportan la carga con un factor de seguridad de 6:1. Este sistema de bolsa en forma de almohada tiene dos puntos de sujeción, lo cual permite sujetar al conjunto AA desde los extremos del alma.

2.9.2 Metodología de descenso y ubicación de la carga.

El método para el descenso de los ánodos hasta el punto de instalación consideró salvaguardar la integridad del conjunto AAP y la optimización del tiempo de montaje.

Por lo cual, los parámetros que se consideraron para definir su metodología fueron: Tiempo de instalación, precio de instalación, seguridad, fácil manipulación. Las terminologías 'conjunto AAP' y 'carga' serán intercambiables para referirse al conjunto 'ánodo-alma-placa' en esta sección.

2.9.2.1 Consideraciones de altura para la instalación.

Acorde a los niveles de marea especificados en la sección 1.4.10, la instalación del conjunto AAP se deberá realizar en la marea alta a causa del movimiento de las corrientes superficiales y al despliegue de la bolsa de elevación. Las situaciones más relevantes para esta maniobra son:

Considerando marea baja, la situación se da únicamente por las corrientes marinas y la superficialidad de la instalación, las cuales impiden al buzo soldador operar con normalidad; mientras que, la marea alta les da mayor profundidad de operación y, por ende, menor exposición al movimiento superficial de las corrientes.

En el caso del despliegue de la bolsa de elevación, la dimensión de la altura de la bolsa es de 1,31 metros, sin considerar la sujeción de la bolsa al ánodo por medio de las correas de nailon, dimensión que puede extenderse hasta los 2 metros.

Esta situación, podría impedir al flotador moverse correctamente y realizar su tarea de manejo de la carga, puesto que, estaría saliendo por fuera de la superficie del agua.

2.9.2.2 Consideraciones de orientación del conjunto AAP.

En el documento INOCAR se describen las corrientes marinas como paralelas a la orilla de la playa. También, el estudio indica que la separación entre ánodos no debe estar por debajo de los 60 grados. Estos detalles permitieron tener una idea de la posible orientación del conjunto AAP en el pilote metálico del muelle portuario, como se ilustra en la Figura 2.43.

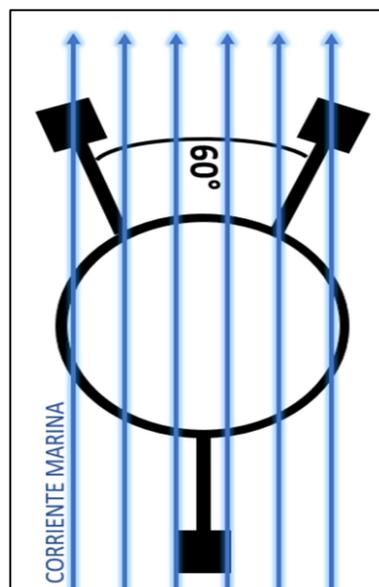


Figura 2.43 Incidencia de la corriente marina sobre la instalación de los ánodos galvánicos en el pilote metálico del muelle portuario.

El análisis de esta configuración de instalación de los ánodos galvánicos se detalla en el Capítulo 3, en la sección 3.6.

2.9.2.3 Mediciones y marcas de posición.

El proceso más común y simple que siguen los soldadores antes de comenzar con un proceso de soldadura es dejar la estructura 'punteada'. Esto significa que, cualquiera que sea el elemento para soldar, debe primero colocarse en el lugar preciso planificado, con mediciones precisas previas, para luego asegurarlo con puntos de soldadura.

Esta acción de asegurar con puntos de soldadura se denomina punteado. Sin embargo, cuando la estructura tiene pesos que no pueden sostener con puntos de soldadura, se utilizan pequeñas secciones que ayuden a sostener a la estructura en las ubicaciones establecidas por medición.

Estas pequeñas secciones que se colocan se denominan 'topes'. Estos topes están ubicados en lugares estratégicos en donde no afecten a las secciones en donde irá el cordón de soldadura.

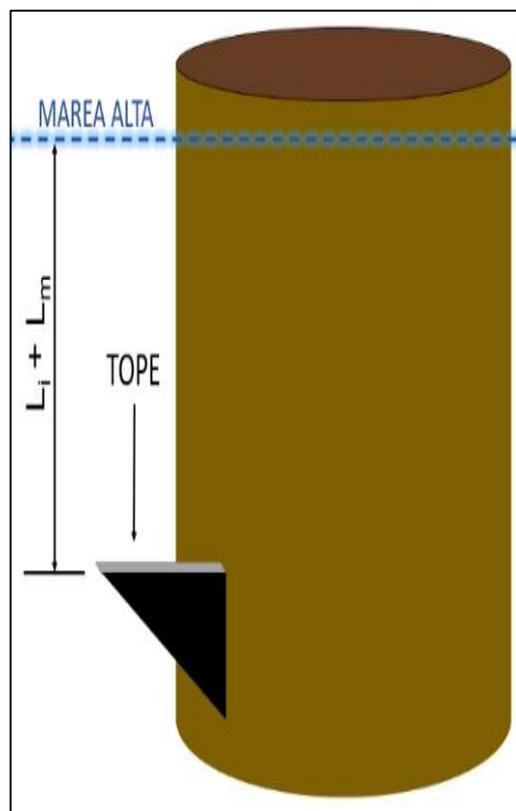


Figura 2.44 Ilustración del 'tope' colocado bajo la medición establecida en el pilote.

En la Figura 2.44, se ilustra un tope ubicado bajo el agua sobre el pilote metálico a la profundidad de la marea alta, como se especifica en la Tabla 2.17. Este tope fue el elemento planificado para sostener el conjunto AAP previo al proceso de soldadura.

Cabe mencionar que, este tope es una medida auxiliar de soporte que utiliza el operador, y no debe ser planificado necesariamente bajo especificaciones técnicas de soldadura.

2.9.2.4 Descenso del conjunto.

Una vez especificado el lugar donde será ubicado el conjunto AAP, se planificó el izaje de la carga desde una barcaza grúa, como se muestra en la Figura 2.45. Es importante mencionar que este proceso de izaje de carga debe realizarse por medio de correas de nailon para no dañar a la estructura del conjunto AAP.

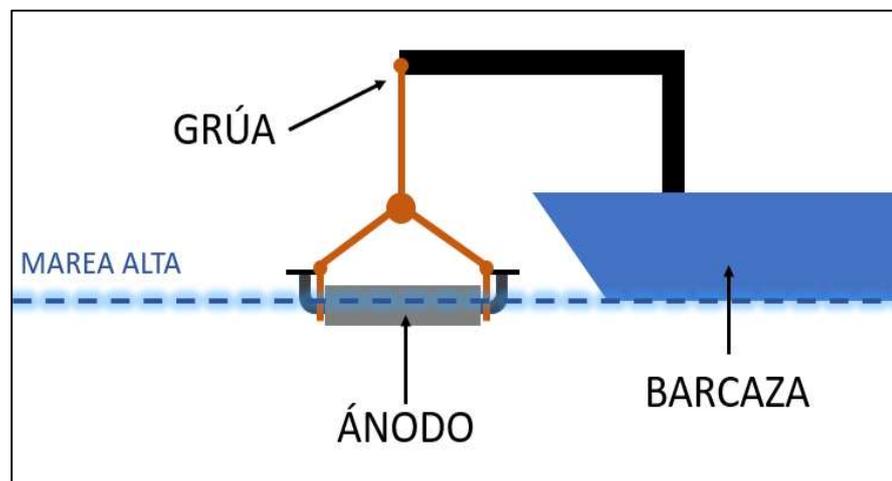


Figura 2.45 Ilustración del proceso de izaje del conjunto AAP sobre el agua desde una barcaza grúa.

Durante este procedimiento debe introducirse a la carga a una profundidad por debajo de los dos metros, para que la función del flotador sea más efectiva, como se observa en la Figura 2.46. la función del flotador ya se especificó previamente en la sección 2.9.1.2.

Por esta razón, se estableció este proceso de izaje por medio de una barcaza grúa, utilizando correas de nailon, para el descenso del conjunto APP hasta una profundidad adecuada para el uso del flotador.

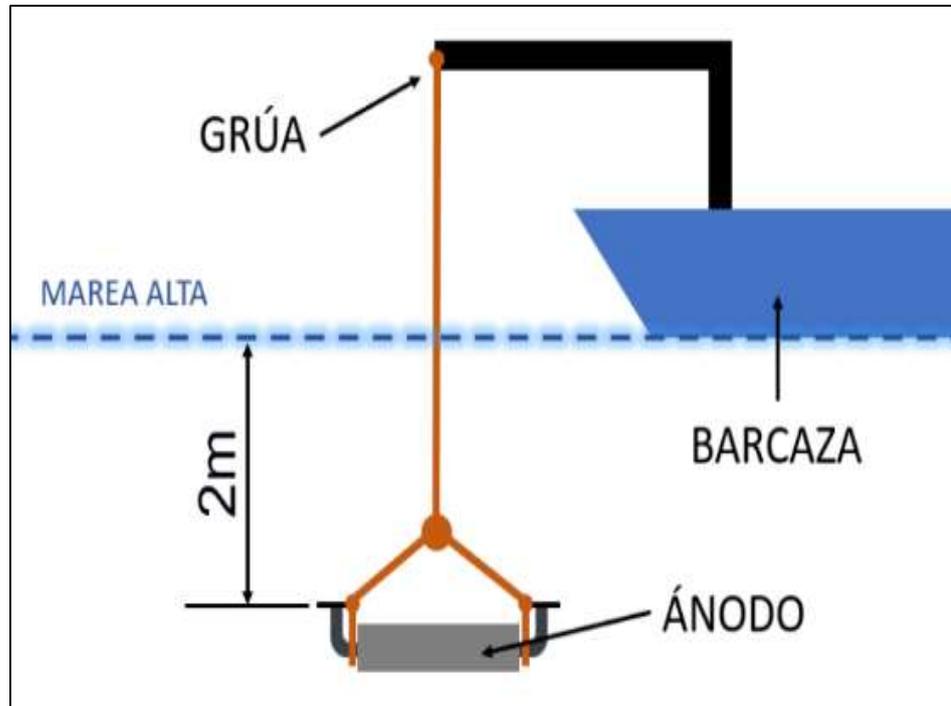


Figura 2.46 Ilustración de la distancia de descenso sugerida de la carga para el posterior uso de la bolsa de elevación.

El análisis de cómo afecta la metodología de descenso del conjunto AA sobre el diseño del sistema de sujeción de ánodos galvánicos se presenta en el Capítulo 3, en la sección 3.6.

2.9.2.5 Cambio de sujeción.

La grúa de la barcaza no puede llevar la carga por debajo del muelle hasta el punto donde será instalado y tampoco se puede manipular la carga con libertad en el medio marino por su gran peso.

Por esta razón, una vez introducida la carga en el mar desde la barcaza, se requiere cambiar la sujeción hacia un método que permita su movilidad con libertad por parte del operador.

Se escogió, entonces, el uso de bolsas de elevación profesional en forma de almohada, para la sujeción del conjunto AAP. Como se ilustra en la Figura 2.47.

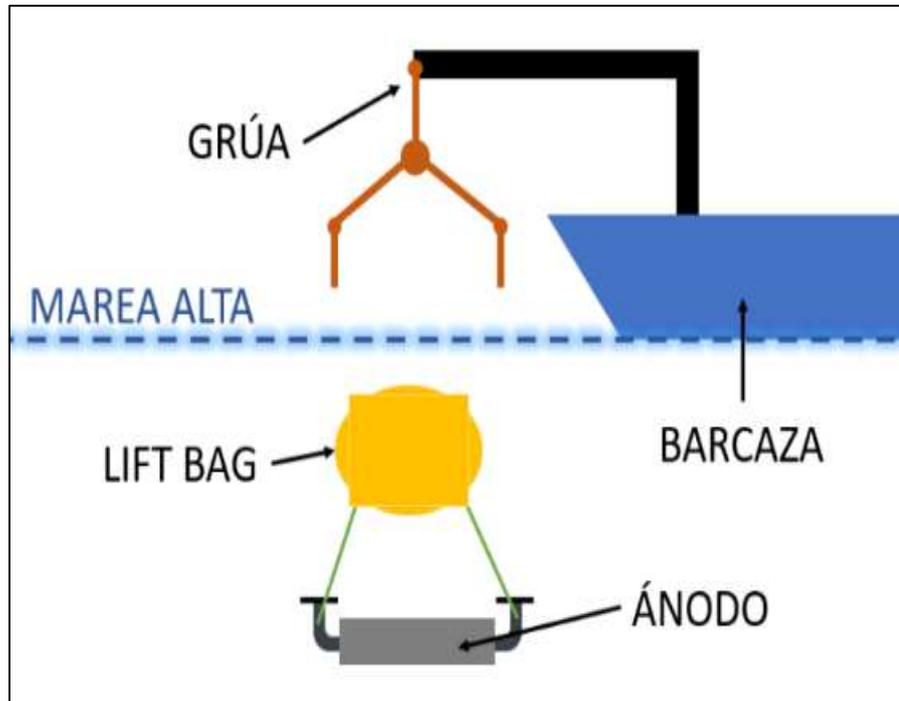


Figura 2.47 Ilustración del cambio de sujeción de la carga desde las eslingas de la grúa hacia las eslingas de la bolsa de elevación.

El análisis de cómo afecta la metodología del cambio de sujeción del conjunto AA sobre el diseño del sistema de sujeción de ánodos galvánicos se presenta en el Capítulo 3, en la sección 3.6.

2.9.2.6 Manipulación del conjunto AAP.

Una vez que una carga ha sido sujeta a una bolsa de elevación, se estableció que el operador manipule la carga en el medio marino hasta el punto en donde será instalado.

Cabe destacar que, el uso de la bolsa de elevación permite mover la carga en la profundidad del agua con libertad tanto horizontal como verticalmente.

Es decir, puede llevarse hasta el punto marcado por las mediciones iniciales y colocarse sobre los topes sin mayor esfuerzo, como se ilustra en la Figura 2.48.

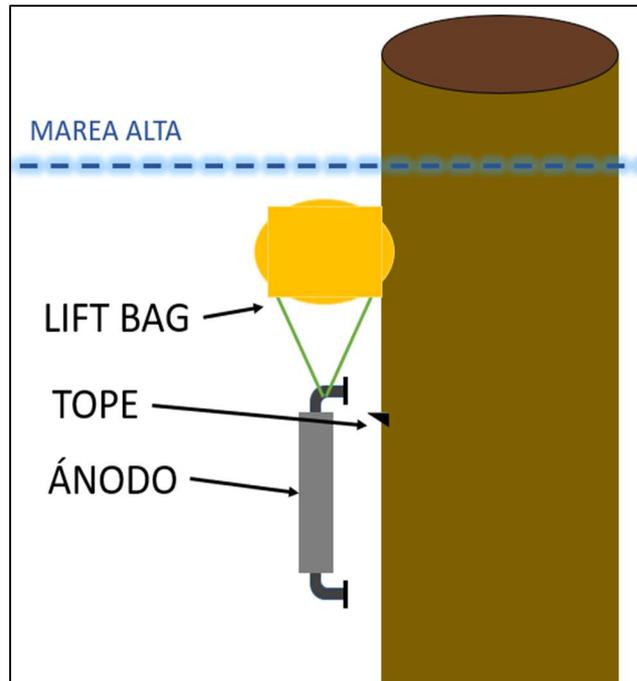


Figura 2.48 Ilustración de la manipulación del conjunto AAP hasta el tope soldado en el pilote metálico.

La carga no se deposita al 100% sobre los topes, puesto que la fuerza de boyantes del flotador mantiene al conjunto AAP a una altura constante dentro del medio marino.

Es importante mencionar que, los topes no se definieron como el único modo de fijación de la carga previo al proceso de soldadura, puesto que, estos solo sostienen al conjunto AAP de manera horizontal. Lo cual hizo que se requiera de una sujeción adicional previo al proceso de soldadura.

El análisis de cómo afecta la metodología del cambio de sujeción del conjunto AA sobre el diseño del sistema de sujeción de ánodos galvánicos se presenta en el Capítulo 3, en la sección 3.6.

2.9.2.7 Fijación del conjunto AAP.

Otro método de fijación común en maniobras marinas es el uso de correas de nailon. Éstas permiten fijar la carga sin agredir su estructura física, limitando su movilidad en todas las direcciones. Se definió, entonces, colocar las correas de nailon alrededor del pilote para mantener fijo al conjunto AAP en todos sus grados de libertad, como se ilustra en la Figura 2.49.

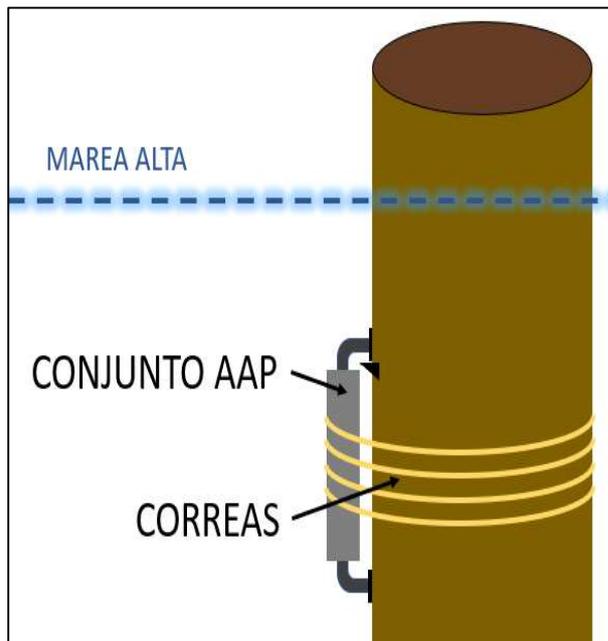


Figura 2.49 Ilustración de la carga fijada al pilote con las eslingas de nylon.

El análisis de cómo afecta la metodología de fijación del conjunto AA sobre el diseño del sistema de sujeción de ánodos galvánicos se presenta en el Capítulo 3, en la sección 3.6.

2.9.3 Parámetros para la calificación de la soldadura subacuática.

2.9.3.1 Profundidad.

Las configuraciones para la soldadura húmeda de Clase A, en el proceso SMAW, están especificadas para aplicaciones superficiales con profundidades en promedio de 15 metros de profundidad (American Welding Society, 2017).

En la Tabla 2.17, de la sección 2.5.1.2, se detalló que la profundidad total a la cual se realizará el proceso más profundo de soldadura es de 13,32 metros para el brazo inferior de la segunda fila de ánodos en marea baja, mientras que, para la marea alta esta altura puede llegar hasta los 16,32 metros de profundidad, quedando dentro del promedio especificado previamente.

2.9.3.2 Amperajes.

En la Figura 2.50, se muestra un resumen de las configuraciones de corrientes y voltajes de arco que se recomienda usar en soldadura húmeda con electrodo E7014 especificado en la sección 2.3.1.1.

Estas configuraciones son válidas para presiones de profundidad de hasta 22.2 Psi (Naval Sea System Comand, 2002), presión equivalente a 15 metros de profundidad como también se valida en la sección anterior. El rango de profundidad queda dentro de la configuración recomendada para el electrodo E7014 de 1/8" indicado en la Figura 1.6 de la sección 1.4.6.3.

Electrode		Welding Position			
Type	Size inch	Horizontal Amps	Vertical Amps	Overhead Amps	Arc ¹ Voltage
E7014	1/8	140-150	140-150	130-145	25-35
	5/32	170-200	170-200	170-190	26-36
	3/16	190-240	190-240	190-230	28-38

Figura 2.50 Configuración recomendada de amperaje para soldadura húmeda en presiones de profundidad de hasta 22.2Psi (Naval Sea System Comand, 2002)

2.9.3.3 Polaridad.

La soldadura húmeda suele conectarse en polaridad directa, en la cual el electrodo es conectado en el lado negativo del circuito de soldadura.

Esta configuración está relacionada con mayor vida útil del porta-electrodo. Sin embargo, no es la única regla de procedimiento. En ocasiones, la polaridad inversa resulta en mejores resultados respecto a control del cordón de soldadura y a la penetración en el metal base (Naval Sea System Comand, 2002).

Sin embargo, en la soldadura subacuática de este proyecto, la unión es traslapada, y el tipo de soldadura de filete, por esta razón, no se busca penetración, y no es recomendable usar polaridad inversa (Symbols & Metals, 2006). La polaridad directa se ilustra en la Figura 2.51.

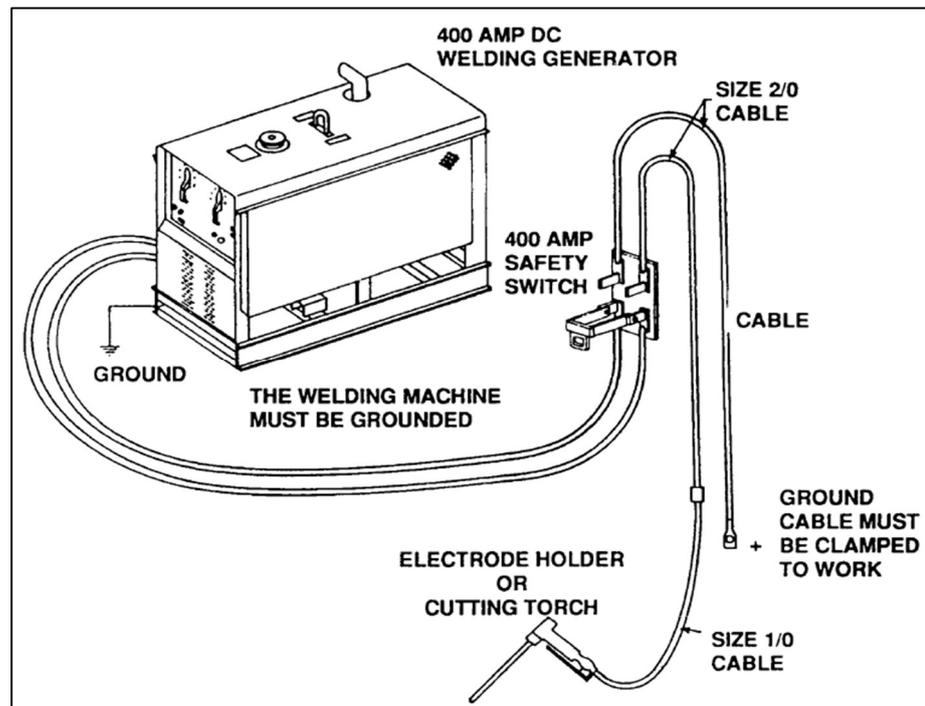


Figura 2.51 Arreglo para soldadura húmeda en polaridad directa (Naval Sea System Comand, 2002).

2.9.4 Documentación del procedimiento de soldadura.

En esta sección se establece las especificaciones de procedimiento de soldadura usados para el soporte de ánodos galvánicos; documentos que sirve de guía para lograr una soldadura bajo los parámetros del código AWS D1.1M/D1.1 y D3.6M especificados en la sección 0 de Diseño Preliminar y 2.8 de Diseño Detallado.

Sin esta documentación, el diseño de la junta soldada y, por ende, del soporte de ánodos galvánicos, no estaría completa.

2.9.4.1 Metodología para la elaboración de WPS.

Posterior al diseño se especificó un procedimiento para juntas precalificadas mediante el documento WPS en la junta AP y AA respectivamente, donde se interpretan los requisitos según la norma AWS.

Tabla 2.21 Secciones importantes en un WPS.

Parámetro	Especificación
Diseño de unión	Se define el tipo de unión y soldadura a realizar de acuerdo con el seleccionado para PP y alma de AP. Además, se detalla las variables de acuerdo con el tipo de soldadura como filete, PJP, CPJ.
Posición de soldadura	La junta precalificada establecerá la ubicación permitida para realizar el cordón de soldadura. Para el caso de la soldadura subacuática en la junta PP se usa la tabla 7.4 de la norma AWS 3.6M, Figura 4.11. Para la junta AP se verifico los movimientos aceptados por la norma AWSD1.1M/D1.1, Figura 4.10
Característica del proceso	Se especifica el proceso de soldadura de acuerdo con su aplicación y diseño para GMAW, SMAW, entre otros. Para la junta PP se validó su proceso acorde con la profundidad que se soldará según la tabla 7.3 de la norma AWS 3.6M, Figura 4.12 .
Metal de aporte	Se definió el palillo revestido para ambos procesos SMAW en juntas PP Y AP según la norma A5.1 para aceros al carbono, además, las recomendaciones de acuerdo con el grupo se establecen en a tabla 3.2 de la AWSD1.1M/D1.1. Para soldadura subacuática cumplió con el ítem 7.5.1.3 de AWS D3.6M:2017, para el carbón equivalente del material aporte.

Metal base	Se estableció los metales bases que intervienen en ambas juntas AP y PP especificando al grupo que pertenecen según la tabla 3.1 de la norma AWS D1.1M/D1.1
Protección de arco	La sección describe el uso de algún elemento adicional para realizar el cordón como gases o cámaras hiperbáricas en caso de la soldadura subacuática. Para la junta PP se descarta la inclusión de algo adicional establecido en la Figura 4.12
Técnica	Detalla el proceso técnico para realizar el cordón como pase, limpieza entre pases, aportación, entre otros. Además, especifica el diámetro del electrodo y número a usar.
Condiciones ambientales	Se especifica los parámetros adicionales determinantes que puedan influir para realizar el cordón.
Pre y Post calentamiento	Describe el calor necesario sobre la placa para preparación y posterior a la soldadura de acuerdo con el grupo que pertenece el material base. Para soldaduras precalificadas se especifica en la tabla 3.3 de la AWS D1.1M/D1.1.
Procedimiento de soldadura	Se especifica el procedimiento del cordón incluido una ilustración de la junta precalificada. Además, se especifica el número de pasadas necesarias, junto a parámetros técnicos como voltaje, amperaje, entre otros.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Fuerza Hidrostática.

De la sección 1.4.8, se conoce que se instalarán dos filas de ánodos cuyas profundidades se especifican en la Tabla 2.17, donde L_i es la distancia mínima por debajo de la marea baja, L_m es la variación entre marea alta y marea baja, y L_{aa} es la separación entre las dos filas de ánodos.

Se escogió la condición más crítica de fuerza hidrostática que comprende el horario de la marea más alta, es decir la suma de las alturas $L_i + L_m$.

3.1.1 Áreas de aplicación de fuerza hidrostática y arrastre.

Tabla 3.1 Resultados de los cálculos de área de la superficie superior de cada tipo de ánodo.

Tipo de ánodo N°	Área de la superficie superior del ánodo [m2]
1	0.043
2	0.038
3	0.034
4	0.026
5	0.034
6	0.019

El área superior de mayor magnitud expuesta a la columna de agua fue la correspondiente al ánodo tipo 1 según la Tabla 3.1. Sobre esta área se realizaron los cálculos de fuerza hidrostática crítica para el dimensionamiento de la soldadura.

Tabla 3.2 Resultado de los cálculos de área de la superficie superior e inferior del alma para los dos diámetros de alma utilizados.

	Especificación de área	Área [m ²]
Alma de 4"	Área del brazo superior del alma	0.0531
	Área del brazo inferior del alma	0.0429
Alma de 3"	Área del brazo superior del alma	0.0404
	Área del brazo inferior del alma	0.0342

El alma de 4 pulgadas corresponde al ánodo tipo 1 según la Tabla 2.16. Esto implica que el ánodo con mayor cantidad de superficies sobre las cuales índice la fuerza hidrostática es el tipo 1 según la Tabla 3.1 y la Tabla 3.2. Este ánodo fue utilizado como crítico para el cálculo de la presión hidrostática total sobre un conjunto AA.

3.1.2 Cálculo de presión hidrostática.

Tabla 3.3 Presión hidrostática en instalación crítica: Primera fila, ánodo tipo1.

Marea	Presión hidrostática sobre:		
	Brazo superior [Pa]	Brazo inferior [Pa]	Área superior del ánodo [Pa]
Alta	50325.30	87163.42	51885.38

Tabla 3.4 Presión hidrostática en instalación crítica: Segunda fila, ánodo tipo1.

Marea	Presión hidrostática sobre:		
	Brazo superior [Pa]	Brazo inferior [Pa]	Área superior del ánodo [Pa]
Alta	90585.54	127423.66	92145.62

Entre la fila 1 y la fila 2 de la instalación de ánodos existe una separación de longitud L_m especificada en la Tabla 2.17. La presión hidrostática de mayor magnitud ocurre para la instalación de la segunda fila, por esta razón, sobre esta fila de ánodos se calculó la fuerza hidrostática total.

3.1.3 Cálculo de fuerza hidrostática.

Tabla 3.5 Fuerza hidrostática en instalación crítica: Segunda fila, ánodo tipo1.

Tipo de ánodo	Fuerza Hidrostática Máxima sobre:			F.H. TOTAL [N]
	Brazo superior [N]	Brazo inferior [N]	Área superior del ánodo [N]	
1	4813.39	5463.36	3929.01	14205.77
2			3505.14	13781.90
3			3108.92	13385.67
4			2371.75	12648.51
5	3663.42	4362.27	3113.86	11139.56
6			1777.75	9803.45

Pese a que la fuerza hidrostática fue igual sobre las almas de los primeros 4 tipos de ánodos, ésta varía para la superficie superior de estos mismo 4 tipos de ánodos, puesto que, sus superficies superiores son diferentes.

Los cálculos dieron como resultado la mayor fuerza resultante sobre el ánodo tipo 1. Esta fuerza hidrostática fue considerada como fuerza resultante sobre el cuerpo, y el cálculo de su centroide de aplicación se detalla en la sección 3.4 de este mismo capítulo.

3.2 Fuerza de Arrastre.

3.2.1 Número de Reynolds y Coeficiente de Arrastre.

Tabla 3.6 Resultados N° Reynolds para flujo de corriente sobre el conjunto AA. Cálculos sobre la geometría cilíndrica del alma y sobre el prisma de base cuadrada que representa al ánodo.

Reynolds	Reynolds
Geometría Cuadrada	Geometría Circular
7.20E+04	3.58E+04
7.20E+04	3.58E+04
6.26E+04	3.58E+04
5.64E+04	3.58E+04
6.26E+04	2.78E+04
5.32E+04	2.78E+04

Tabla 3.7 Resultados N° Reynolds para flujo de contracorriente sobre el conjunto AA. Cálculos sobre la geometría cilíndrica del alma y sobre el prisma de base cuadrada que representa al ánodo.

Reynolds	Reynolds
Geometría Cuadrada	Geometría Circular
6.99E+04	3.47E+04
6.99E+04	3.47E+04
6.08E+04	3.47E+04
5.47E+04	3.47E+04
6.08E+04	2.70E+04
5.17E+04	2.70E+04

El número Reynolds para el flujo de las corrientes marinas sobre el conjunto AA es laminar, puesto que no super la cantidad de 5×10^5 , tanto para las velocidades de corriente como contracorriente. Por esta razón, los coeficientes de arrastre se especifican para estas condiciones, como se observa en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Selección de coeficientes de arrastre para Flujo y Contraflujo para las geometrías del conjunto AA.

Coeficiente de arrastre		
Flujo	Cuadrado	Circular
Corriente	2.2	1.2
Contra corriente	2.2	1.2

3.2.2 Áreas de incidencia lateral.

Tabla 3.9 Resultados del área lateral del ánodo y área de la proyección lateral del alma del ánodo.

Tipo de ánodo	Diámetro	Ánodo (Sección Lateral)	Alma (Sección Lateral)
	[m]	[m ²]	[m ²]
1	4"	0.7705	0.1184
2		0.7705	0.1184
3		0.6700	0.1184
4		0.6030	0.1184
5	3"	0.6700	0.0943
6		0.5695	0.0943

El área de la sección lateral del alma tuvo variaciones, puesto que, las dimensiones de altura de la base cuadrada de éste dependen del tipo de ánodo. Mientras que, el alma del ánodo solo se divide en dos grupos, por eso solo se presentaron dos variaciones de área.

Los ánodos que tuvieron más sección expuesta a la corriente de arrastre lateral tienen son el ánodo tipo 1 y tipo 2. Al presentar iguales dimensiones de área, se escogió el ánodo tipo 1 para los cálculos de fuerza de arrastre crítica y posterior dimensión del cordón de soldadura.

3.2.3 Área de incidencia frontal.

Tabla 3.10 Resultados del área frontal del ánodo y área de la proyección frontal del alma del ánodo.

Tipo de ánodo	Diámetro	Ánodo (Sección Frontal)	Alma (Sección Frontal)
	[m]	[m ²]	[m ²]
1	4"	0.7705	0.0354
2		0.7035	0.0354
3		0.7370	0.0354
4		0.6700	0.0354
5	3"	0.6700	0.0276
6		0.5025	0.0276

El ánodo tipo 1 tuvo mayor área frontal expuesta a la fuerza de arrastre por corriente y contracorriente. Este ánodo fue el modelo crítico sobre el cual se realizaron los cálculos para el diseño del cordón de soldadura.

3.2.4 Arrastre lateral.

Tabla 3.11 Resultados de fuerza de arrastre lateral sobre conjunto AA para las condiciones de corriente.

Tipo de ánodo	Fuerza de arrastre sobre:		Fuerza de Arrastre Lateral sobre el conjunto AA
	Sección lateral del Ánodo	Sección lateral del Alma	
	[N]	[N]	[N]
1	85.00	7.46	92.46
2	85.00	7.46	92.46
3	73.91	7.46	81.37
4	66.52	7.46	73.98
5	73.91	5.95	79.86
6	62.82	5.95	68.77

Tabla 3.12 Resultados de fuerza de arrastre lateral sobre conjunto AA para las condiciones de contracorriente.

Tipo de ánodo	Fuerza de arrastre sobre:		Fuerza de Arrastre Lateral sobre el conjunto AA
	Sección lateral del Ánodo	Sección lateral del Alma	
	[N]	[N]	[N]
1	79.77	7.00	86.77
2	79.77	7.00	86.77
3	69.36	7.00	76.37
4	62.43	7.00	69.43
5	69.36	5.58	74.94
6	58.96	5.58	64.54

3.2.5 Arrastre frontal.

Tabla 3.13 Resultados de fuerza de arrastre frontal sobre conjunto AA para las condiciones de corriente.

Tipo de ánodo	Fuerza de arrastre sobre:		Fuerza de Arrastre Frontal sobre el conjunto AA
	Sección frontal del Ánodo	Sección frontal del Alma	
	[N]	[N]	[N]
1	85.00	2.23	87.23
2	77.61	2.23	79.84
3	81.30	2.23	83.54
4	73.91	2.23	76.15
5	73.91	1.74	75.65
6	55.43	1.74	57.17

Tabla 3.14 Resultados de fuerza de arrastre frontal sobre conjunto AA para las condiciones de contracorriente.

Tipo de ánodo	Fuerza de arrastre sobre:		Fuerza de Arrastre Frontal sobre el conjunto AA
	Sección frontal del Ánodo	Sección frontal del Alma	
	[N]	[N]	[N]
1	79.77	2.10	81.86
2	72.83	2.10	74.93
3	76.30	2.10	78.40
4	69.36	2.10	71.46
5	69.36	1.63	70.99
6	52.02	1.63	53.65

Según la Tabla 3.11 y la Tabla 3.13, el subrayado celeste indica que el ánodo tipo 1 fue el sistema sometido a mayor cantidad de fuerza de arrastre lateral y frontal. La fuerza de corriente se suma con la fuerza de contracorriente para poder realizar los cálculos de fatiga.

3.3 Peso de los ánodos.

Tabla 3.15 Peso del conjunto AA para cada tipo de ánodo.

Tipo de ánodo	Masa del conjunto	Peso del conjunto
	[kg]	[N]
1	410.00	4022.10
2	375.00	3678.75
3	333.00	3266.73
4	295.00	2893.95
5	261.00	2560.41
6	203.00	1991.43

El ánodo tipo 1 fue el ánodo con mayor peso según la Tabla 3.15. Este peso se reparte directamente sobre los dos apoyos especificados en la sección 2.4.3.

Por lo cual, sobre estas tres condiciones críticas de fuerza hidrostática, fuerza de arrastre y peso, se dimensionó el cordón de soldadura en la junta.

3.4 Centroides.

El cálculo de centroides implica una parte muy importante en el análisis de los resultados, puesto que, la magnitud las reacciones que se generan en la junta soldada dependen de la aplicación de las tres fuerzas principales sobre estos. De esta manera, la dimensión del cordón de soldadura dependió directamente de las condiciones críticas de fuerza aplicadas sobre estos centroides.

Tabla 3.16 Resultados del esquema de cálculo para la coordenada en x del centroide C_L para las fuerzas de arrastre laterales.

Numero de Área	Área	Área * \bar{x}
	[m ²]	[m ³]
A1 y A5	5.45E-02	2.29E-02
A2 y A4	4.65E-03	3.91E-03
A3	7.71E-01	3.24E-01
TOTAL	8.89E-01	3.50E-01

Debido a que la geometría del conjunto AA es simétrica respecto a todos sus ejes centrales, la coordenada en y para el centroide C_L es conocida. Esta distancia en y es la mitad de la distancia L_{bb} existente entre los apoyos del ánodo. La coordenada en x para el centroide C_L se detalla en la Tabla 3.16. Las coordenadas completas del centroide C_L se detallan en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17 Centroide C_L para la aplicación de fuerzas laterales sobre el conjunto AA.

Centroide C_L	
Coordenada en \bar{x} .	Coordenada en \bar{y} .
[m]	[m]
0.39	-1.83

Para la aplicación de la fuerza hidrostática se consideró el centroide C_s que se define en las coordenadas xz. La coordenada en z de este centroide se conoce debido a la simetría existente del cuerpo respecto al eje x.

Tabla 3.18 Resultados del esquema de cálculo para la coordenada en x del centroide C_s para la fuerza hidrostática.

Numero de Área	Área [m ²]	Área * \bar{x} [m ³]
Área 1	5.45E-02	1.15E-02
Área 2	4.26E-02	1.79E-02
TOTAL	9.72E-02	2.94E-02

Por lo cual, la coordenada en z para el centroide C_s se establece en el origen, mientras que la coordenada en x quedó definida en según la Tabla 3.18. Las coordenadas completas del centroide C_s se detallan en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19 Centroide C_s para la aplicación de fuerzas superiores sobre el conjunto AA.

Centroide C_s	
Coordenada en \bar{x} . [m]	Coordenada en \bar{z} . [m]
0.30	0.00

La coordenada yz para el centroide C_F en la aplicación de fuerzas frontales es también conocida por la simetría del conjunto AA. La coordenada en z quedó establecida en el origen, mientras que la coordenada en y fue la distancia L_{bb} existente entre los apoyos del ánodo dividida para dos. Las coordenadas completas del centroide C_F se detallan en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20 Centroide C_F para la aplicación de fuerzas frontales sobre el conjunto AA.

Centroide C_F	
Coordenada en \bar{y} . [m]	Coordenada en \bar{z} . [m]
-1.83	0.00

La distancia en x de los centroides C_L y C_S afecta directamente al momento que se ejerce en los apoyos, sin embargo, no afecta en la cantidad de carga que se distribuye sobre estos.

Es decir, al ser simétrica la geométrica del conjunto AA respecto a todos sus ejes, la cantidad de carga se distribuye de igual manera para los dos apoyos. La misma situación ocurre para el centroide C_F , el cual también reparte su fuerza de igual manera para ambos apoyos.

Por esta razón, utilizar uno de los dos apoyos del ánodo basta para dimensionar de manera correcta y conservadora el cordón de soldadura de la junta.

3.5 Fuerzas resultantes y reacciones en los apoyos.

Una vez que quedó establecido el ánodo tipo 1 como el conjunto sometido a fuerzas de mayor magnitud respecto a los otros tipos, se escogió un punto de apoyo de entre los dos apoyos de este ánodo, especificados en la sección 2.4.3, para el análisis.

También, con base en el análisis realizado en la sección 3.4, se escogió el apoyo superior como punto de ejemplo para dimensionar el cordón de la soldadura de la junta, considerando que cualquiera de los dos apoyos podría dar el mismo dimensionamiento de cordón de soldadura.

Tabla 3.21 Resultados de las reacciones sobre un brazo del conjunto AA para el caso crítico: Segunda fila, ánodo tipo 1.

Fuerzas			Momentos		
Px	Vy	Vz	Mx (T)	My	Mz
[N]	[N]	[N]	[N.m]	[N.m]	[N.m]
84.55	9113.93	89.62	164.00	35.33	3093.63

Los resultados de las reacciones sobre la junta superior se muestran en la Tabla 3.21, para el ánodo más afectado de acuerdo con la sección 3.3. Cabe mencionar que, debido a la fatiga realizada por las corrientes marinas, la fuerza lateral V_z y la fuerza axial P_x se sumaron, cada una, en flujo y contraflujo (White, 2003), como se especifica en la sección 2.7.3.

Esta situación se dio, puesto que, la variación de la aplicación de la fuerza en flujo y contraflujo sobre el conjunto AA es la que produce fatiga. Ya que, cada fuerza sobre el conjunto AA se reparte por igual los dos apoyos, y ya que, esta repartición de fuerzas es equivalente entre sí, las reacciones en los puntos de apoyo serán las fuerzas totales sobre el cuerpo divididas para dos, como también se explicó en la sección 2.7.3.

Por esta razón, la fuerza P_x es la fuerza axial total de corriente y contracorriente dividida para dos; la fuerza V_z es la fuerza lateral total de corriente y contracorriente dividida para dos y; la fuerza V_y es la fuerza hidrostática y peso dividida para dos. Estas reacciones ejercen los momentos sobre la junta soldada, y con estas reacciones y momentos se dimensiona el cordón de soldadura del alma a la placa, y de la placa al pilote metálico.

3.6 Análisis de la afectación de la instalación en el proceso de diseño de la placa.

En esta sección se analizó cuánto afectó la forma de instalación del sistema de protección catódica en el diseño de la placa curva y las dimensiones del cordón de soldadura.

3.6.1 Análisis de topes.

Los topes y los punteos no afectan a la dimensión de la placa curva. Éstos no requirieron especificación alguna para la dimensión de la placa. Sin embargo, sí orientan al uso de un cuadrilátero con superficies planas como una placa para facilitar el soporte de ésta. Los punteos no modifican la dimensión del cordón puesto que se realizan dentro del espacio planificado para ser soldado.

3.6.2 Uso de eslingas.

Las eslingas fueron consideradas como la mejor alternativa no dañina para la superficie del alma del ánodo, también porque no requiere accesorios adicionales planificados dentro del diseño de la placa curva y la soldadura. Es decir, se descartan alternativas como soldar al alma del ánodo una oreja para el izaje; se descarta el uso de cadenas que raspen la superficie del alma; se descarta el uso de plataformas de carga para colocar el conjunto AAP, porque son soluciones más costosas y complicadas de lograr.

3.6.3 Uso de bolsas de elevación.

Las bolsas de elevación no requieren que se modifique la estructura del sistema de sujeción de los ánodos galvánicos, puesto que también están diseñadas con eslingas de nylon para sujetarse a la carga. Además, permiten la sujeción de la carga en dos puntos, lo cual permite manipular de mejor manera al conjunto AAP dentro del agua.

3.6.4 Análisis de la orientación.

Las corrientes del mar ocurren de manera paralela a la orilla del mar. Aquí se analizaron dos situaciones: primero, cómo afectarían los elementos dentro de las corrientes a la estructura, y; segundo, como afectaría la corriente en la generación de momento sobre los apoyos de la estructura. Según el estudio Morken el número máximo de ánodos instalados por fila en un pilote es de tres ánodos. También se indica que la separación mínima entre ánodos alrededor del pilote debe ser de 60°.

La consideración de estos dos parámetros llevó a definir la posición de los ánodos como se especifica en la Figura 2.43. En donde, al menos un ánodo, debe ser instalado estratégicamente con respecto a la dirección de la corriente para eliminar en lo posible el momento de flexión sobre éstos.

También, llevando a que, se disminuya el momento de flexión que produciría el impacto de algún elemento encontrado en la corriente marina.

3.6.5 Análisis de la metodología de descenso y fijación.

El proceso para llevar la carga desde la barcaza hasta el agua, y el cambio de sujeción entre las eslingas de la grúa y las eslingas de la bolsa de elevación no representó mayor modificación de la estructura del conjunto AAP. De esta manera, se determinó que las dimensiones de la placa de soporte de los ánodos galvánicos puedan ser de las menores medidas posibles, considerando los esfuerzos realizados en la junta y el factor de seguridad preestablecido en la sección 0, de diseño preliminar.

También se determinó que, no es necesario añadir orejas para el izaje de la carga o refuerzos en el alma del ánodo, puesto que, se podía trabajar tranquilamente con eslingas sin comprometer el diseño de la placa curva y la junta soldada.

3.7 Dimensión del cordón de soldadura.

Los resultados de soldadura para ambas conexiones PP y PA se basaron en las secciones 2.8.4 y 2.8.5 respectivamente.

3.7.1 Cordón de soldadura circular (Junta AP).

Tabla 3.22 Resultados de los factores geométricos para el cálculo de esfuerzos en soldadura en el alma del ánodo.

Factores geométricos	Valores [m, m ² , m ³]
Aw	0.359
Sw	0.010
Jw	0.001

Tabla 3.23 Valores de factores de carga por unidad de longitud para el cálculo del cordón de soldadura en el alma del ánodo.

Esfuerzos normalizados	Punto A	Punto B
<i>fs</i>	25381.06	249.57
<i>fb</i>	301498.89	3207.68
<i>ft</i>	7991.45	7991.45
<i>fv</i>	235.46	235.46
FR	302905.39	8705.22

El punto A presenta el mayor esfuerzo resultante según la Tabla 3.23, por lo tanto, el análisis se realizó para dicho punto, y los resultados se muestran en la Tabla 3.24.

Tabla 3.24 Esfuerzo permisible y factores de seguridad para la soldadura y el material base para tres opciones de garganta (American Welding Society, 2015).

Garganta (w)	Pie (t)	Esfuerzo permisible	Factores de seguridad		Espesor de placa
			Soldadura tipo FT	Soldadura tipo E	
[mm]	[m]	[Pa]			[mm]
3	0.00212	1.428E+08	0.175	0.140	$x < 6$
5	0.00354	8.567E+07	0.292	0.233	$6 < x < 12$
6	0.00424	7.140E+07	0.350	0.280	$12 < x < 20$

Los valores de factores de seguridad para fatiga no fueron satisfactorios según los criterios de la Tabla 2.14, por lo tanto, se determinó aumentar el cordón de soldadura mediante la inclusión de rigidizadores. El rediseño se obtuvo según la sección 2.8.6 del diseño detallado y sus resultados en la sección 3.7.2.

3.7.2 Rigidizadores (Rediseño)

Los rigidizadores fueron diseñados según la sección 2.8.6 del diseño detallado. Los valores para sus factores geométricos se detallan en la Tabla 3.22, factores de carga del cordón de soldadura en la Tabla 3.26.

Tabla 3.25 Resultados de los factores geométricos para el cálculo de esfuerzos en soldadura en el alma del ánodo con rigidizadores.

Factores geométricos	Valores [m, m ² , m ³]	Factores geométricos
Aw	0.519	Aw
Sw	0.191	Sw
Jw	0.002	Jw

Tabla 3.26 Valores de factores de carga por unidad de longitud para el cálculo del cordón de soldadura en el alma del ánodo con rigidizadores.

Esfuerzos normalizados	Punto A	Punto B
<i>fs</i>	17557.72	172.64
<i>fb</i>	16047.84	22.25
<i>ft</i>	4377.33	4377.33
<i>fv</i>	162.88	162.88
FR	24294.49	4384.64

Tabla 3.27 Conjunto con rigidizadores para tres opciones de garganta: Esfuerzo permisible y factores de seguridad para la soldadura y el material base (American Welding Society, 2015).

Garganta (w)	Pie (t)	Esfuerzo permisible	Factores de seguridad		Espesor de placa
			Soldadura para FT	Soldadura para E	
[mm]	[m]	[Pa]			[mm]
3	0.00212	1.145E+07	2.18	1.75	$x < 6$
5	0.00354	6.872E+06	3.64	2.91	$6 < x < 12$
6	0.00424	5.726E+06	4.37	3.49	$12 < x < 20$

Los valores del factor de seguridad para el tubo como la soldadura PJP en ranura fueron aceptables según los parámetros de diseño para la Tabla 2.15 en la sección de diseño detallado.

No fue necesario analizar la placa de los rigidizadores pues entra en la categoría C, porque el esfuerzo permisible es aún mayor y no fallará. Por lo tanto, las medidas de los rigidizadores y sus cordones de soldadura se encuentran dentro de las limitaciones de la norma AWS D1.1M/D1.1.

3.7.3 Análisis en conexión tubular (Junta AP).

Para un tubo hueco como se muestra Figura 2.38 se encontraron los factores en la (tabla) según se especificó en la sección 2.8.8 del Diseño Detallado. El valor de Q_f se seleccionó de acuerdo con la Figura 4.6

Tabla 3.28 Factores para análisis de conexión tubular.

Factores	Valor
F_y	248 [Mpa]
D_b	0.1143 [m]
β	0.2
t	0.602
γ	9.49
Q_f	1

A partir de los factores de la Tabla 3.28 se calculó los esfuerzos para soldadura como línea y tubo con los factores geométricos en la Tabla 3.26. Los resultados en la Tabla 3.29 con el factor de seguridad especificado en la sección 0 del Diseño Preliminar.

Tabla 3.29 Resultados para resistencia disponible en conexión en T.

Sitio	Tipo	Esfuerzo [Mpa]	Factor de seguridad Ω	Esfuerzo soldadura [Mpa/m]
Cordón	M_{n-ip} (Dentro del plano)	84.85	1.67	444.24
Tubo	M_{n-op} (ambos planos)	0.06	1.58	0.31
Cordón	M_{n-ip} (fuera del plano)	0.09	1.58	0.47

Además, se certificó que los valores no sobrepasaron el rango establecido de la Figura 4.5 usando los esfuerzos de la Tabla 3.26. Los valores estuvieron por debajo del 0.1 gracias a la inclusión de los rigidizadores.

3.7.4 Cordón de soldadura de la placa (Junta RAP).

El cordón para la soldadura subacuática fue propuesto para dos posibles configuraciones en los ítems 3.7.4.1 y 3.7.4.2. De esta forma se seleccionó el más viable. Los tipos de configuraciones se detallan en la sección 2.8.4.

3.7.4.1 Completa.

Los resultados de los factores geométricos para soldadura completa en una placa de 20x20 se detallan en la Tabla 3.30

Tabla 3.30 Resultados de los factores geométricos para el cálculo de esfuerzos en soldadura completa en la placa.

Factores geométricos	Valores [m, m ² , m ³]
Aw	0.80
Sw	0.05
Jw	0.01

Tabla 3.31 Valores de factores de carga por unidad de longitud para el cálculo del cordón de soldadura completa en la placa.

Esfuerzos normalizados	Punto A	Punto B
<i>fs</i>	11392.42	112.02
<i>fb</i>	57899.84	556.74
<i>ft</i>	1405.87	1405.87
<i>fv</i>	105.69	105.69
FR	59130.40	1558.15

El punto A representa el punto crítico por tener mayor esfuerzo resultante, 38 veces más que el punto B según la

Tabla 3.31. No fue necesario analizar el punto B las siguientes configuraciones para la placa. Por lo tanto, el análisis se realizó para dicho punto A en la Tabla 3.32.

Tabla 3.32 Resultados de factores de carga por unidad de longitud para el cálculo del cordón de soldadura completa en la placa.

Garganta (w)	Pie (t)	Esfuerzo permisible	Factor de seguridad		Espesor de placa
[mm]	[m]	[Pa]	Soldadura para F	Soldadura para C	[mm]
3	0.00212	2.787E+07	1.973	2.475	$x < 6$
5	0.00354	1.672E+07	3.289	4.126	$6 < x < 12$
6	0.00424	1.394E+07	3.946	4.951	$12 < x < 20$

Los valores del factor de seguridad para la soldadura de soldadura fueron aceptables según los parámetros de diseño para la Tabla 2.14 en la sección de diseño detallado. Por lo tanto, las medidas de los sus cordones de soldadura y el esfuerzo sobre la placa base por conexión tipo C se encuentran dentro de las limitaciones de la norma AWS D1.1M/D1.1.

3.7.4.2 Tipo C.

Los resultados de los factores geométricos para soldadura tipo C en una placa de 20x25 según Figura 2.33 se detallan en la Tabla 3.33.

Tabla 3.33 Resultados de los factores geométricos para el cálculo de esfuerzos en soldadura tipo C en la placa.

Factores geométricos	Valores [m, m ² , m ³]
Aw	0.65
Sw superior	0.05

Sw inferior	0.02
Jw	0.01

El Sw que se seleccionó fue el menor, por su comprometido módulo de sección ante un momento ocasionado por fuerzas externa. Los factores de carga para flexión toman el Sw inferior y los resultados se detallan en la Tabla 3.34.

Tabla 3.34 Resultados de factores de carga por unidad de longitud para el cálculo del cordón de soldadura tipo C en la placa.

Esfuerzos normalizados	Punto A	Punto B
<i>fs</i>	14021.44	137.87
<i>fb</i>	66161.95	626.99
<i>ft</i>	451.89	451.89
<i>fv</i>	130.07	130.07
FR	67760.15	892.38

El punto A representa el punto crítico por tener mayor esfuerzo como fue previsto en el análisis de la tabla 3.21.

Tabla 3.35 Resultados de factores de carga por unidad de longitud para el cálculo del cordón de soldadura tipo C en la placa.

Garganta (w)	Pie (t)	Esfuerzo permisible	Factores de seguridad		Espesor de placa
[mm]	[m]	[Pa]	Soldadura para F	Soldadura para C	[mm]
3	0.00212	3.194E+07	1.722	2.160	$x < 6$
5	0.00354	1.917E+07	2.870	3.600	$6 < x < 12$
6	0.00424	1.597E+07	3.444	4.320	$12 < x < 20$

Los valores del factor de seguridad para la soldadura de soldadura fueron aceptables. Por lo tanto, las medidas de los sus cordones de soldadura y el esfuerzo sobre la placa base por conexión tipo C se encuentran dentro de las limitaciones de la norma AWS D1.1M/D1.1.

3.8 Modelado y simulación.

Se utilizó Inventor para la simulación en la estructura completa. Se utilizó una placa empotrada para simular una conexión por soldadura y verificó los esfuerzos principales y factor de seguridad.

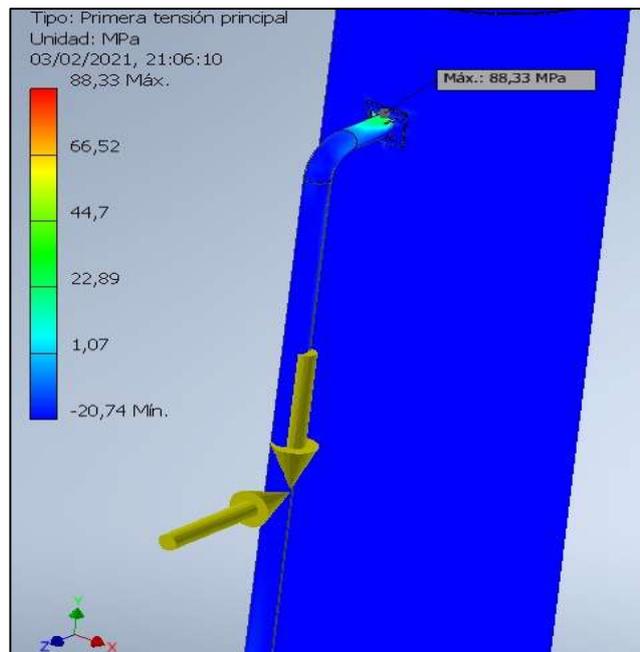


Figura 3.1 Cargas, sistema de referencia y punto de análisis

3.8.1 Reacciones.

	Fuerza de reacción	Pares de reacción
Total	9348 N	3,37e+06 N mm
X	0 N	-3,37e+06 N mm
Y	9342 N	0 N mm
Z	332 N	0 N mm

Figura 3.2 Resultados de reacciones.

Se comparó con los valores de la Tabla 3.21 resultando un error máximo de 6.5% para la fuerza de reacción. El error no es considerable y las razones fueron la línea de acción de fuerza. Se usó un método para

encontrar el centroide, pero no se determinó el punto de acción de la fuerza puesto que no estaría alejado debido a la simetría del ánodo. Sin embargo, se comprobó los esfuerzos por ser los principales autores de alguna falla en las conexiones.

3.8.2 Soldadura Completa junta PP.

Se busco el punto más afectado de la placa para relacionarlo con el teórico una vez ya escogido la garganta. El valor máximo aproximado se visualiza en la Figura 3.3.

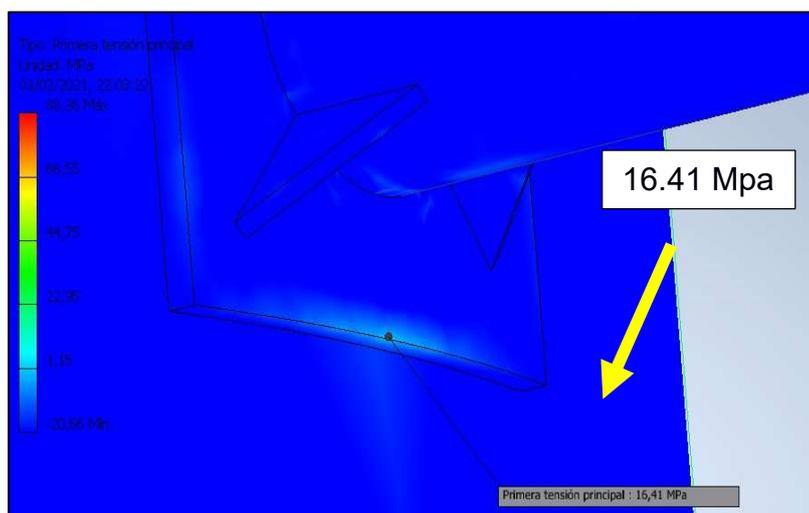


Figura 3.3 Esfuerzo en soldadura para tipo completa

El valor de 16.41 [MPa] se comparó con el esfuerzo determinante soportada por la garganta de 5mm ya seleccionada en la Tabla 3.32. El valor teórico fue de 16.72 [MPa], siendo válido por su cercanía al ubicado en el punto de la Figura 3.3. Es aceptable la configuración tipo completa.

3.8.3 Soldadura Tipo C junta PP.

De igual forma que en la soldadura completa se tomó el punto más afectado. El valor de 19.9 [MPa] se comparó con el esfuerzo determinante soportada por la garganta de 5mm ya seleccionada en la Figura 3.4.

El valor teórico fue de 19.17 [MPa], siendo el error menor al 5%. Además, el previsto para la selección de la garganta fue menor, por lo tanto, es aceptable la configuración en C.

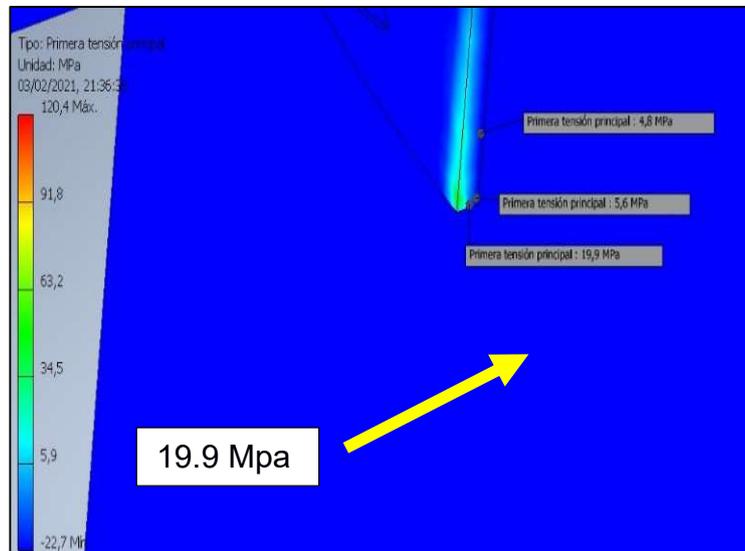


Figura 3.4 Esfuerzo en soldadura para tipo completa

3.8.4 Soldadura en alma con rigidizadores para la junta AP

Se verificó el aporte de los rigidizadores al alma del ánodo según el factor de seguridad y esfuerzo sobre el alma.

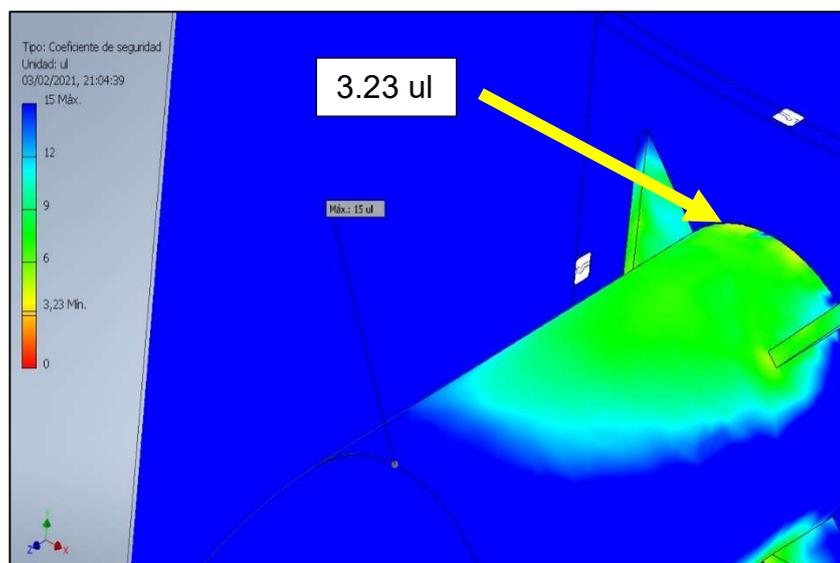


Figura 3.5 factor de seguridad en la soldadura.

El resultado de la simulación fue 3.23, siendo un valor menor pero aceptable debido a que sobrepasa los 2.65 según lo establecido en la Tabla 2.15 del diseño Preliminar.

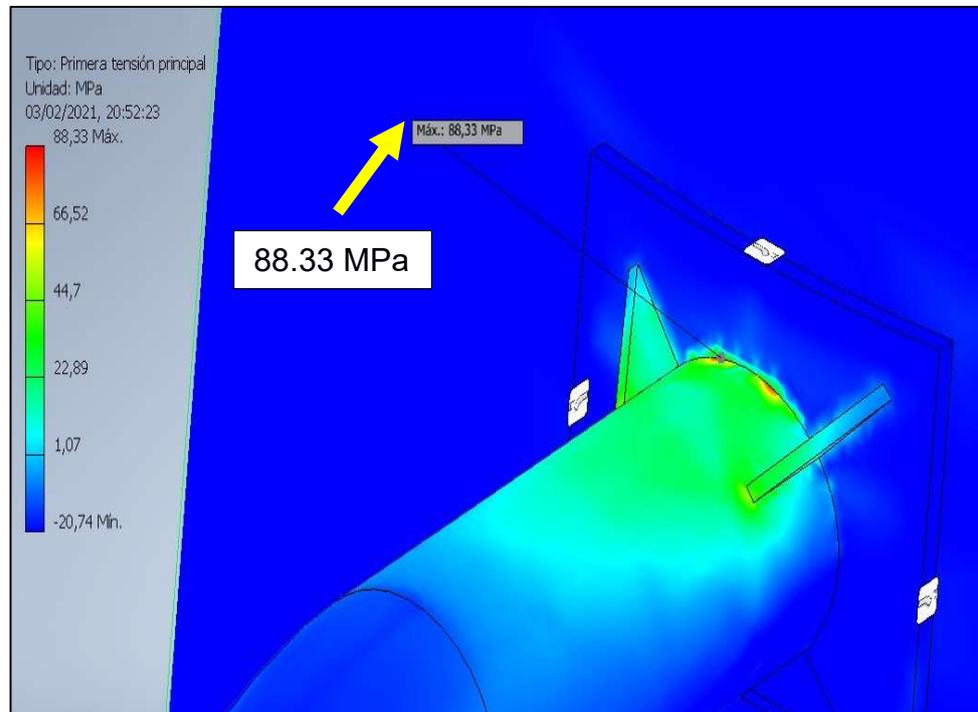


Figura 3.6 Esfuerzo sobre la conexión

El valor fue 88.33 [Mpa] y se comparó con el valor del esfuerzo admisible detallado en la Tabla 3.29. El valor teórico es 88.85 [MPa] y se obtuvo un error 0.59% de error. Por lo tanto, el diseño de la junta es aceptable incluyendo los rigidizadores.

3.9 Resumen de resultados PP.

Tabla 3.36 Resumen de conjunto PP.

Detalle de instalación		
Item	Junta PP	Junta AP
Norma WPS	AWS D3.6M	AWS D1.1/D1.1M
Material base	A588	A36 - A131

Elemento por soldar	A36 - A131	
Mínimo espesor	10 [mm]	3"-4" cédula 80
Soldadura	SMAW - Filet	SMAW – PJP Ranura
Norma electrodo	A5.1 Carbon Steel	
Electrodo	E7014	E7018
Marca	Hydroweld FS	INDURA
Dimensiones Tipo C		
Placa	25 x 20 [cm]	2 x pilote
Rigidizadores	4 [cm] a 45°	4 x placa

3.10 Análisis de Costos.

Tabla 3.37 Cantidad de soldadura por placa.

Tipo C placa w=5mm			
Ítem	Horizontal [cm]	Vertical [cm]	Total [cm]
cordón	40	25	65

Tabla 3.38 Aproximación de precio en trabajo anterior. Fuente: Jupesa.

Trabajo anterior buzo		
Cordón [cm]	w [mm]	Precio
60	4	\$1,500.00

Tabla 3.39 Precio aproximado de materiales en soldadura subacuática.

Precio por pilote		Total x pilote	Precio ítem obra		Total soldadura
palillos	soldadura		palillos	palillos	
\$102.86	\$3,200.00	\$3,302.86	\$13,886.25	\$432,000.00	\$445,886.25

La bolsa de elevación profesional. \$502.32, una por pilote. Las fajas para ayudar a fijar el ánodo son 3 debido a su longitud, consulta: buzo-Jupesa. Se tomo como criterio de instalación que los elementos solo prevalecerán de 2 a 3 instalaciones máxima, para cotización aproximada en escenarios comprometidos. Los valores pronosticados de estos elementos se detallan en la Tabla 3.40.

Tabla 3.40 Estimación de cotización en elementos para instalación.

Precio por pilote		Total por pilote	Precio ítem obra		Total
Fajas (3)	bolsa		Fajas	bolsa	
\$75.00	\$502.32	\$577.32	\$5,250.00	\$35,162.40	\$40,412.40

3.11 Tiempo de duración del proyecto.

Según la tabla de buceo, un buzo puede tener varias inmersiones con lapsos de descompresión y salida a la superficie (Aire, 2003). Para estimar la duración del proyecto se hicieron estimaciones empíricas sobre los procesos de soldadura, con base en la entrevista a soldador subacuático (Castillo, 2021). En esta entrevista se realizaron las siguientes estimaciones para las condiciones establecidas.

- Un electrodo se consume en un promedio de 2 minutos.
- Un electrodo suelda aproximadamente 15cm.

Tabla 3.41 Tiempo estimado de cordón de soldadura por conjunto de protección catódica.

Alternativas	cm/min	cm	min	horas
1	7.50	130.00	17.33	0.29
2		260.00	34.67	0.58
3		390.00	52.00	0.87

En la segunda columna se coloca la velocidad de 7.5 cm/min, obtenida de la relación de 15cm cada 2 minutos. Para la longitud total de cordón de soldadura en la placa curva planificado para este proyecto.

Por otra parte, según la tabla para la planificación de buceo (Aire, 2003), para una profundidad de 18 metros aproximados (profundidad máxima del último punto de soldadura en el sistema de protección catódica), cualquier inmersión que supere los 48 minutos, debe tener una parada obligatoria.

Además, por consejo del soldador Castillo (ex militar) no es recomendable; puesto que, un podría acumular demasiado hidrogeno en proyectos de larga duración. Por esta razón, un buzo debe tener una sola inmersión por día, en la cual realice la mayor cantidad de trabajo posible.

Tabla 3.42 Duración del proceso de soldadura para la instalación del sistema de protección catódica en los pilotes del muelle portuario.

Pilotes	Pilotes/día	Días	Meses
398	2	199	9.05

Se escoge la alternativa 2 de la Tabla 3.41, que implica la soldadura de dos conjuntos de protección catódica, sin varias paradas de recuperación o descompresión. Por otra parte, el total de pilotes sobre los cuales se planificó la protección catódica es de 398, según (Del & Protecci, 2017). Si se suelda dos conjuntos de protección catódica por día, se obtiene un total de 199 días de trabajo. Si se consideran 22 días laborables por mes, el trabajo tendría una duración de 9 meses aproximadamente, según Tabla 3.42.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones.

- Este proyecto de grado tuvo como objetivo principal diseñar un sistema de sujeción mecánica para los ánodos galvánicos del sistema de protección catódica planificado para los pilotes metálicos de un muelle portuario en particular. Situación que implicaba, no solo idear el modo de sostener dichos ánodos en los pilotes, sino también, que dicha solución sea fácil de instalar. Por esta razón, el sistema de sujeción mecánica para la fijación de los ánodos galvánicos de la protección catódica fue logrado mediante una junta de piezas soldadas bajo normas AISC360, AWS D1.1/D1.1M.
- Para lograr este trabajo, se recogieron primero los requerimientos del cliente para conceptualizar la sujeción mecánica de los ánodos galvánicos por medio del uso de árbol de objetivos, árbol de funciones, tablas morfológicas y objetivos ponderados, entre otros. Este proceso de conceptualización convergió su proceso en la matriz de evaluación numérica, en donde también se determinó la junta soldada por medio de una placa curva como el modelo ideal para la sujeción de los ánodos galvánicos de la protección catódica planificada.
- Las fuerzas que intervienen sobre el conjunto ‘alma-ánodo’, y las reacciones que éstas producen sobre los apoyos en el pilote, fueron calculadas para encontrar los esfuerzos permisibles de la junta soldada; esfuerzos que, a su vez, permitieron diseñar la garganta del cordón de la soldadura. Estos resultados que fueron validados por medio de los factores de seguridad establecidos en la norma AISC 360, y establecidos acordes a la norma AWS D1.1
- Se propuso una metodología para la instalación del conjunto a soldar basada en los procesos más utilizados en la industria de maniobras

marinas; para así, asegurar que el diseño de la placa curva de la junta soldada no presentara inconvenientes al momento de la instalación, y que tampoco requiriera de accesorios adicionales para ser instalado. Situación que permitió garantizar una instalación de bajo costo y menor tiempo de desarrollo.

- La fortaleza de este proyecto de grado consiste en el ejercicio real de todo el proceso de diseño involucrado en la práctica de la ingeniería. Puesto que, se ejercitó desde los cálculos de cargas y esfuerzos, validado con los factores de seguridad de la norma AISC 360, y el desarrollo de los parámetros de la soldadura con AWS D1.1, hasta el desarrollo de las especificaciones del proceso de la soldadura (WPS). Sin embargo, hizo falta trabajo de campo para refinar este proyecto; puesto que, muchos proyectos de diseño se refinan en el proceso de prueba y error que, para esta ocasión, quedó aún en espera.
- Los resultados de los cálculos de cargas, dimensiones del cordón de soldadura, configuraciones de cordón, y simulaciones, significan que el diseño de soporte de los ánodos galvánicos para la instalación de la protección catódica planificada para el muelle portuario en cuestión es efectivo. Puesto que, cumple con los requerimientos del cliente establecidos durante el diseño conceptual, cumple con los factores de seguridad del diseño especificados en la norma AISC 360, cumple con los parámetros de soldadura establecidos en la AWS D1.1 y, sobre todo, asegura un proceso de instalación sencillo y rápido, como se planificó desde el inicio.
- Este trabajo de grado se hace relevante frente a otras alternativas de diseño, puesto que, soluciona un problema de importancia económica grande en el contexto del movimiento económico que representa un muelle de las características descritas en el Capítulo 1. También, representa el ejercicio de la ingeniería de manera honesta e íntegra, al proponer un diseño de soporte y una metodología de instalación accesible a la realidad nacional.

4.2 Recomendaciones.

- Sobre el tipo de junta realizado, se recomienda trabajar siempre con uniones soldadas analizadas por fatiga para las estructuras construidas o instaladas en medios marinos. Porque, al ser una instalación en un medio donde, no solo existe fauna y flora, sino también vidas humanas, existe la posibilidad de alcanzar afectaciones irreparables sobre éstas. Por esta razón se debe procurar asegurar, lo mejor posible, la vida y la fauna del sector de posibles desprendimientos de la estructura.
- Se recomienda hacer un análisis de los puntos de corte que deberían realizarse en el alma de los ánodos, pasados los 20 años de vida útil de éstos. Puesto que, este sistema de sujeción fue pensado priorizando la firmeza de la instalación, la durabilidad, y la poca afectación que debe recibir frente a los embates de las corrientes marinas dentro del agua. Sin embargo, el muelle portuario está considerado para un periodo más extenso de servicio.

BIBLIOGRAFÍA

- Aire, B. C. O. N. (2003). *Tablas para buceo con aire*. 1–36.
- Alkhouri Issa, D., & Da Costa Arnald, P. (2018). *Parametrización de instalación de tuberías submarinas desde una embarcación de ensamblaje y tendido mediante la configuración de tendido en s*. 6–32.
- American Welding Society. (2015). *AWS D1.1/D1.1M:2015 An American National Standard Structural Welding Code — Steel*.
- American Welding Society. (2017). *Underwater Welding Code D3.6M:2017*.
- Aquantica proyectos marinos. (2020). *aquantica.com.mx*. 2020.
- Asociación Latinoamericana del Acero. (2016). Especificación para Construcciones de Acero. *American Institute of Steel Construction*, 3–308.
- Blue Logic. (2016). 8992. <https://e-sea.bluelogic.no/main.aspx?page=article&artno=BA8992>
- Continental, A. (2020a). *Eslingas de Nylon*. <http://www.agcontinental.com/eslingas-de-nylon/>
- Continental, A. (2020b). *Eslingas de Nylon*.
- Del, D., & Protecci, S. D. E. (2017). *TERMINAL MARÍTIMO MONTEVERDE. Estación MONTEVERDE - Pleamar y bajamar*. (2021). https://www.inocar.mil.ec/mareas/graphs/grafico_pleabaja.php?id_est=397
- Fydrych, D., Łabanowski, J., Rogalski, G., Haras, J., Tomków, J., Świerczyńska, A., Jakóbczak, P., & Kostro, Ł. (2015). Weldability of S500MC Steel in Underwater Conditions. *Advances in Materials Science*, 14(2), 37–45. <https://doi.org/10.2478/adms-2014-0008>
- Galvotec Corrosion service. (n.d.). 70058.
- Garašić, I., Kralj, S., Kožuh, Z., & Pacak, M. (2010). Analysis of underwater repair technology on the jack-up platform spud can. *Brodogradnja*, 61(2), 153–160.
- Global, G. (2020). *Resistencia a La Corrosion De Acero Al Carbono Comercial En* (Issue 2).
- Hibbeller, R. C. (2011). *Mecánica de Materiales*. In *Pearson Education*.
- López, F. M., Vidaurri, L. E. R., Dávila, J. L. A., Hdz-García, H. M., Hernández-Rodríguez, A., & Jorge Ruiz Mondragon, J. (2016). Efecto de la profundidad sobre la soldabilidad de aceros ferríticos en ambientes simulados unidos por soldadura húmeda.

- Soldagem e Inspecao*, 21(2), 126–136. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2102.02>
- Morken S.A. (2015). *Estudio para protección catódica en muelle monterverde* (p. 39). Petroecuador.
- Naval Sea System Comand, D. of C. (2002). Underwater Cutting & Welding Manual. *Change*, APRIL 1989.
- Nixon, J. H., Allum, C. J., & Lowes, J. M. (1982). *Underwater Welding - a Review*. 147–172. <https://doi.org/10.2478/v10077-008-0040-3>
- Orr, L. (2006). Underwater welding. *Shipping World and Shipbuilder*, 207(4229), 38–39. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v06.a0001463>
- Pardo Ordoñez, D., & Valdiviezo Vilema, H. (2016). *Desarrollo de una Metodología para Soldadura Submarina en Acero Naval ASMT A131*. 197.
- Pourrut, P. (1983). Los climas del Ecuador: fundamentos explicativos. *Centro Ecuatoriano de Investigaciones Geográficas*, 7–41. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-10/21848.pdf
- Robert L. Norton. (2006a). Diseño De Maquinas Un Enfoque Integrado. In *Diseño de Elementos de Máquinas*.
- Robert L. Norton. (2006b). Diseño De Maquinas Un Enfoque Integrado. In *Diseño de Elementos de Máquinas*. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=nrYd_BjTL0UC&oi=fnd&pg=PA1&dq=%22sistemas+de+unidades%22&ots=1BKp2eod9D&sig=SwoWt30msLlcScDpGeL1DGKzRGY#v=onepage&q=%22sistemas de unidades%22&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=nrYd_BjTL0UC&oi=fnd&pg=PA1&dq=%22sistemas+de+unidades%22&ots=1BKp2eod9D&sig=SwoWt30msLlcScDpGeL1DGKzRGY#v=onepage&q=%22sistemas+de+unidades%22&f=false)
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Revista Tecnología En Marcha*, 28(3), 127. <https://doi.org/10.18845/tm.v28i3.2417>
- Singer, F., & Pytel, A. (2008a). *Resist Mat. SINGER.pdf* (p. 586). <https://es.slideshare.net/eden1jonathan/resistencia-de-materiales-singer-13212497>
- Singer, F., & Pytel, A. (2008b). *Resist Mat. SINGER.pdf*. *Sistemas de protección catódica 1*. (n.d.).
- Sundarapandiyam, C., Balamurugan, A., & Mohan, M. (2017). A Review on Under Water Welding Process. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 8(1), 260–265. <https://doi.org/10.21172/ijiet.81.035>
- Symbols, W., & Metals, P. O. F. (2006). *WELDING THEORY & APPLICATION Table of Contents*.

- Szabó, S., & Bakos, I. (2006). Cathodic protection with sacrificial anodes. *Corrosion Reviews*, 24(3–4), 231–280. <https://doi.org/10.1515/CORRREV.2006.24.3-4.231>
- Tamayo Gutierrez, P. (2009). *Diseño de un Sistema de Protección Catódica de Líneas Enterradas en un Tramo del Oleoducto Secundario Sacha-Lago Agrio*. 213.
- Tejada, R. (2011). *Guía De Diseño, Construcción, Operación Y Conservación De Obras Marítimas Y Costeras. 1*.
- Urbina Palacios, R. F. (2004). Guía para el diseño de pilotes. *Universidad de Piura*, 77. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1370/ICI_114.pdf?sequence=1
- Vera, L., Lucero, M., & Mindiola, M. (2009a). *Caracterización Oceanográfica de la costa central ecuatoriana* (VOLUMEN 15; N°1 .2009, Vol. 15, Issue 1). <http://www.inocar.mil.ec/web/index.php/publicaciones/category/17-acta-oceanografica-del-pacifico-vol-15-n-1-2009>
- Vera, L., Lucero, M., & Mindiola, M. (2009b). *Caracterización Oceanográfica de la costa central ecuatoriana* (Vol. 15, Issue 1). <http://www.inocar.mil.ec/web/index.php/publicaciones/category/17-acta-oceanografica-del-pacifico-vol-15-n-1-2009>
- White, F. M. (2003). *Mecánica De Fluidos Quinta Edición*.
- Wolfgang Schneider, R. F. Y. J. G. (2007). Corrientes Marinas Y Masas De Agua. *Biología Marina y Oceanografía: Conceptos y Procesos*, 177–194.
- Castillo. (26 de Enero de 2021). Tiempos de soldadura subacuática. (J. Calle, & J. Paredes, Entrevistadores)
- Subsalve. (18 de Diciembre de 2020). *American Diving and Marine Supply*. Obtenido de Lif Bag: <https://www.americandivingsupply.com/Subsalve-Enclosed-Flotation-Bag-1100-lbs-p/efb-1000.htm>

APÉNDICES

APÉNDICE A - PARÁMETROS DE SOLDADURA

Tabla 4.1 Esfuerzos permisibles para soldadura PJP. Fuente: AWS D1.1/D1.1M:2015

PJP Groove Weld	Longitudinal seam of tubular members	Tension or compression parallel to axis of the weld ^b		Same as for base metal ^c	0.9	F_y	Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal may be used
	Circumferential and longitudinal joints that transfer loads	Compression normal to the effective area	Joint not designed to bear	0.50 F_{EXX} , except that stress on adjoining base metal shall not exceed 0.60 F_y	0.9	F_y	Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal may be used
			Joint designed to bear	Same as for base metal			
		Shear on effective area	0.30 F_{EXX} , except that stress on adjoining base metal shall not exceed 0.50 F_y for tension, or 0.40 F_y for shear	0.75	0.6 F_{EXX}	Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal may be used	
	Tension on effective area		Base metal 0.9 Filler metal 0.8	F_y 0.6 F_{EXX}			
Structural T-, Y-, or K-connection in ordinary structures	Load transfer across the weld as stress on the effective throat (see 9.5 and 9.6.1.3)		0.30 F_{EXX} or as limited by connection geometry (see 9.6), except that stress on an adjoining base metal shall not exceed 0.50 F_y for tension and compression, nor 0.40 F_y for shear	Base metal 0.9 Filler metal 0.8	F_y 0.6 F_{EXX}	or as limited by connection geometry (see 9.6 provisions for LRFD)	Matching filler metal shall be used

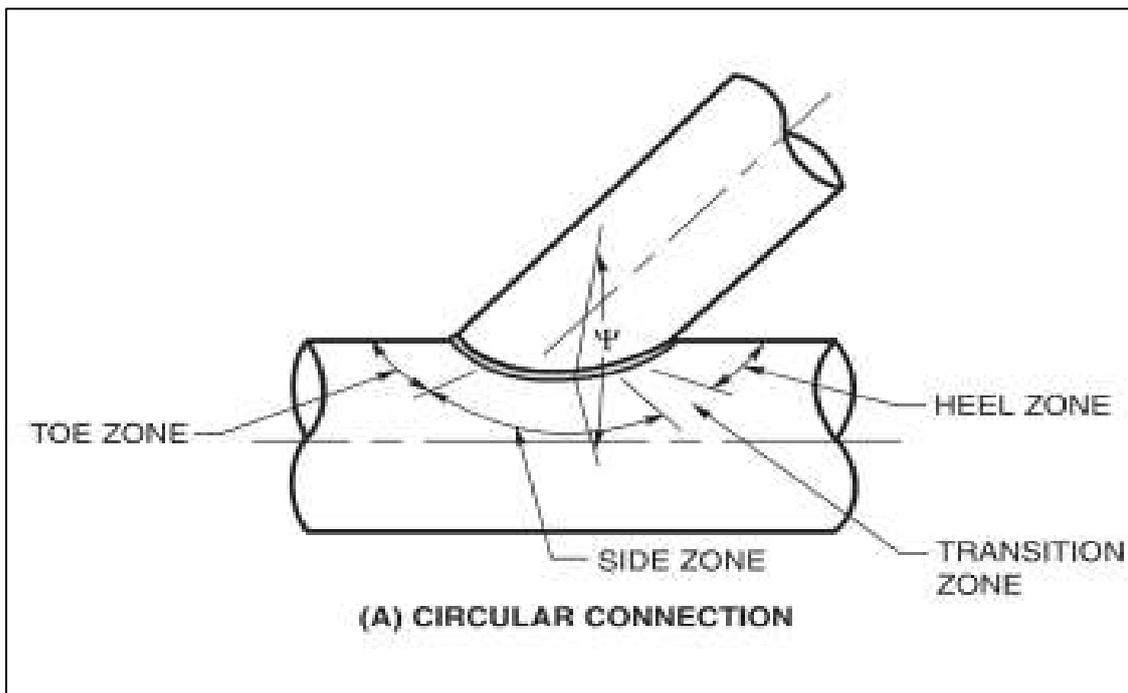


Figura 4.1 Parámetros de soldadura tubulares. Fuente: Fuente: AWS D1.1/D1.1M:2015

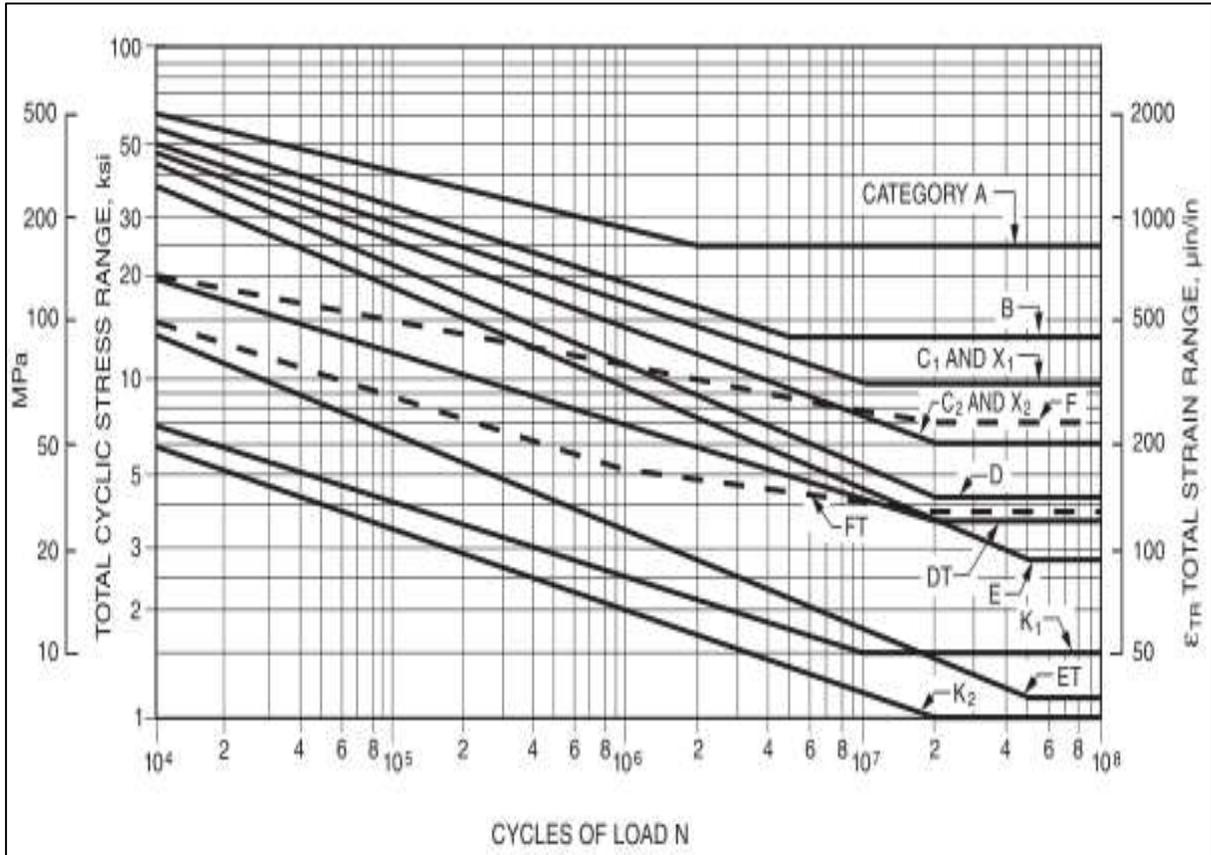


Figura 4.2 Gráfica de categorías para Fatiga en conexiones tubulares. Fuente: Norma AWS D1.1M/D1.1:2015

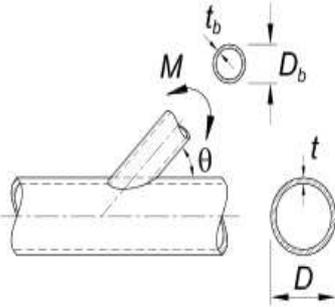
Tipo de Conexión	Resistencia a Flexión Disponible de la Conexión
<p>Rama(s) solicitadas por Flexión en el plano Conexiones en T, en Y y en Cruz</p> 	<p>Estado límite: plastificación del cordón</p> $M_{n-ip} \sin\theta = 5.39F_y t^2 \gamma^{0.5} \beta D_b Q_f \quad (K4-1)$ <p>$\phi = 0.90$ (LRFD) $\Omega = 1.67$ (ASD)</p> <p>Estado Límite: Fluencia por corte (punzonamiento), cuando $D_b < (D - 2t)$</p> $M_{n-ip} = 0.6F_y t D_b^2 \left(\frac{1 + 3\sin\theta}{4\sin^2\theta} \right) \quad (K4-2)$ <p>$\phi = 0.95$ (LRFD) $\Omega = 1.58$ (ASD)</p>

Figura 4.3 Resistencia en conexión T - flexión en el plano. Fuente: AISC360-16

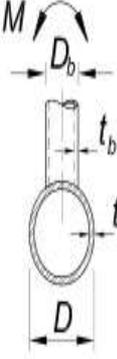
<p>Rama(s) solicitadas por Flexión en fuera del plano Conexiones en T, en Y y en Cruz</p> 	<p>Estado límite: plastificación del cordón</p> $M_{n-op} = \frac{F_y t^2 D_b}{\sin \theta} \left(\frac{3.0}{1 - 0.81 \beta} \right) Q_f \quad (K4-3)$ <p>$\phi = 0.90$ (LRFD) $\Omega = 1.67$ (ASD)</p> <hr/> <p>Estado Límite: Fluencia por corte (punzonamiento), cuando $D_b < (D - 2t)$</p> $M_{n-op} = 0.6 F_y t D_b^2 \left(\frac{3 + \sin \theta}{4 \sin^2 \theta} \right) \quad (K4-4)$ <p>$\phi = 0.95$ (LRFD) $\Omega = 1.58$ (ASD)</p>
---	--

Figura 4.4 Resistencia para conexión en T flexión fuera del plano. Fuente: AISC360-16

<p>Para conexiones en T, en Y y en Cruz, con rama(s) bajo una combinación de carga axial y flexión en el plano y fuera del plano, o cualquiera combinación de estos efectos de carga:</p>	
<p>LRFD: $[P_u / (\phi P_n)] + [M_{r-ip} / (\phi M_{n-ip})]^2 + [M_{r-op} / (\phi M_{n-op})] \leq 1.0$</p>	<p>(K4-5)</p>
<p>ASD: $[P_a / (P_n / \Omega)] + [M_{r-ip} / (M_{n-ip} / \Omega)]^2 + [M_{r-op} / (M_{n-op} / \Omega)] \leq 1.0$</p>	<p>(K4-6)</p>
<p>ϕP_n = resistencia de diseño (o resistencia disponible) de acuerdo con la Tabla K3.1 ϕM_{n-ip} = resistencia de diseño a flexión (o resistencia disponible) para flexión en el plano. ϕM_{n-op} = resistencia de diseño a flexión (o resistencia disponible) para flexión fuera del plano. $M_{r-ip} = M_{u-ip}$ para LRFD; para ASD $M_{r-op} = M_{u-op}$ para LRFD; para ASD</p>	

Figura 4.5 Validación para conexión en T en flexión en el plano. Fuente: AISC360-16

TABLA K4.1 (continuación)
Resistencia Disponible de Conexiones de Momento Tubo-a-Tubo
para Secciones Tubulares Circulares

Funciones

$Q_f = 1$ para cordones (superficie conectada) en tracción
 = para tubos (superficie de conexión) en compresión

$$U = \left| \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c S} \right| \quad (K2-4)$$

donde P_{ro} y M_{ro} son determinados en el lado de la junta que tiene la menor tensión de compresión.

P_{ro} y M_{ro} se refieren a las resistencias requeridas en el tubo. $P_{ro} = P_u$ para LRFD; P_a para ASD.

$M_{ro} = M_u$ para LRFD; M_a para ASD

Figura 4.6 Factor Q para flexión en cargas combinadas

APÉNDICE B - DISEÑO DE SOLDADURA POR FATIGA

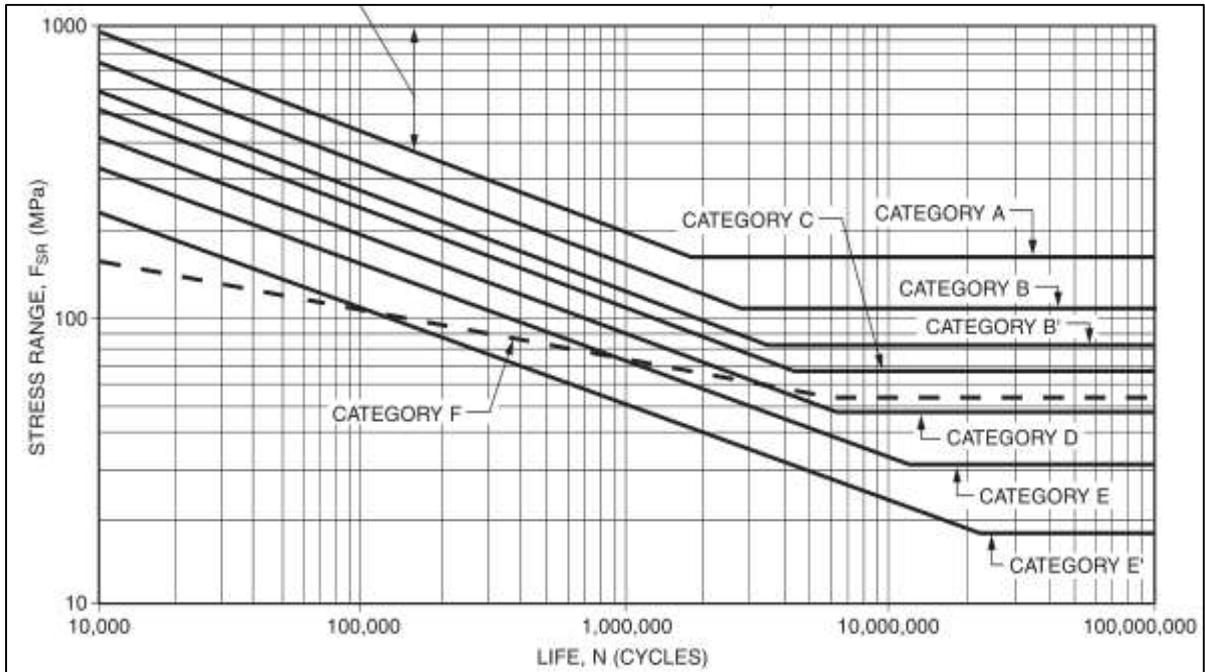


Figura 4.7 Gráfica de categorías para Fatiga para placa. Fuente: Norma AWS D1.1M/D1.1:2015

PJP Groove Welds		
Tension normal to the effective area	$0.30 \times$ classification tensile strength of filler metal	Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal may be used
Compression normal to effective area of weld in joints designed to bear	$0.90 \times$ classification tensile strength of filler metal, but not more than $0.90 \times$ yield strength of the connected base metal	
Compression normal to effective area of weld in joints not designed to bear	$0.75 \times$ classification tensile strength of filler metal	
Tension or compression parallel to axis of the weld ^c	Not a welded joint design consideration	
Shear parallel to axis of effective area	$0.30 \times$ classification tensile strength of filler metal except shear on the base metal shall not exceed $0.40 \times$ yield strength of the base metal	
Fillet Welds		
Shear on effective area or weld	$0.30 \times$ classification tensile strength of filler metal except that the base metal net section shear area stress shall not exceed $0.40 \times$ yield strength of the base metal ^{d,e}	Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal may be used
Tension or compression parallel to axis of the weld ^c	Not a welded joint design consideration	

Figura 4.8 Soldadura Precalificadas filete para placa base. Fuente: AWS D1.1/D1.1M:2015

APÉNDICE C – PARÁMETROS WPS

Table 3.2					
Filler Metals for Matching Strength to Table 3.1, Groups I, II, III, and IV Metals—SMAW and SAW (see 3.3)					
Base Metal Group	AWS Electrode Specification	SMAW		SAW	
		A5.1, Carbon Steel	A5.5 ^a , Low-Alloy Steel	A5.17, Carbon Steel	A5.23 ^c , Low-Alloy Steel
I	AWS Electrode Classification	E60XX	E70XX-X	F6XX-EXXX	F7XX-EXXX-XX
		E70XX		F6XX-ECXXX F7XX-EXXX F7XX-ECXXX	F7XX-ECXXX-XX
II	AWS Electrode Classification	E7015	E7015-X	F7XX-EXXX	F7XX-EXXX-XX
		E7016	E7016-X	F7XX-ECXXX	F7XX-ECXXX-XX
		E7018	E7018-X		
		E7028			
III	AWS Electrode Classification	N/A	E8015-X	N/A	F8XX-EXXX-XX
			E8016-X		F8XX-ECXXX-XX
			E8018-X		

Figura 4.9 Electrodos de acuerdo con el proceso y grupo para metal base. Fuente: AWS D1.1M/D1.1

Table 9.5						
Z Loss Dimensions for Calculating Prequalified PJP T-, Y-, and K-Tubular Connection Minimum Weld Sizes (see 9.5.2.1)						
Joint Included Angle ϕ	Position of Welding: V or OH			Position of Welding: H or F		
	Process	Z (in)	Z (mm)	Process	Z (in)	Z (mm)
$\phi \geq 60^\circ$	SMAW	0	0	SMAW	0	0
	FCAW-S	0	0	FCAW-S	0	0
	FCAW-G	0	0	FCAW-G	0	0
	GMAW	N/A	N/A	GMAW	0	0
	GMAW-S ^a	0	0	GMAW-S ^a	0	0
$60^\circ > \phi \geq 45^\circ$	SMAW	1/8	3	SMAW	1/8	3
	FCAW-S	1/8	3	FCAW-S	0	0
	FCAW-G	1/8	3	FCAW-G	0	0
	GMAW	N/A	N/A	GMAW	0	0
	GMAW-S ^a	1/8	3	GMAW-S ^a	1/8	3
$45^\circ > \phi \geq 30^\circ$	SMAW	1/4	6	SMAW	1/4	6
	FCAW-S	1/4	6	FCAW-S	1/8	3
	FCAW-G	3/8	10	FCAW-G	1/4	6
	GMAW	N/A	N/A	GMAW	1/4	6
	GMAW-S ^a	3/8	10	GMAW-S ^a	1/4	6

^a See 9.10.1(2) for qualification requirements for welding prequalified PJP T-, Y-, K-Connections details with GMAW-S.

Figura 4.10 Soldadura Precalificadas PJP ranura parcial para conexiones tubulares. Fuente: AWS D1.1/D1.1M:2015

Table 7.4					
Welding Procedure Qualification—Type and Position Limitations					
Qualification Test	Welding Test Position Designators ^c	Type of Weld and Position of Welding Qualified ^a			
		Plate ^b		Pipe ^b	
Weld		Groove	Fillet	Groove	Fillet ^d
Plate-groove	PA (1G)	F	F	F	F
	PC (2G)	H	H	H	H
	PG (3G)	V down	V down		
	PF (3G)	V up	V up		
	PE (4G)	OH	OH		
Plate-fillet	PA (1F)		F		
	PB (2F)		H		
	PG (3F)		V down		
	PF (3F)		V up		
	PD (4F)		OH		

Figura 4.11 Posiciones válidas de acuerdo con la junta y elementos por soldar. Fuente: AWS3.6M

Table 7.3			
Depth Limitations for Qualification Welding			
Type of Welding	Depth of Production Welding	Max. Depth Qualified	Min. Depth Qualified
Dry welding	All	X plus 20 m (66 ft)	X minus the greater of 20 m (66 ft) or 0.2X
Wet welding with carbon or low-alloy steel filler metal	Greater than 3 m (10 ft)	X plus 10 m (33 ft)	X minus the greater of 10 m (33 ft) or 0.2X
	Equal to or less than 3 m (10 ft)	X plus 10 m (33 ft)	X
Wet welding with austenitic stainless steel filler metal	All	X plus 3 m (10 ft)	X minus the greater of 20 m (66 ft) or 0.2X
Wet welding with <u>nickel-based</u> and other filler metal	All	X	X minus the greater of 20 m (66 ft) or 0.2X

Notes:

1. X is qualification test depth.
2. For the maximum depth qualified, depth shall be measured from the lower extremity of the test weldment with a tolerance of ± 230 mm (9 in).
3. For the minimum depth qualified, depth shall be measured from the upper extremity of the test weldment with a tolerance of ± 230 mm (9 in).

Figura 4.12 Limite de profundidad de acuerdo con el proceso de soldadura

APÉNDICE D – NIVEL DE MAREA

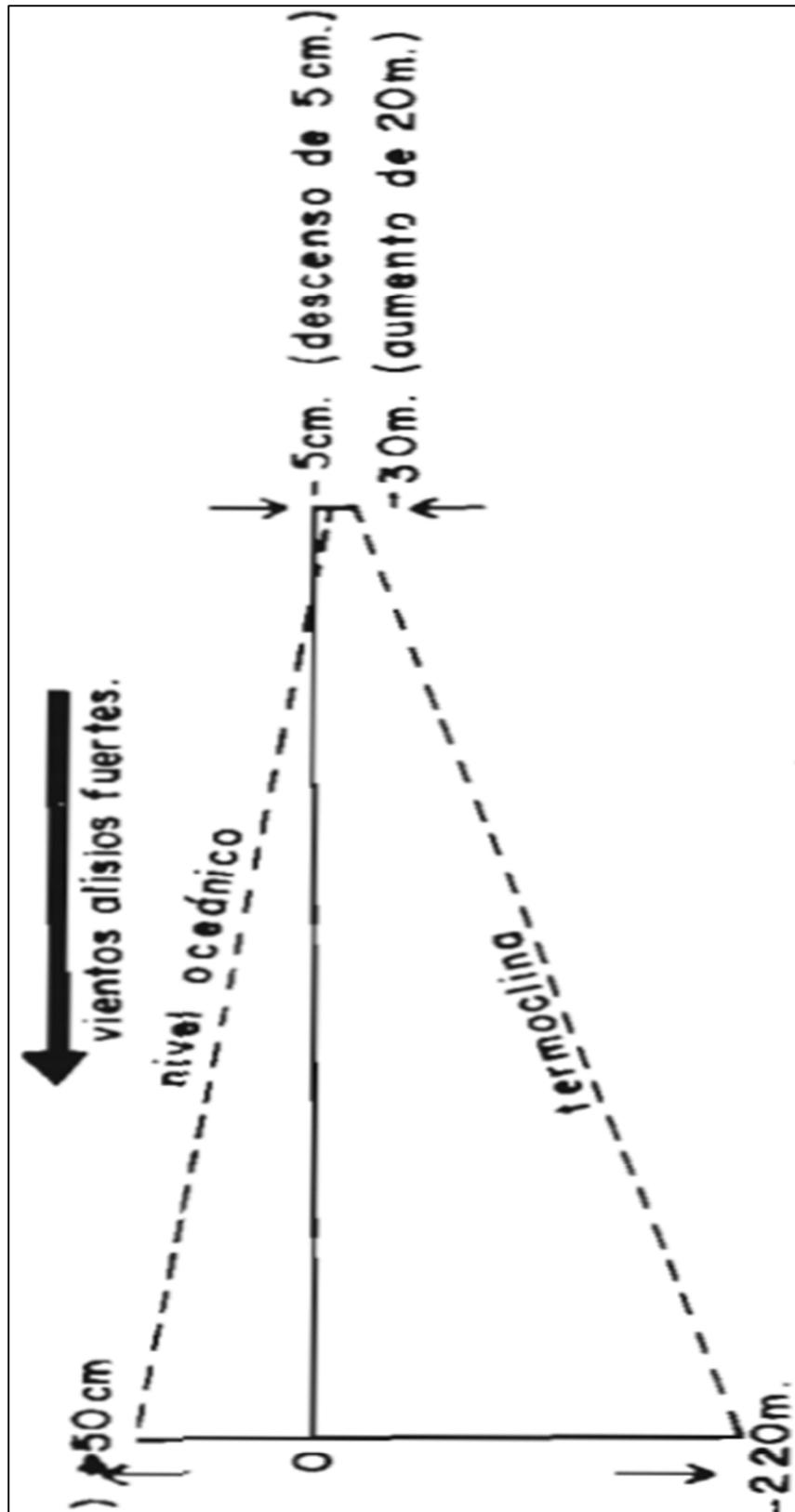


Figura 4.13 Aumento de nivel para temporada de vientos fuertes. (Pourrut, 1983)

APÉNDICE E – WPS

ESPECIFICACION DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)

WPS No: <u> 1 </u>	Norma de referencia: _____	Precalificado	Calificado mediante pruebas	<input checked="" type="checkbox"/>
Revisión: _____	Empresa: _____	Soportado por PQR(s): _____		
Fecha: _____				

DATOS DE SOLDADURA Junta precalificada TC-P8

DISEÑO DE UNION	POSICION DE SOLDADURA
-----------------	-----------------------

Tipo de unión:	A tope	Placa	Ranura	<input checked="" type="checkbox"/>				
Tipo de soldadura:	PJP	Simple	<input checked="" type="checkbox"/>	Tubería	<input checked="" type="checkbox"/>	Filete		
		Doble		Posición:	Plana	Progresión:	circular	
Abertura de Raíz:	N		CARACTERISTICAS ELECTRICAS					
Longitud de cara de raíz:	N/A		Tipo de corriente	AC	DC (+)			
Angulo de ranura:	N/A			Pulso	DC (-)	<input checked="" type="checkbox"/>		
Radio (J/U):	N/A		Fuente de poder:	CV				
Respaldo:	SI	NO	<input checked="" type="checkbox"/>	CARACTERISTICAS DEL PROCESO				
Material del respaldo:	N/A		Proceso:	SMAW				
Ranura al reverso:	SI	NO	<input checked="" type="checkbox"/>	Tipo:	Manual	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático	Semiautomático
Método para realizar la ranura al reverso:	N/A		Modo de transferencia (GMAW):	C. circuito		Globular		
				Spray		N/A	<input checked="" type="checkbox"/>	
Angulo de ranura al reverso:	N/A		Electrodo de tungsteno:	N/A				

METAL BASE	METAL DE APORTE
------------	-----------------

	MB1	MB2	Especificación AWS:	AWS D1.1M:2015
Especificación del acero:	A36	A131	Clasificación AWS:	E70xx
Tipo o Grado:	A	A	Marca:	
Espesor de plancha:	N/A	6-12 mm	Longitud del electrodo:	350 mm
Diámetro (tubería):	6mm	N/A	Diámetro:	4 mm
Grupo	I	I	Porcentaje de carbono	0.10 %
Carbono Equivalente	0.40	0.40		

PROTECCION DE ARCO	TECNICA
--------------------	---------

Fundente:	Revestimiento	Aportación:	Oscilante	Recta	<input checked="" type="checkbox"/>
Electrodo-fundente (clase)	N/A	Pase:	Múltiple	Simple	<input checked="" type="checkbox"/>
Gas:	N/A	Limpieza entre pases:	Si	No	<input checked="" type="checkbox"/>
			Método	N/A	
Composición:		Número de electrodos	N/A		
Velocidad de Flujo:	N/A	Distancia contacto-Pieza	3 mm		
Tamaño de copa de gas:	N/A	Separación entre electrodo	Longitudinal		
			Lateral		
			Angular		

PRECALENTAMIENTO	POSTCALENTAMIENTO	CONDICIONES AMBIENTALES
------------------	-------------------	-------------------------

Temperatura:	N/A	Temperatura:	N/A	Profundidad	N/A
T. de entre pases:	N/A	Tiempo:	N/A	Presión diferencial	Max 20 psi

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

No. Pase	Material de aporte		Corriente		Volts	Velocidad de avance	Velocidad de alimentación de alambre	Detalle de Junta
	Clase	Ø	Tipo y polaridad	Amp.				
1	E70	4 mm	DC(-)	160-200	220 v	10-16 cm/min	N/A	
				Tolerancia	R=0mm	R=5,-0		

*Perpendicularidad ± 10°
 ** T1, T2 < 75 [mm]

ELABORADO POR:	
APROBADO POR:	

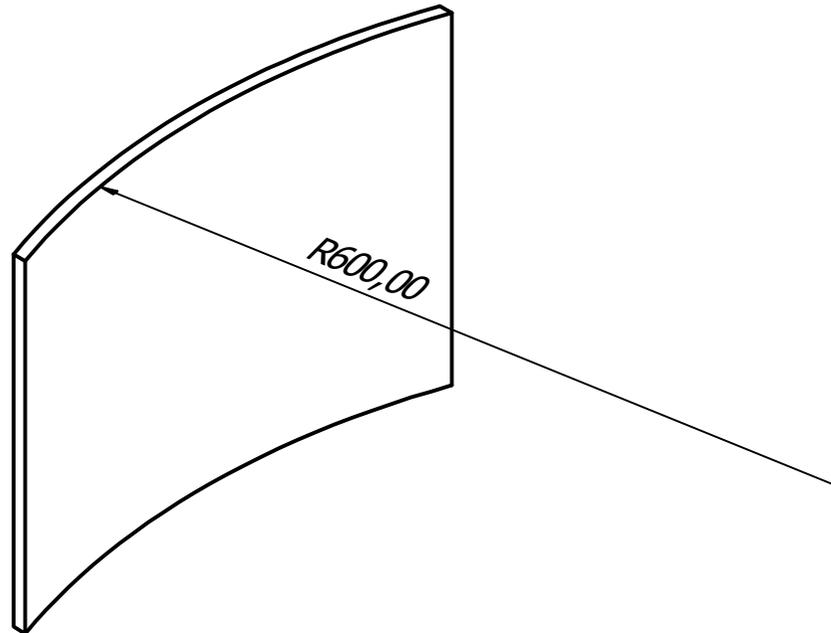
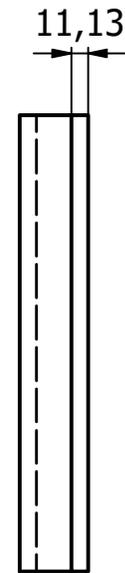
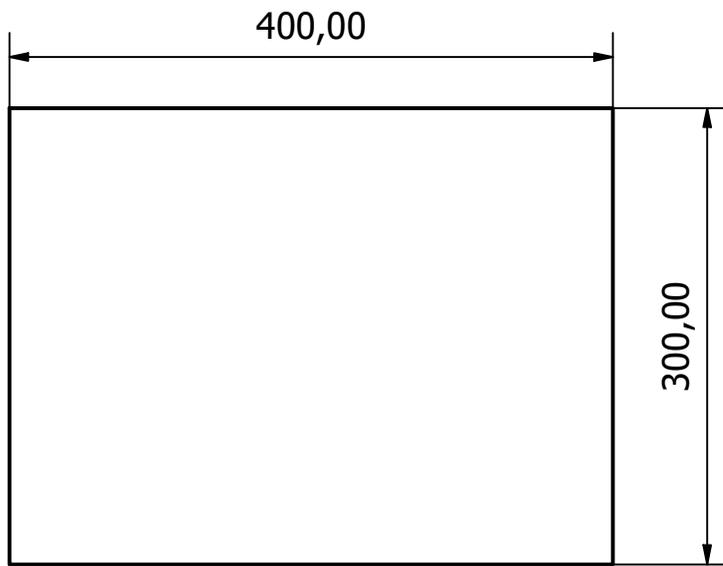
NOTAS Y ACLARACIONES	FIRMAS DE RESPONSABILIDAD
----------------------	---------------------------

--	--

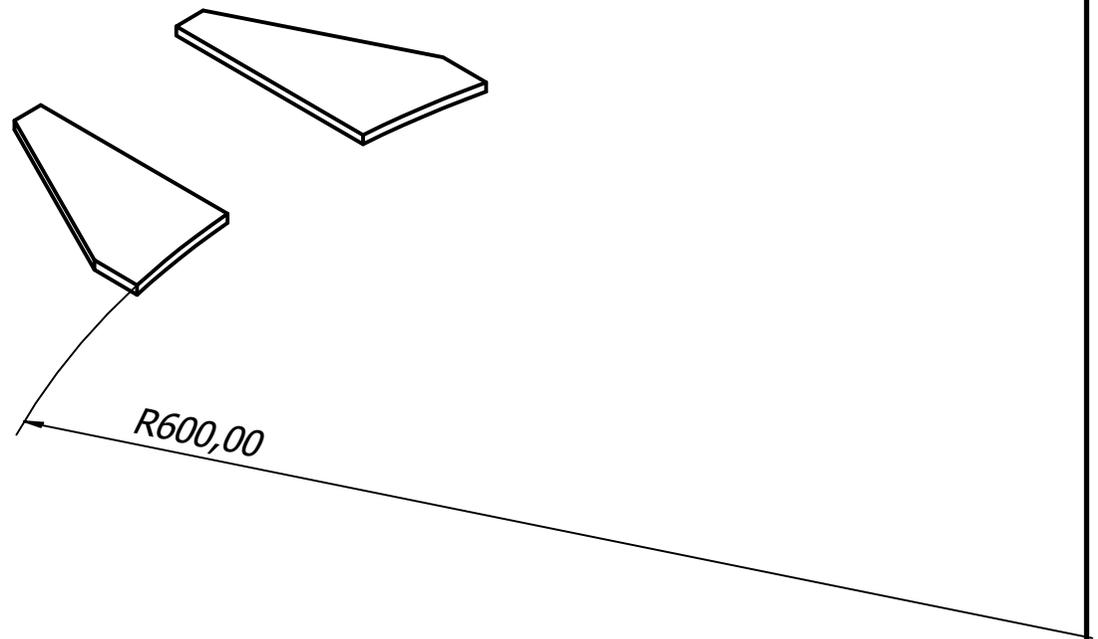
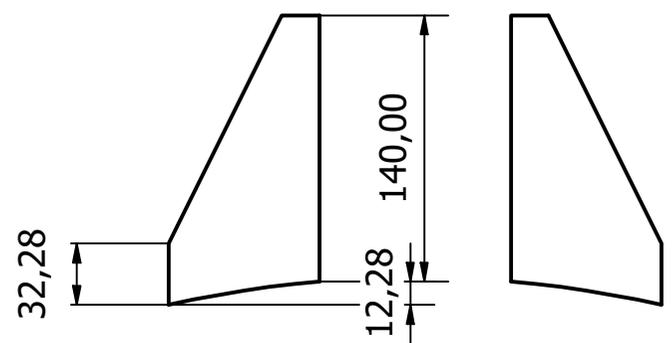
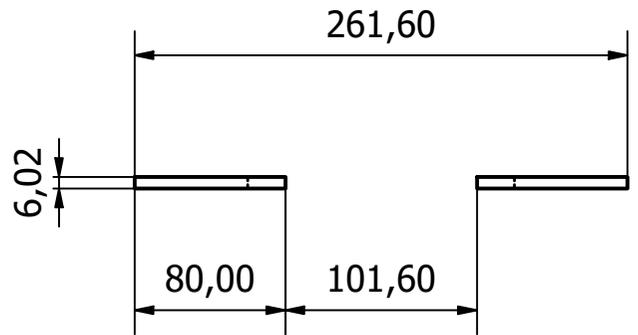
ESPECIFICACION DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)

WPS No: <u> 1 </u>	Norma de referencia: _____	Pecalificado	Calificado mediante pruebas	✓				
Revisión: _____	Empresa: _____	Soportado por PQR(s): _____						
Fecha: _____	DATOS DE SOLDADURA Junta precalificada TC-F12							
DISEÑO DE UNION		POSICION DE SOLDADURA						
Tipo de unión:	A traslape		Placa	✓				
Tipo de soldadura:	Filete	Simple	✓	Tubería				
		Doble		Filete				
		Posición:	Plana - Horizontal - Vertical	Progresión:				
				Descendente				
CARACTERISTICAS ELECTRICAS								
Abertura de Raíz:	N/A		Tipo de corriente:	AC				
Longitud de cara de raíz:	N/A			DC (+)				
Angulo de ranura:	N/A		Pulso:	DC (-)				
Radio (J/U):	N/A		Fuente de poder:	CV				
Respaldo:	SI	NO	✓					
CARACTERISTICAS DEL PROCESO								
Material del respaldo:	N/A		Proceso:	SMAW				
Ranura al reverso:	SI	NO	✓	Tipo: Manual				
				Automático				
Método para realizar la ranura al reverso:	N/A		Modo de transferencia (GMAW):	C. circuito				
				Globular				
				Spray				
Angulo de ranura al reverso:	N/A		Electrodo de tungsteno:	N/A				
METAL BASE		METAL DE APORTE						
	MB1	MB2	Especificación AWS:	AWS D3.6M (group II A5.1)				
Especificación del acero:	A588	A131	Clasificación AWS:	E7014				
Tipo o Grado:	B	A	Marca:	Hydroweld				
Espesor de plancha:	50.8 mm	6-12 mm	Longitud del electrodo:	350 mm				
Diámetro (tubería):	N/A	N/A	Diámetro:	4 mm				
Grupo	II	I	Porcentaje de carbono	0.10 %				
Carbono Equivalente	0.37	0.40						
PROTECCION DE ARCO		TECNICA						
Fundente:	Revestimiento		Aportación:	Oscilante				
				Recta				
Electrodo-fundente (clase)	N/A		Pase:	Múltiple				
				Simple				
Gas:	N/A		Limpieza entre pases:	Si				
				No				
			Método:	N/A				
Composición:			Número de electrodos	14				
Velocidad de Flujo:	N/A		Distancia contacto-Pieza	4 mm				
Tamaño de copa de gas:	N/A		Separación entre electrodo	Longitudinal				
				Lateral				
				Angular				
PRECALENTAMIENTO		POSTCALENTAMIENTO		CONDICIONES AMBIENTALES				
Temperatura:	N/A	Temperatura:	N/A	Profundidad				
				1-15 m				
T. de entre pases:	N/A	Tiempo:	N/A	Presión diferencial				
				Max 20 psi				
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA								
No. Pase	Material de aporte		Corriente		Volts	Velocidad de avance	Velocidad de alimentación de alambre	Detalle de Junta
	Clase	Ø	Tipo y polaridad	Amp.				
1	E7014	3.2 mm	DC(-)	160-200	220 v	10-16 cm/min	N/A	
2-n	E7014	2.2 mm	DC(-)	160-200	220 v	10-16 cm/min	N/A	
*Perpendicularidad ± 10° ** T1, T2 < 75 [mm]				Tolerancia	R=0mm	R=5,-0		
ELABORADO POR:								
APROBADO POR:								
NOTAS Y ACLARACIONES			FIRMAS DE RESPONSABILIDAD					

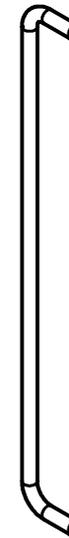
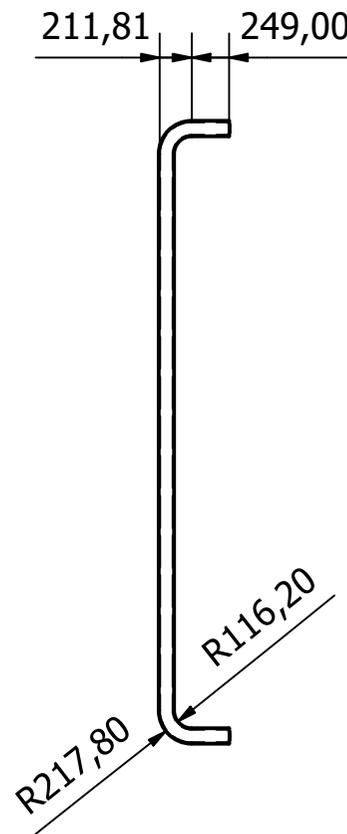
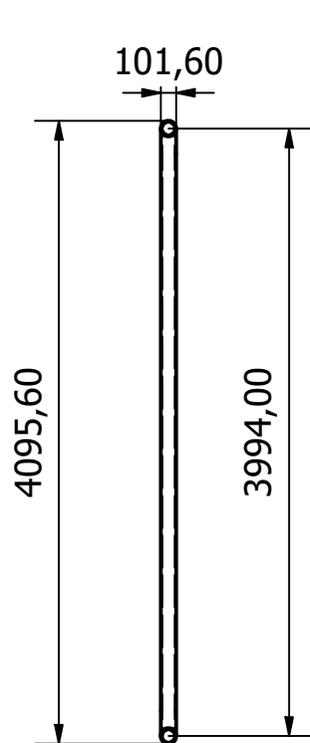
APÉNDICE E – PLANOS



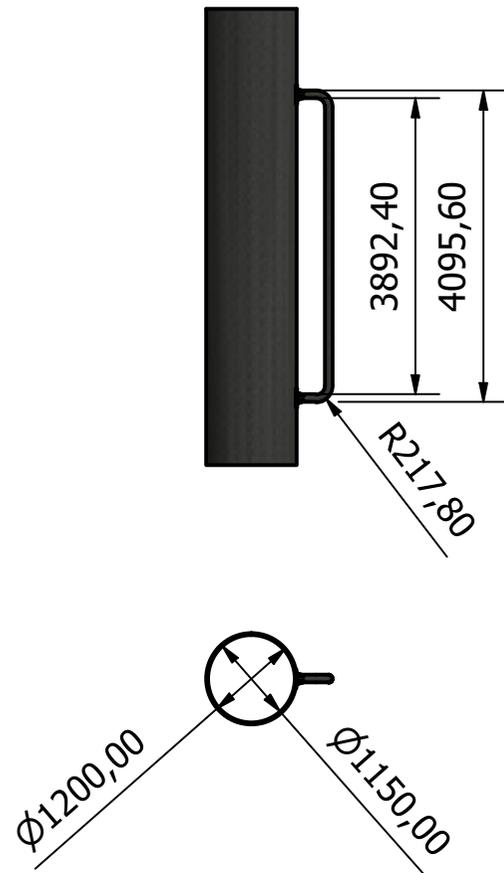
Fecha de revisión: 6/2/2021	Tutor: J. Peña Estrella	Autores: J. Paredes Cedeño J. Calle Acosta	
Escala: 1:25	Proyecto: SISTEMA DE SUJECIÓN DE ÁNODOS GALVÁNICOS PARA EL SISTEMA DE PROYECCIÓN CATÓDICA	Pieza: PLACA CURVA	



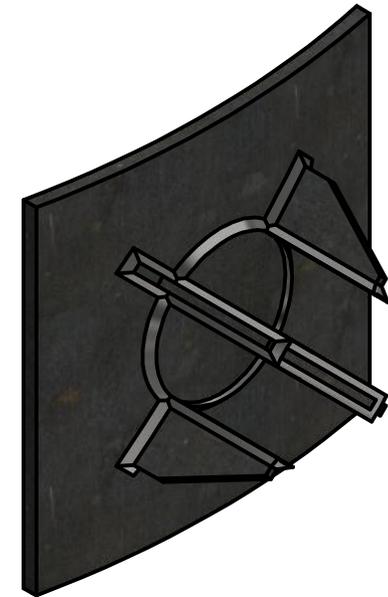
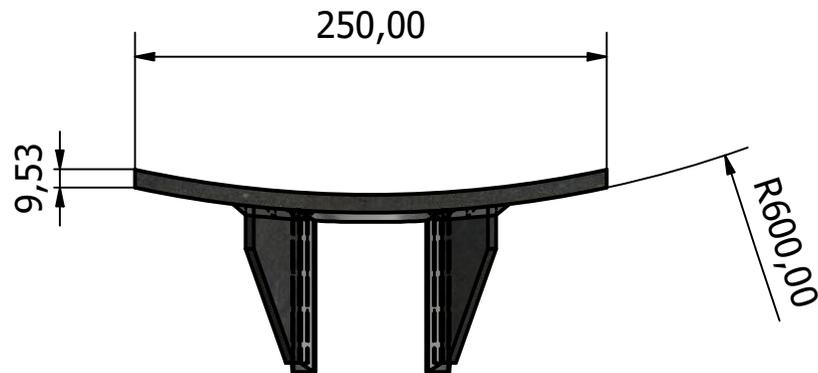
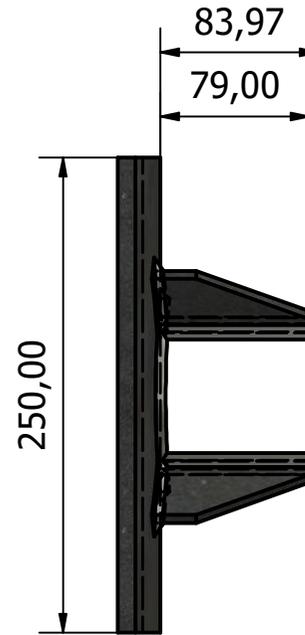
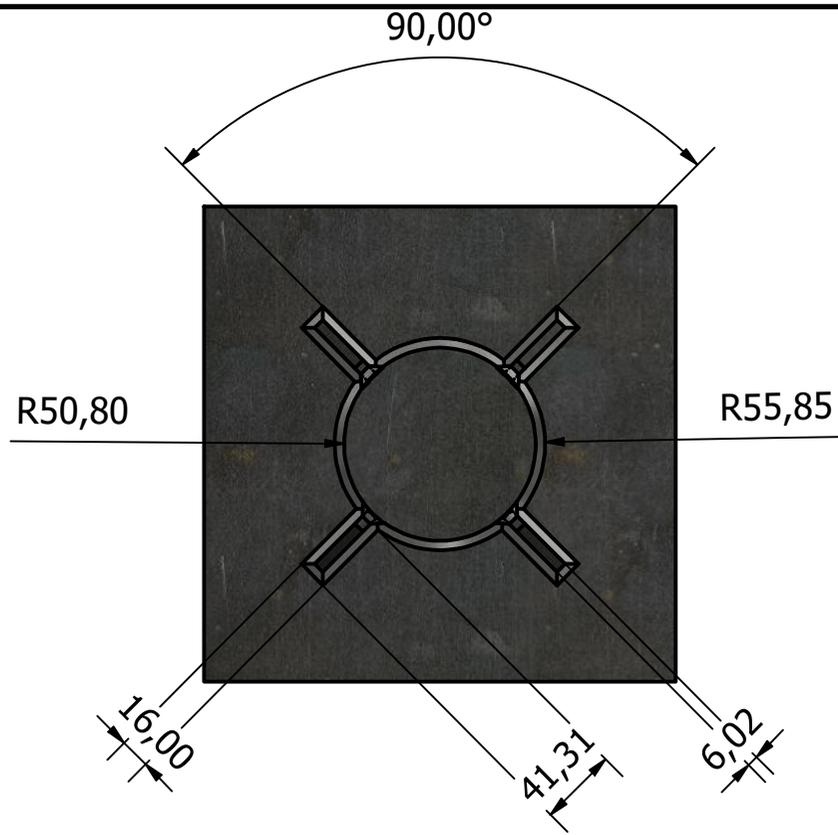
Fecha de revisión: 6/2/2021	Tutor: J. Peña Estrella	Autores: J. Paredes Cedeño J. Calle Acosta	 Fecha: 21/6/2021
Escala: 1:4	Proyecto: SISTEMA DE SUJECIÓN DE ÁNODOS GALVÁNICOS PARA EL SISTEMA DE PROYECCIÓN CATÓDICA	Pieza: RIGIDIZADOR	



Fecha de revisión: 6/2/2021	Tutor: J. Peña Estrella	Autores: J. Paredes Cedeño J. Calle Acosta	
Escala: 1:4	Proyecto: SISTEMA DE SUJECIÓN DE ÁNODOS GALVÁNICOS PARA EL SISTEMA DE PROYECCIÓN CATÓDICA	Fecha: 21/6/2021	
Pieza: ALMA DEL ÁNODO GALVÁNICO			



Fecha de revisión: 6/2/2021	Autores: J. Paredes Cedeño J. Calle Acosta		
Tutor: J. Peña Estrella			
Escala: 1:100	Proyecto: SISTEMA DE SUJECIÓN DE ÁNODOS GALVÁNICOS PARA EL SISTEMA DE PROYECCIÓN CATÓDICA		Fecha: 21/6/2021
Pieza:	ENSAMBLE ALMA-PILOTE		Lamina N°: 4



Fecha de revisión: 6/2/2021	Autores: J. Paredes Cedeño J. Calle Acosta		
Tutor: J. Peña Estrella	Fecha: 21/6/2021		
Escala: 1:4	Proyecto: SISTEMA DE SUJECIÓN DE ÁNODOS GALVÁNICOS PARA EL SISTEMA DE PROYECCIÓN CATÓDICA		Lamina N°: 5
Pieza: ENSAMBLE ALMA-PLACA			