

18  
2ij



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

E. N. E. P. "ARAGON"

## PROTECCION CATODICA A PILOTES DE ACERO PARA PREVENIR LA CORROSION

T E S I S  
Que para obtener el título de  
INGENIERO CIVIL  
p r e s e n t a

**ENRIQUE SANCHEZ LOPEZ**

Sn. Juan de Aragón, Edo. de Méx.

1986



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# I N D I C E

	Pág.
INTRODUCCION . . . . .	3
I CAPITULO. GENERALIDADES . . . . .	5
I.1 Aspectos generales . . . . .	5
I.2 Química y electroquímica de la corrosión . . . . .	11
I.3 Tipos de corrosión . . . . .	16
I.4 Clasificación de ambientes . . . . .	27
II CAPITULO. METODOS PARA PREVENIR O CONTROLAR LA CORROSION DE ESTRUCTURAS METALICAS . . . . .	28
III CAPITULO. PRINCIPIOS GENERALES DE LA PROTECCION CATODICA . . . . .	31
III.1 Fundamentos . . . . .	31
III.2 Criterios para protección catódica . . . . .	34
III.3 Protección catódica con ánodos galvánicos . . . . .	35
III.4 Protección catódica por medio de corriente impresa . . . . .	40
IV CAPITULO. APLICACIONES PRACTICAS DE LA PROTECCION CATODICA A PILO- TES DE ACEPO EMPLEADOS EN ESTRUCTURAS CIVILES: MUELLES, PLATAFORMAS MARINAS Y PUENTES . . . . .	44
IV.1 Recubrimientos . . . . .	46
IV.2 Aplicaciones prácticas de la protección catódica en mue- lles . . . . .	58

	Pág.
IV.3 Plataformas marinas . . . . .	70
IV.4 Protección catódica de los puentes:	
"El Prieto" y "Anáhuac" . . . . .	102
V CAPITULO. EXPERIENCIAS. PROBLEMAS DE MANTENIMIENTO. COSTOS.	
CONCLUSIONES . . . . .	108
V.1 Experiencias . . . . .	108
V.2 Problemas de mantenimiento . . . . .	109
V.3 Costos . . . . .	109
V.4 Conclusiones . . . . .	110
BIBLIOGRAFIA . . . . .	112



## INTRODUCCION.

El presente trabajo explica un método de protección para prevenir la corrosión en estructuras metálicas que se encuentran enterradas e inmersas en agua. Específicamente es el método de protección catódica con ánodos de sacrificio.

El objetivo del mismo es de que el lector al finalizar esta obra aplique correctamente los procedimientos dados aquí, para que una estructura metálica quede protegida catódicamente.

El primer capítulo trata de los aspectos generales de la corrosión, tales como la química y electroquímica de la corrosión, tipos en que se clasifica, el medio ambiente en que se desarrolla, etc.

El segundo capítulo describe a grandes rasgos los métodos para prevenir o controlar la corrosión.

El tercer capítulo explica detalladamente lo que es la protección catódica dando sus principios, fundamentos y criterios. Posteriormente se detalla sobre la protección catódica con ánodos de sacrificio y por medio de corriente impresa.

En el cuarto capítulo se realiza un proyecto sobre protección catódica, primero sobre el muelle No. 4 localizado en Pajaritos, Ver., donde los pilotes empleados en las plataformas de atraque se protegen catódicamente. El segundo -

proyecto es sobre los puentes "El Prieto" y "El Anáhuac", los cuales también son protegidos catódicamente y se encuentran entre los Estados de Veracruz y Tamaulipas. Por último se explica el proceso para que una plataforma marina quede protegida catódicamente y un proyecto de una plataforma de producción. El quinto capítulo trata sobre los problemas de mantenimiento, los costos de la protección catódica y finalmente las conclusiones que se hicieron al finalizar este trabajo.

## I.- Capítulo: Generalidades de la corrosión.

### I.1. Aspectos generales.

Para comprender y analizar la importancia que tiene la corrosión, es necesario definirla primero. La corrosión puede definirse como la destrucción de un elemento por su reacción química o electrolítica con el medio que lo rodea.

Por lo que respecta a la ingeniería civil, la corrosión es un grave problema, ya que esta área de la ingeniería no sólo se encarga de la construcción de las obras, sino de que éstas se mantengan en buenas condiciones, para lo cual es necesario darles un mantenimiento periódico que asegure el buen funcionamiento de las mismas para que cumplan con los objetivos para los cuales fueron creadas.

En el presente trabajo se analizará la corrosión en estructuras metálicas estudiando principalmente las que están expuestas a medios más agresivos como son los pilotes de acero, los cuales se emplean en muelles, plataformas marinas y puentes.

El mantenimiento de los pilotes de acero es de gran importancia, ya que, en caso del descuido, éstos llegarían a corroerse y en consecuencia a provocar el colapso de la obra,

Es conveniente señalar que las pérdidas por corrosión se consideran directas o indirectas. Las primeras son las que se refieren a los gastos debidos a la sustitución de las instalaciones corroídas y a los necesarios para mantener una protección permanente de cualquier tipo de instalaciones metálicas. Las segundas y probablemente las menos consideradas por ser de más difícil evaluación, son las que se refieren a los efectos sobre la salud y vida del hombre, que pueden producirse como consecuencias de fugas y explosiones, convirtiéndose así en accidentes de trabajo.

Debe señalarse que en muchos casos la corrosión es desconocida y muchas veces atacada en forma inadecuada originando serios problemas en las instalaciones, siendo este problema no exclusivo de una región o país. Para dar un ejemplo, en los Estados Unidos de Norteamérica, en 1963 de acuerdo a cifras estadísticas, debido a la corrosión se obtuvieron pérdidas de 5500 millones de dólares anuales. También se presenta como otro ejemplo la Gran Bretaña, donde en 1975 las pérdidas debidas a una mala protección en las superficies metálicas ascendieron a 1500 millones de libras esterlinas. Se trata de dos países desarrollados donde la investigación al respecto alcanza niveles extraordinarios y los costos para la resolución de los problemas son absorbidos por compañías privadas, entidades gubernamentales y por las universidades.

Refiriéndose concretamente a México, en 1971 el Dr. I. Markovic durante un coloquio sobre corrosión y protección de materiales, hizo mención de que aunque no existían datos precisos sobre las pérdidas originadas por la corrosión de los materiales, basándose en la producción anual de acero en esa fecha, dichas pérdidas debían ser de alrededor de 4 millones de dólares anuales.

La corrosión comprende muchos aspectos y su control depende de un gran número de parámetros. Por estas razones es fácil incurrir en errores al tratar de controlarla. Los errores pueden eliminarse si los problemas son atacados en forma sistemática escogiendo para cada caso, de acuerdo a sus características, los métodos adecuados para el control de corrosión de acuerdo con las facilidades disponibles y sin olvidar el aspecto económico que en la mayor parte de los casos será preponderante.

A continuación enumeramos los aspectos económicos, sociales y humanos que deben considerarse al analizar un problema de corrosión:

Aspectos económicos:

- a) Reposición del equipo corroído.
- b) Coeficientes de seguridad y de sobre diseño para soportar la corrosión.
- c) Costo de mantenimiento preventivo.
- d) Paros de producción debidos a fallas de corrosión.

- e) Contaminación de productos.
- f) Pérdidas de productos valiosos.
- g) Daños de equipo adyacente a aquel que puede fallar por corrosión.

Aspectos sociales y humanos:

- a) La seguridad, ya que las fallas violentas pueden provocar incendios, explosiones y liberación de productos tóxicos.
- b) Condiciones insalubres, por ejemplo: contaminaciones debido a productos del equipo corroído, o bien, a productos de la corrosión misma.
- c) Agotamiento de los recursos naturales, tanto en metales como combustibles -- usados para su manufactura.
- d) Apariencia, ya que los materiales corroídos generalmente son desagradables a la vista.

Naturalmente, estos aspectos sociales y humanos también tienen sus aspectos económicos. Por lo anterior, podemos ver claramente que hay muchas razones para -- controlar la corrosión.

Muchos de los comités de corrosión en el mundo han llegado a la conclusión de -- que si se quiere controlar la corrosión es necesario adoptar tres recomendaciones, que son las siguientes :

- Conocimiento,

- Difusión de información.

- Educación.

#### Conocimiento de la corrosión:

Este conocimiento no es fácil debido a que se requiere de una acción particular para cada mismo problema.

Además el control de la corrosión y la protección de los elementos metálicos requieren una atención muy especial. Es importante conocer el grado de corrosión, conocer sus características y hacer una investigación exhaustiva para decidir la forma de combatirla, en ocasiones se aplicará un simple recubrimiento, pero en otras, habría que substituir la pieza por otra, o también aplicar una protección catódica, etc., o sea, es tan variante el problema y tantas las formas de solucionarlo, que si no se le aplica el método correcto, resultaría como un juego de azar, donde tendríamos que aplicar todas las soluciones posibles hasta que acertáramos con una.

#### Difusión de información.

Uno de los factores más importantes que hace casi imposible el conocimiento de los problemas en los sectores industriales y principalmente en lo que respecta a la industria petroquímica, es la falta de comunicación entre la planta y el diseñador.

En muchos casos la falta de intercomunicación y de disseminación de la información, no sólo aumenta el problema, sino que lo convierte en crítico. Es importante apreciar que la corrosión es un factor que puede afectar el funcionamiento de una planta, por lo que se aconseja tener un grupo de asesoria de ingenieros en corrosión y tener relación con ingenieros, diseñadores, inspectores, metalurgistas, químicos, etc.

El ingeniero que trabaja en problemas de corrosión necesita saber dónde empezar y tener un conocimiento básico para reconocer la corrosión, cómo se produce, cómo impedir su severidad, qué herramientas son necesarias, técnicas de inspección, variables de diseño que afectan a la corrosión, selección de materiales y la forma de interpretar y aplicar la información del problema corrosivo, así como dónde obtener ayuda.

#### Educación:

La solución en muchos de los problemas descansa en el Area de Educación, no necesariamente considerando el nivel académico, sino todos los niveles y mantener siempre abierto el camino industria a maestro y viceversa.

Para efectos prácticos, es casi imposible eliminar la corrosión y el secreto efectivo de la ingeniería en este campo radica más en su control que en su eliminación, siendo necesario tomar en cuenta el fenómeno corrosivo desde el diseño de



las instalaciones y no después de ponerlas en operación.

## 1.2.- Química y electroquímica de la corrosión.

La corrosión en estructura metálicas tiene una definición específica: Es la destrucción de un metal por reacción química o electroquímica, entre éste y el medio ambiente que lo rodea, para que exista corrosión se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Debe existir una reacción de reducción (catódica) asociada a otra reacción de oxidación (anódica).
- Es necesario que exista un medio electrolítico para que se lleve a cabo el movimiento de iones.
- Deben estar conectados el cátodo con el ánodo.

El proceso de la corrosión se puede describir más claramente usando como analogía la pila seca. La pila seca genera corriente cuando se cierra el circuito mostrado en la figura 1-B.

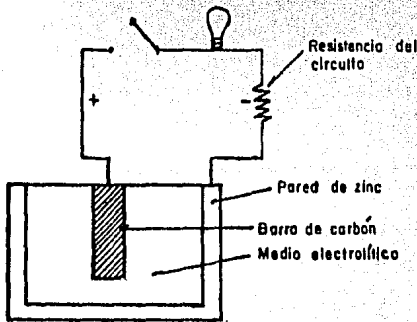


FIG.1-A TÍPICA PILA SECA  
(CELDA GALVANICA)

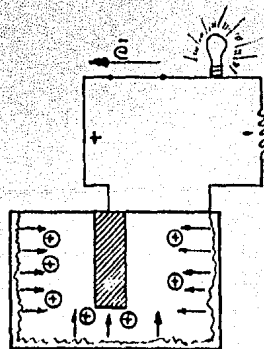


FIG. 1-B

En la figura 1-A se ve que el interruptor del circuito está abierto, por lo tanto no existe flujo de corriente y las paredes de zinc de la batería se mantienen intactas. Cuando el interruptor se cierra, (fig. 1-B), se produce el flujo de corriente desde la terminal positiva hacia la terminal negativa y un flujo de electrones en sentido contrario. Los electrones al llegar a la superficie de la barra de carbón se unen con iones positivos presentes en el electrolito y la corriente es transportada desde la pared del zinc hacia la barra de carbón a través del electrolito, completándose así el circuito eléctrico, al donar electrones para generar corriente, en las paredes de zinc se produce pérdida de metal, lo que se conoce como oxidación y en la superficie de la barra de carbón, que se mantiene íntegra, ocurre lo que se conoce como reducción.

A la pila seca también se le denomina celda galvánica en la cual la barra de carbón es el cátodo y la pared de zinc es el ánodo.

Se puede decir entonces que el proceso de corrosión u oxidación del área anódica se puede evitar simplemente abriendo el circuito de la celda galvánica. En la práctica obviamente este hecho se complica bastante y es imposible de obtener por completo.

Otra conclusión que podemos decir de nuestra analogía de la pila seca es que el ánodo suelta bastante corriente hacia el medio electrolítico y se corroe, y el cátodo

recibe corriente desde el medio electrolítico y no sufre corrosión, el flujo de corriente en la pila seca se produce debido a que el zinc y el carbón son metales de electronegatividades distintas y al conectarse eléctricamente se produce un diferencial de potencial que causa el flujo de corriente. El zinc al poseer una electronegatividad mayor que la del carbón se convierte en el ánodo de la celda galvánica y el carbón es el cátodo.

Uniendo dos o varios metales de electronegatividades distintas en un medio electrolítico, obtendremos una celda galvánica cuyo efecto será la pérdida de metal en el material más anódico.

Las diferencias de potencial también pueden ser causadas en un mismo metal, como se muestra en las siguientes figuras:

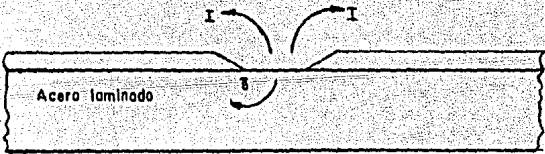


FIG.2-A CORROSION POR PERDIDA DE ESCAMA DE LAMINACION

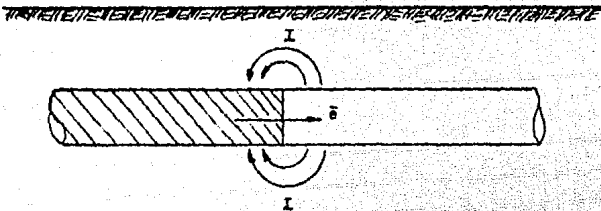


FIG.2-B CORROSION DEBIDO A LA UNION DE TUBERIA VIEJA CON NUEVA

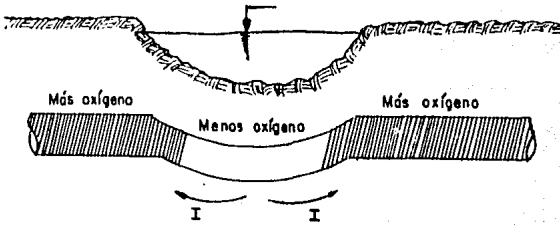


FIG. 2-C CORROSION DEBIDO AL DIFERENCIAL DE OXIGENO

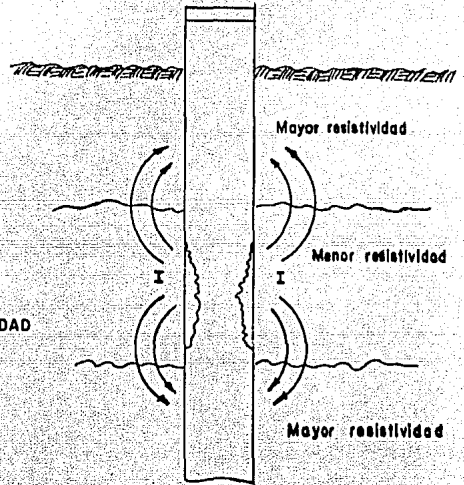


FIG. 2-D CORROSION DEBIDO A DIFERENCIAL DE RESISTIVIDAD EN SUELOS

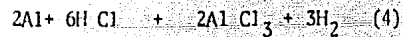
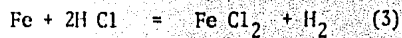
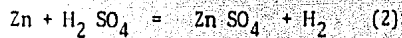
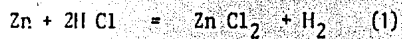
En la figura 2-A la pérdida de la escama de laminación en áreas del acero laminado causa un diferencial de potencial y consecuentemente corrosión. En la figura 2-B la unión de un tramo de tubería nueva con tubería existente generalmente causa la corrosión acelerada de la tubería nueva. En la figura 2-C y 2-D el diferencial de oxígeno presente en la vecindad del acero y la diferencia en resistividades de los diferentes electrolitos adyacentes al tubo causan corrosión en las áreas de menor cantidad de oxígeno y de menor resistividad respectivamente. Estas formas de corrosión son algunas solamente, ya que ésta, se puede presentar en muy

variadas formas, como más adelante describiremos detalladamente.

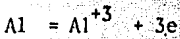
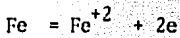
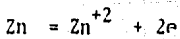
Una vez explicado el proceso de la corrosión, empleando la analogía de la pila seca, será más fácil entenderlo ahora, por reacciones electroquímicas, ayudándonos de ácidos y metales.

Como la corrosión metálica es casi siempre un proceso electroquímico, es muy importante comprender la naturaleza básica de las reacciones electroquímicas,

En términos de corrosión, una reacción de oxidación recibe el nombre de reacción anódica, mientras que a la reacción de reducción se le denomina reacción catódica. A continuación veremos un ejemplo claro donde se presentan estas reacciones.



Todas estas reacciones representan la reducción de los iones hidrógeno a gas hidrógeno:  $2\text{H}^+ + 2\text{e} = \text{H}_2$ . Separando las reacciones 1, 2, 3 y 4, vemos que las ecuaciones 1 y 2 representan la oxidación del zinc a sus iones, mientras que la 3 y la 4 indican la oxidación del fierro y el aluminio a sus iones, tal como se indica en las siguientes reacciones anódicas:



Lo anterior permite ver que la corrosión por ácidos es muy simple, ya que en cada caso, la reacción catódica es asociada a otra reacción anódica.

### 1.3.- Tipos de corrosión.

La corrosión ocurre de muchas y muy variadas formas, pero su clasificación se basa de acuerdo al ambiente que lo produce :

Corrosión acuosa.

Corrosión en gases secos y sales fundidas.

Corrosión en líquidos y gases orgánicos.

Corrosión en metales fundidos.

Por la forma en que se presenta la corrosión, se clasifica en: General y localizada. La primera cuando la pérdida de metal se efectúa en todo el material y la segunda, cuando existen grandes áreas sin atacar y algunas otras pequeñas con evidente pérdida de metal.

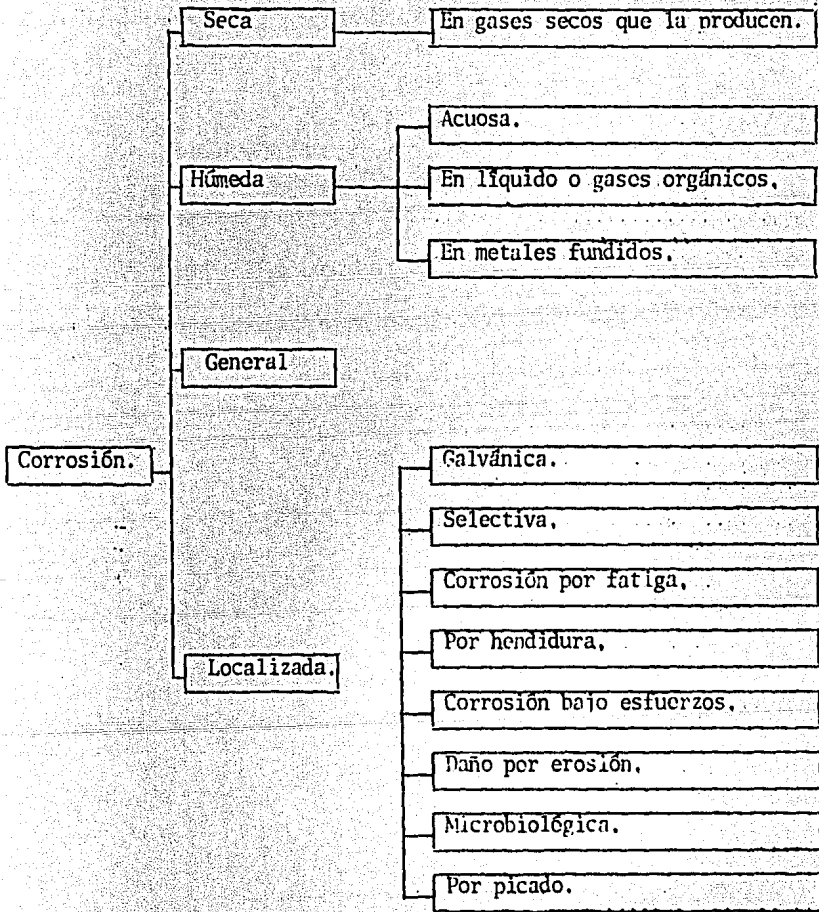
El mecanismo de la corrosión metálica es casi siempre un proceso electroquímico, el cual se define como una reacción química en la cual existe una transferencia de electrones, es decir, es una reacción que comprende el fenómeno de oxidación y reducción.

En este capítulo se estudiarán básicamente aquellos tipos de corrosión que se han considerado de mayor importancia, haciendo énfasis cuando se presentan en forma localizada.

Estos tipos son los siguientes :

- Galvánica.
- Por hendidura.
- Selectiva.
- Corrosión por fatiga.
- Corrosión bajo esfuerzos.
- Daño por erosión.
- Microbiológica.
- Por picado.

Para un mejor entendimiento de la clasificación de la corrosión, desde el punto de vista del ambiente que la produce y por la forma en que ésta se presenta, se elaboró la siguiente tabla:



CLASIFICACION DE LA CORROSION.



- Corrosión galvánica:

Se llama corrosión galvánica, al contacto físico y eléctrico de metales o aleaciones diferentes que produce un incremento en la velocidad de corrosión.

La corrosión galvánica se presenta cuando se tienen las siguientes condiciones:

- 1.- Cuando se conectan metales diferentes, el metal más activo o metal anódico se corroe más rápidamente, mientras que el metal más noble o metal catódico tiende a protegerse.
- 2.- A medida que la diferencia de potencial entre los dos metales se incrementa, la corrosión galvánica también aumenta.
- 3.- Debe existir un contacto eléctrico entre los dos metales.
- 4.- Los metales deberán estar expuestos a un electrolito.

Un ejemplo de corrosión galvánica se presenta al conectar tuberías de aluminio y de hierro, lo que da por resultado una mayor velocidad de corrosión en la tubería de aluminio.

La corrosión galvánica es probablemente la causa de muchas de las fallas de corrosión en medios acuosos. Comúnmente se ha visto que problemas de este tipo se presentan en ambientes marinos, ya sea en instalaciones sumergidas o expuestas al aire marítimo con alto contenido de sal.

Para prevenir la corrosión galvánica, se hacen las siguientes recomendaciones:

- a) Evitar el uso de metales diferentes siempre que ésto sea posible. Si ésto no es práctico, tratar de usar metales que estén lo más cercano posible entre sí en la serie galvánica (Tabla 1).
- b) Es necesario evitar una relación de áreas desfavorables, es decir, bajo ninguna circunstancia conectar una pequeña área anódica a una gran área catódica.
- c) Si se utilizan metales diferentes, aislar eléctricamente uno del otro instalando juntas de aislamiento.
- d) Se necesita utilizar metales diferentes y no pueden ser aislados, las partes anódicas deberán ser diseñadas a manera de poderlas reemplazar fácilmente, o bien, construirlas de mayor espesor para alargar la vida del equipo bajo los efectos de corrosión.

Tabla No. 1

Serie galvánica en agua de mar de algunos materiales metálicos comerciales.

Activo anódico



Magnesio  
Aleaciones de magnesio.  
Zinc  
Acero galvanizado.  
Aluminio 1100  
Aluminio 2024  
Acero.  
Hierro dulce  
Hierro colado.  
Acero Inoxidable 13% Cr Tipo 410 (activo)  
Soldaduras Pb-Sn  
Plomo  
Estaño  
Metal Muntz  
Bronce al manganeso.  
Latón naval  
Níquel (activo)  
Aleación 76 Ni-16Cr-7Fe (activa)  
Aleación 60 Ni-30Mo-6Fe-1Mn  
Latón amarillo  
Latón "Admiralty"  
Latón rojo.  
Cobre.  
Bronce al silicio.  
Cuproníquel 70-30  
Bronce 6.  
Soldadura de plata.  
Níquel (pasivo)  
Aleación 76 Ni-16Cr-7Fe.  
Acero inoxidable 13 Cr, Tipo 410 (pasivo)  
Acero inoxidable 18-8 Tipo 304 (pasivo)  
Plata  
Grafito  
Oro  
Platino.

Noble o catódico.

SERIE ELECTROMOTRIZ

POTENCIALES DE REDUCCION.

$\text{Au} \rightleftharpoons \text{Au}^{+3} + 3\text{e}$ .....	1.42 noble
$\text{Pt} \rightleftharpoons \text{Pt}^{+2} + 2\text{e}$ .....	1.2
$\text{O}_2 + 4\text{H} + 4\text{e} \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$ .....	1,23
$\text{Pd} \rightleftharpoons \text{Pd}^{++} + 2\text{e}$ .....	0,83
$\text{Ag} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{e}$ .....	0,799
$2\text{Hg} \rightleftharpoons \text{Hg}_2^{++} + 2\text{e}$ .....	0,798
$\text{Fe}^{+3} + \text{e} \rightleftharpoons \text{Fe}^{+2}$ .....	0,771
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} \rightleftharpoons 4\text{OH}^-$ .....	0,401
$\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^{+2} + 2\text{e}$ .....	0,34
$\text{Sn}^{+4} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{H}_2$ .....	0,154
$2\text{H} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{H}_2$ .....	0,000 referencia
$\text{Pb} \rightleftharpoons \text{Pb}^{+2} + 2\text{e}$ .....	-0,126
$\text{Sn} \rightleftharpoons \text{Sn}^{+2} + 2\text{e}$ .....	-0,140
$\text{Ni} \rightleftharpoons \text{Ni}^{+2} + 2\text{e}$ .....	-0,23
$\text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}^{+2} + 2\text{e}$ .....	-0,27
$\text{Cd} \rightleftharpoons \text{Cd}^{+2} + 2\text{e}$ .....	-0,402
$\text{Fe} \rightleftharpoons \text{Fe}^{+2} + 2\text{e}$ .....	-0,44
$\text{Cr} \rightleftharpoons \text{Cr}^{+3} + 3\text{e}$ .....	-0,71
$\text{Zn} \rightleftharpoons \text{Zn}^{+2} + 2\text{e}$ .....	-0,763
$\text{Al} \rightleftharpoons \text{Al}^{+3} + 3\text{e}$ .....	-1,66
$\text{Mg} \rightleftharpoons \text{Mg}^{+2} + 2\text{e}$ .....	-2,38
$\text{Na} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{e}$ .....	-2,71
$\text{K} \rightleftharpoons \text{K}^+ + \text{e}$ .....	-2,92 Activo

Corrosión selectiva.

Este tipo de corrosión se presenta cuando existe un remplazo de un elemento de una aleación por otro elemento.

El ejemplo más común es el remplazo selectivo del zinc en la aleación; así el latón, rico en zinc, sufre la llamada deszincación, por la cual es leixiviado el zinc, dejando una masa porosa de cobre casi puro. Esta puede producirse localmente (corrosión de tipo de tapón) o de toda la superficie y entonces se llama de tipo de capa.

A veces sucede que una tubería de latón se transforma en una masa porosa de cobre y la zona afectada toma visiblemente un color rojo que remplaza al amarillo del latón.

Corrosión bajo esfuerzo.

Este tipo de corrosión se presenta cuando ciertos metales están expuestos simultáneamente a esfuerzos de tensión y están rodeados por un favorable ambiente específico corrosivo. Este tipo de corrosión provoca la ruptura inicial y la propagación relativamente lenta de ruptura.

Los metales de alta pureza son esencialmente inmunes a la corrosión bajo esfuerzo, mientras que en las aleaciones es donde se presentan ciertas fallas.

Los esfuerzos que provocan este tipo de corrosión, son siempre los de tensión y nunca de compresión, ahora bien, cuando este tipo de corrosión se presenta, se distinguen tres etapas: inicio de ruptura, propagación de la ruptura y falla final, aunque en la práctica no siempre es posible distinguirlas. El avance de las mismas dependerá de las aleaciones que tenga el metal y del medio ambiente circundante.

#### Corrosión por fatiga.

Este tipo de corrosión puede definirse como la acción combinada de un ambiente agresivo y un esfuerzo alternado o cíclico hasta provocar una falla prematura de los metales por un proceso que comprende el inicio de la ruptura y la propagación de la falla.

La superficie del metal desempeña un papel importante en esta forma de daño, puesto que será la que soporte los mayores esfuerzos y al mismo tiempo estará sometida a los ataques de los medios corrosivos. La corrosión de la superficie metálica hará disminuir la resistencia a la fatiga y el esfuerzo sobre la superficie tenderá a acelerar la corrosión.

En condiciones de esfuerzos cíclicos o alternantes se produce la rotura de las películas protectoras de óxido que evitan la corrosión con una rapidez mayor que la de formación de nuevas películas protectoras,

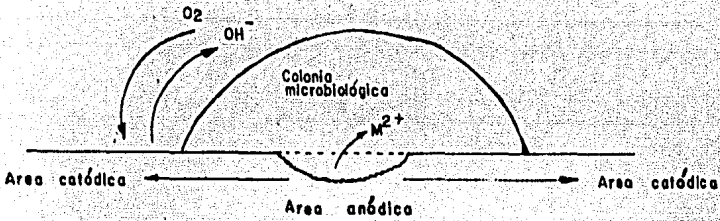
Con frecuencia, esta situación tiene como consecuencia la formación de zonas anódicas en los puntos de rotura: esas zonas producen picaduras que sirven como puntos de concentración del esfuerzo para el origen de grietas que provocan fallas finales.

#### Corrosión por erosión.

Este tipo de corrosión se presenta cuando existe un desgaste en la superficie de un metal debido al movimiento de un fluido. La mayoría de los metales y aleaciones son susceptibles a dañarse por este tipo de corrosión. Debe de observarse que todos los tipos de equipos expuestos a fluidos en movimiento están sujetos a esta corrosión, éstos pueden ser turbinas, codos, válvulas, tuberías, cambiadores de calor, etc.

#### Corrosión microbiológica.

Este tipo de corrosión es producida por diversos microorganismos como son: muchas especies de bacterias, levaduras, filamentos fungi y algas, que se depositan en la superficie de metal formando grandes colonias, de las cuales resultan sustancias químicas que ocasionan la corrosión.



**FIG.3 REPRESENTACION GRAFICA DEL DESARROLLO DE UNA COLONIA MICROBIOLÓGICA SOBRE LA SUPERFICIE DE UN METAL MOSTRANDO EL ESTABLECIMIENTO DE UNA CELDA DE AEREAACION DIFERENCIAL**

#### Corrosión por hendidura.

Este tipo de corrosión se produce en una grieta formada por el contacto con otra pieza del mismo u otro metal, o con un material no metálico. Cuando ocurre ésto, la intensidad del ataque suele ser mayor que en las zonas circundantes de la misma superficie.

#### Corrosión por picado.

Este tipo de corrosión se presenta cuando en el metal ocurren evidentes perforaciones, éstas pueden ir desde las cavidades profundas y de diámetro pequeño a las depresiones relativamente poco profundas,



#### 1.4 Clasificación de ambientes,

Es necesario tratar de enumerar y clasificar los medios ambientes que producen corrosión, puesto que cada medio ambiente produce con cada material un diferente problema de corrosión. Se debe considerar que algunos ambientes son más corrosivos que otros. Claro que existen algunas excepciones pero, por lo general se da como un hecho que :

- a) El aire húmedo es más corrosivo que el aire seco,
- b) El aire caliente es más corrosivo que el aire frío,
- c) El agua caliente es más corrosiva que el agua fría,
- d) El aire contaminado es más corrosivo que el aire puro,<sup>1)</sup>
- e) Los ácidos son más corrosivos que las bases o álcalis.
- f) El agua salada es más corrosiva que el agua dulce,
- g) El acero inoxidable se corroe menos que el acero ordinario,
- h) No se tiene corrosión en el vacío aún a muy altas temperaturas,

Es conveniente aclarar que los postulados expuestos anteriormente, no se cumplen siempre, inclusive para el último caso, es por eso que cada problema de corrosión deberá ser estudiado en particular para lo cual será necesario conocer los materiales de construcción, las condiciones de operación y el medio ambiente, con el objeto de encontrar el factor que produce la corrosión y así controlar el fenómeno.

## II Capítulo: Métodos para prevenir o controlar la corrosión de estructuras metálicas.

Como la corrosión es un proceso inevitable, se han determinado métodos para su control, entre los que pueden mencionarse los siguientes:

- a) Protección electroquímica: Protección catódica,
- b) Modificación del ambiente,
- c) Protección por aislamiento: Uso de recubrimientos anticorrosivos,
- d) Selección de materiales de construcción,
- e) Sobre-diseño de esfuerzos.

- a) Protección electroquímica: Protección catódica,

Este método consiste en controlar la corrosión de un metal en contacto con un electrolito, convirtiendo el metal en el cátodo de una celda electroquímica mediante el flujo de electrones provenientes de un ánodo, evitando así la disolución del metal y consumiéndose el ánodo. Los ánodos pueden ser de sacrificio o inertes. Este método se utiliza preferentemente en tuberías y estructuras enterradas o sumergibles,

- b) Modificación del ambiente: Uso de inhibidores,

Este método considera el uso de pequeñas cantidades de compuestos orgánicos o inorgánicos capaces de formar una película o barrera adherente en la su-

perficie del acero por atracción eléctrica o por reacción, evitando el acceso de los agentes corrosivos.

Estos compuestos se caracterizan por las altas cargas eléctricas en los extremos de sus moléculas capaces de ser atraídas por la superficie a proteger; desafortunadamente esta atracción no es permanente, siendo necesario una dosificación constante en el medio. Este método se utiliza preferentemente en donde existen medios fluidos de recirculación.

c) Protección por aislamiento; uso de recubrimientos anticorrosivos.

Este método es igual que el anterior, considera la formación de una barrera que impida en lo posible el acceso de los agentes corrosivos a la superficie metálica; no obstante, la barrera se forma a partir de la aplicación de una dispersión líquida de una resina y un pigmento, con eliminación posterior del solvente, obteniéndose una película sólida adherida a la superficie metálica. Su durabilidad está condicionada a la resistencia que presente esta película al medio agresivo. Su uso está muy generalizado en la protección de estructuras e instalaciones aéreas o sumergidas.

d) Selección de materiales de construcción.

Quando las condiciones de presión y temperatura sean extremas o bien el medio sea excesivamente agresivo, en tal forma que los métodos anteriores no

sean utilizables, se puede recurrir a una selección adecuada de materiales (generalmente caros). La alta resistencia a la corrosión de estos materiales se basa en la formación inicial de una capa delgada de óxido del metal adherente e impermeable. A este fenómeno se le conoce como pasivación y es de uso poco frecuente en las instalaciones de la industria.

e) Sobre-diseño de estructuras.

Este método consiste en incrementar el espesor de las estructuras, previniendo el desgaste o pérdida del metal debido a la acción de la corrosión, esto se hace cuando la estructura va a estar expuesta a un medio muy agresivo.

Considerando el aspecto económico de cada uno de estos métodos, así como sus limitaciones, las cuales repercuten en su eficiencia de protección, se concluye que la solución a los problemas de corrosión está enfocada a su control más que a su eliminación. Cada uno de estos métodos constituye una extensa área de estudio dentro de la ingeniería de corrosión. En la presente tesis se desarrollará lo concerniente a protección catódica.

### III Capítulo: Principios generales de la protección catódica.

#### III.1 Fundamentos.

La protección catódica se basa en el hecho de que la corrosión de los metales en presencia de un electrolito, es de naturaleza electroquímica, esto es, las estructuras metálicas enterradas se corroen por la formación de pilas locales sobre su superficie. Estas pilas están constituidas por áreas anódicas, donde tienen lugar la disolución del metal y áreas catódicas, donde ocurre la reducción de algún constituyente del electrolito. Las dos reacciones se efectúan en la interfase metal-solución, con la consiguiente transferencia de electrones a través del metal y de iones a través de la solución.

A continuación se muestran dos figuras para ilustrar lo descrito.

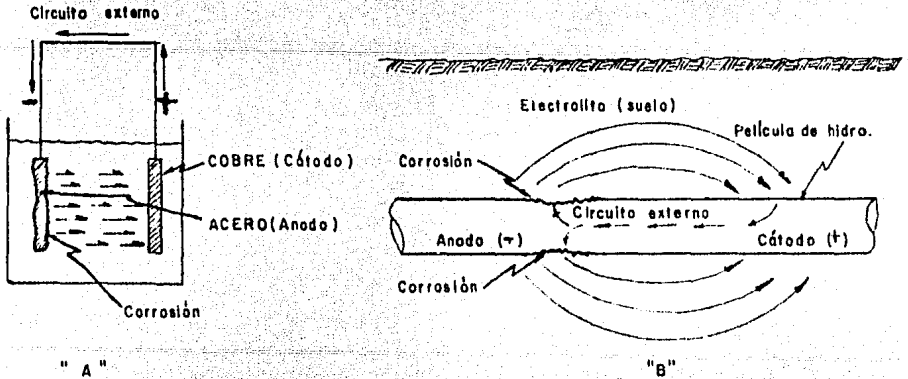


FIG.5 CORROSION GALVANICA

Por lo anteriormente dicho, podemos definir a la protección catódica como una técnica que reduce o detiene la corrosión de un metal en contacto con un electrolito, haciendo al metal un cátodo mediante el paso de una corriente de electrones provenientes de un ánodo. Esto lo podemos ver más claramente en la siguiente figura.

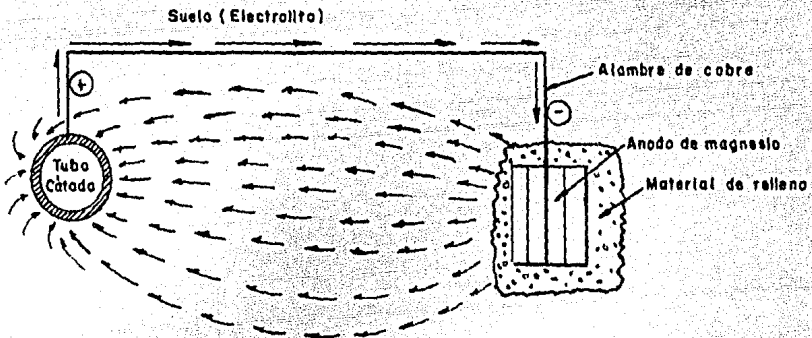


FIG.6 PROTECCION CATODICA CON ANODOS GALVANICOS

La protección catódica está sujeta a que se pueda establecer un circuito de electrólisis en el cual se depositan las cargas positivas. Para que esto suceda, se requiere que toda la estructura esté en contacto permanente con el electrolito. No obstante esta limitación, las estructuras metálicas enterradas o sumergidas y los recipientes de líquidos acuosos, constituyen un amplio campo de aplicación de esta técnica de protección.

La corriente de electrones necesaria para establecer un sistema de protección catódica puede obtenerse formando una pila eléctrica espontánea usando ánodos de metales más activos como zinc, aluminio y magnesio, o bien, mediante la impresión de corriente eléctrica por medio de una fuente externa de energía, -- usando rectificadores de corriente alterna con diodos de selenio o de silicio. En el primer caso, la protección catódica recibe el nombre de protección catódica con ánodos galvánicos de sacrificio, mientras que el segundo se le da el nombre de protección catódica por corriente impresa. Ambos métodos son útiles bajo determinadas condiciones, a continuación se dan sus características de comparación.

#### Anodos galvánicos

#### Corriente impresa

- |  |  |
|--|--|
| 1.- No requiere potencia externa.                                  | - Requiere potencia externa.                                   |
| 2.- Tiene potencia de aplicación fija.                             | - Potencial de aplicación variable.                            |
| 3.- Aplicación para casos de requerimientos de corriente pequeños. | - Util para el diseño de cualquier requerimiento de corriente. |
| 4.- Amperaje limitado.   | - Amperaje variable.   |
| 5.- Util en medios de baja resistividad.                           | - Aplicable a cualquier resistividad del medio ambiente.       |

- 6.- La interferencia de estructuras en terradas vecinas es prácticamente despreciable. - Es necesario tomar en cuenta las estructuras enterradas vecinas para considerar las interferencias que éstas provocan.

Cabe mencionar que para el diseño adecuado de un sistema de protección catódica, utilizando cualquiera de las fuentes de corriente directa mencionadas, es conveniente llevar a cabo una serie de trabajos de campo tales como, mediciones de resistividad del medio donde se encuentra alojada la estructura metálica, determinaciones de los requerimientos de corriente y verificación de la resistencia de los aislamientos eléctricos,

### III.2 Criterios para protección catódica,

La protección catódica está en función de varios parámetros uno de ellos, es el de determinar el potencial mínimo de protección. o sea, se trata de decir cuál es el mínimo potencial del metal con respecto al electrolito que nos garantizará que la estructura trabajará permanentemente como cátodo,

Otro aspecto de gran importancia, es el de decidir cómo se va a proteger la estructura metálica, o sea, si se empleará el método de ánodos de sacrificio o el de corriente impresa,

Existen dos casos a los cuales se puede dar protección catódica: Estructuras enterradas y estructuras sumergidas, dependiendo de donde se encuentre nuestra



estructura, se empleará el método más adecuado.

### III.3 Protección catódica con ánodos galvánicos.

A los ánodos galvánicos también se les llama ánodos de sacrificio. Pueden describirse como un metal con un potencial más electronegativo que el potencial de la estructura que se pretende proteger. Por tal motivo, si un ánodo galvánico se conecta eléctricamente a una estructura enterrada o sumergida, descargará una corriente que fluirá a través del electrolito hasta la estructura en cuestión.

Un buen ánodo de sacrificio deberá tener las siguientes características.

- a) Potencial suficientemente electronegativo para asegurar un flujo de corriente adecuado.
- b) Corriente de salida elevada, por unidad de peso de material consumido.
- c) Buen comportamiento de polarización anódica a través del tiempo.
- d) Bajo costo.

Los ánodos galvánicos que con mayor frecuencia se utilizan en protección catódica son: de magnesio, de zinc y de aluminio, sus propiedades electroquímicas se indican a continuación:

Material anódico	Pot. en circuito abierto (Cu/CuSO <sub>4</sub> ) en Volts.	Drenaje de corriente teórica en Amp-Hr	Drenaje de corriente práctica en Amp-Hr.	Eficiencia en %
		1b	1b	
Magnesio	-1.75	100	500	50
Zinc	-1.10	575	335	90
Aluminio	-1.10	1350	1280	95

Los ánodos de magnesio han encontrado mucha aplicación en la protección de estructuras enterradas, por su parte los ánodos de zinc y de aluminio se utilizan preferentemente para dar protección a estructuras sumergidas en medios acuosos. Como es de suponerse, la protección catódica a base de ánodos de sacrificio, -- tiene ventajas y desventajas respecto al también típico sistema de protección con corriente impresa, las principales son :

#### Ventajas

- a) Bajo costo de instalación
- b) Protección ideal de puntos críticos.
- c) Bajo costo de mantenimiento.
- d) Menos daños al recubrimiento.
- e) Menos problemas de corrientes parásitas.

#### Desventajas

- a) Grandes cantidades de material anódico.
- b) Renovación periódica.
- c) No adaptables a control automático.
- d) Limitados a aplicación de baja corriente.

Un ánodo de sacrificio puede ser diseñado para proporcionar protección catódica a una estructura corroible, para que esta protección sea continua, el ánodo debe no únicamente tener sus propiedades electroquímicas, sino que debe consumirse lo suficientemente lento para tener una vida razonable. El factor importante para determinar la vida útil de un ánodo es la relación del volumen de consumo del metal anódico. Si el volumen de consumo es alto, se presentarán cambios rápidos en la forma y tamaño de los ánodos y la vida efectiva puede ser reducida.

Los pesos de los ánodos comerciales son: 4, 8, 16, 25, 75 y 125 lbs. El consumo del ánodo será proporcional a la carga total drenada por él, pero la velocidad de consumo de cualquier punto de la superficie del ánodo dependerá de su densidad de corriente y ésta no es constante a lo largo de toda la superficie del ánodo. En los filos, en las esquinas y en otros puntos sobresalientes, la densidad de corriente será mayor y el ánodo se corroerá más rápidamente.

A continuación se hablará más detalladamente de los ánodos galvánicos: magnesio, zinc y aluminio, que son los que se emplean para proteger el acero.

Magnesio.

Este metal es extremadamente ligero con las propiedades físicas siguientes:

Peso atómico	24.3
Densidad relativa	1.74
Punto de fusión	650°C
Amperes-Hora/Lb	1000

El magnesio puro y la mayoría de sus aleaciones se corroen rápidamente en soluciones acuosas. Tres propiedades electroquímicas del magnesio lo hacen muy útil como ánodo de sacrificio:

- Posee un alto voltaje de cedencia para proteger el acero.
- Tiene un bajo equivalente electroquímico.
- Tiene buenas propiedades de polarización anódica.

El potencial de una pieza de magnesio puro, inmersa en una solución salina diluida es de -1.70 volts referido a una celda de cobre-sulfato de cobre, entonces es anódico al acero, al plomo, al aluminio, al cobre y al zinc.

Como este metal trabaja con una eficiencia del 50%, su equivalente electroquímico práctico para diseños de protección catódica es de 500 amperes-hora/libra, 1000 amperes-hora/kg.

Zinc,

El zinc es un metal que tiene las siguientes propiedades físicas:

Peso atómico	65.4
--------------	------

Densidad 7.1

Punto de fusión 420°C

Amperes-Hora/Lb. teóricos 372.

El potencial de zinc en circuito abierto es de -1.1 volts referido a una celda de cobre-sulfato de cobre. El consumo teórico del zinc es de 23 lbs/amperes-año con una eficiencia del 90% considerándose entonces, como un equivalente electroquímico práctico el de 25 lb/amperes-año.

Su bajo potencial limita su uso a terrenos de bajas resistividades; (como valor práctico se da el de un máximo de 500 ohms-cm para que pueda ser usado satisfactoriamente). El zinc no puede usarse para proteger tanques de almacenamiento de agua caliente.

Aluminio,

El aluminio es un metal que tiene las siguientes propiedades físicas:

Peso atómico 27

Densidad 2.7

Punto de fusión 660°C

Amperes-hora/libra teórica 1350

El aluminio es un material de muy alta eficiencia (95%) y su equivalente electroquímico en esas condiciones, es de 6.5 lbs por amper-año. Su uso como el -

del zinc, debido a su bajo potencial, está también limitado a medios de baja resistividad, no recomendándose para valores mayores de 600 ohms-cm. Generalmente este tipo de material se utiliza para sistemas de protección catódica en agua salada, principalmente en estructuras marinas, aunque también puede ser utilizado para tanques de almacenamiento de agua cruda o de agua tratada, siempre y cuando los valores de la resistividad no sean mayores que el antes indicado.

#### III.4 Protección catódica por medio de corriente impresa.

En el tema anterior se analizó el mecanismo para proporcionar protección catódica por medio de ánodos de sacrificio, la protección resultante es definida en virtud de la corriente que los ánodos de sacrificio ya sean de aluminio, magnesio o zinc, proporcionan a la estructura. El método de protección catódica por medio de corriente impresa, consiste en una fuente de corriente directa, que es el requerimiento esencial, ésta puede obtenerse con equipo convencional como generadores de corriente directa principalmente. Esta corriente fluye a través de un electrodo llamado ánodo, de éste al electrolito y de ahí a la estructura por proteger. El ánodo puede ser similar en forma y tamaño a los ánodos de sacrificio, pero en lugar de que el potencial del metal se obtenga del material, se obtiene de una fuente de corriente directa. Por lo

tanto, no hay ninguna razón para que el ánodo se corra y será una ventaja particular si es un ánodo permanente. La corriente requerida por la estructura será la misma que con los ánodos de sacrificio, si el ánodo permanente es de forma similar, tamaño e instalación y el voltaje requerido en el generador de corriente directa puede calcularse de los componentes del circuito eléctrico.

Tenemos entonces en un sistema de este tipo dos parámetros a determinar, que son: el voltaje del circuito y la corriente. Este método de protección catódica es conocido como método de corriente impresa.

Los ánodos de sacrificio están limitados por su voltaje y tienen que ser calculados dentro de esta limitación bajo las condiciones particulares del terreno o del electrolito que rodea la estructura. Los sistemas de diseño diferentes para obtener ventaja de ésta, para proteger una estructura muy grande como por ejemplo una tubería de gran longitud con ánodos de sacrificio, se requerirían una gran cantidad de ellos para distribuirlos a lo largo de dicha tubería, lo que incluye una multiplicidad de conexiones eléctricas y una gran cantidad de trabajo de instalación con un sistema de protección a base de corriente impresa, la estructura puede ser protegida con un solo punto o con varios puntos de alimentación de corriente con las consecuentes economías, tanto en materiales como en mano de obra.

Un sistema de corriente impresa consistirá entonces de los siguientes elementos:

- a) Un rectificador de corriente
- b) Un sistema de tierra a base de ánodos inertes y conexiones eléctricas entre el rectificador, la estructura por proteger y el sistema de tierra,

El rectificador se conectará su polo positivo al sistema de tierra y su polo negativo a la estructura por proteger;

Como la corriente es alimentada de una fuente externa, el material del ánodo usado como dispositivo de tierra requiere distintas propiedades a las que hemos analizado en los ánodos de sacrificio. Preferiblemente este sistema de tierra debe ser de un bajo costo de desgaste anual. El costo del ánodo dependerá de distintos factores: del diseño, la vida requerida, la corriente que va a drenarse, el sistema de instalación y la facilidad de reemplazamiento de dicho sistema de tierra para efectos de mantenimiento,

Para un mejor entendimiento del método de corriente impresa se tiene la siguiente figura:



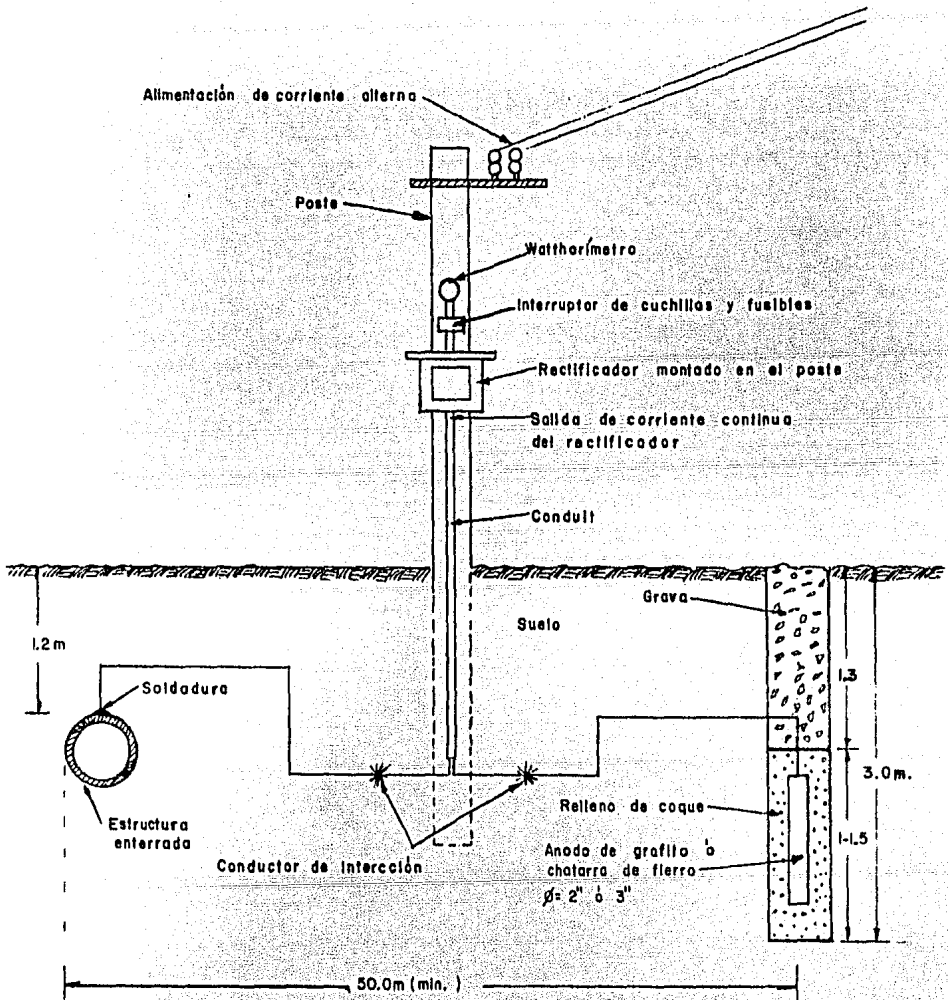


FIG. NO.7 PROTECCION CATODICA CON SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA

#### IV CAPITULO.

#### APLICACIONES PRACTICAS DE LA PROTECCION CATODICA A PILOTES DE ACERO Y LA UTILIZACION DE ESTOS EN ESTRUCTURAS CIVILES: MUELLES, PLATAFORMAS MARINAS Y PUENTES.

El empleo de pilotes de concreto en las estructuras mencionadas resulta desaconsejable en ocasiones, ya que al ser transportados al mar, playa o río, las maniobras para trasladarlos implican muchos movimientos que algunas veces provoca que se fracturen o rompan, siendo en esos casos preferibles los pilotes de acero. Otras razones por las que se usan pilotes de acero son las siguientes :

- Porque los pilotes de acero son ligeros y manejables.
- Porque la sección circular tiene mayor momento de inercia y permite una mejor distribución de las fuerzas que actuarán sobre la estructura.
- Por la facilidad para unir los pilotes.
- Porque las dimensiones transversales de los pilotes de concreto son muy grandes.
- Por el agrietamiento provocado por los golpes de los barcos a los pilotes de concreto, los cuales son atacados por los sulfatos y cloruros, originando fuertes corrosivas al acero.

Como los pilotes de acero van a estar expuestos a la acción del agua marina, zona de marea y oleaje, inversión del lecho marino, ambiente y brisa marina, se necesita protegerlos contra el deterioro prematuro causado por la corrosión.

Para proteger dichas estructuras en la zona de brisa marina y oleaje se usarán recubrimientos anticorrosivos, mientras que en la zona inmersa y enterrada se empleará protección catódica.

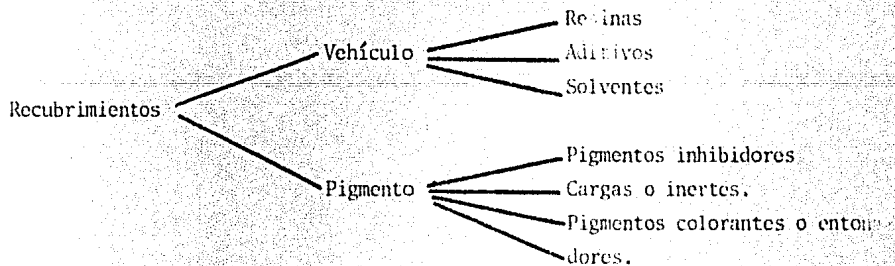
A continuación se expondrá detalladamente lo relacionado con recubrimientos anticorrosivos y posteriormente se presentarán proyectos para muelles, plataformas marinas y puentes, donde se ha empleado la protección catódica con ánodos de sacrificio.

#### IV 1.- RECUBRIMIENTOS.

La protección a los pilotes de acero se inicia primeramente, al aplicarle a estos recubrimientos anticorrosivos, los cuales pueden definirse como una dispersión relativamente estable de un pigmento finamente dividido en una solución de una resina y aditivos, la película resultante representa una barrera flexible adherente y con máxima eficiencia de protección contra la corrosión.

Proteger los pilotes con recubrimientos es muy importante, ya que ésto nos ocasiona grandes beneficios, pues una estructura protegida con recubrimientos necesitará menos protección catódica (corriente proveniente del ánodo), por lo que se tendrá una mayor durabilidad del ánodo y también será menor su desgaste por erosión.

Normalmente un recubrimiento considera los siguientes componentes básicos:



- a) Resinas: Son compuestos orgánicos o inorgánicos poliméricos formadores de película cuyas funciones principales son las de fijar el pigmento, promover una buena adherencia sobre el sustrato metálico de una barrera flexible, durable e impermeable a los agentes corrosivos del medio ambiente.

Dentro de un cuadro básico, se utilizan los siguientes tipos de formadores de película a través de los recubrimientos que protegen las estructuras metálicas:

- 1.- Resina alquidámica.
- 2.- Resina epóxica.
- 3.- Resina poliamídica.
- 4.- Resina poliamínica.
- 5.- Resina vinílica.
- 6.- Resina acrílica.
- 7.- Resina fenólica.
- 8.- Resina de Cumarona-Indeno.
- 9.- Resina de silicón.
- 10.- Silicatos de etilo, litio, sodio y potasio.
- 11.- Aductos y mezclas de algunos de estos productos.

b) Aditivos: Son compuestos metálicos y organo-metálicos que no obstante que se adicionan en pequeñas cantidades tienen gran influencia sobre la viscosidad y estabilidad del recubrimiento líquido, así como sobre el poder de nivelación y apariencia de la película ya aplicada.

- c) **Solventes:** Son líquidos orgánicos de base alifática o aromática cuya función principal es la de disolver las resinas o aditivos y presentar un medio adecuado para la dispersión de polmento. Estos compuestos no son formadores de película, ya que se eliminan del recubrimiento a través del proceso de secado.
- d) **Pigmentos:** Son sustancias sólidas orgánicas o inorgánicas que reducidas a un tamaño de partícula inferior a las 25 micras (1 milésima de pulgada) y dispersas en el vehículo, imparten a la película seca del recubrimiento propiedades tales como: Resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, poder cubriente, así como protección a la acción degradante de los rayos ultravioletas de la luz solar.
- e) **Pigmentos inhibidores:** Inhiben en mayor o menor grado la corrosión impidiendo el acceso de los agentes corrosivos al sustrato metálico dado que obstruyen los poros presentes en pequeña proporción en cualquier recubrimiento. Entre ellos se puede mencionar al minio, subóxido de plomo, cromado básico de zinc, polvo de zinc, óxido de zinc, combinado amarillo de zinc, sulfato básico de plomo, etc.

f) Pigmentos cargas o inertes.

Frecuentemente la cantidad de pigmento inhibidor necesario para la protección de la resina a los rayos ultravioleta es inferior a la que se requiere en la formulación, por lo que es una práctica común cubrir el excedente con cargas o inertes que resultan más económicos. Como ejemplo se tiene silicato de magnesio, Mca. talco, sílica de diatomacea, baritas, bentónicas, etc.

g) Pigmentos entonadores:

Son compuestos solubles o fácilmente dispersables en el vehículo que en menor proporción al pigmento inhibidor permiten lograr diferentes tonos y colores en el recubrimiento. Azul de ftalocianina, rojo toluidina, naranja de dini--trualinina y naranja molibdato, son ejemplos de este tipo de pigmentos.

Una vez definido los componentes de los recubrimientos, es necesario señalar que antes de la aplicación de cualquiera de éstos, la estructura será sometida a un proceso de limpieza o preparación. Esto se hace con el fin de eliminar los principales contaminantes tales como la grasa, aceite, suciedad, espuma, escama de la laminación y el herrumbre.

La preparación o limpieza de superficies de acero se reduce a cuatro métodos fundamentales que se detallan en los siguientes incisos.

a) Limpieza con chorro de arena.

Este es el método más eficaz en la preparación de superficies de acero, dado que, además de eliminar eficientemente la suciedad, herrumbre, escamas, escoria y otros contaminantes, proporciona una superficie áspera de color gris uniforme, excelente para promover una buena adherencia del recubrimiento.

Dependiendo del tipo de recubrimiento para utilizar en la película, se utilizan tres grados de limpieza con chorro de arena.

- 1.- Limpieza a metal blanco. Se obtiene una superficie gris claro uniforme, eliminando totalmente cualquier contaminante de los mencionados anteriormente.
- 2.- Limpieza comercial. Se obtiene una superficie gris oscuro con rayas o estrías más oscuras, eliminando todo el herrumbre, escoria de laminación y cualquiera otra materia extraña pero sin eliminar totalmente las incrustaciones firmemente adheridas.
- 3.- Limpieza cercana a metal blanco. Su aspecto es intermedio entre los dos tipos de limpieza antes mencionados y no deberá mostrar óxido de herrumbre, residuos de pintura, aceite, grasa u otra materia extraña.

Este método consiste en limpiar la superficie metálica por medio de soploteo con arena sílica y gravilla de acero, el aire es inyectado a pre



sión y se le agrega el material abrasivo. Ambos deben mantenerse constantes.

b) Limpieza manual.

Este método de preparación de superficie considera el uso de herramientas neumáticas y eléctricas, tales como cepillos rotatorios de cerdas de alambre, esmeriles, lijadora, y herramienta de impacto, así como de herramientas manuales del tipo cepillos de alambre, raspadores, cincelos, martillos especiales, etc.

c) Limpieza química.

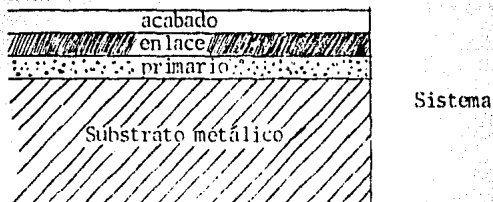
Este procedimiento considera el uso de mezclas o soluciones comerciales capaces de producir por separado primeramente una acción detergente capaz de eliminar restos de grasa y aceite y de disolver escamas, escoria y restos de óxido a fin de dejar la superficie libre de cualquier contaminante.

De los métodos antes mencionados, la preparación con chorro de arena constituye el método más eficaz para el caso del acero estructural y solamente en aquellos casos que resulte impráctica e incosteable podrán utilizarse la limpieza manual o la química, aunque es preferible la manual.

## ESPECIFICACIONES PARA RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS.

Para efectos de protección anticorrosiva y debido a la permeabilidad natural de los recubrimientos, éstos deberán aplicarse con un espesor tal que la película seca nunca sea inferior a las 6 mls. de pulgada. En principio podría pensarse en cubrir este espesor en una sola formación de un recubrimiento donde incluyese la resina adecuada y un porcentaje determinado de pigmentos inhibidores, no obstante la eficiencia en la protección contra la corrosión no depende exclusivamente de la resina y del pigmento sino también del espesor.

Aspectos de tipo económico han dado lugar a la utilización de diferentes formulaciones para cubrir el espesor antes mencionado. Dependiendo de su posición, estas formulaciones se denominan primario, enlace y acabado; al conjunto se le conoce como sistema; las características más relevantes de cada uno de ellos se mencionan a continuación:



**PRIMARIO:** Son recubrimientos cuya formulación está encaminada fundamentalmente hacia la obtención de una buena adherencia con el sustrato metálico, así como hacia la inhibición de la corrosión, por lo que normalmente los contenidos de pigmentos

inhibidores son elevados. Otros requisitos adicionales en un primario consideran el presentar una superficie lo suficientemente áspera y compatible para que las siguientes capas de enlace o acabado logren una buena superficie para la adherencia, además deben ser resistentes a productos de la corrosión y poseer buena humectación.

**ENLACE:** Para ciertos casos particulares no es posible tener el mismo tipo de resina en el primario y en el acabado, presentándose problemas de incompatibilidad o de adherencia, por lo que se requiere de una capa intermedia denominada de enlace capaz de adherirse tanto al primario como al acabado. Normalmente los enlaces contienen una mezcla de resinas parte de las cuales contienen la adherencia con el primario y el resto con el acabado.

Con fines de identificación y control de espesor es conveniente que el primario, enlace y acabado en un sistema sean de diferente color y como se mencionó anteriormente, la suma total de los espesores de estos componentes debe ser superior a 6 mls. de pulgada a fin de que sea efectivo en su protección contra la corrosión.

**ACABADO:** Los acabados representan la capa exterior en contacto con el medio ambiente y se forman para promover la impermeabilidad del sistema, por lo que su contenido de pigmento en volumen es inferior al 25%. En este tipo de recubri-

mientos es frecuente el tipo de entonadores y el contenido de pigmentos inhibidores es inferior al de un primario, su grado de molienda es tal que su superficie ofrece un aspecto terso y/o brillante.

En la elección del tipo de acabado, es de mucha importancia para la adherencia su compatibilidad con el tipo de primario utilizado, en términos generales, el uso del mismo tipo de resina en estos dos componentes del sistema, asegura una buena adherencia, aún cuando hay casos como los epóxicos capaces de lograr una adherencia sino excelente, cuando menos aceptable sobre otro tipo de recubrimientos. Como la gama de recubrimientos es muy amplia y extensa, entonces se mencionan únicamente los que se aplican para la protección de pilotes de acero.

- a) Recubrimientos vinílicos. Son recubrimientos no tóxicos resistentes a la abrasión que pueden ser utilizados en la protección de superficies metálicas para que resistan a la inmersión continua en agua dulce o salada.
- b) Recubrimientos Epoxi-Alquitrán de hulla. Este recubrimiento se ha desarrollado específicamente para resolver de inmersión continua en agua salada por muy largo tiempo. En él se combinan la alta resistencia y características de un recubrimiento epóxico con alta impermeabilidad del alquitrán de hulla. No se recomienda su exposición continua a los rayos del sol, ya que tiende a cuartearse.

c) Recubrimiento Vinil-Acrílico. Es un recubrimiento que combina la alta resistencia química y a la abrasión de los vinílicos con la excepcional resistencia al intemperismo y rayos del sol de las resinas acrílicas; no se recomienda para inmersión continua.

d) Recubrimientos antivegetativos. Es un recubrimiento desarrollado para prevenir el crecimiento de organismos marinos en superficies sumergidas por largos periodos, este recubrimiento requiere una formulación cuidadosa a fin de que el tóxico abandone el recubrimiento paulatinamente en cantidad suficiente para inhibir el crecimiento de organismos marinos.

Petróleos Mexicanos tiene especificados los siguientes recubrimientos:

P R I M A R I O S

Especificaciones	Denominación
RP-1-74.....	Minio alquidálico.
RP-2-74.....	Cromato de zinc, vinil alquidálico.
RP-3-74.....	Zinc 100% inorgánico tipo poscurado.
RP-4-74 Tipo A.....	Zinc 100% inorgánico, autocurante Base acuosa.
RP-4-74 Tipo B.....	Zinc 100% inorgánico, autocurante Base solvente.
RP-5-74 Tipo A.....	Epoxi-Alouitrán de hulla catalizado con amino.
RP-5-74-Tipo B.....	Epoxi-Alouitrán de hulla catalizado con poliamida.
RP-6-74.....	Epóxico catalizado.
RP-7-74, Primario.....	Vinil epóxico.
RP-7-74 Enlace.....	Vinil epóxico.

## Especificaciones

## Denominación.

RP-8-74..... Epóxico catalizado para turbosina.

## A C A B A D O S

## Especificaciones

## Denominaciones.

RA-20-74..... Esmalte alquidálico brillante.  
 RA-21-74..... Epóxico catalizado.  
 RA-22-74..... Vinílico de altos sólidos.  
 RA-23-74..... Epóxico catalizado para turbosina.  
 RA-24-74..... Fenólico de aluminio.  
 RA-25-74..... Vinil acrílico.  
 RA-26-74..... Epóxico catalizado de altos sólidos.

R E C U B R I M I E N T O S  
E S P E C I A L E S .

RE-30-74-Tipo A..... De cumarona, para altas temperaturas.  
 RE-30-74-Tipo B..... De silicón, para altas temperaturas.  
 RE-31-74 Tipo A..... Antivegetativo, base  $Cu_2O$   
 RE-31-74-Tipo B..... Antivegetativo, con órgano metálico.  
 RE-32-74..... Epóxico para zona de mareas y oleajes.  
 RE-33-74..... Esmalte alquidálico para tambores.

De los recubrimientos descritos anteriormente, se seleccionarán los más utilizados para pilotes de acero.

Quando la humedad sea del 60-80% se empleará un recubrimiento primario RP-4-74

Tipo A, cuando la humedad sea del 60-95% se utilizará un RP-4-74 tipo B y se em-

pleará para acabado un RA-21 ó RA-26 ó RA-22.

Para instalaciones sumergidas en agua de mar o para fondos de embarcaciones, se aplicará un recubrimiento primario RP-5-B y un acabado RE-31-74 "A" o "B".

Para estructuras que se encuentren en parte sumergidas y en parte expuestas al medio ambiente, se emplea un recubrimiento primario RP-4-74 tipo "B" y un acabado RA-21-74 también se utiliza un recubrimiento especial RE-32-74 (epóxico para zonas de mareas y oleajes).

#### IV.- 2 APLICACIONES PRACTICAS DE LA PROTECCION CATODICA EN MUELLES.

Para proporcionar protección catódica, ya sea a muelles, plataformas marinas o puentes, es necesario que se lleven a cabo los siguientes procedimientos de operación:

- 1.- Limpieza de la estructura.
- 2.- Aplicación de recubrimientos anticorrosivos.
- 3.- Realización de prueba de requerimiento de corriente (después de colocar la estructura.
- 4.- Determinación de la corriente necesaria de diseño (ID).
- 5.- Cálculo de la masa anódica.
- 6.- Determinación de las características físicas, químicas y electroquímicas del ánodo:

- Longitud (L)
- Radio (Y)
- Corriente drenada del ánodo (I<sub>o</sub>)
- Material anódico a emplear.
- Eficiencia.
- Consumo.
- Capacidad de corriente:



7.- Instalación del sistema protector una vez colocada la estructura (ánodos de sacrificio o corriente impresa).

A continuación se analizará un proyecto para muelles, protegiéndolo catódicamente con ánodos de sacrificio:

PROTECCION CATODICA PARA LAS PLATAFORMAS DE ATRAQUE DEL MUELLE No. 4 PAJARITOS VER.

#### 1.- ANTECEDENTES:

Originalmente el Muelle No. 4 de la Terminal Marítima en Pajaritos, Ver., fue diseñado y construido considerando pilotes de concreto para todos sus elementos; sin embargo debido a un accidente, las plataformas de atraque recibieron daños de consideración debido a los continuos golpes que los barcos cargueros le proporcionaron, lo cual obligó, con el fin de prevenir futuros daños, a construir plataformas de atraque que protegieran a los elementos principales de dicho muelle, usando en esta ocasión pilotes metálicos de 48"Ø x 2" de espesor, así el muelle 4 cuenta con 8 plataformas de atraque con 5 pilotes metálicos de 48"Ø x 2" de espesor cada una, haciendo un total de 40 pilotes metálicos en este muelle.

Debido al medio que estarán expuestos dichos pilotes, es necesario protegerlos contra un deterioro prematuro causado por la corrosión.

2.- OBJETIVO: La finalidad del presente estudio es diseñar el o los sistemas de protección anticorrosiva necesaria para que los pilotes metálicos de las plataformas de atraque del muelle No. 4 no sufran deterioros prematuros a causa de la corrosión.

3.- ALTERNATIVAS POSIBLES Y SELECCION DE LA MAS ADECUADA.

Los pilotes metálicos de las plataformas de atraque del muelle No. 4 están expuestos a la acción corrosiva de los siguientes medios:

- a) Ambiente y brisa marina.
- b) Zona de marea y oleaje.
- c) Inmersión en agua de mar.
- d) Inmersión en el lecho marino.

Para proteger la estructura es necesario usar recubrimiento anticorrosivo en las zonas de ambiente y brisa marina y en la zona de mareas y oleaje, ya que éstos provocan corrosión de tipo químico. En las áreas inmersas en agua de mar y el lecho marino se da una corrosión de tipo electroquímico y por lo tanto presentan condiciones favorables para la implantación de un sistema de protección catódica.

La protección catódica a una estructura, se puede suministrar ya sea por medio de corriente impresa, o bien mediante ánodos de sacrificio. Por presen

tar los pilotes un 100% de área desnuda y estar inmersos en un medio de alta conductividad, el protegerlos mediante inmersa representa costos elevados de operación y mantenimiento. En base a esto, se proporcionará protección catódica por ánodos de sacrificio a los pilotes metálicos, para protegerlos en las zonas que se encuentran inmersos, independientemente del sistema de recubrimientos anticorrosivos para la zona de mareas y oleajes, así como de la brisa y ambiente marino.

4.- Bases teóricas.

- Material anódico a emplear.

Aleación de aluminio Galvalum.

- Características electroquímicas de material anódico:

Eficiencia - - - - - 95%

Capacidad de corriente - - - - - 1280 lbs/amp-año.

Consumo - - - - - 6,8 lbs/amp-año.

Potencial en circuito cerrado - - - - 1.1 volts (Cu/Cu SO<sub>4</sub>)

- Resistividad del agua de mar: = 20 Ohm-cm.

CALCULOS.

1.- Corriente necesaria de diseño (ID)

Conociendo la densidad de corriente de protección ( $8\text{mA}/\text{pie}^2$ ) y el área de 1 pilote, la corriente de diseño queda definida por:

$$ID = AP \text{ (DC)} = 1277.75 \text{ (8)} = 10222 = 10.22 \text{ amp/pilote.}$$

2.- Masa anódica mínima necesaria.

Se determina con la siguiente expresión:

$$W = \frac{I \text{ o } Ca \text{ } Va}{Ep}$$

DONDE :

W = Masa anódica mínima necesaria (C/BS)

Ca= Consumo del material anódico = 6.8 BS/amp-año.

Va= Vida Útil esperada del ánodo = 10 años.

Ep= Eficiencia práctica del ánodo = 0.8

ID= Corriente diseño = 10.22 amp.

$$\text{Sustituyendo valores: } W = \frac{10.22 \text{ (6.8) (10)}}{0.8} = 868.7 \text{ lbs}$$

3.- Determinación de las características del o de los ánodos requeridos.

Las variables que deben satisfacer este ánodo o grupo de ánodos serán:

ID = 10.22 amp.

Va = 10 años.

W = 868.7 lbs,

Para determinar las características del ánodo o grupo de ánodos que satisfagan estas variables se emplean las siguientes fórmulas :

$$I_0 = \frac{AE (L)}{0.0626 (\rho) \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right)}$$

$$Y = \frac{C (U) (W)}{I_0 (8760)}$$

DONDE :

$I_0$  = Corriente drenada del ánodo.

AE = Potencial de circuito cerrado.

L = Longitud del ánodo (Pulg.)

$\rho$  = Resistividad del electrolito = 20 Ohm - cm

r = Radio equivalente del ánodo.

Y = Vida útil del ánodo.

C = Capacidad de corriente = 1280 amp-hr/lbs.

U = Factor de utilización = 0.8

Como paso siguiente, se resuelven estas ecuaciones para distintos valores

de L y r. Tomando en cuenta que se usarán ánodos de sección "G", el radio

(r) será:

$$r = \sqrt{\frac{\Delta \times B}{\pi}}$$

DCNDI :

$r$  = Radio equivalente.

$A$  = Ancho del ánodo (pulg).

$B$  = Altura del ánodo (pulg).

Al sustituir valores para un ánodo de 7" de ancho por 7" de altura ( $B$ ) y longitud de 96" ( $L$ ), obtenemos:

$r = 3.9493$  pulg.

$I_o = 5.35$  amp, como necesitamos 10.22 amps, son 2 ánodos.

$Y = 10.14$  años.

$W = 465$  lbs (aprox).

Por lo tanto, para proteger catódicamente los pilotes metálicos de 48"Ø en las plataformas de atraque del Muelle No. 4, es necesario instalar 2 ánodos de 7" x 7" x 96" en cada uno de ellos, ya que así se satisfacen los requisitos establecidos anteriormente. Por lo tanto como son 2 ánodos por pilote y como son 40 pilotes, se necesitarán 80 ánodos.

6.- Estimado de costos  
 (Según precios Febrero de 1985).

<u>Part.</u>	<u>Cant.</u>	<u>Descripción</u>	<u>Precio Unit.</u>	<u>Precio total</u>
1	80	Suministro de ánodos de alu- minio tino galvalum, sección G de 7"x7"x96", con alma de tubo de acero de 2"Ø Ced.80 con características electro- químicas según se indica en en Anexo III.	\$ 250,000.00	\$20'000,000.00
2	160	Suministro de placas roladas para fijación de ánodos a los pilotes. Las características y dimensiones de estas placas se muestran en el Anexo II.	\$ 3,000.00	\$ 480,000.00
3	160	Instalación de placas de fija- ción (Part. 2) a ánodos de sa- crificio (Part. 1), con solda- dura eléctrica por arco, según se indica Anexo II.	\$ 1,000.00	\$ 160,000.00

4	80	Instalación de ánodos a pilotes de 48"Ø, según se indica en el Anexo II.	\$ 16,000.00	\$ 1'440,000.00
5	10	Suministro de ánodos de aluminio tipo galvalum, sección G de 7"x7"x96", con alma de tubo de acero de 2"Ø Ced. 80 con características electroquímicas, según se indica en el Anexo III. Estos se usarán para posibles reposiciones y ajustes.	\$ 250,000.00	\$ 2'500,000.00

---

\$24'580,000.00

=====

7.- RECOMENDACIONES:

- 1.- Las pasarelas de acceso a las plataformas de operación con pilotes metálicos se deben aislar eléctricamente de éstas, colocando en los puntos de contacto una placa de neopreno, o bien, de neolite de 1/4" de espesor.



- 2.- En todos los pilotes se debe aplicar recubrimiento RE-32 a un espesor de 100-125 milésimas de pulgada, debiéndose aplicar desde el nivel mínimo de mareas, hasta un metro sobre el nivel máximo de mareas.
- 3.- En este caso, es posible checar potenciales de protección para cada pilote y por ser de fácil acceso no se considera necesario instalar registros para medir potenciales. Cuando se requieran estas lecturas, se deben hacer tomándolas directamente del pilote en cuestión.
- 4.- Los ánodos deben soldarse al tubo (pilote) tan pronto se sumerjan. Nunca deben mantenerse sumergidos durante más de dos horas sin soldarse a su pilote correspondiente.
- 5.- Todos los trabajos relativos a la supervisión de la instalación del sistema de protección catódica deberán relacionarse bajo estricto control por personal técnico de la superintendencia local de construcción y/o proyectos.

## 8 - CONCLUSIONES :

Para proteger catódicamente los pilotes metálicos (80 pzas. de 48"Ø de las plataformas de atraque del muelle No. 4 de la terminal Marítima de Pajaritos, es necesario realizar los siguientes trabajos:

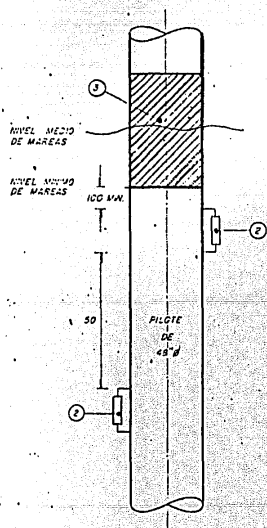
- 1.- Suministrar 90 ánodos de aluminio tipo galvalum, sección G de 7"x7" y longitud 8' (96"), con pesos aproximados de 465 lbs. cada uno, su eficiencia debe ser de 95%, capacidad de corriente de 1280 amp-hr/lb, consumo 6.8 -- lbs/amp-año y potencial de circuito cerrado de -1.1 V (Ver anexo III).
- 2.- Suministro de 160 placas de acero al carbón de 1/2" x 8" x 8" roladas según se indica en el Anexo II.
- 3.- Instalación de las placas de acero de 1/2" x 8" x 8" a los extremos de los ánodos, mediante soldadura de arco eléctrico, según se indica en el Anexo II.
- 4.- Instalar en cada uno de los 40 pilotes metálicos 2 ánodos según se indica en el anexo II.

Además de estos trabajos, es necesario proteger, en la zona de mareas y oleaje, los pilotes con recubrimiento PE-32, siguiendo los lineamientos marcados en el tema sobre recubrimientos anticorrosivos, señalados anteriormente.

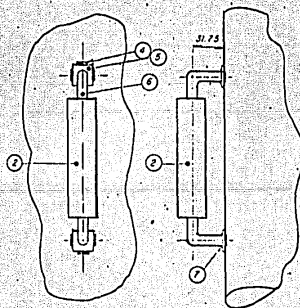
ANALISIS DE COSTOS.

- Costo de operación total de la obra \$ 24'580,000.00, considerando que la protección catódica durará 10 años.
- Costo por año \$ 2'458,000.00
- Costo por ánodo/anual \$ 30,725.00
- Area de 1 pilote 119.5 m<sup>2</sup>
- Costo por 1 m<sup>2</sup> de pilote/anual \$250.00

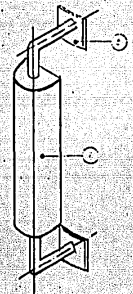
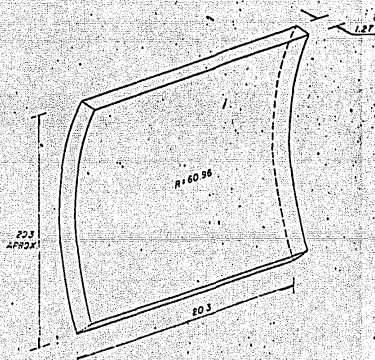
DISTRIBUCION DE ANODOS EN PILOTES DE 48"Ø



DETALLE DE INSTALACION DE ANODOS



DETALLE DE PLACA DE FIJACION (5)



NOVENCLATURA:

- ① ANODO DE ALUMINIO LISTO PARA EL MONTAJE
- ② ANODO DE ALUMINIO INSTALADO
- ③ ACCESORIOS RE-132
- ④ SOLDADURA SUBMARINA, COMPLETA DE 1/2" EN CADA UNO DE LOS 3 LADOS ACCESIBLES DE CADA PLACA.
- ⑤ PLACA DE FIJACION DE ALEA AL CROMIO DE 1.27" DE ESPESOR Y 87.93" ANCHURA A UN RADIO DE 60.96" (R=47).
- ⑥ TUBO DE ACERO AL CARBONO SCS A 18" DE DIAM. Y CEMENTO DE SOLDADURA ELECTRODA

<b>UNAM ENEP ARAGON</b>	
ENRIQUE	SANCHEZ LOPEZ
TESIS PROFESIONAL	

### IV.3 Plataformas marinas.

Una plataforma marina es un complejo estructural compuesto por una o varias cubiertas que sobresalen convenientemente del nivel del mar, alojando instalaciones diversas de acuerdo a las funciones para las cuales haya sido destinada.

Esa cubierta o conjunto de cubiertas se apoyan directamente en un sistema estructural, que bien puede ser metálico o de concreto; el cual puede extenderse o no, hasta el lecho marino, puede o no estar cimentado en forma permanente.

Estos complejos estructurales pueden estar alejados de la costa varios cientos de kilómetros y la extensión de sus áreas variará de acuerdo a sus funciones.

Estructuralmente las plataformas están diseñadas para diferentes estados de esfuerzo, originados por diferentes agentes mecánicos externos, que en términos generales son los siguientes :

- Las fuerzas debidas al viento, las cuales son función de la velocidad del mismo, la orientación de la estructura y las características aerodinámicas de los elementos estructurales componentes,
- Las fuerzas debidas al oleaje, que deben considerarse en condiciones de tormenta con un tiempo de retorno de 100 años, además de tomar en cuenta las variaciones de marea durante la vida útil. Estas fuerzas se calculan mediante sus componentes ortogonales.

- Las fuerzas debidas a las corrientes marinas, las cuales producen aumento en las componentes horizontales de las fuerzas del oleaje, producen aceleración en las mismas y hacen que la estructura genere ondas que provocan difracción de fuerza. Los dos últimos efectos son generalmente despreciables para fines náuticos.
- Carga muerta que puede deberse al equipo de perforación, equipo de tratamiento de materiales complementarios para la perforación, materiales para el proceso de tratamiento del crudo, cargas que induce la perforación y el equipo operativo básico.
- Carga viva que es función y responsabilidad del usuario de la plataforma.
- Fuerzas de impacto las cuales deberán determinarse en función del tipo de embarcaciones que se acerquen a la plataforma dentro del plan operativo.
- Fuerzas inducidas por movimientos sísmicos,
- Otras, como son las debidas a los amarres circunstanciales de las embarcaciones.

Los eventos de mayor importancia dentro de las diferentes etapas para realizar la construcción de una plataforma marina de sub-estructura tubular de acero, son los siguientes :

- Etapa de diseño.
  - Estudios preliminares e investigaciones especiales.
  - Estudio geotécnico, estudio geofísico y geología de márgenes continentales.
  - Selección del tamaño de las grúas y lanchones de trabajo.
- Determinación de las condiciones relativas a la corrosión, solicitaciones mecánicas ambientales, transportación de productos, personal y equipo.
- Preparación y diseño de los planos ingenieriles,
  - Diseño de la cimentación,
  - Diseño estructural,
  - Preparación de planos,
- Etapa constructiva,
  - Fabricación en tierra,
  - Pedido y recibimiento de materiales,
  - Fabricación de artículos especiales,
  - Equipos y modelos,
  - Cortado, ajuste y unión de miembros componentes,
  - Revestimiento de componentes y aplicación de otros procedimientos de protección contra corrosión,
- Carga y transportación de la estructura al sitio de emplazamiento,

- Fijación de la estructura en el mar.

Hundimiento y colocación de la estructura sobre el niso marino.

Instalación de los pilotes de cimentación.

· Maniobras de inspección submarina.

Construcción y ensamble coordinado de partes.

Cimentación profunda de las plataformas marinas y análisis respectivo.

La cimentación profunda mediante pilotes tubulares de acero queda fijada en el momento que se define para la plataforma una sub-estructura de acero, lo que sucede generalmente si en la zona de ubicación de la obra existen tirantes de agua importantes, o si la distancia entre ella y el patio de construcción es muy grande o también, si la configuración del lecho marino presenta irregularidades significativas donde se ve la conveniencia de que los pilotes sean prácticamente una extensión de las patas de la sub-estructura.

La operación de instalación de los pilotes se realiza desde un barco de trabajo que tiene una grúa con capacidad suficiente para manipular tramos de pilotes cuyas longitudes suelen ser mayores a los 100 m.

El plan de trabajo en la instalación de los pilotes se programa fundamentalmente para lograr lo más rápidamente posible la estabilización de la sub-estructura, y ésto se logra generalmente con el hincado de los pilotes interiores donde uno



de ellos se considera de prueba para ajustar en el sitio de la obra los procedimientos de hincado de los pilotes restantes, de esta manera se hacen esfuerzos para garantizar la posibilidad de hincado del grupo de pilotes.

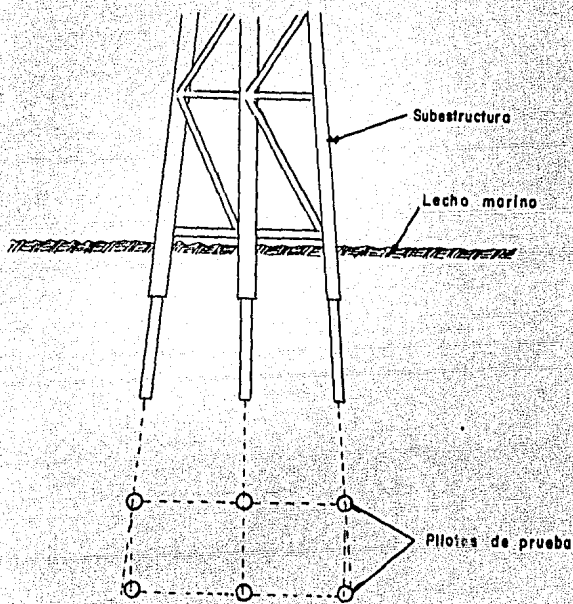


FIG. NO.1 LOCALIZACION DE PRUEBA

Apoyada la sub-estructura en el lecho marino después de haber sido sumergida el primer tramo del pilote de prueba se introduce en una de las patas dejándose caer por peso propio hasta la profundidad donde el suelo alcanza a desarrollar la resistencia que lo equilibra. En las zonas donde predominan las formaciones arcillosas superficiales, esa profundidad donde se detiene el pri

mer tramo de pilote puede alcanzar facilmente los 40 ó 50 m.; mientras que en las zonas donde la presencia alternada de estratos superficiales de arena es dominante, esa profundidad puede quedar comúnmente entre los 5 y 15 m. Esto último sucede con mucha frecuencia en las zonas cercanas a la costa.

Colocado el primer tramo de pilote hasta la posición que marca el plan de instalación, se procede a la preparación de su contacto superior mediante el cual quedará unido al tramo siguiente, para esto se recorta una zona que se considera dañada por la acción del martillo que aplica la energía de hincado. La longitud de esta zona es función de tal energía y puede ser normalmente del orden de 1 m. lograda la unión de los tramos mediante la aplicación de la soldadura, se reinicia el procedimiento de hincado hasta que el nuevo tramo de pilote quede a su vez -- hasta la posición marcada por el procedimiento. Esto se realiza tantas veces como tramos formen el pilote.

Las patas de la subestructura presentan pequeñas inclinaciones con la vertical -- que puede estar frecuentemente comprendidas entre los 7 y 8 grados, por lo tanto, dichas patas constituyen una guía inclinada para la trayectoria de los diferentes tramos de pilote. Ver figura 2.

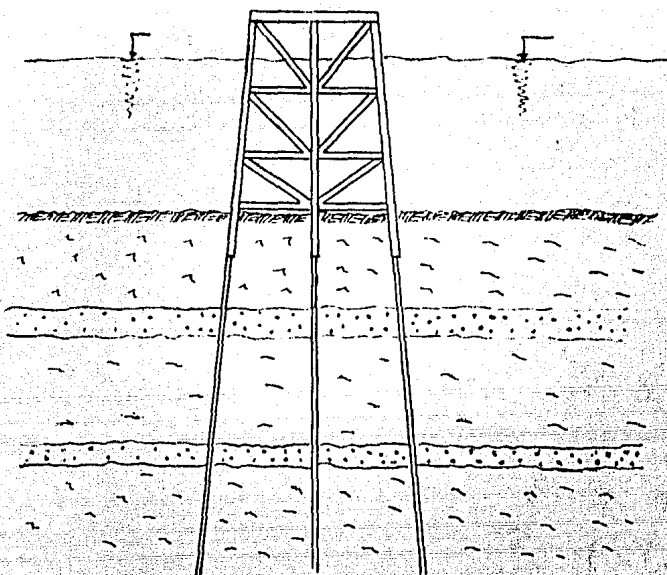


FIG. 2 ESQUEMA DE LA POSICION FINAL DE LOS PILOTES

Al terminarse la colocación total de un pilote, se realiza la unión de su parte superior con la correspondiente en la pata de la subestructura, quedando de esa manera dicho pilote colocado en su posición definitiva. Ver figura 3.

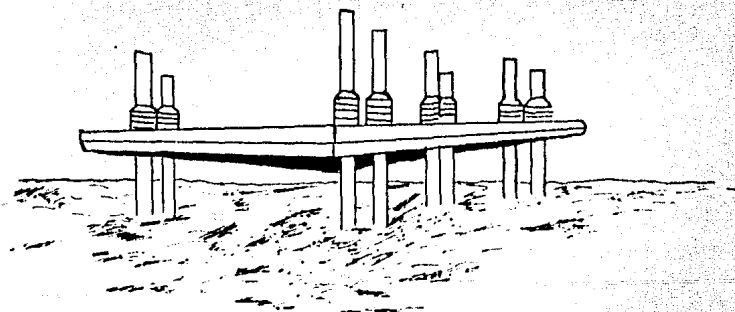


FIG. 3 PLATAFORMA CON SUBESTRUCTURA METALICA EN PROCESO DE COLOCACION DE SUS PILOTES

El análisis de la cimentación de una plataforma marina requiere como cualquier otro problema de cimentación del desarrollo ordenado de dos fases:

- a) La fase de aproximación mediante el empleo cualitativo de los factores ambientales, estructurales, constructivos y funcionales de la obra.
- b) La fase de revisión y selección definitiva mediante el manejo cuantitativo de esos factores, con el fin de obtener las mejores alternativas de entre las cuales se escoge la solución.

Por ser el medio ambiente marino el que impone los factores que principalmente marcan la diferencia entre la realización de una cimentación en el subsuelo marino y las que se practican en tierra adentro, se mencionan algunos problemas fundamentales que influyen en las etapas del proceso general de la obra, que a su vez obligan a la definición de los procedimientos del análisis de la cimentación.

#### Aspectos estructurales y constructivos de los pilotes de acero.

Los pilotes construídos para cimentar estructuras marinas ubicadas a distancias relativamente grandes de la costa, se caracterizan por tener grandes relaciones de esbeltez, debido a que la magnitud de las fuerzas que transmite la sub-estructura sujeta a las acciones de las tormentas y huracanes, o a las fuerzas de inercia de la misma, requieren comúnmente que la penetración de los pilotes en

el subsuelo marino sea del orden de los 76 a los 122 m. y como los pilotes se prolongan sobre el lecho marino, éstos pueden alcanzar fácilmente los 183 a los 244 m. de longitud. En ocasiones especiales se han registrado longitudes de pilote aún mayores, pero generalmente dentro de ciertos límites se busca reducir la longitud de los pilotes empleando mayores diámetros, lo que debe tomarse en cuenta en el diseño de la sub-estructura. Así por ejemplo, para una estratigrafía dada, se tuvo en algún caso.

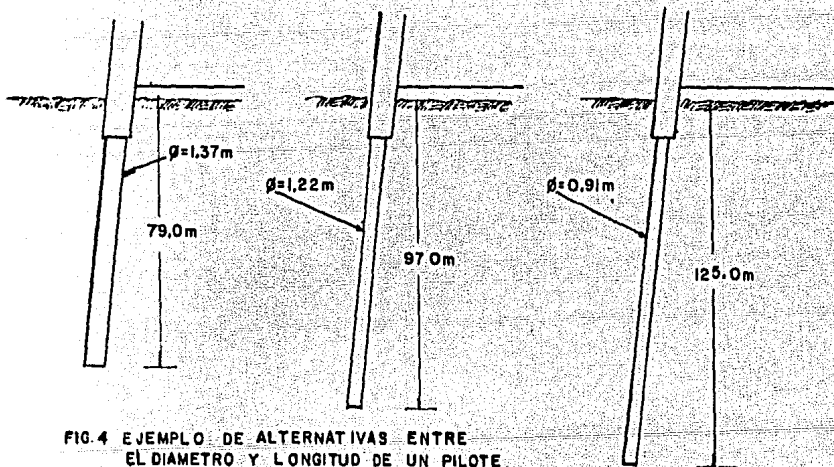


FIG. 4 EJEMPLO DE ALTERNATIVAS ENTRE EL DIAMETRO Y LONGITUD DE UN PILETE

Los pilotes generalmente están constituidos por varios segmentos con longitudes de varias decenas de metros, los cuales son hincados en el subsuelo marino a través de las patas de la subestructura, y son unidos mediante soldadura bajo estricto control de calidad por sus bordes de contacto y previamente preparado, para ello las características metálicas y estructurales de los pilotes suelen comprender entre los datos más importantes lo siguiente :

Número de tramos, longitud de los mismos, diámetro exterior, variación de espesores con la profundidad, longitud libre fuera del agua, longitud dentro del agua, longitud dentro del subsuelo marino, centro de gravedad de los tramos, tipos de acero, tipos de soldadura, características de unión entre tramos, especificaciones generales de construcción y perspectivas de hincado, ver figura 5.

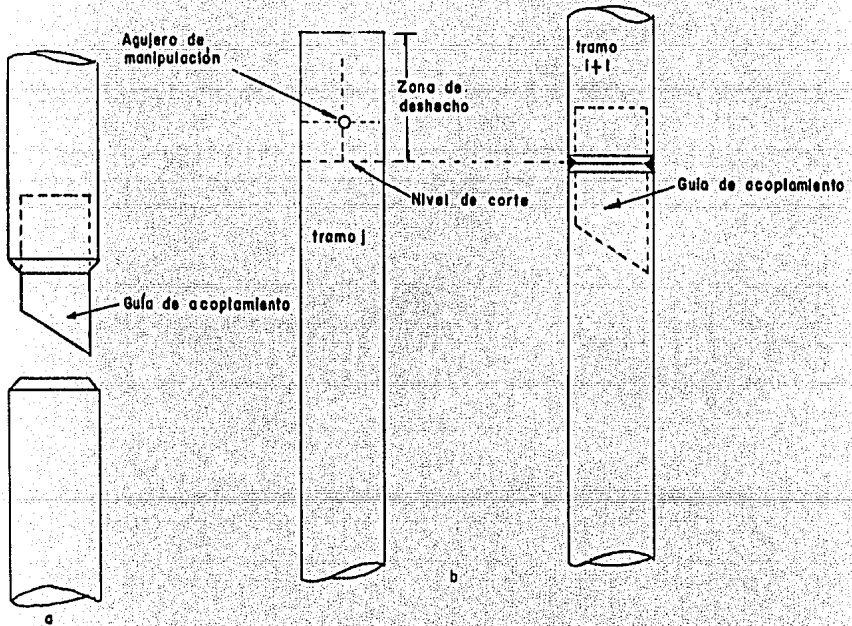


FIG. 5 ESQUEMA DE UNA GUIA DE UNION ENTRE DOS TRAMOS DE PILETE (a)  
ESQUEMA DE UNION (b)

Los diámetros exteriores de los pilotes usados comúnmente en México son de 60.96, 91.44, 106.68, 121.92 y 137.16 cms, pudiendo variar los espesores de las paredes de los mismos (16-76 mm), según las zonas de distribución de los esfuerzos debi-

dos a los momentos flexionantes y a los esfuerzos cortantes.

Los cambios de la sección se realizan en la cara inferior del pilote y consisten en aumentos concéntricos del mismo tipo de metal con que está construido el tubo exterior, ubicados en las zonas de mayores esfuerzos flexionantes y cortantes.

Una sección típica de pilote se presenta en la siguiente figura:

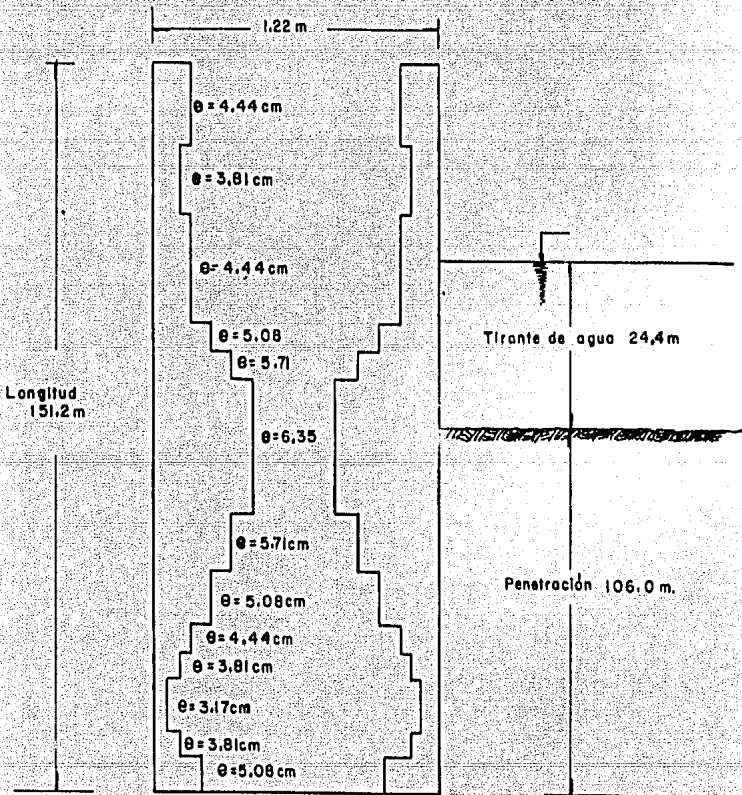


FIG.6 SECCION TIPICA DE UN PILOTE TUBULAR DE ACERO

### Localización:

De acuerdo al lugar en que se encuentra la estructura metálica, debe considerarse lo siguiente :

- Profundidad del agua, contenido de oxígeno, velocidad, turbulencia, temperatura y efectos de la marea.
- Confiabilidad en el mecanismo futuro y en el mantenimiento incluyendo los factores del costo.
- Aislamiento eléctrico de otras estructuras metálicas que puedan provocar fugas de corriente.
- Propuesta del sistema de protección catódica.

### Funcionamiento de los ánodos de sacrificio.

El funcionamiento de los ánodos de sacrificio en el agua del mar depende ricuoramente de la composición de la aleación, en especial para los de zinc y del aluminio.

Los ánodos de magnesio y de zinc son muy activos y se desastan muy rápidamente; pero debido a su corta vida para un peso dado, no se recomienda su uso, ya que de hacerlo deben reponerse con frecuencia.



Cantidad de ánodos.

El número de ánodos se determina por la siguiente expresión:

$$N_a = \frac{(A) (dc) (VU) (Eq)}{(n) (W_a)}$$

Donde :

A = Area por proteger.

dc= Densidad de corriente.

VU= Vida útil promedio de los ánodos en años.

Eq= Equivalente electroquímico del material de los ánodos,

n = Eficiencia de drenaje de corriente de los ánodos,

W<sub>a</sub>= Peso por ánodos,

Factores que determinan los requisitos de la corriente total para la protección catódica.

- I.- El total de áreas sumergidas que comprende el área bajo el agua y el área bajo la línea de fango con todos sus elementos.
- II.- En las plataformas que contengan nozos; el número actual o el previsto de nozos por perforarse.
- III.- Las estructuras metálicas próximas sin aislar y sin proteger dentro de la misma plataforma.

Requisito mínimo de corriente de protección prevista por metro cuadrado del área de la plataforma.

Las densidades de corriente para una zona característica del agua del mar, tienen un rango de 54-161 mA/m<sup>2</sup> para proteger catódicamente las plataformas en mar abierto.

NOTA: Existen algunos valores característicos del área de producción costa afuera que pueden tomarse como datos de investigación antes de seleccionar el diseño del parámetro final; tales valores se indican en la tabla siguiente:

Valores característicos de áreas de producción en plataformas marinas costa afuera.

Factores del medio ambiente.					
Área de producción	Resistividad del agua (ohm-cm)	Temp. del agua (°C)	Factor de turbulencia (acción de la onda)	Flujo lateral del agua,	Densidad de corriente - mA/m <sup>2</sup>
Golfo de México	20	22	Moderado	Moderado	54-65
Costa Oeste de E.U.	24	15	Moderado	Bajo	76-86
Cook Inlet (Alaska)	50	2	Bajo	Alto	378-432
Mar del Norte	26 - 33	0 - 12	Alto	Moderado	86-216
Golfo Pérsico.	15	30	Moderado	Bajo	76-108
Indonesia.	19	24	Moderado	Moderado	54-65

Criterios de diseño para sistemas de protección catódica.

Las densidades de corriente de protección en las zonas de fango son de 11-22 mA/m<sup>2</sup>.

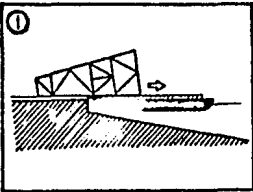
Para la corriente de diseño total, se puede asignar un pozo de 1.5-4 amperes, para compensar la carga de corriente de la tubería de ademe bajo la línea de fango.

Por razones económicas, los requerimientos se aplican a las plataformas en la zona de marea y oleaje.

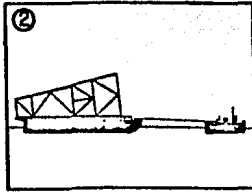
Donde no exista tal recubrimiento debe considerarse en el diseño de protección catódica la superficie del aislamiento y su deterioro por el tiempo, pues por éste se incrementa la demanda de corriente de la plataforma recubierta.

El recubrimiento calizo que se forma sobre la armadura de la plataforma origina que al aplicar la corriente de protección catódica, se reduzca la densidad de corriente requerida para mantener los potenciales de protección y además mejora la distribución de corriente.

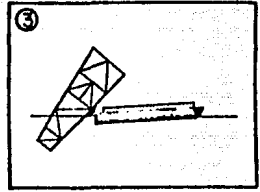
A continuación se muestran las secciones de una plataforma donde se localizan los ánodos de sacrificio instalados correctamente.



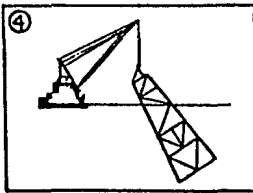
DESPLAZAMIENTO Y CARGA DE LA SUBESTRUCTURA EN LA BARCAZA



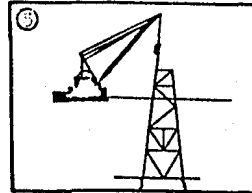
SUJECION Y TRANSPORTE DE LA SUBESTRUCTURA AL LUGAR DE LA INSTALACION



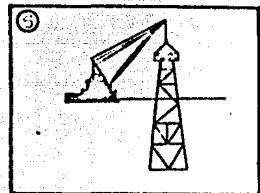
BOTADO DE LA SUBESTRUCTURA



POSICIONAMIENTO Y ORIENTACION DE LA SUBESTRUCTURA



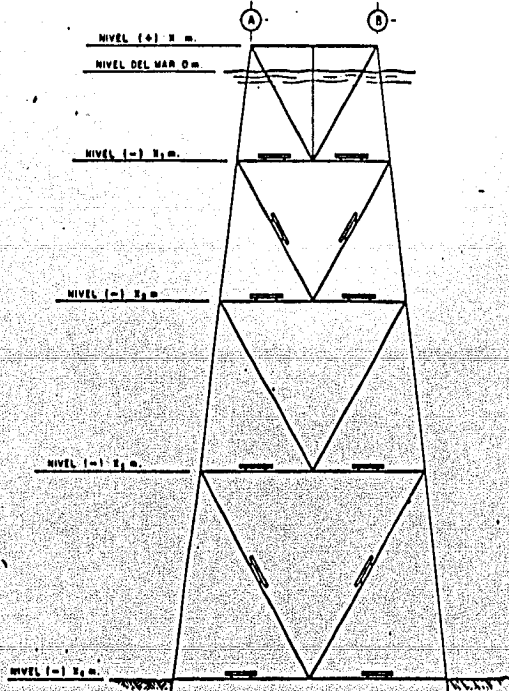
HINCADO DE PILOTES



INSTALACION DE SUPERESTRUCTURA Y PAQUETES

### INSTALACION DE UNA PLATAFORMA DE ACERO

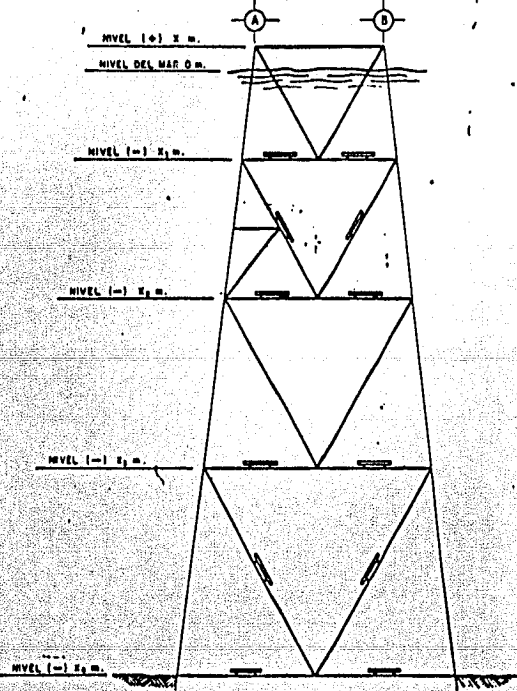
SECCION A-B



NOTA:  
LAS DOS SECCIONES LLEVAN LA MISMA DISTRIBUCION DE LOS ANCHOS

ELEVACIONES EJES 1 y 4

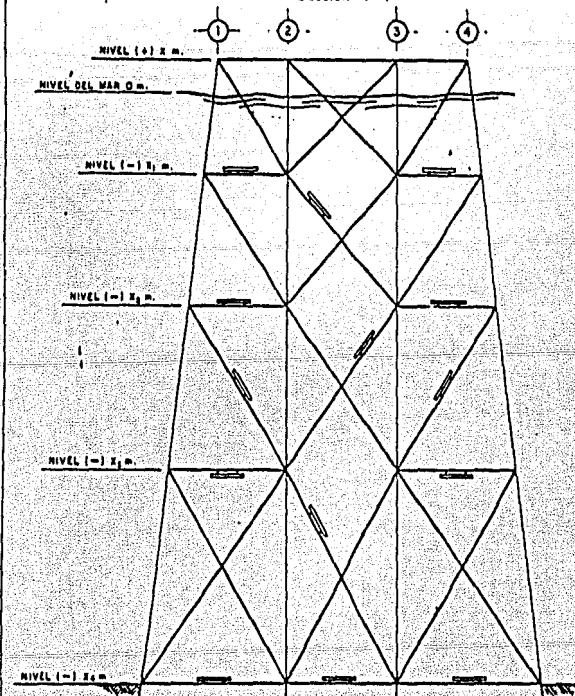
SECCION A-B



NOTA:  
LAS DOS SECCIONES LLEVAN LA MISMA DISTRIBUCION DE LOS ANCHOS

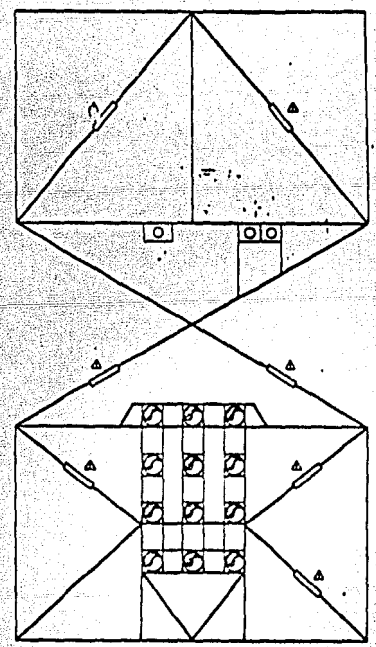
ELEVACIONES EJES 2 y 3

SECCION 1-4



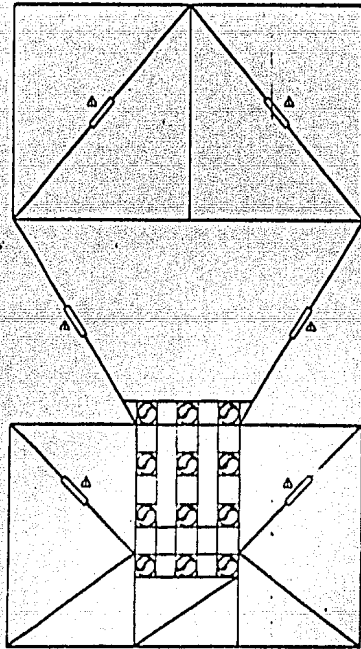
NOTA:  
LAS DOS SECCIONES LLEVAR LA MISMA DISTRIBUCION DE LOS ANODOS.

ELEVACION EJES A y B



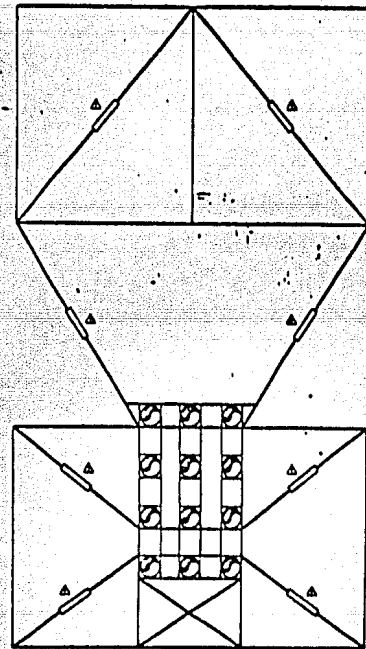
△ ANODOS

PLANTA DEL NIVEL (-) 3,5 m.  
DISTRIBUCION DE LOS ANODOS



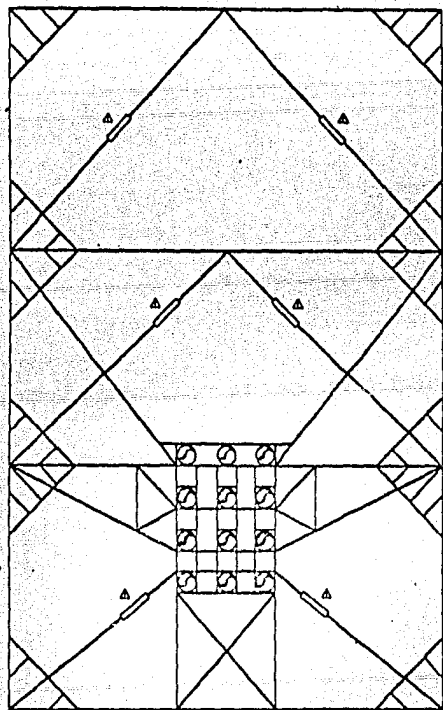
△ ANODOS

PLANTA DEL NIVEL (-) 2 m.  
DISTRIBUCION DE LOS ANODOS



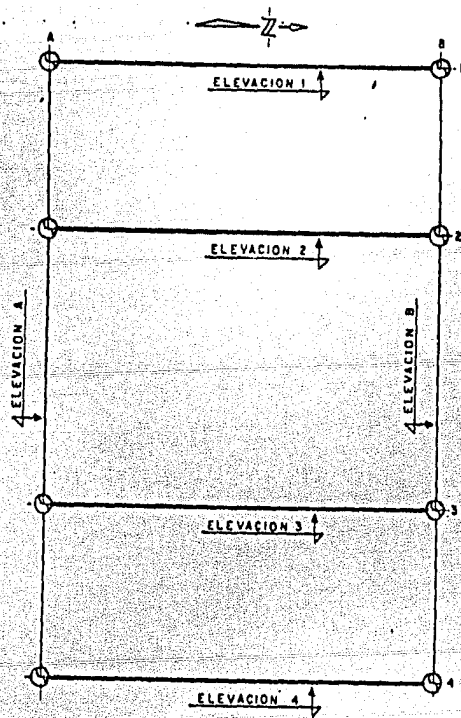
△ ANODOS

PLANTA DEL NIVEL (-) 3 m.  
DISTRIBUCION DE LOS ANODOS



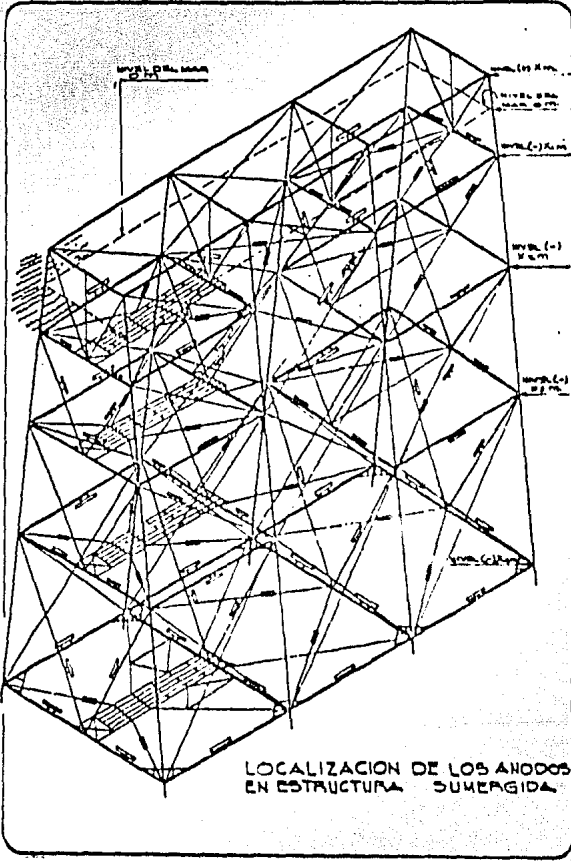
△ ANODOS

PLANTA DEL NIVEL (-) X4 m.  
DISTRIBUCION DE LOS ANODOS



CROQUIS AUXILIAR ORIENTACION ELEVACIONES





LOCALIZACION DE LOS ANODOS  
 EN ESTRUCTURA SUMERGIDA

Diseño para la protección catódica de la plataforma  
de producción tipo B-PB/KUA-1, localizada en la Son-  
da de Campeche.

DETERMINACION DEL AREA EN PIES<sup>2</sup>.

I.- Columnas de apoyo:

CANT.	DIAMETRO	DESCRIPCION	II.D.L.	SUP. EN PIES <sup>2</sup>
8	58 1/2"	Columnas	$8 \times 4.87 \times 3.1416 \times 215.88 =$	26,423.01

II.- Elevación de ejes 1, 2, 3, 4.

1	30" Ø	Horizontales	$1 \times 2.5 \times 3.1416 \times 118' \times 4 =$	3,707.08
1	26" Ø	Horizontales	$1 \times 2.16 \times 3.1416 \times 101.2' \times 4 =$	2,746.91
1	22" Ø	Horizontales	$1 \times 1.84 \times 3.1416 \times 72.9 \times 4 =$	1,685.60
1	30" Ø	Diagonales	$2 \times 2.5 \times 3.1416 \times 81.51 \times 4 =$	5,121.43
2	26" Ø	Diagonales	$2 \times 2.16 \times 3.1416 \times 70.79 \times 4 =$	3,842.96
3	24" Ø	Diagonales	$2 \times 2.0 \times 3.1416 \times 53.63 \times 4 =$	2,695.74
4	22" Ø	Diagonales	$2 \times 1.83 \times 3.1416 \times 25.74 \times 2 =$	591.93
5	24" Ø	Diagonales	$1 \times 2.0 \times 3.1416 \times 111.83 \times 2 =$	<u>1,405.30</u>
				21,796.95

III.- Elevación ejes "A y B"

1	30" Ø	Ejes Horizon.	$1 \times 2.5 \times 3.1416 \times 208' \times 2 =$	3,267.26
2	26" Ø	Ejes Horizon.	$1 \times 2.16 \times 3.1416 \times 189.68 \times 2 =$	2,574.28
3	24" Ø	Ejes Horizon.	$1 \times 2.0 \times 3.1416 \times 176.96 \times 2 =$	2,223.75
4	22" Ø	Ejes Horizon.	$1 \times 1.83 \times 3.1416 \times 164.79 \times 2 =$	<u>1,894.80</u>
				<u>9,960.09</u>

5	30"Ø	Ejes Diagon.	585.22x2.5x3.1416 =	4,596.31
6	26"Ø	Ejes Diagon.	532.38x2.16x3.1416 =	3,612.65
7	24"Ø	Ejes Diagon.	493.77x2.0x3.1416 =	3,102.45
8	22"Ø	Ejes Diagon.	264.16x1.83x3.1416 =	<u>1,518.69</u>
				<u>12,830.10</u>

IV.- Planta elevación ( - ) 27-0

1	22"Ø	Horizontales	192.75x2x1.83x3.1416=	2,216.28
2	22"Ø	Horizontales	72.75x4x1.83x3.1416 =	1,673.00
3	20"Ø	Horizontales	23.0x4x1.66x3.1416 =	1,003.78
4	20"Ø	Horizontales	22.0x2x1.66x3.1416 =	<u>229.46</u>
				<u>4,598.52</u>

V.- Planta elevación ( - ) 80-0

1	24"Ø	Horizontales	206'x2x3.1416x2 =	2,588.68
2	24"Ø	Horizontales	86'x2x3.1416x2 =	2,161.42
3	22"Ø	Diagonales	109x1.83x3.1416x4 =	2,506.60
4	22"Ø	Diagonales	100.8x1.83x3.1416x2 =	<u>1,159.00</u>
				<u>8,415.70</u>

VI.- Planta elevación ( - ) 140'-0"

1	26"Ø	Horizontales	221x2.16x3.1416x3 =	4,499.00
2	26"Ø	Verticales	101x2.16x3.1416x4 =	2,741.48
3	24"Ø	Diagonales	90.51x2.00x3.1416x8 =	4,549.54
4	24"Ø	Diagonales	73.67x2.00x3.1416x4 =	<u>1,851.53</u>
				<u>13,641.55</u>

VII.- Planta elevación ( - ) 208'-0

1	30"Ø	Horizontales	238'x2.5x3.1416x3	=	5,607.75
2	30"Ø	Verticales	118'x2.5x3.1416x4	=	3,707.08
3	24"Ø	Refuerzos	117'x2.0x3.1416x1	=	<u>735.13</u>
					10,049.96
					<hr/>

VIII.- Placas base de refuerzo.- ( \* de 6"x4"x3/8")

1	* 238'x4	(.895)	=	852.05
2	* 118x4	(.895)	=	422.44
3	* 13 x60	(.895)	=	698.10
4	* 4.5 x 118	(.895)	=	<u>475.24</u>
				2,447.83
				<hr/>

IX.- Estructura enterrada en el lecho marino :

8-54"Ø	Pilotes	289'x4.5x3.1415.8	=	32,685.20
--------	---------	-------------------	---	-----------

Total de estructura inmersa en agua de mar:

I.	Columnas de apoyo de 58 1/2" Ø	26,423.01
II.	Elevación ejes 1, 2, 3, 4.	21,796.95
III.	Elevación ejes "A y B"	22,790.19
IV.	Planta elevación ( - ) 27-0	4,598.52
V.	Planta elevación ( - ) 80-0	8,415.70
VI.	Planta elevación ( - ) 140-0	13,641.55
VII.	Planta elevación ( - ) 208-0	10,049.96
VIII.	Placas refuerzo ( * de 6"x4"x3/8")	<u>2,447.83</u>
		110,163.71
		<hr/>

X.- Total de estructura enterrada en el lecho marino :

Pilotes de 54" Ø (8) 32,685.20

Corriente requerida para 20 años de vida:

$$I_A = (\text{Arca ft}^2) (\text{Densidad de corriente amp/ft}^2) (\text{Arca desnuda } 100\%)$$

$$I_A = 110,163.71 \times 0.005 \times 1 = 550.82 \text{ Amps.}$$

D.C. Agua = 0.005; D.C. Lodo = 0.002

$$I_A = 32,685.20 \times 0.002 \times 1 = \underline{65.37 \text{ Amps.}}$$

616.19

Aluminio requerido para 20 años de vida :

WAL = (IT) (Equivalente electroquímico de aluminio) (Años de vida útil).

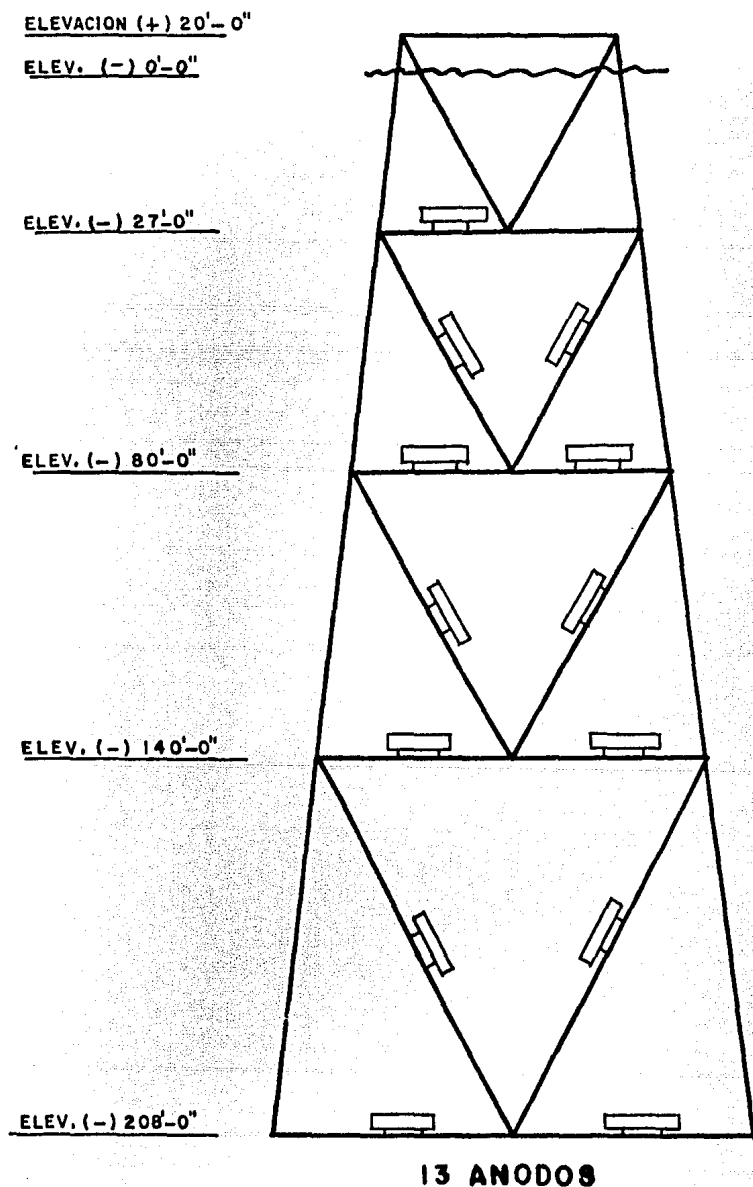
$$WAL = 616.190 \times 7.2 \times 20 = 88731.40 \text{ lbs.}$$

$$= (\text{Amp}) \left( \frac{\text{Lbs}}{\text{amp-año}} \right) (\text{años}) = \text{lbs.}$$

$$\text{No. de ánodos} = \frac{88731.50}{540} = 164.32 \approx 165$$

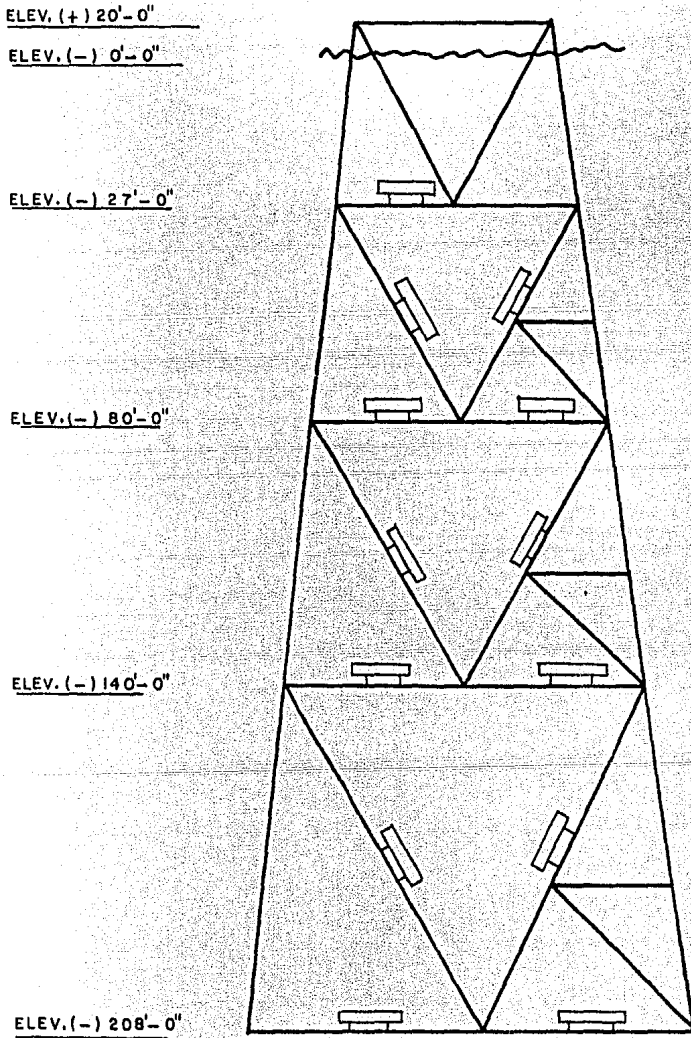
Se emplearon ánodos de 540 lbs c/u.

# ELEVACION EJE NO. 1 Y 4



PROTECCION CATODICA  
PLATAFORMA DE PRODUCCION TIPO B-PB-KUA-1

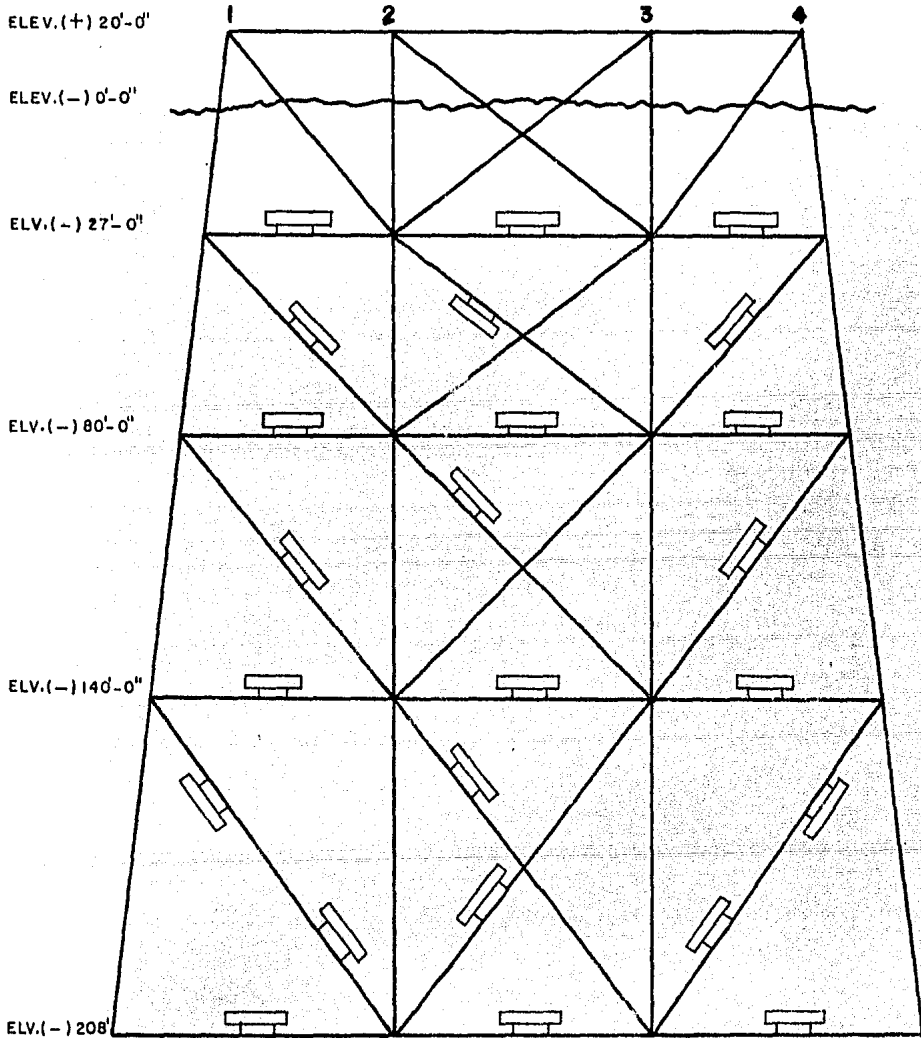
# ELEVACION EJE NO. 3 Y 2



13 ANODOS

PROTECCION CATODICA  
PLATAFORMA DE PRODUCCION TIPO B-PB-KUA-1

ELEVACION EJE "A" Y "B"



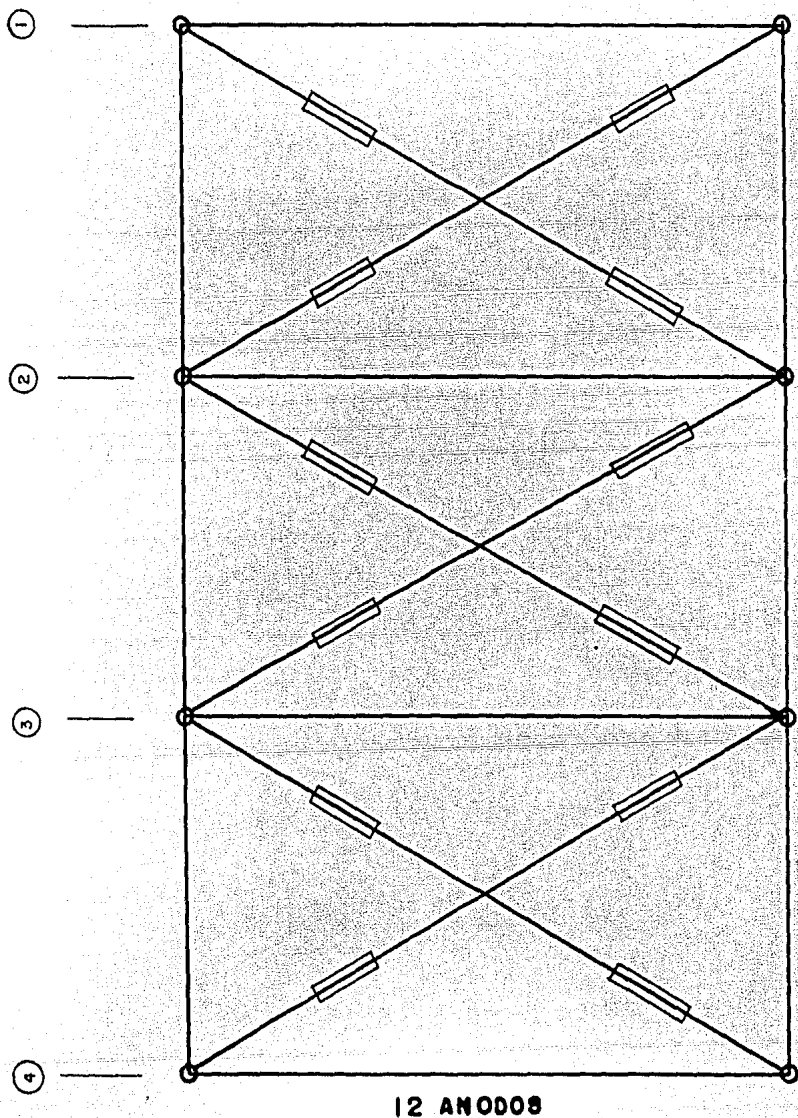
24 ANODOS

PROTECCION CATODICA

PLATAFORMA DE PRODUCCION TIPO B-PB-KUA-1



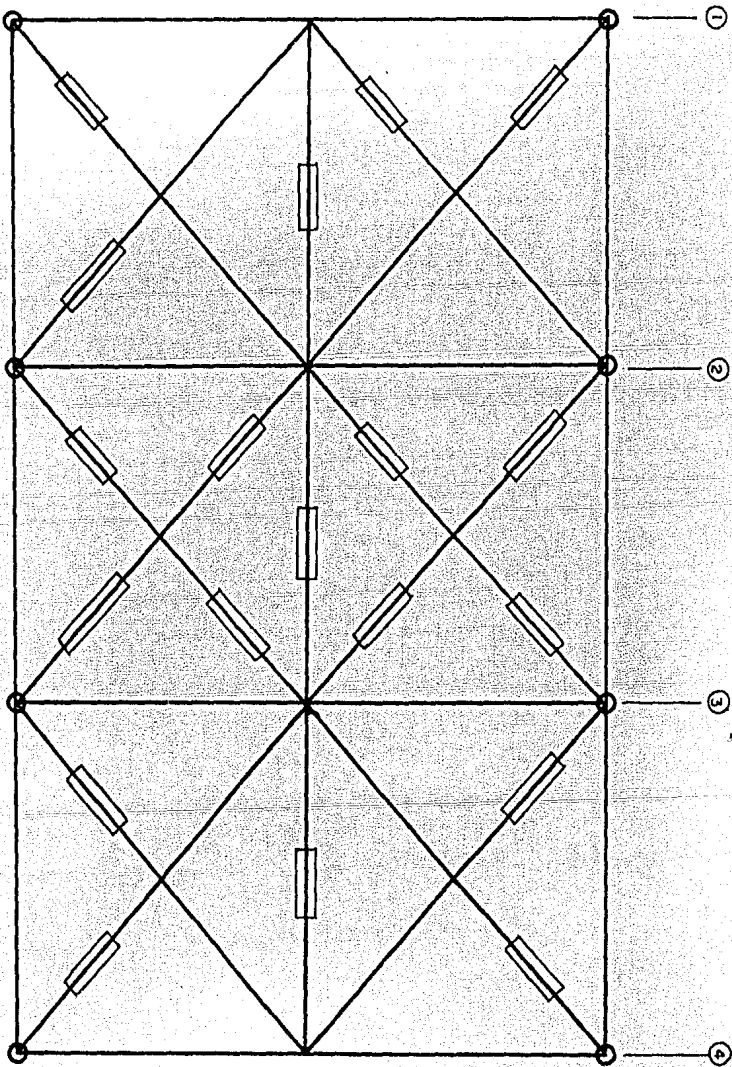
PLANTA EN ELEVACION (-) 27' Y 80'



PROTECCION CATODICA

PLATAFORMA DE PRODUCCION TIPO B-PB-KUA-1

PLANTA EN ELEVACION (-) 140'-0"

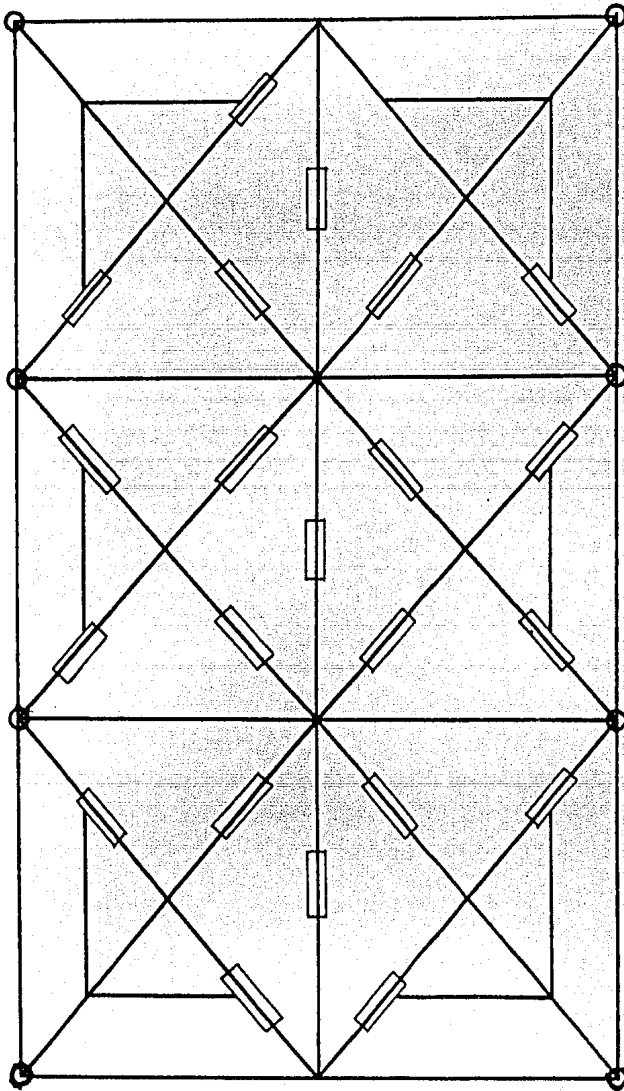


19 ANODOS

PROTECCION CATODICA

PLATAFORMA DE PRODUCCION TIPO B-PB-KUA-1

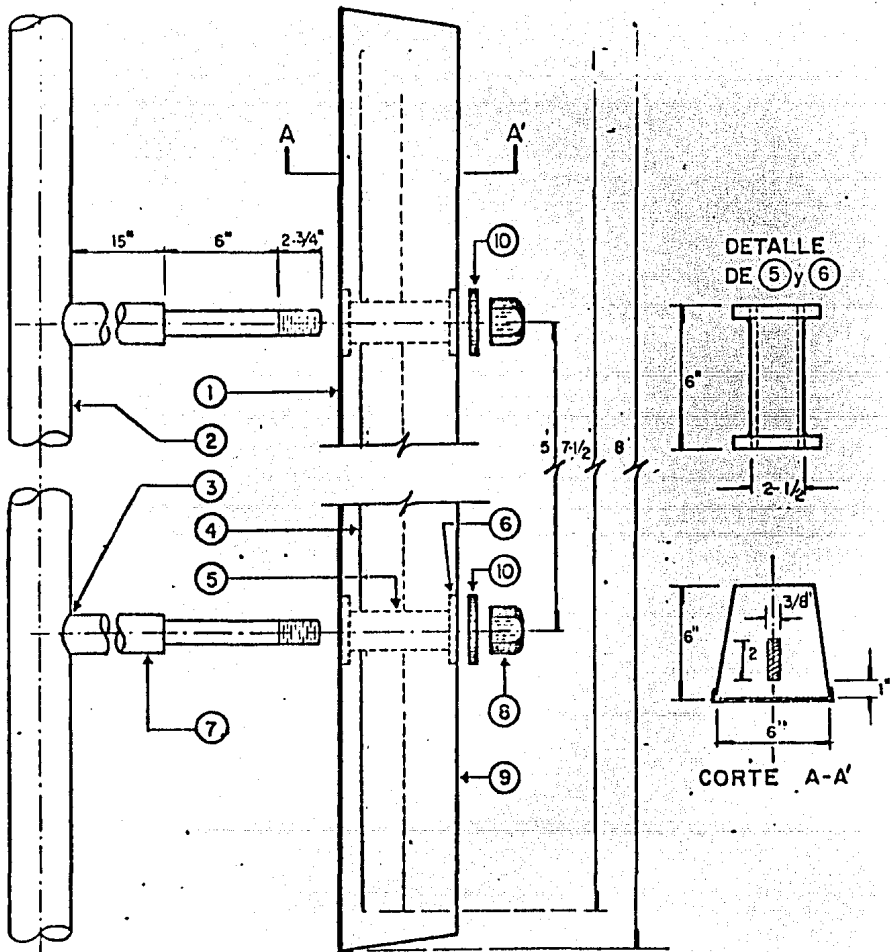
PLANTA EN ELEVACION (-) 2 08'-0"



22 ANODOS

PROTECCION CATODICA

PLATAFORMA DE PRODUCCION TIPO B-PB-KUA-1



- |  |  |
|--|--|
| <p>① Recubrimiento Alquitrán de Hulla-Epoxy a 16 mils. de espesor</p> <p>② Armadura de la Platabrca</p> <p>③ Soldadura de Filete, de 1/4" ASTM-A: 233 Clase E-60</p> <p>④ Solera de Acero Galvanizada de 2" x 3/8" espesor 3.79 Kg/m L., soldada a ⑤</p> <p>⑤ Tubo Standard de 2" D.N. y 1/4" Espesor de Pared</p> <p>⑥ Roldana Standard de acero de 2-1/2" D.I., soldada a ⑤</p> <p>⑦ Barra de acero de 35000 lbs/pq. de fuerza admisible de 2-1/2" Ø y 1-1/2" E. con unca Std. en eléctrico.</p> | <p>⑧ Tuerca Hexagonal de 1-1/2" D.I. apretada a un par de 250 pies.-lb</p> <p>⑨ Ancho de Aluminio "Galvalum" de 325 lbs. de peso Neto.</p> <p>⑩ Roldana de Presión de acero de 1-1/2" D.N.</p> |
|--|--|

UNAM ENEP ARAGON

ENRIQUE SANCHEZ LOPEZ

TESIS PROFESIONAL

#### IV.4 PROTECCION CATODICA DE LOS PUENTES "EL PRIETO" Y "EL ANAÑHUAC" EN LAS CERCANIAS DE TAMPICO.

##### 1.- ANTECEDENTES :

Debido a las necesidades de comunicación entre los Estados de Veracruz y Tamaulipas, fue necesario realizar la construcción de dos puentes: "El Prieto" y "El Anáhuac", los cuales están contruídos con estructuras metálicas, tanto la superestructura como los caballetes de soporte y los pilotes que se emplearon en su cimentación. En los caballetes y en los pilotes se emplearon tubos de 24"Ø también se emplearon en los caballetes unos marcos llamados "minichaquetas", formados por tubos de 26"Ø para lograr una mejor sujeción y alineación de los pilotes y caballetes.

Como las estructuras de acero (enterradas y sumergidas) están expuestas a un medio corrosivo (agua y suelo), fue necesario protegerlas contra el deterioro prematuro causado por la corrosión.

##### 2.- OBJETIVO :

La finalidad del presente estudio es diseñar el sistema de protección anticorrosiva, para proteger las 22 estructuras metálicas que se encuentran en los puentes "El Prieto" y "El Anáhuac" en Tampico, contra deterioros prematuros causados por la corrosión.

### 3.- DETERMINACION DEL SISTEMA PROTECTOR.

Para proteger la estructura en las áreas enterradas e inmersa, que es donde se presenta una corrosión de tipo electroquímico, se estima adecuado que -- sean protegidas catódicamente por medio de ánodos de sacrificio.

En las áreas de medio ambiente y variación del tirante del río se emplearán recubrimientos anticorrosivos, ya que el tipo de corrosión que se presenta en esta zona es de tipo químico.

### 4.- BASES TEORICAS.

- Material anódico a emplear: Aluminio indio.

- Características electroquímicas de material anódico.

Eficiencia -----95%

Capacidad de corriente -----1225 amp-hr/lb.

Consumo -----7.7 lb/amp-año.

Potencial en circuito cerrado -----1.1 volts (Cu/CuSO<sub>4</sub>)

- Resistividad del agua del río  $\rho = 26 \text{ Ohm-cm.}$

- Para el diseño de los ánodos de sacrificio, se analizará sólo una estructura (Ver detalle, Anexo II), ya que las demás son semejantes.

- La longitud de los pilotes es de 50.00 m. (comprende la parte enterrada y sumergida), considerándose el 100% de área desnuda.

5.- CALCULOS.

a) Area por proteger.

Area de 1 pilote.

$$d = 24'' = 2'$$

$$h = 50m = 184'$$

$$A = \pi dh$$

$$A = (3.1416)(2')(184') = 1156 \text{ ft}^2$$

$$\text{Area de los 4 pilotes} = 4 (1156) = 4624 \text{ ft}^2$$

Area de una minichaqueta.

$$d = 26'' = 2.16'$$

$$h = 3.5 \text{ m} = 11.8'$$

$$A = \pi dh = (3.1416)(2.16)(11.8) = 80.1 \text{ ft}^2$$

$$\text{Area de las 4 minichaquetas} = 4 (80.1) = 320.4 \text{ ft}^2$$

Area de las riostras.

$$d = 8 \frac{5}{8}'' \approx 0.719'$$

$$\text{Largo total} = 13.42 \text{ m} = 44'$$

$$A = \pi dh = (3.1416)(0.7191)(44') = 99.38 \approx 100 \text{ ft}^2$$

$$\text{Total de área desnuda} = 4624 + 320.4 + 100 = 5044.4 \text{ ft}^2$$

$$\text{Area total} = 5044.4 \text{ ft}^2$$

b) Densidad de corriente de protección (supuesta).

$$Dc = 4 \text{ mA (ft}^2\text{)}$$

c) Corriente necesaria de diseño (ID).

Conociendo la densidad de corriente de protección  $4 \text{ mA/ft}^2$  y el área de la estructura por proteger, la corriente de diseño queda definida por:

$$ID = Ae (Dc) (F.S.)$$

Donde :

Ae = Area desnuda de estructura.

Dc = Densidad de corriente.

F.S. = Factor de seguridad.

$$ID = (5044.4 \text{ ft}^2)(4\text{mA/ft}^2)(1.1) = 22195.36 \text{ mA}$$

$$ID = 22.195 \text{ amp.}$$

d) Masa anódica mínima necesaria.

Se determina con la siguiente expresión.

$$W = \frac{ID \text{ Ca Va}}{E_p} = \frac{(22.195)(7.7)(20)}{.95} = 3577.9 \cong 3598 \text{ lbs.}$$

Donde :

W = Masa anódica mínima necesaria.

Ca = Consumo material anódico =  $7.7 \text{ lb/amp-año}$ .

Va = Vida útil esperada del ánodo = 20 años.



$E_p$  = Eficiencia práctica del ánodo = 95%

$I_D$  = Corriente de diseño = 22.195 amp.

e) Determinación de las características del o de los ánodos requeridos.

Las variables que deben satisfacer este ánodo o grupo de ánodos serán:

$I_D$  = 22.195 amp.

$V_u$  = 20 años.

$W$  = 3598 lbs.

Para determinar las características del ánodo o grupo de ánodos que satis

fagan estas variables se emplean las siguientes fórmulas :

$$I_o = \frac{AE (L)}{0.0626 (\rho) \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right)}$$

$$Y = \frac{C (U) (W)}{I_o (8760)}$$

Donde :

$I_o$  = Corriente drenada del ánodo.

$AE$  = Potencial de circuito cerrado ánodo-estructura = 0.3V

$L$  = Longitud del ánodo (pulg).

$\rho$  = Resistividad del electrolito = 20 Ohm-cm

$r$  = Radio equivalente del ánodo.

$Y$  = Vida útil del ánodo.

$C$  = Capacidad de corriente = 1225 amp/hr/lb.

U = Factor de utilización = 0.90

W = Masa del ánodo.

Como paso siguiente se resuelven estas ecuaciones para distintos valores de L y r, tomando en cuenta que se usarán ánodos de sección circular.

Para una L = 90"

$$r = 5.5''$$

$$I_o = \frac{AE(L)}{0.0626 \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right)}$$

$$I_o = \frac{(0.3)(90'')}{0.0626 (26) \left( \ln \frac{4(90)}{6} - 1 \right)} = 5.36 \text{ amp.}$$

$$I_o = 5.36 \text{ amp.}$$

$$Y = \frac{C(U)(W)}{I_o(8760)} = \frac{(1225)(.90)(845)}{(5.36)(8760)} = 19.84 \text{ años.}$$

$$Y = 19.84 \text{ años.}$$

Como necesitamos 22.195 amp. para proteger una estructura y como  $I_o =$

5.36 amp., entonces necesitamos 4 ánodos de sección circular de W =

845 lbs c/u, L = 90" y r = 5.5" para que satisfagan las necesidades de corriente.

Como cada estructura necesita 4 ánodos y tenemos 22 estructuras, por lo tanto necesitamos un total de 88 ánodos para proteger catódicamente todo nuestro sistema estructural con ánodos de sacrificio.





## V CAPITULO.

EXPERIENCIAS. PROBLEMAS DE MANTENIMIENTO. COSTOS. CONCLUSIONES.

### V.1 EXPERIENCIAS.

En cuanto a experiencias sobre la protección catódica en nuestro país, realmente es poca, ya que las únicas empresas que emplean dicha protección es Petróleos Mexicanos y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, siendo en la primera donde se tiene mayor experiencia en cuanto a su diseño y aplicación.

A continuación se indican las obras en las cuales se ha aplicado protección catódica:

#### - MUELLES:

Topolobampo, Sin.

Guaymas, Son.

Salina Cruz, Oax.

Pajaritos, Ver. Muelles 7, 9, 6, 4 y 3.

#### - PLATAFORMAS MARINAS.

Sonda de Campeche 107.

Tampico 4.

Poza Rica 6

Agua Dulce, Ver. 3

- PUENTES.

"Prieto" y "Anáhuac" cruce Tampico-Veracruz.

"Catzacoalcos", Ver.

## V.2 PROBLEMAS DE MANTENIMIENTO.

Con lo que respecta a este punto, realmente no es grave, ya que cuando se determina la dimensión de los ánodos (peso y longitud), se toma en cuenta el período de vida de la plataforma, con el fin de no hacer un cambio periódico de los ánodos.

Lo único que se hace es checar el potencial de las estructuras periódicamente cada trimestre a distancia de 5 mts. cada una, hasta llegar a una profundidad de 60 mts. el potencial mínimo es de .85 ampers. En caso de ser menor, la estructura no está protegida y en consecuencia sufrirá daños por corrosión.

V.2 Los costos que implican la protección catódica, realmente son muy bajos, pues no alcanzan ni el 3% del costo total de la obra.

Como ya se hizo un análisis del costo del muelle No. 4 localizado en Panajitos, Ver., no es necesario hacer otro análisis de las otras dos

obras (Puente y Plataforma), lo que si es conveniente señalar es que el precio de los ánodos continuamente aumenta y como consecuencia los costos pueden andar fluctuando entre el 1, 2, 3, al 4% del costo total.

De acuerdo a los datos obtenidos en Petróleos Mexicanos, se han dado casos en que el costo de la protección catódica no alcanza ni el 1% del costo total de la obra.

#### V.4 CONCLUSIONES :

Después de todo lo expuesto en este trabajo, he llegado a la conclusión de que la protección catódica con ánodos de sacrificio es un método muy eficiente, económico y sencillo, pues su diseño es muy claro, la colocación de los ánodos tampoco es problemática y su mantenimiento prácticamente es nulo, pues solamente se supervisa su funcionamiento.

Sin embargo los beneficios obtenidos son bastantes considerables, ya que nos mantiene a nuestra estructura protegida contra la corrosión, agente por el cual en muchas ocasiones no se le ha dado la debida importancia, provocando grandes pérdidas económicas.

Finalmente, no me queda más que recomendar el método de protección catódica con ánodos de sacrificio, para todas aquellas estructuras metálicas --

que se encuentran inmersas en agua y además enterradas en medios muy --  
agresivos y favorables para que se desarrolle la corrosión.



## B I B L I O G R A F I A

1.- Normas de proyecto de obras.

Sistema de protección catódica.

Norma 2.135.01

Pemex.

2.- Catálogo sobre corrosión.

(Principios electroquímicos)

I.M.P.

3.- Curso de Ingeniería de Proyecto.

(Generalidades sobre la corrosión).

I.M.P.

4.- Corrosión y protección catódica.

Tecnología galvánica.

5.- Control of Pipeline Corrosión.

Peabody W. A.

NACE.

6.- Manual del Ingeniero Químico.

Robert H. Perry/Cecil H. Chilton.

7.- Introducción a la protección anticorrosiva de equipos  
e instalaciones a base de recubrimientos.

Ing. Alfredo Arriola Torres.

Quím. Margarita C. de García.

I.M.P.

8.- Rectificadores de C.A. para protección catódica.

Subdirección de Tecnología de la Explotación.

División de Corrosión.

I.M.P.

9.- Guía de procedimientos para el análisis de cimentaciones profundas de pla-  
taformas marinas.

Ricardo Campos Campos.

I.P.N.