

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

“Diseño de un Sistema de Protección Catódica en  
Tablestacado de un Muelle Portuario”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la Obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Cristian Armando Suque Cercado

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2014

## AGRADECIMIENTO

A mi Madre y mi Padre que hicieron posible mi educación y guiarme en cada momento de mi vida.

A mis amigos que de una u otra manera colaboraron con la realización de esta tesis y en especial al Ing. Julián Peña, Director de Tesis, por su invaluable ayuda.

## DEDICATORIA

A MIS PADRES.

A MIS HERMANOS

A MI FAMILIA

A MIS AMIGOS

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



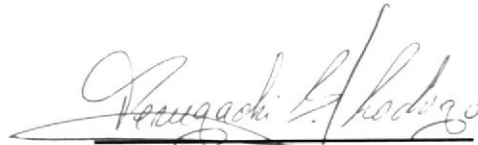
---

Dr. Kleber Barcia V., Ph.D.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE



---

Ing. Julián Peña E.  
DIRECTOR




---

Ing. Rodrigo Perugachi B.  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



---

Cristian Armando Suque Cercado

## RESUMEN

Para prolongar la vida útil y proteger un muelle construido en dos etapas; la primera iniciada en el año del 2003 y la segunda en el 2005 con perfiles de acero ASTM A690 (tablestacas) que consta de una parte frontal, dos laterales (norte y sur), posterior o de anclaje y transversales; se aplicó un Sistema de Protección Catódica (SPC) por ánodos galvánicos.

Para la protección externa del muelle (que se encuentra en contacto directo con el agua) del referido sistema, que consta de ánodos de sacrificio de aleación Aluminio – Zinc colocados en la parte frontal y laterales del tablestacado distribuidos uniformemente sobre su superficie, sujetos mecánicamente por debajo del nivel de marea baja. Tienen una vida útil de 4 años, los cuales muestran deficiencias de diseño, corto tiempo de servicio y reposición alrededor del 50% de ánodos antes de cumplir su ciclo de vida, por lo que es importante realizar una revisión de dicho sistema de protección. La parte interna del tablestacado cuenta con diferentes tipos de ánodos con una duración superior a la frontal; por lo tanto, esta tesis se centra solamente al análisis del SPC frontal externa; dado que, es difícil acceder directamente a los ánodos colocados internamente.

La presente Tesis tiene como objetivo inspeccionar y evaluar técnicamente el estado actual del SPC y plantear mejoras en el actual sistema o un método alternativo el cual brinde un adecuado nivel de protección y a su vez incrementar la vida útil. Para evaluar y mejorar un sistema alternativo este documento hace énfasis en la aplicación de prácticas recomendadas y criterios de protección aceptados por normas y estándares reconocidos; para garantizar un sistema confiable para este tipo de estructura.

## ÍNDICE GENERAL

|   | Pág. |
|---|------|
| RESUMEN .....   | II   |
| ÍNDICE GENERAL .....  | IV   |
| ABREVIATURAS.....   | VII  |
| SIMBOLOGÍA.....   | VIII |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....   | IX   |
| ÍNDICE DE TABLAS .....  | X    |
| ÍNDICE DE PLANOS.....   | XI   |
| INTRODUCCIÓN .....  | 1    |
| <br>  |      |
| <b>CAPÍTULO 1</b>   |      |
| 1. CORROSIÓN EN MUELLES Y TÉCNICAS DE PREVENCIÓN.....                                     | 4    |
| 1.1 Tipos de corrosión.....   | 7    |
| 1.2 Zonas de corrosión en tablestacas de muelles portuarios.....                          | 10   |
| 1.3 Técnicas para prevenir la corrosión.....  | 13   |
| 1.4 Factores que influyen en el funcionamiento del Sistema de<br>Protección Catódica..... | 16   |
| 1.5 Mediciones de campo y monitoreo.....  | 19   |
| 1.6 Criterios de Protección Catódica.....   | 28   |

**CAPÍTULO 2**

|  |    |
|--|----|
| 2. EVALUACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA DEL MUELLE EXISTENTE..... | 31 |
| 2.1 Características generales del muelle.....                                      | 32 |
| 2.2 Proceso de inspección.....   | 36 |
| 2.3 Observaciones y Resultados obtenidos.....                                      | 42 |
| 2.4 Análisis de resultados.....  | 44 |
| 2.5 Selección del Sistema de Protección Catódica.....                              | 44 |

**CAPÍTULO 3**

|   |    |
|---|----|
| 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS GALVÁNICOS..... | 46 |
| 3.1 Mediciones preliminares.....  | 47 |
| 3.2 Parámetros de diseño.....   | 47 |
| 3.3 Cálculo de corriente requerida.....                                 | 56 |
| 3.4 Selección de ánodos de sacrificio y cálculo de resistencia.....     | 58 |
| 3.5 Cálculo de corriente inicial por ánodo.....                         | 62 |
| 3.6 Expectativa de vida útil de ánodos.....                             | 65 |
| 3.7 Distribución y ubicación de ánodos.....                             | 66 |
| 3.8 Factibilidad Técnico – Económica.....                               | 68 |

**CAPÍTULO 4**

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 75

**APÉNDICES**

**BIBLIOGRAFÍA**

## 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 paso a paso, medición de potenciales de encendido |
| MPY             | Milésimas de pulgadas por año                                |
| M <sup>n+</sup> | Ion metálico   |

## SIMBOLOGÍA

|                      |                                |
|----------------------|--------------------------------|
| $e^-$                | Electrones                     |
| H                    | Hidrógeno                      |
| H <sub>2</sub> O     | Agua                           |
| O                    | Oxígeno                        |
| OH <sup>-</sup>      | Oxidriló                       |
| Cu-CuSO <sub>4</sub> | Cobre Sulfato de Cobre         |
| Ag-AgCl              | Plata Cloruro de Plata         |
| mil                  | Milésima de pulgada            |
| mg                   | Miligramo                      |
| g/m <sup>3</sup>     | Gramos por centímetro cúbico   |
| pulg <sup>2</sup>    | Pulgadas cuadradas             |
| °C                   | Grados centígrados             |
| pH                   | Potencial de Hidrógeno         |
| $\rho$               | Resistividad eléctrica         |
| $\Omega$             | Ohmio                          |
| cm                   | Centímetro                     |
| $\Omega$ -cm         | Ohmio - Centímetro             |
| m                    | Metro                          |
| m <sup>2</sup>       | Metro cuadrado                 |
| cm <sup>2</sup>      | Centímetro cuadrado            |
| Kg                   | Kilogramo                      |
| V                    | Volt                           |
| mV                   | Milivoltio                     |
| Cu                   | Cobre                          |
| Ni                   | Niquel                         |
| C                    | Carbono                        |
| Mn                   | Manganeso                      |
| P                    | Fósforo                        |
| S                    | Azufre                         |
| Se                   | Selenio                        |
| A                    | Amperio                        |
| mA/m <sup>2</sup>    | Miliamperio por Metro Cuadrado |
| $e$                  | Eficiencia                     |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 1.1 | Ubicación de zonas en tablestacado.....   | 12 |
| Figura 1.2 | Velocidad de corrosión en tablestacas de acero en agua de mar.....              | 12 |
| Figura 1.3 | Esquema típico de ánodos de sacrificio en tablestacas.....                      | 15 |
| Figura 1.4 | Esquema típico de ánodos por corrientes impresas.....                           | 16 |
| Figura 1.5 | Medición de potencial eléctrico entre estructura y electrolito.....             | 21 |
| Figura 1.6 | Medición de resistividad de suelo con el método de cuatro puntas de Wenner..... | 24 |
| Figura 1.7 | Medición de resistividad con la caja de suelo (Soil Box).....                   | 26 |
| Figura 2.1 | Vista general del tablestacado.....   | 32 |
| Figura 2.2 | Esquema general del muelle.....   | 33 |
| Figura 2.3 | Ubicación de niveles en muelle.....   | 34 |
| Figura 2.4 | Conexión entre ánodo y tablestaca.....  | 35 |
| Figura 2.5 | Vista panorámica del muelle.....  | 36 |
| Figura 2.6 | Evidencia fotográfica.....  | 37 |
| Figura 2.7 | Perfil de tablestaca tipo z.....  | 38 |
| Figura 2.8 | Toma de potenciales eléctricos.....   | 39 |
| Figura 3.1 | Dimensiones y espesores de sección de tablestaca.....                           | 49 |
| Figura 3.2 | Sección lateral del tablestacado.....   | 50 |
| Figura 3.3 | Áreas de zonas sumergida y enterrada de parte frontal.....                      | 51 |
| Figura 3.4 | Áreas de zonas sumergidas y laterales norte y sur.....                          | 52 |
| Figura 3.5 | Áreas de zonas enterradas laterales norte y sur.....                            | 53 |
| Figura 3.6 | Ánodo de aluminio.....  | 59 |
| Figura 3.7 | Toma de muestras para resistividades eléctricas en agua de muelle.....          | 61 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Tabla 1  | Serie galvánica empírica en agua de mar.....                   | 7  |
| Tabla 2  | Tasas de corrosión en tablestacas metálicas.....               | 10 |
| Tabla 3  | Potenciales eléctricos en tablestacado.....                    | 41 |
| Tabla 4  | Especificaciones de acero ASTM 690.....                        | 48 |
| Tabla 5  | Propiedades geométricas de tablestaca.....                     | 49 |
| Tabla 6  | Resultado de áreas a proteger.....                             | 54 |
| Tabla 7  | Resistividades eléctricas en agua de muelle.....               | 61 |
| Tabla 8  | Propiedades electroquímicas del ánodo.....                     | 63 |
| Tabla 9  | Lista de materiales para el SPC en tablestacas del muelle..... | 68 |
| Tabla 10 | Porcentaje de desgaste de ánodos en inspección anual.....      | 70 |
| Tabla 11 | Presupuesto referencial del SPC por ánodos galvánicos.....     | 73 |

## ÍNDICE DE PLANOS

|         |   |
|---------|---|
| PLANO 1 | Implantación general del muelle                         |
| PLANO 2 | Ubicación de ánodos en tablestacado frontal             |
| PLANO 3 | Ubicación de ánodos en tablestacado lateral norte y sur |

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial ha motivado la construcción e instalación de diferentes tipos de estructuras metálicas los cuales por factores técnicos un porcentaje son subterráneas o sumergidas; considerando que la corrosión suele ser relativamente alta para este tipo de estructuras y se hace vital la presencia de un control adecuado de la misma; dentro de los métodos complementarios utilizados para ello el más apropiado es la Protección Catódica.

Los puertos tienen la necesidad que su infraestructura cumpla todas las exigencias respecto a seguridad y medio ambiente para la continua operación de sus muelles, de tal manera estos requieren que se encuentren en óptimo estado para el desarrollo normal de sus actividades, donde el volumen de carga que maniobran tanto en exportaciones como importaciones representan sus principales actividades, por lo que es primordial mantener en buenas condiciones dichas instalaciones portuarias aplicando técnicas factibles para incrementar la vida útil.

El progresivo deterioro de estructuras que se encuentran sumergidas y/o expuestas bajo la acción del ambiente marino constituye sin duda alguna, un grave problema industrial. Por lo que se requiere evaluar Sistemas de Protección contra la Corrosión que protege las estructuras para determinar

su grado de protección e idoneidad; y de esta manera establecer mejoras o seleccionar otro método alternativo para incrementar la vida útil. Para conseguir lo expuesto, el desarrollo de esta tesis abarca principalmente lo siguiente:

En el capítulo 1 se describe los fundamentos básicos de la corrosión en muelles, factores que influyen en el deterioro, técnicas preventivas como recubrimientos y tipos de Sistemas de Protección Catódica (SPC).

En el capítulo 2 se realizará la evaluación técnica del SPC actual, presentando las características generales del muelle para efectuar un proceso de inspección mediante la aplicación de prácticas y criterios recomendados de protección para proceder con la inspección visual y mediciones de campo. De los resultados obtenidos se valorará el grado de protección ofrecido por el sistema actual y se realizará el mejoramiento del mismo o la elección de otro método que ofrezca mayores ventajas como menor costo de mantenimiento y mayor tiempo de vida útil, que brinde un adecuado nivel de protección a la estructura.

Con estos antecedentes, en el capítulo 3 se realizará el diseño de un SPC para proyectar una vida útil mayor al sistema actual, aplicando fundamentos bajo los principios y criterios normativos vigentes. Se planteará demandas de corriente, tipos de ánodos a emplear con las debidas especificaciones y

demás elementos que formen parte del sistema de protección catódica seleccionado. Una vez culminado dicho diseño se realizará el correspondiente análisis de factibilidad Técnico-Económica para conocer si es viable el sistema propuesto.

Finalmente, en el capítulo 4 se darán las respectivas conclusiones y recomendaciones del sistema propuesto.

# CAPÍTULO 1

## 1. CORROSIÓN EN MUELLES Y TÉCNICAS DE PREVENCIÓN.

Los puertos están formados por diferentes tipos de estructuras que se encuentran sumergidos parcial o totalmente en agua de mar el cual presenta una composición química uniforme, caracterizada por la presencia de sales solubles en peso.

Los elementos estructurales de acero que forman parte de las instalaciones en los muelles que están expuestos al ambiente marino, sufren deterioro debido a los efectos combinados de la acción química de los constituyentes del agua de mar.

Entre los problemas que más afectan a este tipo de estructuras es la corrosión, que puede definirse como la degradación de un metal por la interacción con el medio que lo rodea. De acuerdo con el tipo de interacción la corrosión será química o electroquímica; la primera implica

interacción la corrosión será química o electroquímica; la primera implica la reacción del metal con un medio no iónico y se presenta a elevadas temperaturas, la segunda involucra en forma simultánea un transporte de electricidad a través de un electrolito, generando una disminución espontánea en la energía de la celda o pila de corrosión, a éste grupo pertenecen la corrosión atmosférica, la corrosión en soluciones salinas, en agua de mar, en soluciones ácidas y la corrosión en suelos; entre otras. En cualquiera de los casos se presenta una transformación del metal a su forma nativa como mineral. La corrosión en sentido más amplio es un fenómeno natural, por medio del cual los sistemas químicos expresan su tendencia hacia un estado de equilibrio estable.

Para que un proceso de corrosión se presente son necesarias condiciones tales como:

- Un ánodo y un cátodo.
- Conductor eléctrico entre el cátodo y el ánodo.
- El ánodo y el cátodo deben estar en contacto con un electrolito.
- Una diferencia de potenciales entre el ánodo y el cátodo.

Una vez alcanzadas estas condiciones en el ánodo, el metal se corroe o disuelve, esto se puede visualizarse como el paso del metal a un ion

metálico o como la pérdida de uno o más electrones del átomo metálico, lo que eléctricamente puede escribirse como:

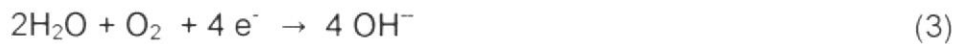


Como etapa posterior a esta reacción el ión metálico pasa al estado mineral de menor potencial, generalmente a óxidos. En el cátodo el metal no reacciona pero sobre su superficie se presenta reacciones de reducción, que dependiendo del electrolito serán:

- Desprendimiento de Hidrogeno en medios acuosos:



- Reducción del oxígeno si está presente en medios neutros o alcalinos.



- Reducción del oxígeno si está presente en medios ácidos y aireados, la cual puede darse en forma simultánea con el desprendimiento de Hidrogeno.



La diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo es la diferencia algebraica de sus potenciales individuales en relación con un electrodo de referencia. Como normalmente no se emplean metales puros sino aleaciones, es fundamental conocer el comportamiento electroquímico de dichos materiales, por ello se han desarrollado las series galvánicas, como la mostrada en la *Tabla 1*, donde los metales con menores potenciales se denominan activos o anódicos y se oxidan cuando se encuentran unidos a metales de mayor potencial.

**TABLA 1**  
**SERIE GALVÁNICA EMPÍRICA**  
**EN AGUA DE MAR**

| Metal                   | Voltios vs. Cu-CuSO <sub>4</sub> | Voltios vs. Ag-AgCl |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------|
|                         | Extremo Activo o Anódico         |                     |
| Magnesio                | -1.60 a -1.75                    | -1.55 a -1.70       |
| Zinc                    | -1.10                            | -1.05               |
| Aluminio                | -1.05                            | -1.00               |
| Acero al carbono limpio | -0.50 a -0.80                    | -0.45 a -0.75       |
| Hierro Dúctil           | -0.50                            | -0.45               |
| Plomo                   | -0.50                            | -0.45               |
| Acero en hormigón       | -0.20                            | -0.15               |
| Cobre                   | -0.20                            | -0.15               |
| Hierro – Silicio        | -0.20                            | -0.15               |
| Carbono – Grafito       | +0.30                            | +0.35               |
|                         | Extremo noble o Catódico         |                     |

### 1.1 Tipos de corrosión.

Básicamente todos los métodos que existen para lograr controlar la corrosión de los materiales metálicos, son intentos de interferir con

el mecanismo que la produce, para lograr el control del deterioro del metal debemos conocer los principales tipos de corrosión que ocurren en muelles metálicos, entre los cuales tenemos:

**Corrosión uniforme.**- el ataque se extiende en forma homogénea sobre toda la superficie metálica y la penetración media es igual en todos los puntos.

**Corrosión localizada por picaduras.**- es una forma de ataque estrecha y profunda, la cual con frecuencia causa una rápida perforación en el espesor del sustrato. Se caracteriza por un ataque en una región localizada rodeada de una superficie muy poco o no corroída, esta puede iniciarse de manera estadística sobre una superficie abierta y libremente expuesta o en imperfecciones de tipo aleatorio en donde películas de óxido protector o recubrimientos se han roto.

**Corrosión galvánica.**- es un proceso electroquímico en el que un metal se corroe preferentemente cuando está en contacto eléctrico con un tipo diferente de metal (más noble) y ambos metales se encuentran inmersos en un electrolito o medio húmedo.

**Corrosión por erosión.-** este tipo de corrosión ocurre cuando la velocidad de un fluido corrosivo es suficiente para remover películas protectoras de la superficie del metal ocasionando su deterioro y desgaste.

**Velocidad de corrosión.-** la velocidad de corrosión se reporta en milésimas de pulgadas de penetración (1mil = 0.001 pulg) por año (MPY). La ecuación para evaluar las milésimas de penetración por año está dada por:

$$MPY = \frac{534W}{DAT} \quad (5)$$

Dónde:

|     |   |                                |
|-----|---|--------------------------------|
| MPY | : | Milésimas de pulgadas por año  |
| W   | : | Pérdida de peso (mg)           |
| D   | : | Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) |
| A   | : | Área (pulg <sup>2</sup> )      |
| T   | : | Tiempo (horas)                 |

En tablestacas los productos de corrosión ocurren donde existe el contacto directo con el electrolito (agua de mar y partes enterradas), la velocidad que ocurre el deterioro del metal difiere respecto a su ubicación.

## 1.2 Zonas de corrosión en tablestacas de muelles portuarios.

En muelles portuarios, el tipo de corrosión y la tasa que ocurre está condicionada por el tipo de ambiente marino en el que se encuentra la estructura que pueden clasificarse según la ubicación y condiciones agresivas donde se estén inmersos, las tasas de corrosión se muestran a continuación en la *Tabla 2* y la ubicación de las mismas en la *Figura 1.1*

**TABLA 2**  
**TASAS DE CORROSIÓN EN TABLAESTACAS METÁLICAS**

| DESCRIPCIÓN         | TASA DE CORROSIÓN |
|---------------------|-------------------|
|                     | [mpy]             |
| Zona Atmosférica    | -                 |
| Zona de Salpicadura | > 11.81           |
| Zona de Mareas      | 0.00 – 3.94       |
| Zona Sumergida      | < 1.96            |
| Zona de Lodo        | < 1.96            |

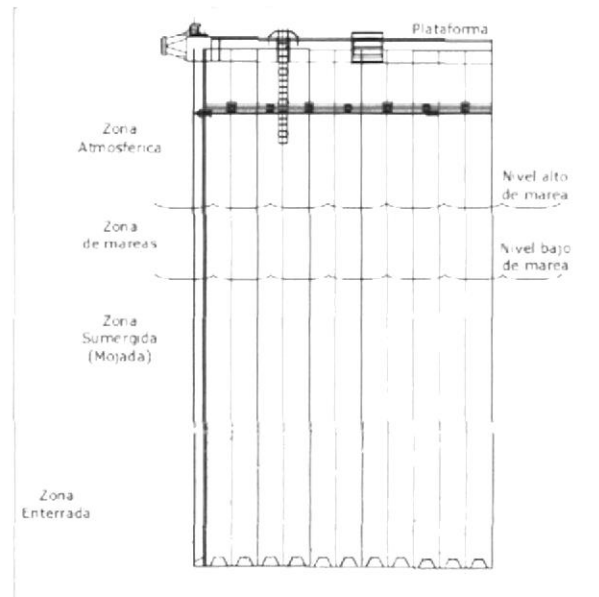
**Zona atmosférica.-** comprendida desde la cubierta hasta el nivel alto de agua (HWL, high water level) donde inicia la zona de mareas, aquí ocurre el menor índice de corrosión puesto que los cloruros acceden por niebla salina, depositada en la superficie por el viento, condensación, etc. Además de la poca cantidad de humedad.

**Zona de salpicaduras.-** es aquella que se encuentra inmediatamente arriba de la zona de mareas (HWL), donde se humedece y seca alternativamente, en esta zona hay exceso de oxígeno y elevada humedad, por lo que el riesgo de corrosión es alto.

**Zona de mareas.-** se encuentra entre HWL y el nivel bajo de agua (LWL, low water level), donde la estructura está permanentemente humedeciéndose, debido a que la inmersión es cíclica en el transcurso del día.

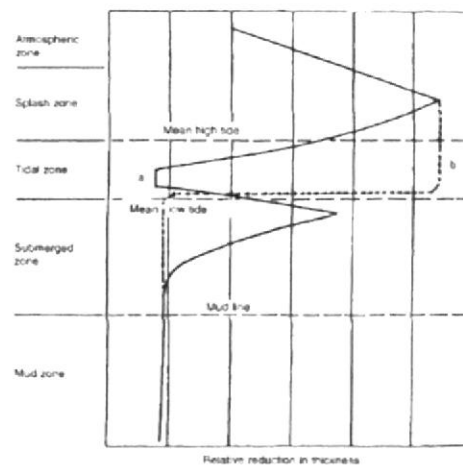
**Zona sumergida.-** está ubicada inmediatamente después de LWL y se extiende hasta el fondo del mar. Usualmente esta zona está cubierta con una capa de óxido lo cual limita el ataque corrosivo.

**Zona enterrada.-** por lo general es similar a la zona sumergida, sin embargo aquí se tiene el efecto de la abrasión de la arena, el cual se extiende alrededor de los productos de corrosión que ha sido removidos del acero.



**FIGURA 1.1. UBICACIÓN DE ZONAS EN TABLESTACADO.**

De acuerdo al perfil de desgaste para el tablestacado de un muelle, la *Figura 1.2* se muestra el perfil de corrosión de acero en agua de mar.



<sup>(1)</sup> Uhlig's Corrosion Handbook (2nd Edition)

**FIGURA 1.2. VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN TABLESTACAS DE ACERO EN AGUA DE MAR <sup>(1)</sup>**

### **1.3 Técnicas para prevenir la corrosión.**

En la mayoría de los programas de control de corrosión, los revestimientos constituyen la estrategia principal. Desgraciadamente los revestimientos no son perfectos, incluso acelera la corrosión en las fallas (holidays) del revestimiento. Justamente, en estos casos se utiliza SPC para evitar la corrosión del sustrato en estos holidays.

#### **Recubrimientos**

En estructuras marinas los métodos de recubrimiento comúnmente usados tiene:

- Recubrimiento orgánicos
- Recubrimientos inorgánicos
- Recubrimientos metálicos
- Recubrimientos combinados (orgánicos e inorgánicos)
- Recubrimientos a base de Bitumen (betún)
- Barnices o Esmaltes Bituminosos.
- Resinas Liquidas de Dos Componentes.

#### **Protección Catódica.**

Cuando la estructura a proteger está desnuda; como en el caso de tablestacas, se requerirá lograr cubrir toda la superficie expuesta

en las zonas de mayor afectación. Una forma muy eficiente y económica de impedir la corrosión en este tipo de estructura es el uso de la Protección Catódica por medio de Ánodos de Sacrificio o Corrientes Impresas.

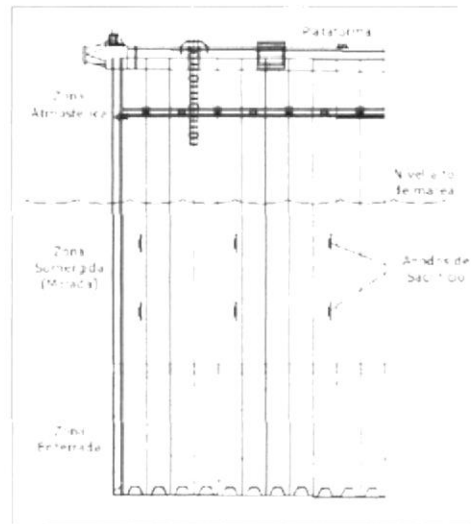
**a) Sistemas de Protección Catódica por Ánodos Galvánicos.**

Los sistemas de ánodos galvánicos utilizan ánodos de sacrificio, los cuales están hechos de magnesio, zinc o aluminio, en diferentes formas y tipos, se instalan a cierta distancia debajo del nivel del agua.

Los ánodos de zinc y magnesio son usados en suelos pre-empaquetados con un material de relleno compuesto 75% de sulfato de calcio, 20% de bentonita y 5% de sulfato de sodio empacados en sacos especiales.

Estos ánodos pueden ser conectados directamente a la estructura soldándolos o por fijación mecánica, como se muestra en la *Figura 1.3*. Si se usa un cable, el fabricante se encarga de conectarlo al ánodo, luego se conectará,

mediante una conexión mecánica, soldadura exotérmica u otro medio metalúrgico adecuado.

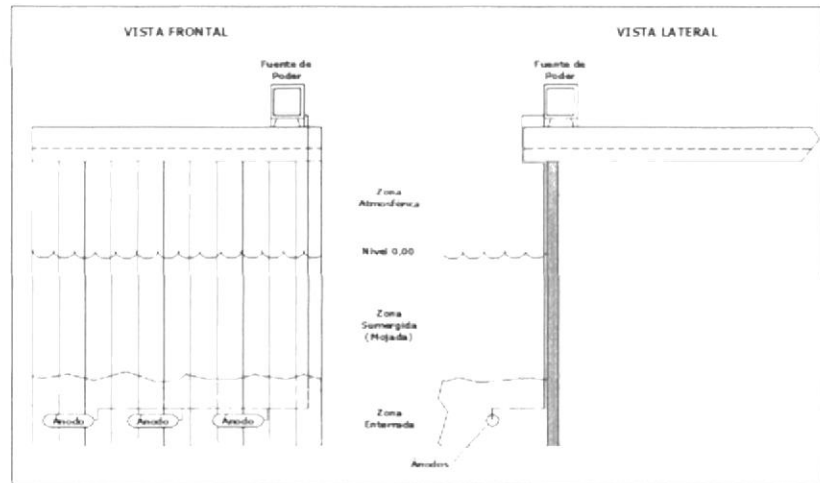


**FIGURA 1.3. ESQUEMA TÍPICO DE ÁNODOS DE SACRIFICIO EN TABLESTACAS**

#### **b) Sistemas de Protección Catódica por Corrientes Impresas.**

Los sistemas por corrientes impresas utilizan una fuente de energía (rectificador) como medio de alimentación para su funcionamiento, como se muestra en la *Figura 1.4*, además los ánodos son diferentes a los usados en sistemas galvánicos y se fabrican con materiales que se consumen lentamente. Generalmente este sistema

funciona a niveles más altos de corriente y voltaje que los sistemas galvánicos.



**FIGURA 1.4. ESQUEMA TÍPICO DE ÁNODOS POR CORRIENTES IMPRESAS EN TABLESTACAS**

#### **1.4 Factores que influyen en el funcionamiento del Sistema de Protección Catódica.**

Para comprender los efectos que pueden ocurrir en un SPC debemos tomar en cuenta varios factores que nos permitirá enfrentar y resolver problemas en el sistema protección a emplear, para esto debemos consideremos algunas variables que pueden influir en un tablestacado metálico en muelles.

**Salinidad.-** en el agua de mar la salinidad se encuentra alrededor de 3.5%, del cual el 78% es cloruro de sodio, y el 15% cloruro de magnésico y sulfato de magnésico conjuntamente. Además estos porcentajes varían con la ubicación donde se encuentre el muelle y pueden penetrar la capa protectora formada por los productos de corrosión localizada y su presencia influye en la solubilidad del agua.

**Revestimiento.-** en el caso de tablestacas el revestimiento se limita a la zona atmosférica y de salpicaduras del muelle, donde el fácil acceso ayude a la aplicación del mismo, realizando la selección adecuada, preparación de superficie y adherencia a la superficie expuesta. Para este caso particular, la superficie a proteger se considera solamente el área sumergida incluyendo la zona enterrada donde el acero se encuentra expuesto directamente al ambiente marino donde ocurre corrosión, a excepción del área de la zona atmosférica y de mareas que se encuentra protegida con pintura.

**Temperatura.-** La velocidad de corrosión tiende a aumentar con la temperatura. Por lo tanto, en electrolitos más cálidos, el requerimiento de corriente será mayor, se estima que un aumento

de la temperatura en 10° C duplica la velocidad de la reacción. Además afecta el rendimiento de ánodos con el incremento de temperatura.

**Contenido de oxígeno.-** a medida que la concentración de oxígeno aumenta, la polarización tiende a disminuir. Por lo tanto, en medios más oxigenados, el requerimiento de corriente será mayor.

**Movimiento de estructura y electrolito.-** el movimiento relativo entre la estructura y el electrolito influye en el requerimiento de corriente, a medida que aumenta la velocidad relativa entre estos, el requerimiento de corriente también aumenta. En tablestacas colocadas en aguas turbulentas requieren más corriente de aquellos que colocados en aguas quietas.

**Nivel de pH.-** el valor de pH (grado de acidez o alcalinidad) del agua de mar es casi constante, su valor está entre 7.5 y 8.4 y varía en función de la temperatura. Si el pH disminuye tiende a la acidez, también puede variar en función de la salinidad, de la presión o profundidad y de la actividad de los organismos marinos.

**Contaminantes.-** la contaminación de las aguas en muelles se debe a la alteración de las aguas naturales y construcción de estructuras artificiales, debido a desechos industriales y aguas residuales, por lo que causa daños biológicos al ecosistema por la reducción de oxígeno disuelto en el agua. Los contaminantes reducen el nivel de pH en los sitios donde la tasa de corrosión en el acero es alta.

**Organismos biológicos.-** las bacterias en especial la bacteria reductora de sulfatos, tienen el efecto de despolarizar las superficies protegidas además de organismos incrustantes se adhieren a la superficie produciendo picaduras a la superficie de las tablestacas.

### **1.5 Mediciones de campo y monitoreo.**

Dada la importancia económica de toda estructura en industrias; para cumplir con todas las exigencias y marcos normativos, evitar daños al ambiente y ofrecer seguridad a las personas que hacen uso de estas instalaciones, es necesario llevar inspecciones habituales para detectar cualquier anomalía y de esta manera evitar consecuencias negativas.

Para esto necesitan de mediciones y monitoreo periódicos para garantizar el uso continuo de las instalaciones en los niveles previstos. Esto abarca un amplio espectro de actividades técnicas; para esto, se deben aplicar procedimientos adecuados para determinar la efectividad de la Protección Catódica. Además da una apreciación más real de los datos para mantenimientos, selección de materiales y diseños de SPC.

### **Mediciones de campo**

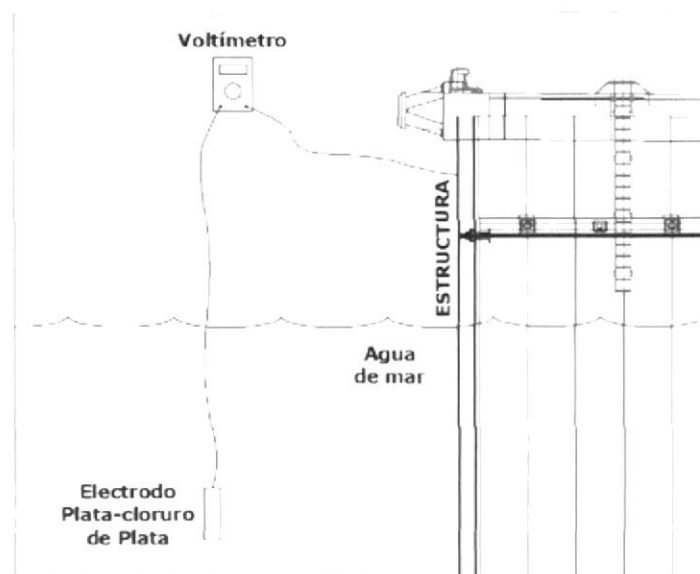
Son varios los métodos que se pueden utilizar para determinar el grado de protección catódica y parámetros para diseño de una estructura, que asegure una eficaz protección contra la corrosión, entre las que se tiene:

#### **Medición del Potencial de estructura - electrolito.**

El potencial estructura a electrolito es una medición tomada con el voltímetro conectado en paralelo al circuito. La resistencia del circuito externo es alta, de forma tal que la resistencia de entrada del voltímetro deberá ser lo suficientemente alta como para evitar derivar mucha corriente de la estructura lo que hace que se alcancen mediciones no precisas. Además para esto se debe utilizar un electrodo de referencia, a menudo llamado celda de

referencia, el cual debe utilizarse haciendo contacto entre el electrolito y la estructura (ver *Figura 1.5*). Las mediciones de potencial son comunes para determinar si se ha alcanzado una protección adecuada con la aplicación de los criterios de protección catódica los cuales se describirán posteriormente.

El electrodo de referencia utilizado para aplicaciones donde el electrolito es el agua de mar es el de Plata-Cloruro de Plata. Para minimizar el error por caída óhmica asociado al electrolito, el electrodo deberá colocarse lo más cerca posible de la estructura.



**FIGURA1.5. MEDICIÓN DE POTENCIAL ELECTRICO  
ENTRE ESTRUCTURA Y ELECTROLITO**

**Medición de corriente**

Esta medición de corriente en un circuito de protección catódica es un procedimiento necesario para poder evaluar la eficiencia del sistema. Entre las mediciones típicas se tiene:

- Corriente de ánodos galvánicos
- Corriente de salida de sistemas de corriente impresa
- Corriente que circula en una estructura
- Corriente en un puente de unión.

Para obtener estas mediciones se puede usar tres accesorios: un amperímetro, una pinza amperométrica, o una resistencia calibrada (Shunt).

**Continuidad eléctrica.**

Todas las partes de una estructura que reciben protección catódica desde una fuente única, ya sea con ánodos galvánicos o con corrientes impresas, deben tener continuidad eléctrica (metálica). En caso de que no exista continuidad eléctrica, deberán utilizarse uniones con cables o algún otro medio para establecerla.

### **Medición de pH**

La resistividad del electrolito puede medirse de diferentes maneras. Para los líquidos, puede usarse el papel de pH (tornasol) o un medidor de pH. Para suelos, puede usarse un medidor de pH, o se puede realizar un filtrado de agua destilada y una muestra del suelo puede ser medido con papel tornasol, medidor de pH o un kit de medición de pH.

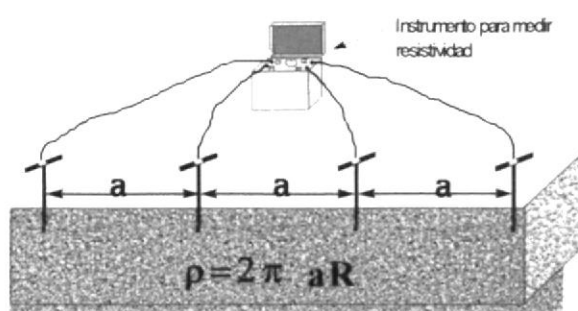
El pH del suelo también se puede medir usando un electrodo de antimonio y un electrodo de cobre/sulfato de cobre. El electrodo de antimonio consiste en una punta de antimonio en el extremo de un tubo no-metálico. Esta punta se conecta a un terminal en la parte superior del tubo.

Las dos celdas se colocan cercanas entre sí en el suelo y se conectan a un voltímetro. No importa qué celda se conecte a qué terminal del instrumento, ya que lo que interesa es la diferencia de potencial entre los dos electrodos; asegurándose de que el sulfato de cobre no entre en contacto con la punta de antimonio. A un lado del electrodo de antimonio hay una escala calibrada en miliVolts y pH. Una vez medido el potencial, se puede determinar el pH usando esta escala.

### Medición de la Resistividad del Electrolito.

La resistividad del electrolito es uno de los factores que pueden determinar la corrosividad de un medio, por lo que es un parámetro fundamental a la hora de diseñar un SPC. La mayoría de estas mediciones se lo realizan mediante dos métodos: de las cuatro puntas de Wenner y de caja de Suelo (Soil Box)

- **Método de cuatro puntas de Wenner.-** es un método que usa cuatro varillas o jabalinas que se hincan en la tierra (ver *Figura 1.6*), se aplica una corriente a las varillas externas y se mide el voltaje entre las varillas internas, la resistividad está en función de la corriente, el voltaje y la separación entre electrodos (lo que equivale a la profundidad de ensayo)



<sup>(2)</sup> NACE International Training & Certification – Cathodic Protection Tester  
Course Manual – CP Level 1, 2005

**FIGURA1.6. MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DE SUELO CON EL MÉTODO DE CUATRO PUNTAS DE WENNER <sup>(2)</sup>**

La resistividad se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = 2\pi * a * R \quad (6)$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad en  $\Omega$ -cm

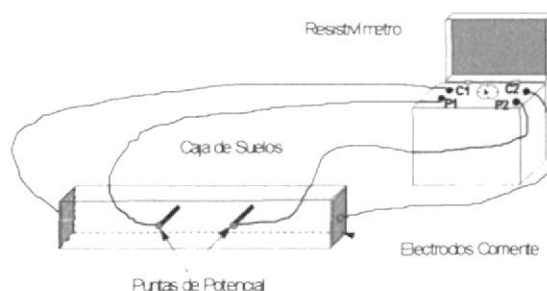
$\pi$  = Constante Pi (3.1416)

a = Separación en cm

R = Resistencia,  $\Omega$

- **Método de caja de Suelo (Soil Box).**- es un método para medir resistividad de un electrolito que ha sido removido de su medio natural, se lo usa para medir resistividad de un líquido. Una caja de suelos consiste en dos placas en el extremo de la caja para que circule la corriente y dos puntas en el centro para medir la caída de potencial, como se ilustra en la *Figura 1.7*. La sección transversal entre las puntas de medición de caída de potencial es constante e igual en valor numérico a la separación lineal, resultando en un factor de calibración de la caja de 1. Por lo tanto, la resistencia medida equivale a la resistividad de la muestra en ohm-cm. La caja de suelo se conecta al instrumento de medición de

resistividad de la misma manera que en el método de Wenner.



<sup>(3)</sup> NACE International Training & Certification – Cathodic Protection Tester  
Course Manual – CP Level 1, 2005

### FIGURA 1.7. MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD

CON CAJA DE SUELO (SOIL BOX).<sup>(3)</sup>

#### Monitoreo de SPC

Cuando inicia la corrosión, hay pérdidas de espesor del metal en la estructura y ocurren daños estructurales. También existen las cuestiones de seguridad pública y daño ambiental. Por esto, en muchas industrias y países se han establecido regulaciones para garantizar que las estructuras estén protegidas en forma adecuada, para reducir el riesgo al público y al medio ambiente. Por estas razones es necesario monitorear la protección catódica para asegurarse de que la corrosión esté bajo control.

Para determinar si un sistema de protección catódica está funcionando correctamente y protegiendo una estructura de la corrosión, se registran los siguientes datos en forma periódica:

- Potencial estructura-electrolito.
- Tensión y corriente de salida de rectificadores.
- Drenaje de corriente de los ánodos galvánicos.
- Magnitud y dirección de la corriente a través de los drenajes.
- Resistencia de dispersores (camas anódicas).
- Integridad de rectificadores, juntas aislantes, uniones eléctricas y otras características físicas relacionadas con el sistema de control de corrosión.

El único método para determinar si se alcanza la protección catódica adecuada es la medición de los potenciales estructura-electrolito. Sin embargo, una vez realizado el relevamiento de potencial, se pueden usar otros elementos indirectos para monitorear un sistema y aplicar otros procedimientos para garantizar la efectividad del SPC a intervalos específicos según corresponda, entre los cuales tiene:

- Estaciones de medición con cupones.
- Estaciones de medición con probetas de resistencia eléctrica.

- Inspección de la estructura mediante excavación ó buceo.
- Relevamientos de potencial paso a paso (CIS).

### **1.6 Criterios de Protección Catódica.**

La protección catódica es un fenómeno de polarización, lo que implica reducir a cero la diferencia de potencial entre los ánodos y cátodos localizados sobre la superficie metálica.

Para garantizar el funcionamiento de un SPC se puede recurrir a los criterios recomendados por Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión de Estados Unidos (NACE por sus siglas en inglés). A continuación se describen los tres criterios de mayor uso, de los cuales debe cumplirse al menos uno.

#### **Hierro y Acero Enterrados o Sumergidos.**

Existen tres criterios aplicables: dos relacionados con un potencial estructura-suelo de -850 mV con respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre (CSE), y otro, con desplazamiento en la polarización de 100 mV.

Estos tres criterios son:

**CRITERIO 1: Un potencial negativo (catódico) de al menos 850 mV** con la protección aplicada. Ese potencial se mide con respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre en contacto con el electrolito. Para poder interpretar correctamente esta medición, deben tenerse en cuenta las otras caídas de potencial, además de la que tiene lugar en la interfase estructura-electrolito.

**CRITERIO 2: un potencial polarizado negativo de al menos 850 mV** con respecto al electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre.

**CRITERIO 3: un mínimo de 100 mV de polarización catódica** entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable en contacto con el electrolito. La formación o desaparición de la polarización puede medirse para alcanzar este criterio.

### **Plataformas Offshore en Agua Salada**

Un voltaje negativo (catódico) de al menos -0.800 voltios medidos entre la superficie de la plataforma y un electrodo de referencia de plata-Cloruro de Plata (Ag-AgCl) en contacto con el agua. Normalmente este voltaje debe medirse con la corriente de protección aplicada. Este criterio de -0.800 V incluye la caída

óhmica de la interfase acero/agua, pero no la caída óhmica en el agua. En este caso se puede aplicar este criterio para muelles portuarios.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. EVALUACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA DEL MUELLE EXISTENTE.**

La evaluación del actual SPC de ánodos galvánicos consiste en la verificación de los componentes, mediciones de campo y diagnóstico del sistema existente; tales como, estado físico de ánodos, medición de potenciales eléctricos estructura-electrolito, conexiones mecánicas entre ánodos y estructura, continuidad eléctrica, todo esto desde la parte frontal del muelle; debido a la facilidad que existe para la ejecución de estas actividades. El tablestacado posterior o anclaje se encuentran instalados ánodos galvánicos para una vida de 25 años; por lo tanto, nos centraremos solamente a la parte frontal del muelle.

## 2.1 Características generales del muelle.

### Características Generales.

El referido muelle se encuentra ubicado cerca del Puerto Marítimo de Guayaquil donde se realiza descarga de productos importados, fue construido en el año del 2003 y se encuentra compuesto por tablestacas situadas en el parte frontal y dos laterales (norte y sur), además de tablestacados en la parte posterior o de anclaje.

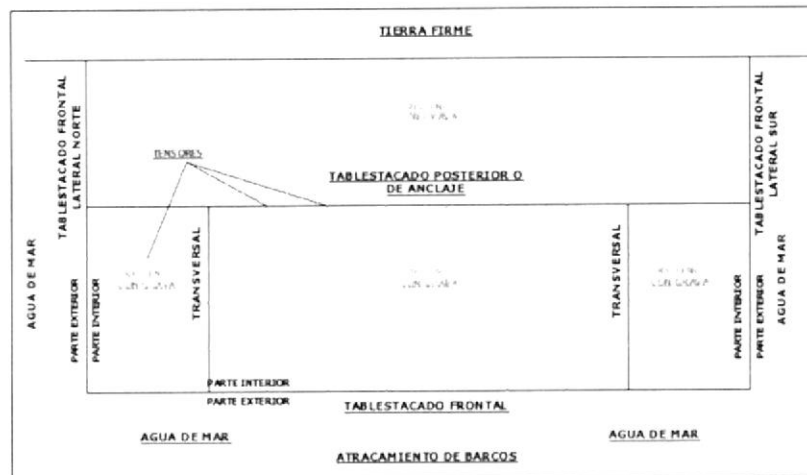


**FIGURA 2.1. VISTA GENERAL DEL TABLESTACADO**

Para determinar las características del muelle se procede primero a identificar las zonas en que se encuentra inmersa la estructura, la descripción de cada una de estas zonas fueron descritas en el Capítulo 1, sección 1.2. Además las zonas sumergidas y enterradas

no presentan ningún tipo de recubrimiento; por lo tanto, será considerado como superficie de acero desnudo.

La parte frontal tiene una longitud de 292.32 m y cada lateral cuenta con 35.28 m, el área del patio de maniobras del muelle que encierra el tablestacado es de 10313.05 m<sup>2</sup>, en la parte frontal atracan barcos de gran calado para el desembarque de mercadería. La parte posterior posee la misma longitud que la parte frontal y se encuentra sujetando a este con tensores metálicos (ver *Figura 2.2*).

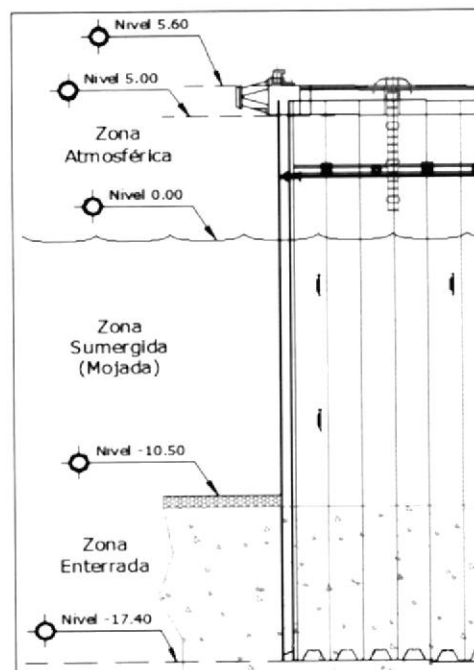


**FIGURA 2.2. ESQUEMA GENERAL DEL MUELLE**

Las profundidades de las tablestacas dependen de su ubicación, existiendo leves diferencias entre la parte frontal y los laterales. La zona mojada y enterrada se la considera constante en la parte

frontal y laterales, la zona de mareas no forma parte de la evaluación del sistema, debido a que su superficie posee recubrimiento.

En la *Figura 2.3* se muestra los niveles que encierran las zonas a considerar para la protección catódica, independiente qué tipo de protección catódica que se aplique; las áreas protegidas por SPC son aquellas que se encuentran constantemente en contacto con el electrolito, que en este caso serán las zonas mojadas y enterradas. La zona mojada comprende desde el nivel 0.00 hasta -10.50 m y la enterrada desde el nivel -10.50 m hasta -17.4 m.



**FIGURA 2.3. UBICACIÓN DE NIVELES EN TABLESTACADO**

### Características Generales del SPC actual.

El SPC actual del muelle cuenta con ánodos de sacrificio colocados y distribuidos en la superficie externa del tablestacado en contacto directo con el electrolito (agua y lecho). Consta de 268 ánodos de Aluminio A-30E cada uno con una masa de 14.24 Kg, diseñados para una vida útil de 4 años, conectados mecánicamente a la estructura en un extremo por soldadura y en el otro por unión empernada (ver *Figura 2.4*), de tal manera que exista contacto eléctrico entre dispersores y estructura. Estos fueron instalados en el año 2003 conjuntamente con la construcción del muelle.

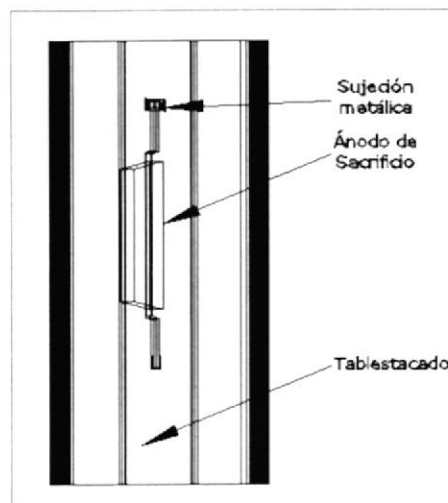


FIGURA 2.4. CONEXIÓN ENTRE ÁNODO Y TABLESTACA

## 2.2 Proceso de inspección.

Para el proceso de evaluación se hizo uso de instrumentos y herramientas para la inspección y recolección de datos; aplicando prácticas recomendadas y de esta manera obtener resultados para su posterior análisis. A continuación se presenta el proceso ejecutado para el diagnóstico del sistema.

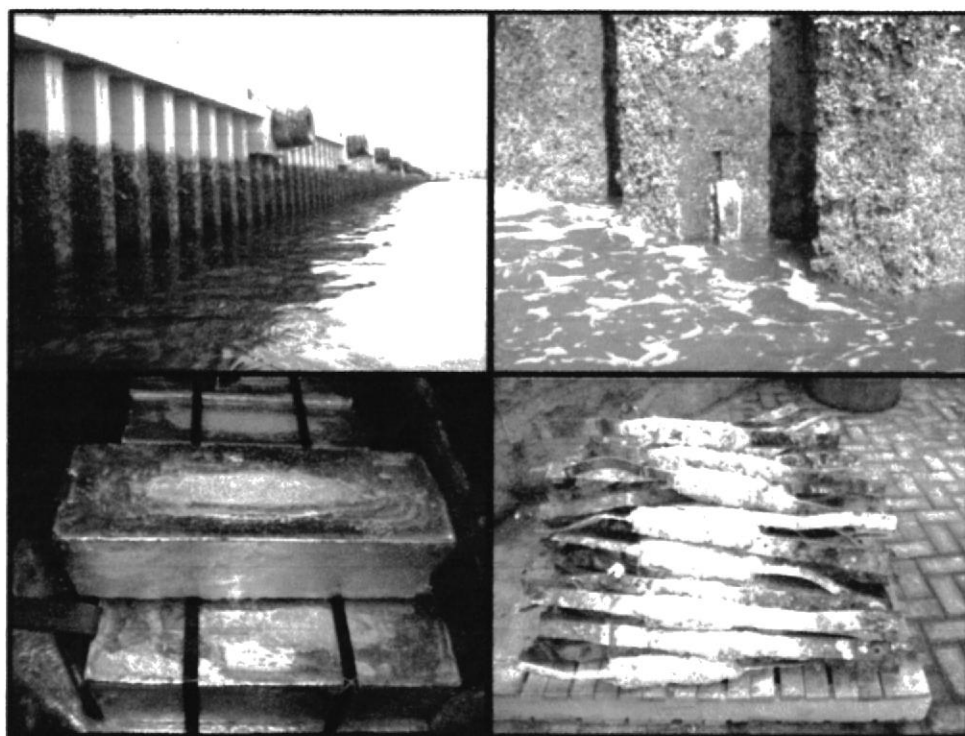
### Inspección visual

Consistió en observar la condición actual de los componentes del sistema instalado en las paredes de la tablestaca. En este punto se realizó una inspección general de las partes involucradas (tablestacas, ánodos, pernos y tuercas de sujeción) en un recorrido por el muelle desde una embarcación; así como también a ánodos desgastados que han sido separados de la estructura para su reemplazo.



**FIGURA 2.5. VISTA PANORAMICA DEL MUELLE**

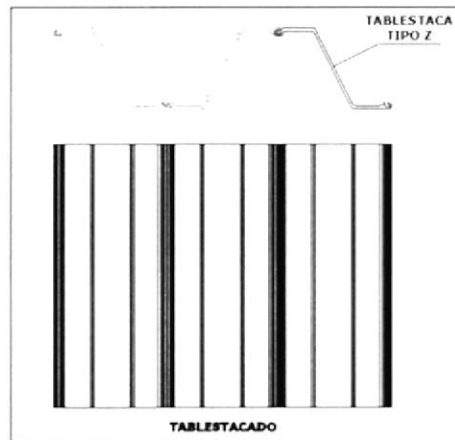
A continuación se presenta una secuencia de fotos (ver *Figura 2.6*) donde se muestran las evidencias con más relevancia hallada en este proceso.



**FIGURA 2.6. EVIDENCIA FOTOGRÁFICA**

### **Relevamiento estructural**

La estructura se encuentra constituida por tablestacas de acero con perfiles tipo "Z" (ver *Figura 2.7*), hincados entre sí en forma continua alrededor del muelle. Con las características geométricas del perfil usado se calculará posteriormente el área a proteger para la protección del sistema catódico a emplear.

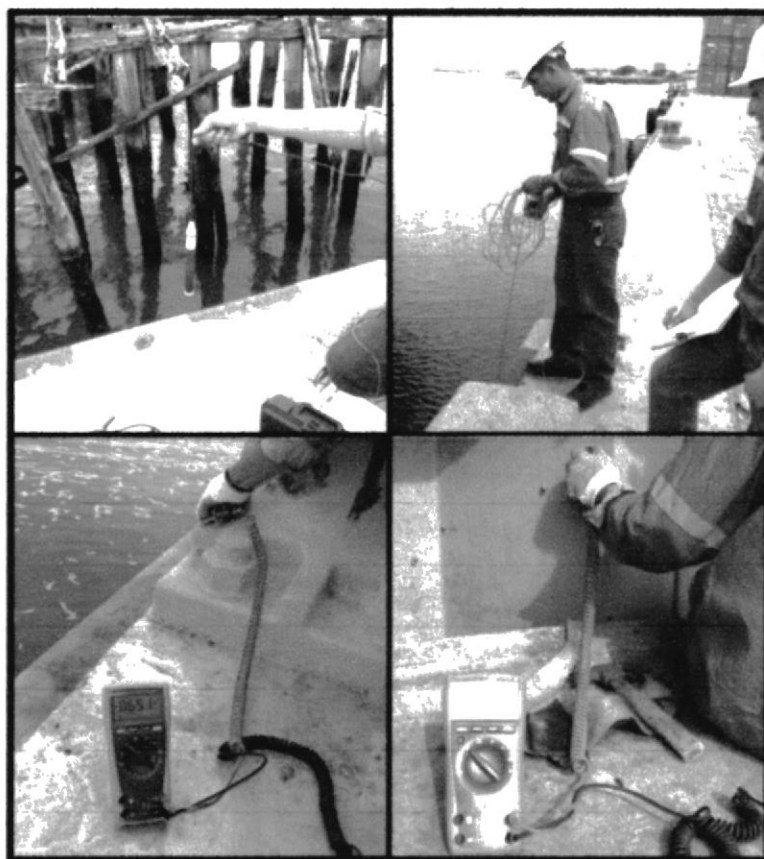


**FIGURA 2.7. PERFIL DE TABLESTACA TIPO Z**

En la construcción se empleó tablestacas ASTM A690, comúnmente utilizado en agua de mar, ya que tiene presencia combinada de Cobre (Cu) y Níquel (Ni), que entre sus características presenta una buena resistencia a la corrosión en comparación con otros tipos de acero.

#### **Medición de Potenciales Eléctricos.**

En la *Figura 2.8* se muestran las mediciones de potenciales en el borde del tablestacado con la ayuda de un electrodo de referencia portátil de plata / cloruro de plata (Ag/AgCl).



**FIGURA 2.8. TOMA DE POTENCIALES ELÉCTRICOS**

En estas mediciones se cumplió con el siguiente procedimiento en cada punto de medición de potenciales:



- Se realizó limpieza superficial en un área aproximada de 1  $\text{cm}^2$  de tal forma que exista conductividad eléctrica entre la estructura (tablestaca) e instrumento de medición (multímetro).
- Se conectaron los terminales del multímetro y se armó el sistema de la siguiente manera: el polo negativo del

multímetro al electrodo de referencia portátil de Ag/AgCl (previamente ensamblado con el contrapeso para evitar que flote) y el polo positivo al área descubierta de la estructura.

- Se sumergió el electrodo portátil lentamente en el agua en un punto cercano al tablestacado.
- Se encendió el multímetro en la opción de lecturas de voltaje de corriente continua. Las lecturas se realizaron con un multímetro de alta impedancia interna (20 Mega-ohmios).
- Se conectó el polo positivo del multímetro con la estructura y se registraron los valores cada cierta altura a medida de que se iba recogiendo el cable del electrodo.

Las mediciones obtenidas fueron registradas en la siguiente tabla.

**TABLA 3**  
**POTENCIALES ELÉCTRICOS EN TABLESTACADO**

| <b>MEDICIÓN DE POTENCIALES ELÉCTRICOS</b>   |                             |  |                              |                        |
|---|-----------------------------|--|------------------------------|------------------------|
| <b>PROYECTO:</b>  |                             | DISEÑO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA DE MUELLE                           |                              |                        |
| <b>EQUIPOS UTILIZADOS:</b>  |                             | MULTÍMETRO, ELECTRODO DE REFERENCIA PORTÁTIL (Ag/AgCl), HERRAMIENTAS MENORES |                              |                        |
| <b>FECHA DE INSPECCIÓN:</b>   |                             | Mayo del 2013  | <b>ESTRUCTURA PROTEGIDA:</b> | TABLESTACAS DEL MUELLE |
| <b>HORA INSPECCIÓN:</b>   |                             | 12:00 p.m.   | <b>PLANO REFERENCIAL:</b>    | Esquema mostrado       |
| <b>CROQUIS ESQUEMÁTICO</b>  |                             |  |                              |                        |
| <b>UBICACIÓN DE MEDICIÓN DE POTENCIALES</b>   |                             |  |                              |                        |
|           |                             |  |                              |                        |
|           |                             |  |                              |                        |
| <b>ÁNODOS:</b>  |                             |  |                              |                        |
| <b>TIPO:</b>  | Galvánico de Aluminio A-30E |  | <b>CANTIDAD:</b>             | 268                    |
| <b>PESO:</b>  | 14.24 Kg                    |  | <b>AÑO DE INSTALACIÓN:</b>   | 2003                   |
| <b>MEDICIONES DE POTENCIALES ELÉCTRICOS (mV)</b>  |                             |  |                              |                        |
| ITEM  | A [ Fondo ] (°)             | B [ 10 m. ] (°)  | C [ 15 m. ] (°)              | Observaciones          |
| 1   | -600                        | -588   | -641                         | Lateral Sur            |
| 2   | -596                        | -604   | -615                         | Frente                 |
| 3   | -595                        | -612   | -620                         | Frente                 |
| 4   | -631                        | -618   | -620                         | Frente                 |
| 5   | -635                        | -615   | -621                         | Frente                 |
| 6   | -650                        | -611   | -617                         | Frente                 |
| 7   | -669                        | -617   | -617                         | Frente                 |
| 8   | -693                        | -624   | -620                         | Frente                 |
| 9   | -663                        | -622   | -621                         | Frente                 |
| 10  | -658                        | -616   | -620                         | Frente                 |
| 11  | -652                        | -616   | -621                         | Frente                 |
| 12  | -628                        | -630   | -625                         | Frente                 |
| 13  | -596                        | -610   | -624                         | Frente                 |
| 14  | -594                        | -651   | -623                         | Frente                 |
| 15  | -630                        | -610   | -622                         | Frente                 |
| 16  | -638                        | -610   | -622                         | Frente                 |
| 17  | -630                        | -607   | -619                         | Frente                 |
| 18  | -613                        | -608   | -619                         | Frente                 |
| 19  | -616                        | -610   | -624                         | Frente                 |
| 20  | -625                        | -608   | -621                         | Frente                 |
| 21  | -650                        | -594   | -618                         | Frente                 |
| 22  | -602                        | -602   | -619                         | Frente                 |
| 23  | -579                        | -589   | -614                         | Frente                 |
| 24  | -596                        | -597   | -609                         | Frente                 |
| 25  | -630                        | -607   | -671                         | Frente                 |
| 26  | -622                        | -595   | -611                         | Frente                 |
| 27  | -632                        | -616   | -621                         | Frente                 |
| 28  | -661                        | -602   | -614                         | Frente                 |
| 29  | -628                        | -610   | -615                         | Frente                 |
| 30  | -638                        | -617   | -621                         | Frente                 |
| 31  | -650                        | -695   | -650                         | Lateral Norte          |
| <b>Promedios</b>  | <b>-629</b>                 | <b>-613</b>  | <b>-622</b>                  | <b>Promedios</b>       |
| <b>OBSERVACIONES GENERALES:</b>   |                             |  |                              |                        |
| (*) Medidas realizadas desde la plataforma  |                             |  |                              |                        |
| Las mediciones fueron tomadas con respecto a un electrodo de referencia portátil de Ag/AgCl |                             |  |                              |                        |
| El promedio general obtenido fue de 621 mV  |                             |  |                              |                        |

### 2.3 Observaciones y Resultados obtenidos.

En la inspección visual correspondiente en el tablestacado se encontró lo siguiente:

- Los ánodos retirados presentaron altos niveles de desgaste y trabajo de instalación inadecuado en la unión soldada; además, algunos de estos se encuentran instalados por encima del nivel de marea baja.
- El promedio de las lecturas registradas en las mediciones de potenciales eléctricos efectuadas entre el tablestacado y electrodo de referencia portátil de Ag/AgCl fue de - 621 mV.
- Se apreció gran cantidad de organismos marinos adheridos a la superficie en la zona de mareas, lo mismo ocurre con las platinas y tuercas de sujeción de los tensores, además de encontrarse ligeramente corroídos.
- Debido al difícil acceso, no se pudo observar los ánodos instalados en el tablestacado posterior, por lo que no se presentan observaciones del estado de los mismos. Sin embargo, en la información técnica recibida, se detalla una vida útil de 25 años para la protección catódica en esta zona.

- Las conexiones de los ánodos repuestos con el tablestacado presentan alto grado de corrosión, lo que genera gran resistencia a la circulación de corriente de protección.
- En los planos entregados por los responsables de la seguridad del muelle indicaron que en la parte frontal y laterales se encuentran 245 ánodos instalados versus 292 del diseño original. Adicionalmente, en la última tabla de inspección realizada por terceros al SPC, presentaron 268 ánodos instalados.
- En los cálculos de diseño recibidos en la etapa de relevamiento de información, en el cálculo de área se asumió la geometría de las superficies de protección tanto frontal como laterales del tablestacado como planchas rectangulares planas; obviando la forma de los perfiles tipo "Z" instalados, por lo que el área total de protección del diseño original calculada fue de 6775.75 m<sup>2</sup>. Dicha área fue calculada nuevamente considerando esta vez la forma de cada tablestaca, obteniendo un resultado de 9418.72 m<sup>2</sup>; esto representa una diferencia del 28 % en los cálculos de diseño para obtener la corriente de protección de la estructura.

## **2.4 Análisis de resultados.**

De los resultados obtenidos de mediciones y observaciones realizadas se evidencia que los potenciales eléctricos no se encuentran en valores adecuados para proteger a la estructura catódicamente, al no cumplir con ninguno de los criterios para protección catódica.

Además, la no aplicación de una correcta práctica de procedimientos adecuados para el diseño, instalación y monitoreo del SPC por ánodos galvánicos, genera una inadecuada protección provocando el reemplazo de dispersores prematuramente por tener una menor vida útil, por tales motivos es necesario aplicar mejoras en el sistema existente.

## **2.5 Selección del Sistema de Protección Catódica.**

El sistema actual no ofrece el nivel de protección adecuada para la superficie externa del muelle, para alcanzar una operación óptima del sistema se requerirá que la corriente necesaria para el suministro sea la ideal y que cubra de manera uniformemente toda la superficie del tablestacado del muelle. Para esto se tiene dos opciones:

- a) Seleccionar otro tipo de ánodo para dar una vida útil mayor a la actual y suministre la corriente mínima necesaria para la protección de la estructura. Considerando los costos de instalación, monitoreo, mantenimiento y reemplazo.
  
- b) Implementar un SCP por corrientes impresas con una vida útil superior, considerando un alto costo inicial y una fuente de alimentación eléctrica constante para la operación del sistema.

Para seleccionar el método para proteger la estructura se tomará en cuenta los costos de instalación, monitoreo, mantenimiento, reemplazo y lo más importante; la vida útil del sistema. Teniendo en cuenta que el muelle no se debe interrumpir las operaciones de carga y descarga; además de no tener fuentes de energía eléctrica cercanas al muelle y dificultad de ejecutar trabajos civiles para instalación de cables eléctricos, se descarta el método con corrientes impresas, para priorizar el método de ánodos galvánicos con la selección de un ánodo diferente al del diseño original; que proporcione la protección adecuada con una vida de útil mayor.

# CAPÍTULO 3

## 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS GALVÁNICOS.

Este tipo de estructuras de acero, están expuestas en un medio que reduce su vida útil, tales como la oxidación por variación de marea, agentes biológicos, salinidad, entre otros.

Se prevé proteger a la estructura por un periodo mayor al actual, con un diseño que permita proporcionar una corriente eléctrica suficiente con una mejor distribución de corriente en su superficie, de tal manera que cumpla con el criterio de protección seleccionado.

Para diseñar este sistema de protección catódica por ánodos galvánicos se tomará en cuenta las siguientes consideraciones.

- Mediciones preliminares
- Parámetros de diseño

- Requerimiento de corriente
- Selección de ánodo de sacrificio y cálculo de resistencia
- Expectativa de vida útil

### **3.1 Mediciones Preliminares.**

Para el diseño del sistema a emplear, se necesita conocer el estado del sistema actual que protege al muelle, características de la estructura como también el medio donde este se encuentra expuesto. Además los potenciales eléctricos fueron ejecutados en la evaluación técnica del capítulo anterior, donde mostraron valores no adecuados para el nivel de protección.

### **3.2 Parámetros de Diseño.**

Para el dimensionamiento de un SPC se requiere de información técnica de la estructura a proteger que en conjunto con las mediciones de campo, constituyen los datos fundamentales para la elaboración del diseño, siendo denominados parámetros de diseño. Con el fin de alcanzar esto se describe a continuación que información que se requiere para el diseño de un SPC.

### Tipo de material del tablestacado

Todo el muelle está formado por tablestacas del mismo tipo de acero; ASTM A690, comúnmente usado para ambientes marinos por la presencia combinada de Cobre (Cu) y Níquel (Ni), que tiene mejor resistencia a la corrosión en comparación con otros tipos de acero.

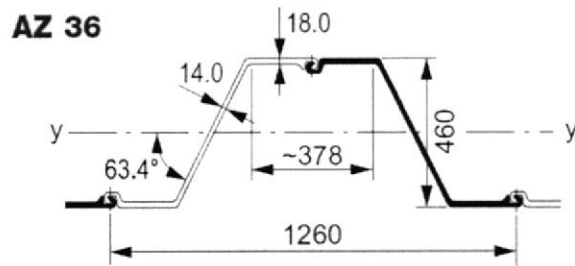
Adicionalmente se muestra en *Tabla 4* la composición química del acero de las tablestacas tipo Z empleado en la construcción del muelle.

**TABLA 4**  
**ESPECIFICACIONES DE ACERO ASTM 690**

| COMPOSICIÓN QUÍMICA (%) |       |       |      |      |      |       |
|-------------------------|-------|-------|------|------|------|-------|
| C                       | Mn    | P     | S    | Si   | Cu   | Ni    |
| 0.22                    | 0.60- | 0.08- | 0.04 | 0.40 | 0.50 | 0.40- |
| máx.                    | 0.90  | 0.15  | máx. | máx. | máx. | 0.75  |

### Área a proteger

Para conocer el área que requerimos proteger, necesitamos conocer la forma y dimensiones de la tablestaca usada (ver *Figura 3.1*).



**FIGURA 3.1. DIMENSIONES Y ESPESORES DE SECCIÓN DE TABLESTACA**

Las propiedades geométricas de la tablestaca se muestran en la *Tabla 5*.

**TABLA 5**  
**PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE TABLESTACA**

| Tipo de sección de tablestaca | Área de sección transversal (m <sup>2</sup> ) | Área de superficie (m <sup>2</sup> /m) |
|-------------------------------|---|--|
| AZ 36                         | 0.0155  | 1.86                                   |

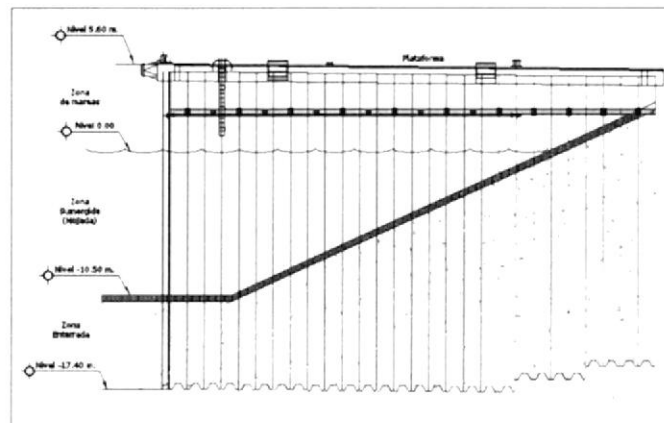
Para obtener las áreas de las zonas a proteger tanto sumergidas como enterradas se considerará la profundidad de cada zona del tablestacado en función de la ubicación donde se requiera proteger.

Se deberá entonces separar las aéreas a proteger considerando al muelle en tres secciones. La primera consta del tablestacado frontal y las dos restantes en tablestacado lateral norte y sur

respectivamente. Todas las secciones constan de dos partes; la primera sumergida o mojada (expuesta directamente al agua mar) y la segunda enterrada.

El diseño por ánodos galvánicos, no incluye las áreas internas de los tablestacados frontal, posterior o de anclaje y transversales, en vista que no existe conexión posible de manera física entre los ánodos externos que serán instalados en las tablestacas del muelle principal.

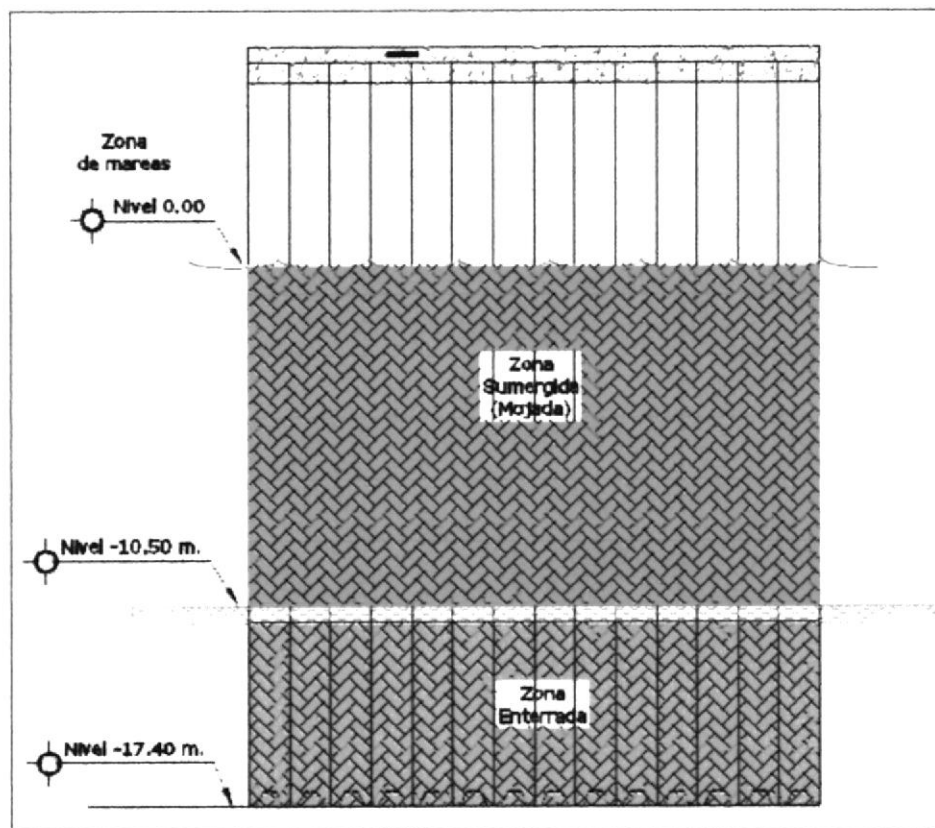
Las profundidades de la sección frontal son constantes en toda su longitud, mas no las secciones laterales los cuales presentan diferentes profundidades de hincado de las tablestacas (ver *Figura 3.2*) que se deberán considerar para el cálculo de las áreas.



**FIGURA 3.2. SECCIÓN LATERAL DEL TABLESTACADO**

Teniendo en cuenta que la longitud transversal frontal de cada valle mide 1.88 m y la cantidad de valles en la parte frontal y laterales (norte y sur) son 232 y 56 respectivamente, cada valle (ver *Figura 3.1*) está formado por dos perfiles en forma de Z. De acuerdo a las consideraciones mencionadas anteriormente y a los esquemas siguientes, se detallan los cálculos de áreas.

### Áreas de zona frontal



**FIGURA 3.3. ÁREAS DE ZONAS SUMERGIDA Y ENTERRADA DE PARTE FRONTAL**

Zona mojada = Longitud transversal\* Longitud mojada\*  
Cantidad

Zona mojada = 1.88 m \* 10.50 m \* 232

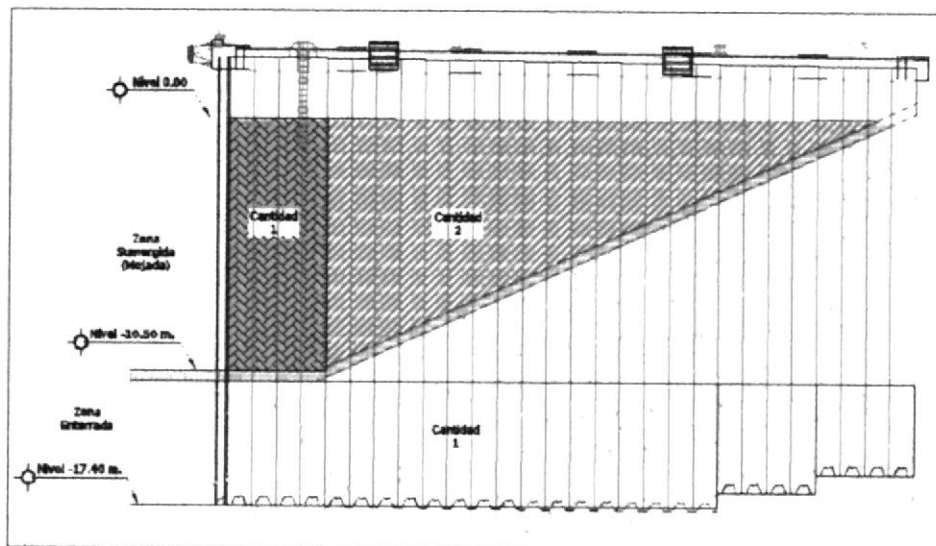
**Zona mojada = 4579.68 m<sup>2</sup>**

Zona enterrada = Longitud transversal\* Longitud enterrada\*  
Cantidad

Zona enterrada = 1.88 m \* 6.9 m \* 232

**Zona enterrada = 3009.50 m<sup>2</sup>**

### Áreas de zonas laterales sumergidas



**FIGURA 3.4. ÁREAS DE ZONAS SUMERGIDAS**

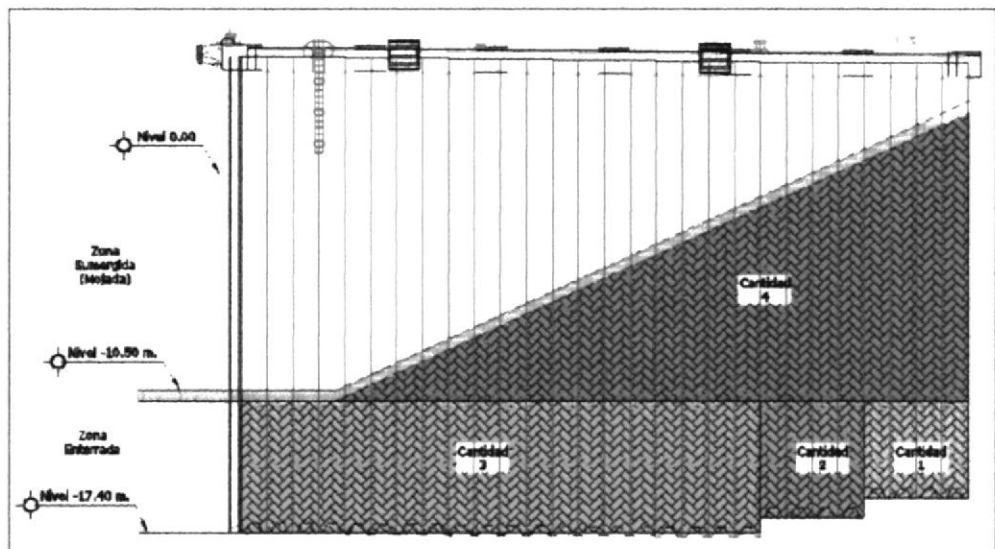
**LATERALES NORTE Y SUR**

$$\text{Zona mojada} = (\text{Longitud transversal} * \text{Longitud mojada} * \text{Cantidad}_1) + (\text{Longitud transversal} * \text{Longitud mojada} * \text{Cantidad}_2 * 0.5)$$

$$\text{Zona mojada} = (1.88 \text{ m} * 10.50 \text{ m} * 4) + (1.88 \text{ m} * 10.5 \text{ m} * 18 * 0.5)$$

$$\text{Zona mojada} = 256.62 \text{ m}^2$$

### Áreas de zonas laterales enterradas



**FIGURA 3.5. ÁREAS DE ZONAS ENTERRADAS**

### LATERALES NORTE Y SUR

$$\text{Zona enterrada} = (\text{Longitud transversal} * \text{Longitud mojada}_1 * \text{Cantidad}_1) + (\text{Longitud transversal} * \text{Longitud mojada}_2 * \text{Cantidad}_2) + (\text{Longitud transversal} * \text{Longitud mojada}_3 * \text{Cantidad}_3)$$

$$\begin{aligned} & \text{Longitud mojada}_3 * \text{Cantidad}_3 + (\text{Longitud} \\ & \text{transversal} * \text{Longitud mojada}_4 * \text{Cantidad}_4 * 0.5) \\ \text{Zona enterrada} = & (1.88 \text{ m} * 5.26 \text{ m} * 4) + (1.88 \text{ m} * 6.15 \text{ m} * 4) \\ & + (1.88 \text{ m} * 6.9 \text{ m} * 20) + (1.88 \text{ m} * 13.87 \text{ m} * 24 * \\ & 0.5) \\ \text{Zona enterrada} = & \quad \mathbf{658.15 \text{ m}^2} \end{aligned}$$

A continuación se presenta la *Tabla 6* donde se muestra un resumen de los resultados de las áreas de la zona mojada y enterrada del tablestacado frontal y laterales del muelle, para posteriormente utilizarlos en el cálculo de corriente total requerida para el sistema.

**TABLA 6**  
**RESULTADOS DE ÁREAS A PROTEGER**

| ZONA      | FRENTE   | LATERALES |                              | ÁREAS [m <sup>2</sup> ] |
|-----------|----------|-----------|------------------------------|-------------------------|
|           |          | NORTE     | SUR                          |                         |
| SUMERGIDA | 4579.68  | 256.62    | 256.62                       | 5092.92                 |
| ENTERRADA | 3009.504 | 658.15    | 658.15                       | 4325.8                  |
|           |          |           | <b>TOTAL [m<sup>2</sup>]</b> | <b>9418.72</b>          |

### Densidad de corriente

Este parámetro corresponde valores para cálculos clásicos en este tipo de estructuras, con densidades de corriente de "arranque" o de

“start up” muy elevadas, las que permiten modificar las condiciones de la interfase, a través de la deposición de materiales calcáreos (básicamente carbonato de calcio e hidróxido de magnesio), los que a su vez dificultan la llegada del reactivo oxidante por excelencia, del oxígeno disuelto en el agua del estuario.

La superficie mojada a proteger de acuerdo a cálculos presentados en la *Tabla 6* es de 5092.92 m<sup>2</sup>; y, para la superficie enterrada de 4325.80 m<sup>2</sup>.

En zona de mareas se tiene previsto mejorar el sistema de pinturas actual, de esta manera no incluye en los cálculos para el requerimiento de corriente de protección para el tablestacado.

La densidad de corriente adoptada para la superficie enterrada será de 10 mA/m<sup>2</sup>, por lo que es posible calcular la corriente mínima a ser provista por los ánodos de sacrificio a ser instalados.

### **Eficiencia de recubrimiento**

La protección catódica actúa generalmente sobre estructuras que poseen recubrimiento como pintura, alquitrán, etc. Entonces, la corriente de protección resulta ser entonces un porcentaje pequeño

con respecto al necesario para proteger a la estructura; dado que los recubrimientos presentan defectos ya sean por fabricación o se formaran durante el proceso de instalación como poros, rasguños, ralladuras, imperfecciones; entre otros. Normalmente esta eficiencia disminuye con el paso del tiempo por el envejecimiento mismo del material de recubrimiento.

En este caso particular la superficie frontal húmeda a proteger no tienen ningún tipo de recubrimiento; por lo tanto, la eficiencia es cero, de tal manera que no interviene en los cálculos para requerimientos de corriente de protección.

La zona atmosférica y de mareas posee recubrimiento pero no interviene en el diseño al no encontrarse constantemente en un medio electrolítico (agua).

### **3.3 Cálculo de corriente requerida.**

El cálculo de la corriente de protección se la obtiene en función de la densidad de corriente, el área de la superficie a proteger y la eficiencia del recubrimiento empleado en el tablestacado.

Con los datos adquiridos se procederá a realizar el cálculo de la corriente requerida con el uso de la siguiente ecuación:

$$I_{inicial} = A_z \times D_{Cz} \times (1 - e) \quad (6)$$

Donde:

$I_{inicial}$ : Corriente total requerida (A)

$A_z$ : Área por zona expuesta ( $m^2$ )

$e$ : Eficiencia de recubrimiento

$D_{Cz}$ : Densidad de corriente en función de la zona expuesta ( $mA/m^2$ )

Se considera 2 tipos de densidad, la primera aplica a la zona sumergida (mojada) que se encuentra directamente en contacto con el agua de mar que tomará el valor de  $280 \text{ mA/m}^2$  y para la zona enterrada  $10 \text{ mA/m}^2$ , valores que son usados para la protección de estructuras sumergidas en ambientes marinos y brinda un nivel adecuado de protección<sup>(1)</sup>. Además la superficie no posee ningún tipo de recubrimiento ( $e = 0$ ); por lo tanto la ecuación (6) queda:

$$I_{inicial} = A_z \times D_{Cz} \quad (7)$$

---

<sup>1</sup> Información proporcionada por Instructor NACE, Ing. Héctor Albaya (CP4 – Cathodic Protection Specialist).

Los resultados obtenidos de la aplicación de los valores antes mencionados de acuerdo al área y zona expuesta de superficie a proteger se muestran a continuación:

$$I_{inicial} = 0.280 \text{ A/m}^2 * 5093 \text{ m}^2 + 0.010 \text{ A/m}^2 * 4326 \text{ m}^2$$

$$I_{inicial} = 1426.04 \text{ A} + 43.26 \text{ A} = 1470 \text{ A}$$

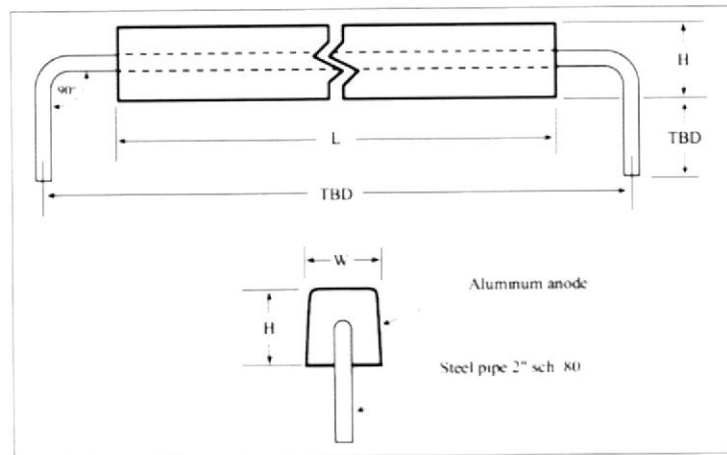
### 3.4 Selección de Ánodos de Sacrificio y Cálculo de Resistencia.

Los ánodos de sacrificio son aleaciones como el magnesio, zinc o aluminio; estas aleaciones se obtienen de diferentes formas, tamaños y pesos para producir una corriente de protección para la estructura a proteger.

Para aplicaciones en ambientes marinos se usan principalmente ánodos de aluminio; porque tienen una velocidad de consumo mucho menor que los de zinc o magnesio.

Existen varias aleaciones patentadas, con ligeras variaciones en su composición química y propiedades electroquímicas. Los manuales de referencia para cálculos de protección catódica, ofrecen tablas con valores estándar; para efectos de cálculo se ha seleccionado el ánodo con denominación MM-B235 (Ver *Figura 3.6*), con

composición química MA-3 Alloy. El ánodo escogido se encuentra anexado en el Apéndice B.



**FIGURA 3.6. ÁNODO DE ALUMINIO**

Las características básicas del ánodo con esta denominación; son las siguientes:

|                       |   |                     |
|-----------------------|---|---------------------|
| Aleación              | = | Aluminio/Zinc/Indio |
| Peso neto             | = | 90.09 Kg (200 Lb)   |
| L (longitud de ánodo) | = | 203.20 cm (108")    |
| W (ancho de ánodo)    | = | 15.24 cm (6")       |
| H (altura de ánodo)   | = | 12.70 cm (5")       |

Para calcular el diámetro equivalente, se utiliza el valor del perímetro que resulta de 55.80 cm.

$$D_{\text{equivalente}} = \frac{\text{perímetro}}{\pi} \quad (8)$$

$$D_{\text{equivalente}} = \frac{55.80 \text{ cm}}{\pi} = 17.75 \text{ cm}$$

Para calcular los valores de resistencia del ánodo se utilizará la expresión de Dwight:

$$R_{\text{ánodo}} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \left[ \ln \left( \frac{4 \cdot L}{r} \right) - 1 \right] \quad (9)$$

Donde:

$R_{\text{ánodo}}$  = Resistencia de ánodo ( $\Omega$ )

$\rho$  = Resistividad de agua de mar ( $\Omega$ -cm)

$L$  = Longitud de ánodo (cm)

$r$  = Radio equivalente del ánodo (cm)

Para adquirir la resistividad de agua alrededor del muelle, se tomó varias muestras (ver *Figura 3.7*); para el efecto se empleó un equipo adecuado para este fin que fue descrito anteriormente utilizado conjuntamente con un Soil Box.



**FIGURA 3.7. TOMA DE MUESTRAS PARA RESISTIVIDADES  
EÉCTRICAS EN AGUA DEL MUELLE**

De las mediciones obtenidas mostradas en la *Tabla 7* se obtuvo un promedio de 30 ohm-cm.

**TABLA 7  
RESISTIVIDADES ELÉCTRICAS EN AGUA DE MUELLE**

| MEDICIÓN DE RESISTIVIDADES EN AGUA DEL MUELLE  |   |                         |                     |                       |               |
|--|---|-------------------------|---------------------|-----------------------|---------------|
| OBRA: DISEÑO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN CÁTÓDICA DE MUELLE   |   |                         |                     |                       |               |
| ESCALA DE MEDICIÓN:  | MEDIDOR DE RESISTIVIDAD (VIBROGROUND) SOL BOX |                         |                     |                       |               |
| FICHA DE INSPECCIÓN:   | Mayo del 2013                                 | ESTRUCTURA PROTEGIDA:   | Talleres del muelle |                       |               |
| HORA INSPECCIÓN:   | 12:00 p.m.                                    | CONDICIONES CLIMÁTICAS: | Normal              |                       |               |
| TABLA DE MEDICIONES  |   |                         |                     |                       |               |
| MUESTRA  | LECTURA DEL EQUIPO                            | ESCALA (FACTOR MULT.)   | RESISTENCIA [ohm]   | RESISTIVIDAD [ohm-cm] | OBSERVACIONES |
| 1  | 3.0   | 10                      | 30                  | 30                    | Zona Norte    |
| 2  | 3.1   | 10                      | 31                  | 31                    | Zona Norte    |
| 3  | 3.0   | 10                      | 30                  | 30                    | Zona Central  |
| 4  | 3.0   | 10                      | 30                  | 30                    | Zona Central  |
| 5  | 3.1   | 10                      | 31                  | 31                    | Zona Central  |
| 6  | 3.0   | 10                      | 30                  | 30                    | Zona Central  |
| 7  | 3.2   | 10                      | 32                  | 32                    | Zona Central  |
| 8  | 3.1   | 10                      | 31                  | 31                    | Zona Central  |
| 9  | 3.1   | 10                      | 31                  | 31                    | Zona Central  |
| 10   | 3.3   | 10                      | 33                  | 33                    | Zona Central  |
| 11   | 2.9   | 10                      | 29                  | 29                    | Zona Central  |
| 12   | 3.0   | 10                      | 30                  | 30                    | Zona Central  |
| 13   | 3.1   | 10                      | 31                  | 31                    | Zona Central  |
| 14   | 3.1   | 10                      | 31                  | 31                    | Zona Central  |
| 15   | 3.2   | 10                      | 32                  | 32                    | Zona Central  |
| 16   | 3.0   | 10                      | 30                  | 30                    | Zona Central  |
| 17   | 3.0   | 10                      | 30                  | 30                    | Zona Central  |
| 18   | 3.0   | 10                      | 30                  | 30                    | Zona Central  |
| 19   | 3.0   | 10                      | 30                  | 30                    | Zona Central  |
| 20   | 3.3   | 10                      | 33                  | 33                    | Zona Central  |
| 21   | 3.1   | 10                      | 31                  | 31                    | Zona Central  |
| 22   | 3.0   | 10                      | 30                  | 30                    | Zona Central  |
| 23   | 3.3   | 10                      | 33                  | 33                    | Zona Central  |
| 24   | 3.1   | 10                      | 31                  | 31                    | Zona Central  |
| 25   | 3.1   | 10                      | 31                  | 31                    | Zona Central  |
| 26   | 2.9   | 10                      | 29                  | 29                    | Zona Central  |
| 27   | 3.2   | 10                      | 32                  | 32                    | Zona Central  |
| 28   | 3.0   | 10                      | 30                  | 30                    | Zona Central  |
| 29   | 2.9   | 10                      | 29                  | 29                    | Zona Sur      |
| 30   | 2.9   | 10                      | 29                  | 29                    | Zona Sur      |
| Promedio   |   |                         |                     | 30                    | 30.0          |
| OBSERVACIONES ADICIONALES:   |   |                         |                     |                       |               |
| Para realizar las mediciones de resistividad del agua se tomaron muestras en tres zonas del muelle (zona norte, sur y central) |   |                         |                     |                       |               |

Con un radio equivalente de 8.88 cm y con la resistividad obtenida previamente se obtiene:

$$R_{\text{ánodo}} = 0.0826 \Omega$$

Para calcular la resistencia que resulta del desgaste del ánodo, normalmente se utiliza un valor del radio equivalente igual a la mitad del radio original, o sea 4.44 cm y entonces la resistencia del ánodo desgastado será:

$$R_{\text{ánodo desgastado (derated)}} = 0.0989 \Omega$$

### 3.5 Cálculo de corriente inicial por ánodo.

La corriente inicial por ánodo se la obtiene usando la siguiente fórmula:

$$I_{\text{inicial-ánodo}} = \Delta V_i / R_{\text{ánodo}} \quad (10)$$

Donde:

$I_{\text{inicial-ánodo}}$ : Corriente proporcionada por el ánodo (A)

$\Delta V_i$ : Fuerza impulsora inicial para la circulación de la corriente (V)

$R_{\text{ánodo}}$ : Resistencia de contacto del ánodo en contacto con el agua de mar ( $\Omega$ )

La fuerza impulsora es la diferencia de potencial disponible, cuando se vincula el ánodo a la tablestaca, que resulta de la diferencia entre el potencial operativo del ánodo de sacrificio de aluminio y el potencial natural de la tablestaca, expresada en Voltios.

El potencial del ánodo seleccionado (ver *Tabla 8*) es de -1.10 Voltios referidos a un electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) y para el potencial de la tablestaca, se tomará el valor medido en campo de -0.6 Voltios en promedio, también referidos al mismo electrodo.

**TABLA 8**  
**PROPIEDADES ELECTROQUÍMICAS DEL ÁNODO**

| <b>PROPIEDAD</b>                 | <b>VALOR</b>     | <b>UNIDAD</b>                             |
|----------------------------------|------------------|---|
| Capacidad electroquímica teórica | 2959             | A-hora/Kg                                 |
|                                  | -1345            | (A-h/lb)                                  |
| Eficiencia                       | 87               | %   |
| Capacidad electroquímica real    | 2574             | A-hora/Kg                                 |
|                                  | -1170            | (A-h/lb)                                  |
| Consumo real                     | 3.4              | Kg/A-año                                  |
|                                  | -7.48            | (Lbs/A-año)                               |
| Potencial nominal                | -1100<br>(-1150) | mV <sub>SSC</sub><br>(mV <sub>CSE</sub> ) |

De esta forma, la diferencia de potencial impulsor para la corriente a proveer por los ánodos resulta (en términos de valor absoluto) de 500 mV (0.50 V).

La corriente inicial por ánodo resulta entonces:

$$I_{\text{inicial-ánodo}} = 0.50 \text{ V} / 0.0826 \ \Omega = 6.05 \text{ A}$$

Para calcular el número de ánodos capaz de proveer los 1470 Amperios iniciales tiene:

$$N_{\text{ánodos}} = I_{\text{inicial-ánodo}} / I_{\text{ánodo}} \quad (11)$$

$$N_{\text{ánodos}} = 1470 \text{ A} / 6.05 \text{ A} = 243 \equiv 250 \text{ ánodos}$$

Asumiendo que para la corriente inicial entregada por los 250 ánodos de Aluminio, el nivel de polarización alcanzado es de -0.9  $V_{\text{SSC}}^{(2)}$ , el valor de la corriente de mantenimiento por ánodo resultaría.

$$I_{\text{mantenimiento}} = \Delta V_f / R_{\text{ánodo desgastado (derated)}} \quad (12)$$

$\Delta V_f$ : Fuerza impulsora final para la circulación de la corriente (V)

$R_{\text{ánodo desgastado}}$ : Resistencia de ánodo desgastado en contacto con el agua de mar ( $\Omega$ )

$$I_{\text{mantenimiento}} = |-1.10 - (-0.9)| / 0.0989 \ \Omega$$

$$I_{\text{mantenimiento}} = 0.20 \text{ V} / 0.0989 \ \Omega = 2.02 \text{ A}$$

<sup>2</sup> Todos los potenciales a que se hará referencia, serán referidos al electrodo de SSC, es decir, plata /cloruro de plata, por sus siglas en inglés.

### 3.6 Expectativa de vida útil de ánodos.

De las propiedades electroquímicas del ánodo (ver *Tabla 8*) se obtiene la capacidad electroquímica real (A-hora/kg).

Capacidad electroquímica real = 2959 A-hora/Kg

Para calcular la capacidad electroquímica necesaria al cabo de 15 años, se estima que la corriente inicial (corriente de start up o corriente de arranque) requiere un periodo mínimo de 60 días para lograr la formación de los depósitos calcáreos, por lo que la capacidad requerida será:

$$\text{Capacidad total} = I_{\text{inicial-ánodo}} * 60 * 24(\text{horas}) + I_{\text{mantenimiento}} * 15 * 365 * 24(\text{hora}) \quad (13)$$

$$\text{Capacidad total} = 6.05 * 60 * 24 + 2.02 * 15 * 365 * 24$$

$$\text{Capacidad total} = 8712 + 265428$$

$$\text{Capacidad total} = 274140 \text{ A-hora}$$

Para la capacidad disponible se toma la eficiencia de corriente (87%) del ánodo seleccionado (ver *Tabla 8*) para obtener:

$$\text{Capacidad disponible} = \text{Peso por ánodo (Kg/ánodo)} * 0.87 * \text{capacidad electroquímica teórica (A-hora/Kg)} \quad (14)$$

$$\text{Capacidad disponible} = 90.90 * 0.87 * 2959$$

$$\text{Capacidad disponible} = 234006.59 \text{ A-hora}$$

Por lo tanto; la capacidad total requerida supera la capacidad disponible, por lo que es dable de esperar una expectativa útil superior al valor que calcularemos a continuación.

Tomando la capacidad calculada para cada ánodo de 90.90 Kg indicada anteriormente y 2.02 Amperios drenado por cada ánodo, la expectativa de vida útil será:

$$\text{Expectativa vida útil} = \text{Capacidad disponible} / I_{\text{mantenimiento}} \quad (15)$$

$$\text{Expectativa vida útil} = 234006.59 \text{ A-hora} / 2.02 \text{ A}$$

$$\text{Expectativa vida útil} = 115844.85 \text{ horas}$$

$$\text{Expectativa vida útil} = 13.22 \text{ años}$$

### 3.7 Distribución y ubicación de Ánodos.

Para un correcto funcionamiento del sistema los ánodos deberán permanecer siempre en contacto con el electrolito (agua); por lo tanto, se tendrá en cuenta colocarlos en la zona sumergida que

comprende desde el nivel 0.00 (punto más bajo de marea) hasta -10.50 m donde empieza la zona enterrada.

Los ánodos serán instalados en los valles de la parte frontal y laterales del tablestacado, distribuida de manera uniforme para una mejor distribución de corriente sobre la superficie a proteger, la ubicación y distribución de los ánodos a instalar en el tablestacado se encuentran anexados en el Apéndice A.

#### **Listado de Materiales a emplear**

La cantidad de materiales requeridos para la instalación de este tipo de protección es mínimo, debido a que cada ánodo será directamente instalado en posición vertical sobre el tablestacado por medio de sujeción mecánica. El ánodo cuenta con un alma de acero (tubo) que sirve de estructura soportante para la aleación de aluminio; para facilitar los trabajos de soldadura sub-acuática húmeda, será unido a un perfil de acero en taller para formar un conjunto ánodo-soporte y este a su vez sea soldado en la zona sumergida del tablestacado; en la *Tabla 9* se muestra la lista de materiales que será necesario para implementar el sistema.

**TABLA 9**  
**LISTA DE MATERIALES PARA EL SPC EN**  
**TABLESTACAS DEL MUELLE**

| <b>ITEM</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>UNIDAD</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>                              |
|-------------|-----------------|---------------|---|
| 1           | 250             | u             | Aluminium Anode MA-3 Alloy / 90,90 Kg.          |
| 2           | 500             | u             | Soportes de acero 125x50x6 mm. longitud 150 mm. |

### **3.8 Factibilidad Técnico – Económica.**

Se procede al análisis de factibilidad del sistema propuesto para el tablestacado, para lo cual se analizará alternativas técnicas viables para la protección de la estructura, en función de la vida útil, operación y mantenimiento.

Para proteger este tipo de estructuras se requiere de una corriente de protección elevada, por lo cual un sistema por corrientes impresas sería lo ideal. Pero, por el tipo de infraestructura sería dificultosa la implementación de dicho sistema; ya que para su instalación, la plataforma del muelle se encuentra operativa con apilamiento de carga, frecuentes movimiento de grúas, camiones, lo que implicaría una difícil ubicación cercana de los transformadores-rectificadores necesarios para la protección del tablestacado; estos a su vez necesitarían alimentación eléctrica

constante y el cableado involucraría rotura de hormigón en la plataforma.

Con estas observaciones y la vida útil estimada (13 años) en los cálculos para los ánodos de sacrificio, es viable la instalación de un sistema por ánodos galvánicos. Además, la instalación es relativamente fácil, y no necesitan de alimentación eléctrica externa.

#### **Alternativas Probables.**

Se enuncian a continuación los posibles escenarios para proteger catódicamente el tablestacado:

- Emplear el actual sistema instalado con ánodos galvánicos (diseño original); manteniendo cantidad, características y dimensiones de ánodos.
- Emplear ánodos galvánicos con diferentes dimensiones, cantidad y tipo de ánodos.

#### **Análisis de Factibilidad del Sistema Catódico Actual.**

Para realizar un análisis técnico-económico del sistema actual que consta de ánodos galvánicos, se consideró la cantidad de

dispersores repuestos en la última inspección realizada. El procedimiento empleado consistió en la observación de los ánodos instalados para verificar el desgaste de los mismos, mediante la toma de sus dimensiones, pesos y cálculo de porcentaje de pérdida de masa. La reposición se dio en aquellos que tengan un 75% o más de pérdida.

A continuación en la *Tabla 10* se presenta la cantidad de ánodos a sustituir, según la última inspección anual realizada a mediados del 2013 por personal de mantenimiento.

**TABLA 10**  
**PORCENTAJE DE DESGASTE DE**  
**ÁNODOS EN INSPECCIÓN ANUAL**

| <b>Desgaste</b>             | <b>Unidades</b> | <b>Observación</b> |
|-----------------------------|-----------------|--------------------|
| 100 %                       | 72              | Reponer            |
| 90% a 99%                   | 14              | Reponer            |
| 80% a 90%                   | 34              | Reponer            |
| 75% a 80%                   | 16              | Reponer            |
| 70% a 75%                   | 49              | Decidir            |
| 60% a 70%                   | 58              | Mantener           |
| Desgastes bajo lodo         | 18              | Limpiar            |
| Desaparecidas               | 2               | Reponer            |
| Incompletas                 | 1               | Reponer            |
| Irrecuperable por sedimento | 4               | Costados           |

Existen 268 ánodos instalados en el muelle en la parte frontal y laterales de los cuales se reemplazaron 139 unidades; es decir, un

52% de la cantidad total de diseño original. Según información suministrada por el departamento de mantenimiento del muelle, anualmente se repone una cantidad similar representando un costo significativo para la empresa. Adicionalmente, es necesario considerar el costo de inspección con buzos y mantenimiento de ánodos, lo cual representa un costo de alrededor de \$17.400,00 al año; fuera del costo por la cantidad de ánodos (\$171,00/unidad) que se requiera reponer.

En el caso de mantener este sistema con el mismo tipo de dispersores, será necesario colocar mayor cantidad de ánodos, ya que las áreas a proteger son mayores en comparación con lo calculado en el diseño original.

Para este tipo de protección se tiene las siguientes ventajas:

- Es de fácil instalación.
- No requiere de una fuente de corriente continua, ni regulador de voltaje.
- Permite distribución de corriente uniforme.

Como desventajas tiene:

- Tiene menor vida útil en comparación con otro método.

- Requiere de mayor cantidad de ánodos para superficies grandes.

En la inspección realizada por buzos cada año, únicamente se incluye inspección visual de ánodos y cambio de los que se consideran en mal estado; sin embargo, no se cuenta con un respaldo técnico que indique el estado de protección de la estructura con dichos dispersores. Para que la protección catódica se encuentre funcionando correctamente, es necesario cumplir criterios normalizados en estándares internacionales.

#### **Análisis de Factibilidad de un nuevo Sistema Catódico por Ánodos de Sacrificio.**

Generalmente los sistemas por ánodos galvánicos tienen menor tiempo de vida útil que los sistemas por corriente impresas, se requerirán ánodos de mayores dimensiones y peso para conseguir un tiempo una durabilidad considerable. Logrando esto, el tiempo de reemplazo de los ánodos se extendería, dando como resultado menor costo por inspección y reemplazo.

### Presupuesto Referencial del Sistema

Para el efecto se ha realizado un presupuesto referencial para la implementación de este sistema el cual se muestra a continuación:

**TABLA 11**  
**PRESUPUESTO REFERENCIAL DEL SPC**  
**POR ÁNODOS GALVÁNICOS**

| ITEM                     | RUBRO  | UNIDAD | CANTIDAD | VALOR UNITARIO | SUBTOTAL     |
|--------------------------|--|--------|----------|----------------|--------------|
| 1.0                      | <b>SUMINISTRO DE MATERIALES</b>  |        |          |                |              |
| 1.1                      | Aluminum Anode MA-3 Alloy / 90,90 Kg   | u      | 250      | \$874.19       | \$218,547.50 |
| 1.2                      | Soportes de acero 125x50x6 mm longitud 150 mm  | u      | 500      | \$13.50        | \$6,750.00   |
| SUBTOTAL POR SUMINISTRO  |  |        |          |                | \$225,297.50 |
| 2.0                      | <b>INSTALACIÓN DEL SISTEMA CATÓDICO</b>  |        |          |                |              |
| 2.1                      | Unión soldada entre soporte y alma tubular de ánodo  | u      | 500      | \$12.00        | \$6,000.00   |
| 2.2                      | Unión soldada entre conjunto de soporte y Aluminum Anode MA-3 Alloy con tablestacado de muelle | u      | 250      | \$317.00       | \$79,250.00  |
| 2.3                      | Ensayos y Pruebas de polarización en Sistema Catódico  | GLB    | 1        | \$1,300.00     | \$1,300.00   |
| 2.4                      | Elaboración de Informe técnico   | GLB    | 1        | \$800.00       | \$800.00     |
| SUBTOTAL POR INSTALACIÓN |  |        |          |                | \$87,350.00  |
| COSTO TOTAL SIN IVA      |  |        |          |                | \$312,647.50 |
| 12% IVA                  |  |        |          |                | \$37,517.70  |
| MONTO TOTAL INCLUIDO IVA |  |        |          |                | \$350,165.20 |

Un sistema con las características descritas tiene una inversión inicial de aproximadamente \$350.165,20 con una vida útil no menor de 13 años; en comparación el diseño original con menos de 4 años y un elevado costo de mantenimiento de \$17.400,00 anuales por inspección y reposición, más el costo de ánodos reemplazados anualmente (52% de ánodos del diseño original) en cada inspección con un aproximado anual de \$23.769,00

Debido a que la opción de SPC propuesto por ánodos de sacrificio tiene una mayor vida útil, la recuperación de la inversión inicial será aproximadamente en un lapso de 8.5 años. En los años restantes que el sistema se encuentre funcionando, se podrá realizar un importante ahorro para la empresa en costos de mantenimiento (inspección y reposición de ánodos respecto al diseño original), teniendo en cuenta que dichos costos aumentan con tiempo.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Se concluye lo siguiente:

1. Actualmente, los valores registrados en campo de los potenciales eléctricos del sistema actual medidos con electrodo de Ag/AgCl portátil muestran lecturas por debajo de los niveles de protección; por lo tanto, la estructura no se encuentra protegida catódicamente.
2. La sujeción mecánica entre los ánodos y la estructura nunca fue técnicamente adecuada debido a la falta de procedimientos apropiados y supervisión con personal calificado. La corrosión en pernos de sujeción en la parte superior de los ánodos da como resultado que la resistencia aumente y como consecuencia problemas con el paso de la corriente de protección.

3. El sistema actual tiene dispersores con vida útil menor que el tiempo previsto en el diseño original que establece 4 años de duración. Los ánodos presentan desgaste acelerado debido a que la corriente requerida es mayor que la obtenida en el diseño. Los calculados fueron efectuados para áreas menores, por lo que la cantidad de ánodos que se encuentran instalados actualmente son inferiores para la cantidad necesaria para protección catódica del muelle.
4. El sistema que se propone, es factible en lo técnico y económico, pues si bien es cierto el costo inicial para la implementación del sistema es elevado, este será compensada a mediano plazo. De esta manera se evitan los altos costos por mantenimiento y reposición anual de ánodos empleados actualmente.
5. El sistema a instalar queda diseñado para una vida útil de al menos 13 años, pudiendo ser mayor la expectativa de durabilidad, lo cual dependerá de otras variables como calidad de los ánodos, capacidad de corriente, sistemas de pintura a aplicar en zona de variación de marea, entre otras.
6. Para la instalación de los ánodos galvánicos propuestos no habrá afectación en las actividades diarias del muelle, porque se lo

realizaría por etapas, para que de esta manera el muelle se encuentre en normal funcionamiento.

Se recomienda lo siguiente:

1. Mantener la superficie de la zona de mareas libre de bio-incrustaciones aplicando un sistema de pinturas anti-incrustante (anti-fouling) para evitar la adherencia de sustancias en las paredes del tablestacado.
2. Desarrollar procedimientos de soldadura apropiados para la instalación de ánodos en el tablestacado para garantizar buena conductividad eléctrica entre los dispersores y el tablestacado.
3. Realizar monitoreo semestral y llevar registros estadísticos de potenciales eléctricos para verificar los niveles de protección del sistema instalado.
4. Inspeccionar y evaluar el SPC del tablestacado interno para establecer la condición actual del mismo.

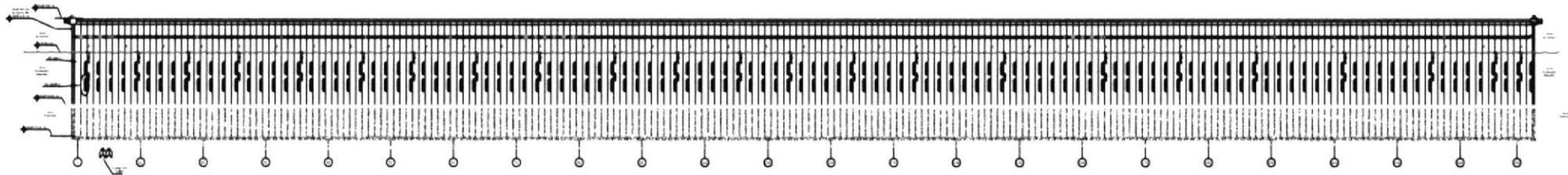
## **APÉNDICE A**

### **PLANOS ESQUEMÁTICOS**

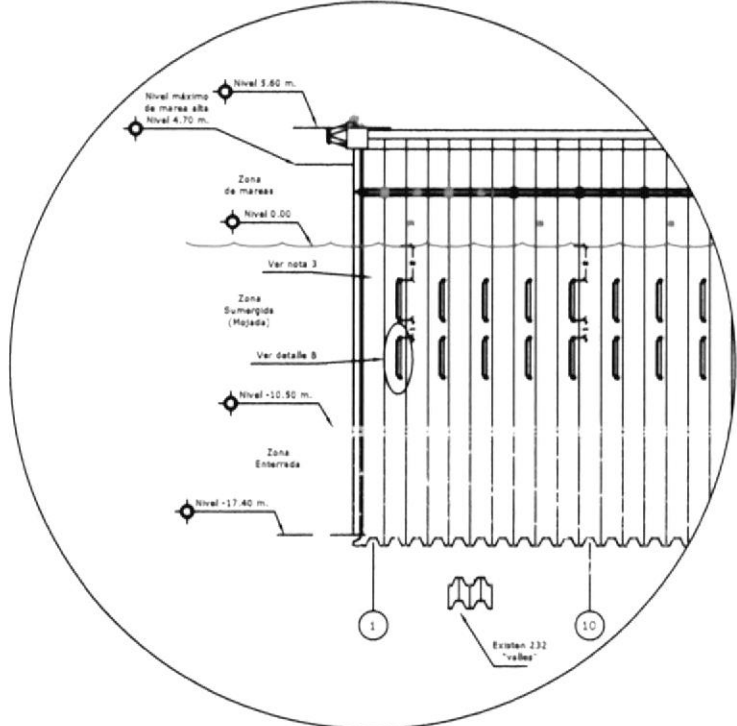


| ITEM No | DESCRIPCIÓN                        | DIMENSIONES                                  | MATERIAL | CANTIDAD   | QTY |
|---------|------------------------------------|--|----------|--|-----|
| 1       | ALUMINUM ANODO MM-B-235C 90.90 Kg. | L = 2032 mm.<br>W = 152.4 mm.<br>H = 127 mm. | Aluminio | FRENTE = 232<br>LATERAL NORTE = 9<br>LATERAL SUR = 9 | 250 |

Las unidades son las mostradas en cada tabla y/o esquema.

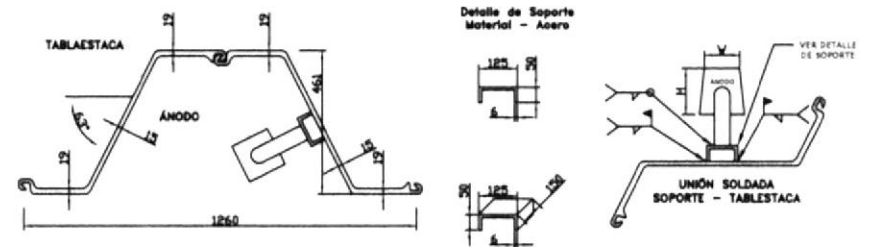


Detalle A



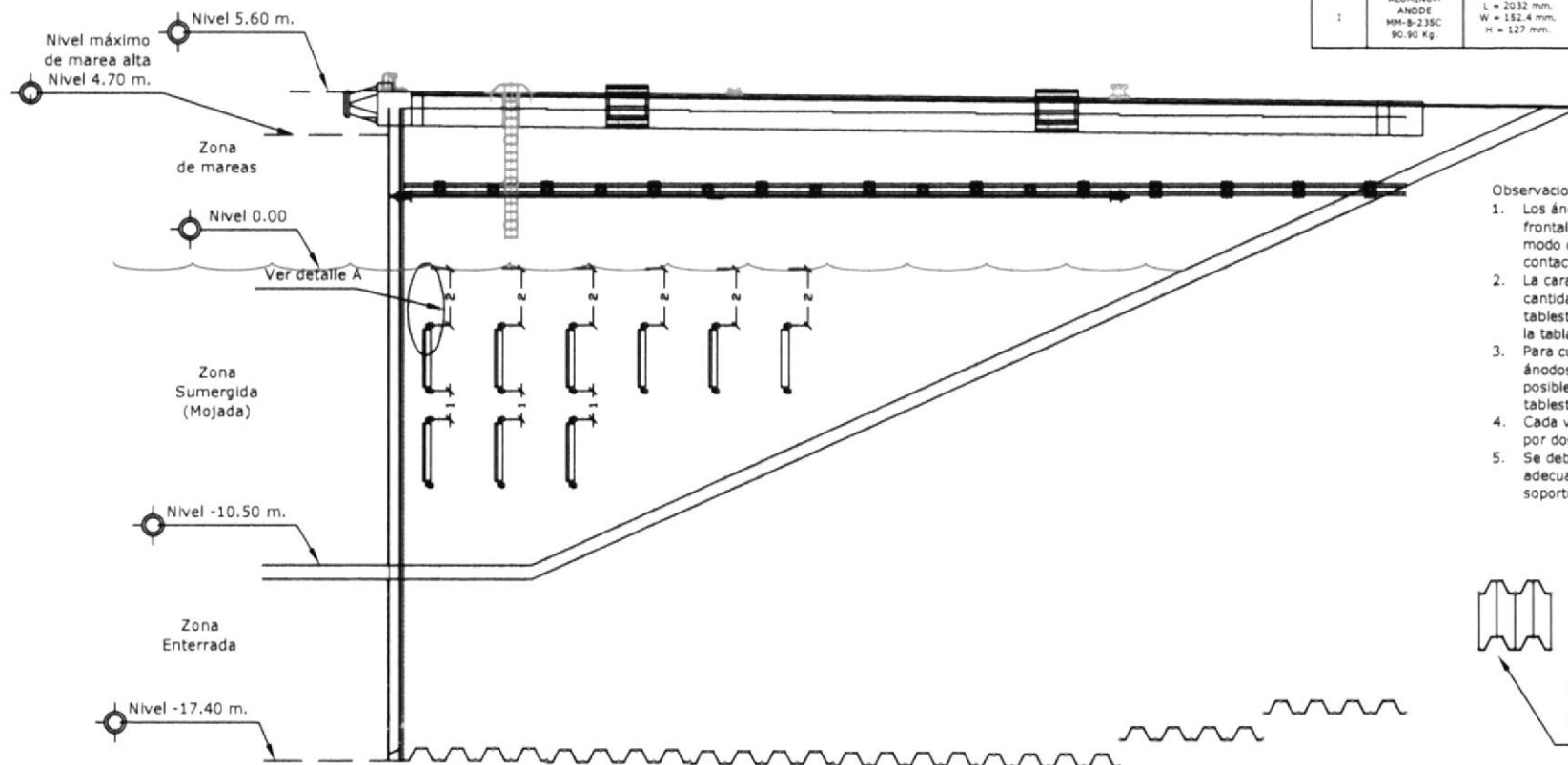
- Observaciones:
1. Los ánodos instalados en tablestaca frontal y laterales estarán de tal modo que permanezcan siempre en contacto con el agua.
  2. La características principales, cantidad total de ánodos para el tablestacado frontal, se detallan en la tabla mostradas.
  3. Para cuidar la integridad de los ánodos se los colocará en lo posible dentro de los valles del tablestacado.
  4. Cada valle se encuentra formado por dos tablestacas.
  5. Se deberá seguir procedimientos adecuados para soldadura entre los soportes y tablestacado.

Detalle B



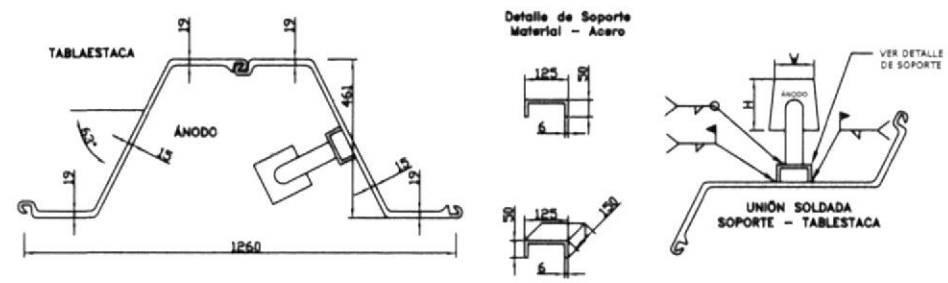
|              |               |                              |  |
|--------------|---------------|------------------------------|--|
| <b>ESPOL</b> |               | Facultad: FIMCP              |  |
|              |               | Carrera: INGENIERÍA MECÁNICA |  |
| Fecha:       | 09-12-2013    | 09-12-2013                   | Tema: Diseño de un Sistema de Protección Catódica en tablestacado de un muelle portuario |
| Nombre:      | C. Suque      | J. Peña                      | Título: Ubicación de ánodos en tablestacado frontal                                      |
|              | Dibujado por: | Aprobado por:                | Escala: S/E Lámina: 1/1  |

| ITEM No | DESCRIPCIÓN                        | DIMENSIONES                                  | MATERIAL | CANTIDAD   | QTY |
|---------|------------------------------------|--|----------|--|-----|
| 1       | ALUMINUM ANODO MM-8-235C 90.90 Kg. | L = 2032 mm.<br>W = 152.4 mm.<br>H = 127 mm. | Alumina  | FRENTE = 232<br>LATERAL NORTE = 9<br>LATERAL SUR = 9 | 250 |



- Observaciones:
1. Los ánodos instalados en tablestaca frontal y laterales estarán de tal modo que permanezcan siempre en contacto con el agua.
  2. La características principales, cantidad total de ánodos para el tablestacado frontal, se detallan en la tablas mostradas.
  3. Para cuidar la integridad de los ánodos se los colocará en lo posible dentro de los valles del tablestacado.
  4. Cada valle se encuentra formado por dos tablestacas.
  5. Se deberá seguir procedimientos adecuados para soldadura entre los soportes y tablestacado.

Detalle A



Las unidades son las mostradas en cada tabla y/o esquema.

|                |               |                              |  |
|----------------|---------------|------------------------------|--|
| <h1>ESPOL</h1> |               | Facultad: FIMCP              |  |
|                |               | Carrera: INGENIERÍA MECÁNICA |  |
| Fecha:         | 09-12-2013    | 09-12-2013                   | Tema: Diseño de un Sistema de Protección Catódica en tablestacado de un muelle portuario |
| Nombre:        | C. Suque      | J. Peña                      | Título: Ubicación de ánodos en tablestacado lateral norte y sur                          |
| Dibujado por:  | Aprobado por: | Escala: S/E                  | Lámina: 1/1  |

## **APÉNDICE B**

### **CATÁLOGO DE ÁNODO**

# M&M Industries, Inc.

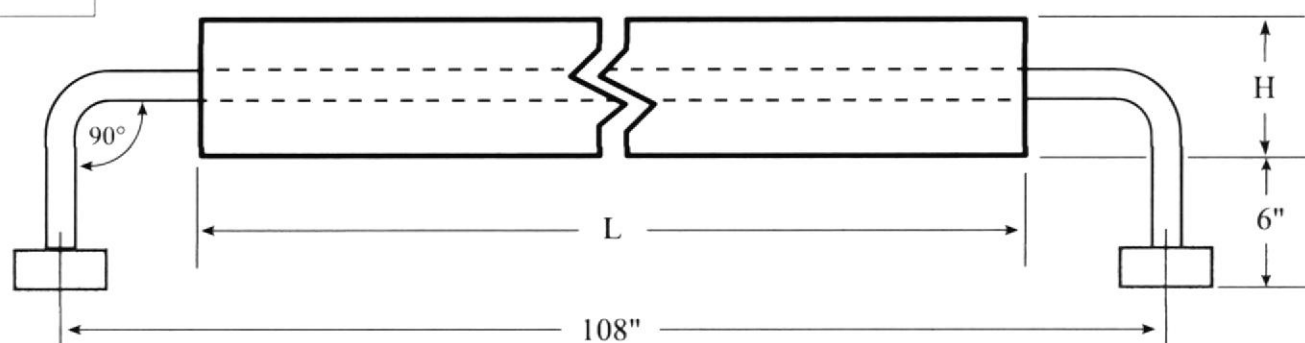
West Front Street, Chester PA 19013  
 (610) 447-0663 ~ Fax (610) 447-0994

Mississippi Office  
 P.O. Box 1439, Amite LA 70422  
 (985) 748-6651 ~ Fax (985) 748-6671  
 Website: [www.mmanodes.com](http://www.mmanodes.com)

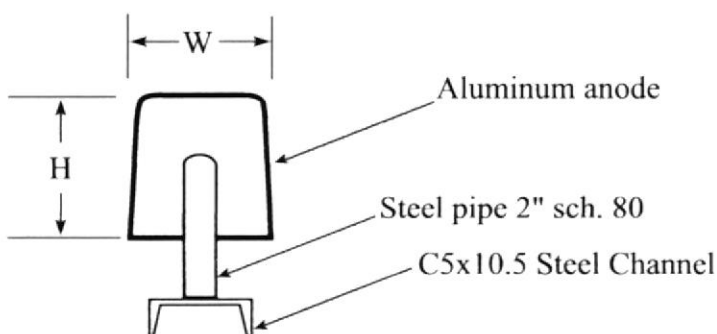
## ALUMINUM ANODE

## MM-B-235C

Side View



End View



Not to scale.  
 Weights and dimensions are nominal.  
 Other sizes and configurations optional.  
 Steel Core size shown is standard for this size anode.

| Part No.:         |             | MM-B-235C                          | <i>MA-3 Alloy</i> |               | <i>MIL-A-24779 Alloy</i> |               |
|-------------------|-------------|------------------------------------|-------------------|---------------|--------------------------|---------------|
| <b>Dimensions</b> | <i>La</i>   | 80" ( $\pm 3/4$ " )                | Fe                | 0.10% max.    | Fe                       | 0.090% max.   |
|                   | <i>W</i>    | 6" ( $\pm 1/2$ " )                 | Hg                | ---           | Hg                       | 0.001% max.   |
|                   | <i>H</i>    | 5" ( $\pm 1/2$ " )                 | Cu                | 0.006% max.   | Cu                       | 0.004% max.   |
|                   | <i>Core</i> | 2" Sch. 80 pipe<br>C5x10.5 channel | Si                | 0.10% max.    | Si                       | 0.08% - 0.20% |
| <i>Net weight</i> | 200 Lbs.    | Zn                                 | 2.8 - 3.5 %       | Zn            | 4.0 - 6.5 %              |               |
|                   |             | In                                 | 0.01 - 0.02%      | In            | 0.014 - 0.020 %          |               |
|                   |             | Aluminum                           | Remainder         | Other (ea)    | 0.020% max.              |               |
|                   |             |                                    |                   | Other (total) | 0.10% max.               |               |
|                   |             |                                    |                   | Aluminum      | Remainder                |               |

**THE RIGHT PRODUCT · THE RIGHT TIME · THE RIGHT PRICE**

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASTM G57-07 – Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method.
- [2] Basic Corrosion Course, NACE International, 2005.
- [3] Handbook of Cathodic Corrosion Protection – Theory and Practice of Electromechanical Protection Processes, Third Edition. W. von Baeckmann, W. Schwenk, and W. Prinz, 1997.
- [4] NACE International Training & Certification – Cathodic Protection Tester Course Manual – CP Level 1, 2005.
- [5] NACE International Training & Certification – Cathodic Protection Technician Course Manual – CP Level 2, 2007.
- [6] NACE International Training & Certification – Cathodic Protection Designer Course Manual – CP Level 3, 2005.

- [7] NACE Standard Test Method 0497-2007 – Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Systems.
- [8] “Peabody’s Control of Pipeline Corrosion”, Second Edition. A.W. Peabody, Edited by R.L. Bianchetti, 2001.