

25



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

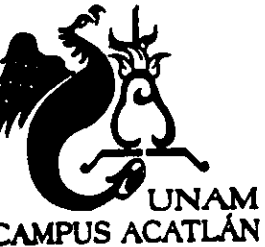
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLÁN"

INVESTIGACIÓN SOBRE LA DURABILIDAD DE PILOTES METÁLICOS DE CIMENTACIONES DE ESTRUCTURAS MARINAS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
N E M E S I O S A N D O V A L

282465

ASESOR: ING. CELSO BARRERA CHAVEZ



ACATLÁN, EDO. DE MÉXICO AGOSTO DEL 2000





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 esta 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.



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLÁN"  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

SR. NEMESIO SANDOVAL.

ALUMNO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.

P R E S E N T E .

En atención a su solicitud presentada con fecha de 27 de mayo de 1997, me complace notificarle que esta Jefatura de Programa aprobó el tema que propuso, para que lo desarrolle como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

" INVESTIGACIÓN SOBRE LA DURABILIDAD DE PILOTES METÁLICOS DE  
CIMENTACIONES DE ESTRUCTURAS MARINAS ".

INTRODUCCIÓN

- 1 GENERALIDADES.
- 2 ANÁLISIS DE DURABILIDAD DE PILOTES DE ACERO Y DE HIERRO HINCADOS EN EL MAR.
- 3 FUERZAS QUE ACTÚAN EN LAS ESTRUCTURAS MARINAS Y SU EFECTO EN LA DURABILIDAD DE LOS PILOTES METÁLICOS
- 4 ACCIONES SÍSMICAS EN PILOTES METÁLICOS USADOS EN ESTRUCTURAS MARINAS

CONCLUSIONES.

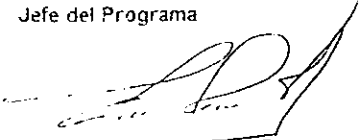
Asimismo fue designado como asesor de tesis el ING. CELSO BARRERA CHÁVEZ, pido a usted, tomar nota en cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses, como requisito básico para sustentar examen profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.  
Esta comunicación deberá publicarse en el interior del trabajo profesional.

A T E N T A M E N T E .

" POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU "

Acatlán Edo. de México a 14 de agosto del 2000.

Jefe del Programa



Ing. Enrique del Castillo Fragoso

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

## CAMPUS "ACATLÁN"

### TESIS PROFESIONAL

#### INVESTIGACIÓN SOBRE LA DURABILIDAD DE PILOTES METÁLICOS DE CIMENTACIONES DE ESTRUCTURAS MARINAS.

C. NEMESIO SANDOVAL

INTERESADO

Agradezco mucho los apoyos que me brindaron: Mi Esposa y mis hijos para terminar mi carrera profesional, doy muchas gracias, por aguantarme durante varios años mientras estudiaba y preparaba mi tesis viviendo en una severa crisis económica.

Agradezco también, los apoyos que me dieron aquellas personas integrantes dentro de la sociedad mexicana, para poder llevar adelante mis propósitos.

Doy gracias a los funcionarios, profesores que laboran dentro de la Universidad Nacional Autónoma de México, que hicieron todo lo posible de prepararme, con el fin de tener éxito en el desempeño de las funciones que se requieren en la sociedad.

Doy gracias y agradezco a los Ingenieros que aceptaron fungir como sinodales para dirigir mi trabajo de tesis en el examen profesional, que son los siguientes:

Ing. Celso Barrera Chávez (Asesor)

Presidente.

Ing. Manuel Siliceo Ramírez

Vocal.

Ing. Rubén Felipe Montes Trejo

Secretario.

Ing. Liborio Julián Bravo Martínez

Suplente.

Ing. Pablo Miguel Pavía Ortiz

Suplente.

"Por mi raza hablará el espíritu"

## **INVESTIGACIÓN SOBRE LA DURABILIDAD DE PILOTES METÁLICOS DE CIMENTACIONES DE ESTRUCTURAS MARINAS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Realizar las investigaciones, acerca de la durabilidad de los pilotes metálicos, empleados en cimentaciones de estructuras marinas.

## ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
INTRODUCCIÓN	1
<b>CAPÍTULO 1. GENERALIDADES</b>	<b>2</b>
1.1.- Definición de términos	2
1.2 - Partes que constituyen un pilote metálico	21
1.3 - Tipos de pilotes metálicos	23
1.4 - Ventajas y desventajas de los pilotes metálicos	24
<b>CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE DURABILIDAD DE PILOTES DE ACERO Y DE HIERRO HINCADOS EN EL MAR.</b>	<b>25</b>
2.1.- Investigación sobre las acciones de los organismos marinos a los pilotes de acero o de hierro.	25
2.2 - Corrosión de los pilotes de acero o de hierro, debida a bacterias anaeróbicas y aeróbicas que se encuentran en el mar.	26
2.3 - Corrosión de los pilotes de acero o de hierro, provocado por los diferentes fenómenos que ocurren y existen en el agua de mar.	28
2.4.- Corrosión de los pilotes de acero o de hierro, causados por suelos gruesos o finos en la profundidad de mar.	38
2.5.- Diseño de técnicas para protección de pilotes metálicos contra la corrosión causado por el agua de mar, suelos gruesos y finos.	39

<b>CAPÍTULO 3. FUERZAS QUE ACTÚAN EN LAS ESTRUCTURAS MARINAS Y SU EFECTO EN LA DURABILIDAD DE LOS PILOTES METÁLICOS.</b>	<b>58</b>
3.1.- Fuerza de viento y oleaje.	58
3.2.- Efectos de las fuerzas de oleaje en los pilotes metálicos.	61
3.3.- Fuerza de corriente de agua en los pilotes metálicos.	68
<b>CAPÍTULO 4. ACCIONES SÍSMICAS EN PILOTES METÁLICOS USADOS EN ESTRUCTURAS MARINAS.</b>	<b>72</b>
4.1.- Fuerza de sismo en los pilotes metálicos.	72
4.2.- Efecto sísmico en el agua de mar y suelos marinos.	77
CONCLUSIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	82

## INTRODUCCIÓN

En el campo de las cimentaciones, los trabajos realizados en obras marítimas son actividades muy especializadas y la utilización de pilotes metálicos como elementos de cimentación, tienen una gran aplicación, de aquí que es importante el conocer su comportamiento ante los agentes del medio ambiente donde son hincados, por lo que en este trabajo se tratan dichos aspectos.

En el capítulo uno, se da la definición de cada uno de los términos empleados en cimentaciones de estructuras marinas, se establecen cada una de las partes que constituye un pilote metálico, y se menciona cuantos tipos de pilotes metálicos existen, ventajas y desventajas de este material.

En el capítulo dos, se exponen los resultados obtenidos de las investigaciones realizadas sobre la durabilidad de los pilotes de acero y de hierro en el mar. Se menciona los daños causados por organismos marinos a los pilotes; especialmente los de acero o hierro. Así como la corrosión de los pilotes metálicos debida a bacterias anaeróbicas, aeróbicas, sales disueltas del agua de mar, por suelos finos o gruesos ubicados por debajo del agua de mar. Diseño de Técnicas de protección de pilotes metálicos contra la corrosión.

En el capítulo tres, se tratan los efectos de las fuerzas naturales en estructuras marinas. Se describe la intervención de estas fuerzas en la durabilidad de los pilotes metálicos.

En el capítulo cuatro, se mencionan los factores en el diseño por sismo, efecto sísmico en el agua de mar y suelos marinos.



## **CAPÍTULO I. GENERALIDADES**

### **1.1 Definición de términos**

#### **CIMIENTO**

Los cimientos son elementos destinados a transmitir las cargas de una construcción al terreno de cimentación, por lo que la estabilidad de la construcción, dependerá predominantemente de la cimentación.

Un cimiento transmite las cargas de la estructura al suelo a niveles adecuados a la resistencia del suelo para que este no sufra fallas de resistencia a esfuerzo cortante y debe transmitir adecuadamente las cargas para que no causen deformaciones mayores a las permisibles.

Cualquier cimiento de esta naturaleza, debe cumplir con una capacidad de carga del suelo, deformaciones dentro de los límites permisibles y cumplir con el aspecto económico.

La resistencia al esfuerzo cortante que se genera bajo la acción de una cimentación, se denomina “Capacidad de carga” del suelo y se acostumbra representar por la letra  $q_c$ .

## CIMENTACIÓN

Es el conjunto de cimientos y suelos en donde se apoya una estructura y que tiene como función transmitir las cargas a niveles adecuados a la resistencia y a las deformaciones permisibles del mismo. Una cimentación, es la parte de una infraestructura que soporta la estructura y las acciones que actúan sobre ella, incluyendo no sólo los elementos que transmiten las cargas al suelo, si no también el peso del suelo que puede actuar sobre la cimentación (fricción negativa).

Cualquier cimentación, además de la resistencia precisa de los elementos estructurales que la constituyen, debe reunir las tres condiciones generales siguientes:

- 1) Estar desplazada de tal manera que quede protegida de cualquier efecto que pueda alterar a su comportamiento (socavación, congelamiento del suelo, etc.).
- 2) Ser estable; es decir, contar con un coeficiente de seguridad adecuado respecto al hundimiento o falla por cortante del terreno.
- 3) No permitir ningún movimiento excesivo (asentamientos ni desplazamientos horizontales) que pueda producir daños en la estructura e impedir su utilización.

Los principales tipos de cimentación empleadas son los siguientes:

- 1) Cimentaciones superficiales: Las cimentaciones superficiales, por su material podrán ser de; mampostería de piedra, concreto ciclópeo y concreto armado.

Las cimentaciones superficiales, por su forma podrán ser; zapatas aisladas, zapatas corridas y losas de cimentación.

2) Cimentaciones profundas: Cajón de cimentación, pilotes, pilas y cilindros.

## **CIMENTACIONES PROFUNDAS**

Son aquellas en las que se tienen grandes cargas y las capas superficiales no, son resistentes ni adecuadas para soportar el peso de la construcción, por lo que es necesario apoyarlas en capas más profundas y más resistentes.

En particular, este trabajo tratará sobre pilotes de acero o de hierro, y lo que trataremos es el comportamiento de los pilotes metálicos ante la corrosión en el mar.

## **PILOTES**

Los pilotes son piezas largas, cilíndricas o prismáticas. Fabricadas de madera, de concreto o de metal, que penetran a través de un suelo de baja capacidad de carga, con el fin de transmitir las cargas a una zona de capacidad de carga alta y que apoyadas en el suelo de alta capacidad de carga, sirve de soporte a la estructura como pueden ser el caso de muelles y otras estructuras.

Los pilotes se pueden emplear para las cimentaciones de las escolleras, pilas de puentes, estructuras marinas, etc.

En el caso de que tenga un estrato superficial de buena capacidad de carga, esto no significa que tiene un espesor suficiente y bajo este estrato se tengan suelos deformables, entonces se contemplará de una cimentación profunda, pudiendo ser a base de pilotes metálicos.

Los pilotes también se emplean cuando los estratos inmediatos a la estructura pueden generar asentamientos grandes. Otro motivo es cuando el terreno es capaz de sufrir superficialmente grandes vibraciones. También puede resultar una solución económica cuando los estratos resistentes no se encuentran a gran profundidad. Otro uso es cuando los cimientos puedan estar sometidos a esfuerzos de tensión, ésto ocurre en varias situaciones:

- a) En estructuras altas sometidas a esfuerzos de viento.
- b) En construcciones que para su equilibrio necesitan de elementos sometidos a tensión; estructuras de cables y en general cualquier estructura anclada al suelo.
- c) Cuando sea presumible un levantamiento del fondo de una excavación por haber extraído un gran volumen de suelo o por haber aumentado considerablemente el contenido de agua del suelo.

Se usan cuando sea necesario resistir cargas inclinadas; tal es el caso de los pilotes inclinados que se disponen en los cimientos de un muro de contención y en los de un muelle para resistir el impacto de atraque de los barcos.

## **PILOTES METÁLICOS**

Los pilotes metálicos son de acero o de hierro. Pueden ser circulares, de forma poligonal, logradas mediante unión de tablestacas metálicas o de perfil laminado, generalmente en sección H. Todos los pilotes metálicos están amenazados por la corrosión, que es provocada por la naturaleza del terreno en el que se hunden, el agua o la atmósfera. En los países cálidos, la corrosión por el

agua en ciertos casos, puede ser bastante rápida en las partes sometidas a cambios de inmersión y sequedad. Este fenómeno puede acelerarse por acción de origen químico, por consiguiente en los pilotes metálicos hay que introducir la noción de duración y se imponen ciertas precauciones, especialmente el empleo de aceración al cobre. Se emplea para obras de emergencia y cuando la carga por soportar es intensa y la obra deba realizarse en el menor tiempo posible.

## **ESCOLLERA**

Obra construida en el mar con fragmento de roca natural o materiales fabricados de concreto , para defensa y resguardo de las embarcaciones .

## **MUELLE**

Obra construida a la orilla de mar o de un río para facilitar el embarque y desembarque de personas y/o mercancías.

## **TABLESTACA**

Elemento, generalmente metálico, que se hinca en el suelo. Se emplea principalmente en la construcción de muros de contención.

## **BUQUE**

Se le llama buque a todo género de embarcación, naves de diversas clases en sus dimensiones y modelos. Siendo construido, según predomine uno de estos materiales de construcción, se llaman de madera, de acero o de hierro.

## **OLAS**

Las olas son ondas de gran amplitud que se forman en la superficie del agua por la acción del viento, mareas, corrientes marinas y por sismo. El tamaño de la ola para una ubicación particular depende de la velocidad, duración y dirección del viento.

## **OLA SÍSMICA**

Son las olas que se generan o que se originan a grandes profundidades de mar; producto de un movimiento sísmico cualquiera o por un maremoto llamado en Japón TSUNAMI.

## **OLEAJE**

El oleaje es una sucesión continua de olas, es un fenómeno generado por el viento que al soplar sobre la superficie de mar, hace que dicha superficie se deforme, produciéndose ondas que se mueven en la dirección del viento.

## **MAREA**

La marea es el movimiento periódico y alternativo de ascenso y descenso del nivel del agua de mar, producido por la acción de atracción del sol y la luna.

## **MAREA MUERTA**

Movimiento de poca amplitud, sin aumento por corrientes u oleaje.

## **MAREA VIVA**

Marea de gran amplitud, que se produce cuando la tierra, el sol y la luna se encuentran alineados.

## **MAR**

Masa de agua salada que cubre la mayor parte de la superficie de la tierra.

## **CORROSIÓN**

Es el orín o moho que se forma en los pilotes metálicos, por efecto de la humedad de la atmósfera o del agua salada de mar, principalmente. También hay corrosión por la acción galvánica que se produce entre el fierro o acero con otro metal de distinta tenacidad, como es el cobre, cuando está en contacto con el agua salada de mar.

## **SISMO**

Un sismo implica movimientos vibratorios, trepidatorios u oscilatorios y pueden ser poco o muy violentos de la corteza terrestre. Los sismos se deben a una acumulación de energía de deformación en los grandes bloques del interior de la corteza terrestre.

## **COSTA**

Es la línea o zona de contacto entre el mar y la tierra emergida a orilla de mar.

## **FLOTACIÓN**

Acción de sobrenadar sobre la superficie del agua.

## **RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO**

Se refiere a todas las pinturas y productos que se usan para prevenir la corrosión de recipientes, tuberías, conexiones y estructuras metálicas por aislamiento del medio. Los recubrimientos anticorrosivos, se denominan en general: primarios, acabados y especiales.

## **CONDICIONES DE EXPOSICIÓN**

Por condiciones de exposición se entiende el medio ambiente a que están expuestas las instalaciones.

## **ZONA DE MAREAS Y OLEAJE**

Son las condiciones existentes en la zona de mareas y oleaje en estructuras de muelles, diques, plataformas marinas de perforación, etc.

## **PROTECCIÓN CATÓDICA**

Es una de las técnicas que controla la corrosión de un metal en contacto con un electrólito, convirtiendo el metal en el cátodo de una celda electroquímica mediante el paso de la corriente que proviene de un ánodo.



## **RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS USADOS EN PROTECCIÓN CATÓDICA**

Son todos los materiales y revestimientos que se usan para prevenir la corrosión por aislamiento del medio en que se encuentran las estructuras metálicas.

### **ELECTRÓLITO**

Cuerpo que en estado líquido puede ser descompuesto por la electricidad. Cuando las sales se encuentran en alguna solución y permiten pasar la corriente eléctrica, entonces son electrólitos. Cuando un ácido, una base y una sal se disuelven en agua, ésta se vuelve buena conductora de la corriente eléctrica, éstas sustancias, como el ácido clorhídrico, el hidróxido de sodio y el cloruro de sodio, se llaman electrólitos.

### **IONIZACIÓN**

Es el mecanismo por medio del cual, las moléculas se disocian en iones.

Si se disuelve en agua un ácido, una base o una sal, algunas o casi todas las moléculas de estas sustancias se disocian, es decir, se dividen en partículas llamadas iones.

Los iones metálicos y los del hidrógeno se cargan positivamente, por que sus átomos pierden electrones; mientras que los iones no metálicos o de radicales se cargan negativamente al ganar electrones.

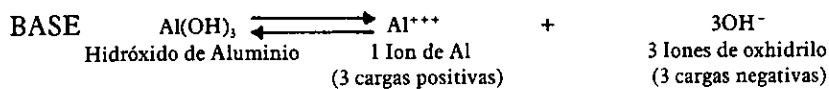
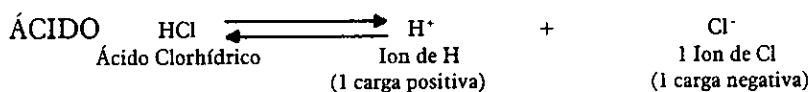
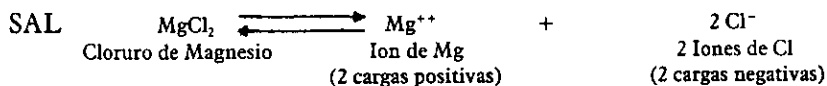
El número de cargas positivas o negativas en el ion, es exactamente igual a

la valencia del elemento o del radical, por lo que toda la solución permanece eléctricamente neutra.

Un ion se mueve libremente a través de la solución (la palabra ion, derivada del griego, significa “viajero”).

Por tener cargas eléctricas contrarias, los iones se atraen unos a otros y producen nuevas sustancias que no se disocian.

Las siguientes ecuaciones son ejemplos de una ionización:



## ELECTRÓLISIS.

Es un caso de ionización, en el cual, un electrólito disuelto o fundido es descompuesto por medio de la corriente eléctrica, este mecanismo se representa en la fig. 1.0.

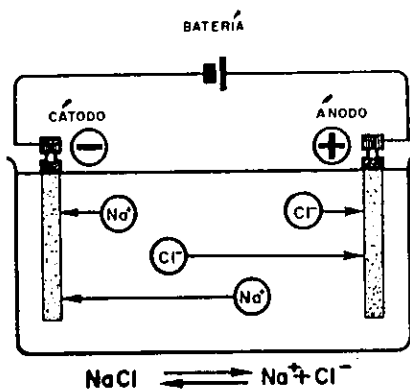


Fig. 1.0 Mecanismo de la electrólisis.

Durante la electrólisis los iones se mueven libremente a través de la solución y viajan de la siguiente manera:

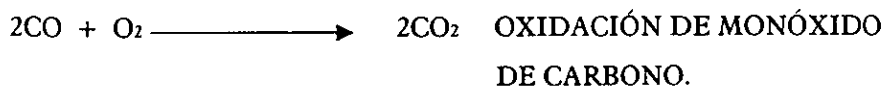
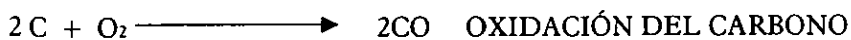
ANIONES (iones de carga negativa) se dirigen al ÁNODO (electrodo positivo).

CATIONES (iones de carga positiva) se dirigen al CÁTODO (electrodo negativo).

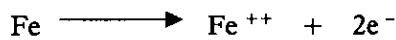
En la electrólisis de un electrólito fundido, en la fig. 1.0, el NaCl (cloruro de sodio), los iones Na y Cl, se dirigen al cátodo y al ánodo, respectivamente.

## OXIDACIÓN.

La oxidación, es un cambio químico en el cual un átomo o grupo de átomos pierden electrones. Cuando un elemento se combina con el oxígeno, sufre oxidación.



También se considera que la oxidación de un elemento, se produce siempre que el número de valencia del mismo, sea aumentado positivamente como resultado de la pérdida de electrones, por lo que el elemento que pierde electrones se oxida aunque no intervenga el oxígeno. Por lo tanto, una transformación que convierte un átomo neutro en un ion positivo, debe estar acompañada por la pérdida de electrones y debe, por lo tanto, ser una oxidación. Observe los siguientes ejemplos:



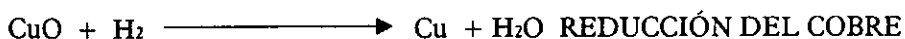
Los electrones ( $\text{e}^{-}$ ) se escriben explícitamente en el lado derecho y proporcionan la igualdad de la carga total en los dos lados de la ecuación.



Oxidación del Na por pérdida de un electrón, ver fig. 1.1.

## REDUCCIÓN.

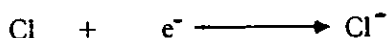
La reducción, es un cambio químico en el cual un átomo o grupo de átomos ganan electrones. Esto se produce, si un elemento o sustancia pierde oxígeno.



También se considera que la reducción de un elemento, se efectúan, cuando su número de valencia positiva se disminuye porque ganan electrones. Por lo tanto, la transformación de un elemento neutro en un anión debe estar acompañada por la ganancia de electrones y se clasifica como reducción. Observen los dos ejemplos siguientes:



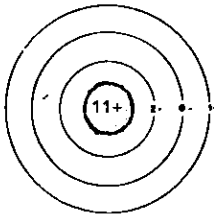
La oxidación y la reducción, siempre ocurren simultáneamente, y el número total de electrones perdidos en la oxidación, debe ser igual al número de electrones ganados en la reducción:



Reducción del Cl por ganancia de un electrón, ver fig. 1.2.

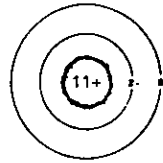
## NÚMERO DE OXIDACIÓN Y SU DETERMINACIÓN.

La valencia de un átomo en un compuesto iónico o electrovalente, es el número de electrones que recibe o pierde; en un compuesto covalente, es el

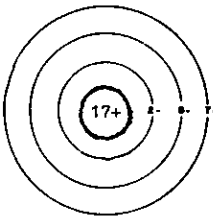


Atomo de Na  
N° de oxidación = 0

Fig. 1.1.

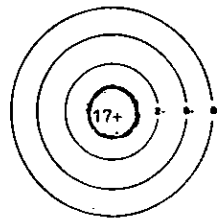


Ion de Na  
N° de oxidación = 1+



Atomo de Cl  
N° de oxidación = 0

Fig. 1.2.



Ion de Cl  
N° de oxidación = 1-

número de electrones compartidos entre los átomos

## NÚMERO DE OXIDACIÓN.

Al número de oxidación de un elemento, se le define como el número que indica su valencia, al cual se le agrega el signo + o - .

El número de oxidación para un elemento libre o sin combinar es 0.

El número de oxidación para cationes simples  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  y para aniones como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{O}^{2-}$ , y  $\text{P}^{3-}$ , es el que corresponde a su carga iónica.

En los compuestos covalentes, como ningún átomo se convierte en ion, el número de oxidación negativo se le asigna al átomo más electronegativo, y positivo a los otros. Por ejemplo, en el  $\text{CaCl}_2$ , como la valencia del Ca es 2, su número es 2+; si la valencia de cada cloro es 1, su número de oxidación es 1-.

## DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE OXIDACIÓN.

El número de oxidación de un elemento, puede ser determinado con la aplicación de las siguientes reglas:

- El número de oxidación de un elemento en estado libre o sin combinarse es 0:  $\text{Hg}^0$ ,  $\text{Cl}_2^0$ ,  $\text{P}_4^0$ .
- número de oxidación del hidrógeno es 1+.
- El número de oxidación del oxígeno es 2-.
- El número de oxidación de ion simple, es igual a su carga iónica o electrovalencia. Iones y radicales:  $\text{Br}^{1-}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{NO}_3^{1-}$ .
- En la molécula de un compuesto, la suma de los números positivos de

oxidación y los números negativos de oxidación es igual a 0. Ejemplos

$$1 + 6 + 2 -$$



$$(2+) + (6+) + (8-) = 0$$

$$1 + 5 + 2 -$$

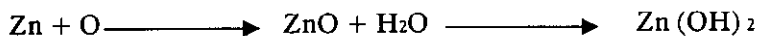
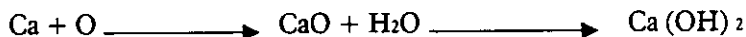


$$(1+) + (5+) + (6-) = 0$$

### DETERMINACIÓN DE ÓXIDOS Y BASES.

METALES + Oxígeno  $\rightarrow$  ÓXIDOS + Agua  $\rightarrow$  BASES (HIDRÓXIDOS)

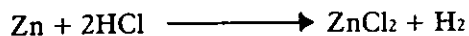
Ejemplos:



### REACCIÓN ELECTROQUÍMICA

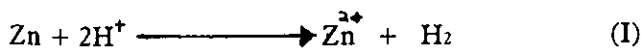
La naturaleza electroquímica de la corrosión puede ser ilustrada mediante el ataque del zinc por el ácido clorhídrico; ocurre la reacción. Se produce hidrógeno gaseoso y se disuelve el zinc, formando una solución de cloruro de Zinc.

La reacción se lleva a cabo de la siguiente manera:



Observe que el ion cloruro no está involucrado en la reacción, esta ecuación puede ser escrita en forma simplificada:





De este modo, el zinc reacciona con los iones hidrógeno de la solución ácida para formar iones zinc e hidrógeno gaseoso. Examinando la ecuación anterior, se puede ver que durante la reacción el zinc se oxida a iones zinc y los iones hidrógeno son reducidos a hidrógeno.

La ecuación (I) lo debemos dividir en dos reacciones siguientes:



Una oxidación o reacción anódica es indicada por un incremento en la valencia o una producción de electrones. Una disminución en la valencia o el consumo de electrones significa una reducción o reacción catódica. Las ecuaciones (I.1) y (I.2) son reacciones parciales, ambas pueden ocurrir simultáneamente y a la misma velocidad en la superficie del metal, si esto no fuera cierto, el metal se cargaría eléctricamente al momento, lo cual es imposible. Esto lleva a uno de los principales principios básicos de la corrosión: durante la corrosión metálica, la velocidad de oxidación es igual a la velocidad de reducción.

El concepto anterior se ilustra en la figura 1.3, donde un átomo de zinc ha sido transformado en ion zinc y dos electrones, estos electrones que permanecen en el metal, son inmediatamente consumidos en la reducción de los iones hidrógeno.

\* Tesis profesional. J. L. Sánchez Cuellar. E. S. I. Q. I. E. I.P.N.

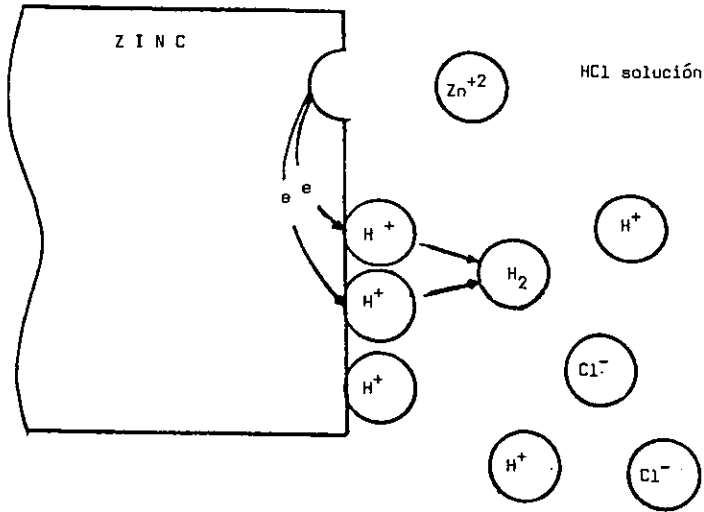


Fig. 1.3. Reacciones electroquímicas que ocurren durante la corrosión del Zinc, en ácido clorhídrico libre de oxígeno.

## **ÁNODO**

Elemento emisor de corriente eléctrica o polo positivo de un generador de electricidad. Puede ser ánodo de sacrificio o ánodo inerte.

### **ÁNODO DE SACRIFICIO**

Anodo de sacrificio, es aquel que se consume al emitir corriente de protección.

### **ÁNODO INERTE**

Ánodo inerte, es aquel que no produce corriente eléctrica y su consumo no es directamente proporcional a la corriente de protección.

### **CORRIENTE DE PROTECCIÓN**

Es la que se necesita para obtener los valores de potenciales de protección de la estructura metálica de acuerdo al proyecto que se presenta.

### **DENSIDAD DE CORRIENTE ELÉCTRICA**

Es la corriente por área unitaria, expresada usualmente en miliamperios por metro cuadrado o miliamperios por pie cuadrado.

### **SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA**

Los sistemas de protección catódica, comúnmente usados son:

- 1) Mediante ánodo de sacrificio (protección galvánica), el cual está basado en el consumo del ánodo protector.
- 2) Mediante corriente impresa, la cual se obtiene de una fuente emisora de corriente directa drenada a tierra a través de ánodo inerte.

## **ELECTRODO DE REFERENCIA**

Es un dispositivo cuyo potencial de circuito abierto es constante.

## **POTENCIAL DE ESTRUCTURA AL ELECTRÓLITO**

Es la diferencia de tensión entre una estructura metálica enterrada o sumergida y un electrodo de referencia en contacto con el electrólito.

## **POLARIZACIÓN**

Es el cambio de un potencial de circuito abierto de un electrodo que resulta del paso de una corriente directa. Todo fenómeno que produzca resistencia eléctrica y que forme parte del circuito, se le llama polarización.

## **PUNTO DE DRENAJE**

Es el punto de conexión entre el cable de la protección catódica y la estructura metálica protegida.

## **MATERIAL DE RELLENO**

Es el que envuelve al ánodo para reducir su resistencia de contacto con el terreno.

## **RESISTENCIA DEL TERRENO**

Es la resistencia eléctrica específica de un terreno y su unidad se expresa en ohms-cm.

## **JUNTA DE AISLAMIENTO**

Elemento de material aislante que sirve para seccionar eléctricamente la estructura metálica por proteger.

## **POSTE DE AMOJAMIENTO Y REGISTRO**

Son señalamientos que tienen por objeto indicar la trayectoria y localización de las estructuras metálicas por proteger, sirviendo además para medir corriente y potencial de estructura al electrólito.

## **RECTIFICADOR**

Equipo que convierte corriente alterna a corriente directa controlada.

## **ELEMENTO DE MEDICIÓN**

Es una resistencia calibrada contenida en el interior del poste de

amojamiento (referencia) y registro.

## **CONDUCTOR DE INTERCONEXIÓN**

Es aquel al que se conectan eléctricamente los elementos que integran el sistema de protección catódica.

## **SOLDADURA POR ALUMINOTERMIA**

Es aquella que se utiliza en campo para soldar conductores eléctricos a estructuras metálicas.

## **MATERIAL PARA AISLAMIENTO Y PARCHADO**

Es el material aplicado a un metal o a un conductor eléctrico con el fin de evitar contactos directos de electricidad con el medio en que la instalación va a quedar alojada.

\* Diccionario marítimo. PEMEX.

### **1.2 Partes que constituyen un pilote**

#### **CABEZA**

La cabeza es la extremidad superior del pilote; esta parte recibe los golpes consecutivos del mazo, tiene tendencia a aplastarse y a hundirse, se tiene el peligro de astillarse o fracturarse.

## **ZUNCHO**

Se evita el astillado procediendo al zunchado; operación que consiste en introducir en caliente sobre la periferia del pilote un anillo de hierro que al enfriarse, comprime progresivamente las fibras y las refuerza muy bien.

El zuncho debe estar situado de 0.02 a 0.03 m., por debajo de la parte superior de la cabeza para evitar el choque directo con el mazo.

## **PUNTA**

Está en contacto permanente con el suelo o roca, tiene tendencia a disgregarse durante el hincado en el suelo, si no estuviera protegido con un casco o azuche metálico.

## **AZUCHAMIENTO**

El azuchamiento debe efectuarse con cuidado, la punta del azuche debe estar en el eje del pilote para evitar desviaciones durante el hincado.

\* Zeven Davidian. Pilotes y cimentaciones sobre pilotes. Editores técnicos asociados, S.A.

### 1.3 Tipos de pilotes metálicos

#### **PILOTES DE ACERO**

Los pilotes estructurales de acero, especialmente los pilotes H y los perfiles WF; son muy usados como pilotes para soportar cargas, especialmente cuando se requiere una alta resistencia por la punta en suelos o en rocas. Las cargas de trabajo de estos perfiles, varían de 40 a 150 Ton. Se han usado perfiles de ala ancha de hasta 91.50 cm. de peralte y también ocasionalmente pilotes formados por canales y rieles de ferrocarril. Se hincan los pilotes, hasta topar con el estrato resistente de roca, en la práctica solamente se han colocado perfiles H de 35.50 cm. de más de 90 m. de longitud.

Los perfiles H hincados en roca, pueden soportar cargas hasta el límite elástico de acero. Los pilotes H penetran al suelo, causando un desplazamiento mínimo y produciendo un levantamiento del suelo y presión lateral también mínimo.

Cuando los pilotes H se usan para resistir por fricción, como el área entre las alas es tan grande, la falla ocurre por esfuerzo cortante en planos paralelos al alma de la sección que pasan por las aristas exteriores de las alas y por fricción contra el metal en las caras exteriores de las alas.

#### **PILOTES DE HIERRO**

Los pilotes de hierro fundido o hierro forjado, fueron empleados hace ya varios años. La principal ventaja de estos pilotes es su gran durabilidad, siendo registrados hasta 50 años de servicio para algunos casos, lo que es



considerablemente bueno para pilotes en aguas de mar. Debajo del agua, generalmente se les encuentra todavía en buenas condiciones. El costo de este material hoy en día sería alto. Entre sus desventajas están el alto costo inicial, la necesidad de hincar con cuidado, de forma que se ubiquen los agujeros para pernos de ajuste en el grado correcto, la tendencia a la ruptura de punta de riostra bajo el impacto de barcos y sus longitudes relativamente cortas. Existen tres formas generales de estos pilotes; tubos ordinarios alados, pilotes discos y pilotes tornillos.

\* Conferencia de proyecto y construcción de obras marítimas y portuarias. Palacio de minería de la UNAM.

#### 1.4 Ventajas y desventajas de los pilotes metálicos.

Entre sus ventajas tenemos: su colocación en obra puede realizarse inmediatamente después de recogerlo en fábrica. Atraviesan fácilmente las capas resistentes y presentan una resistencia elevada a los esfuerzos de flexión, compresión y cortante, su hincado puede realizarse en tramos de pequeña longitud: de 8 a 12 m. de largo, que se unen por soldadura, sus dimensiones transversales son pequeñas.

Su mayor desventaja es su sensibilidad a la corrosión, que exige la utilidad de una protección catódica, revestimiento superficial o envoltura de concreto armado.

\*Cimentaciones de estructuras. Clarence W. Dunhan. Ingenieros consultores.

\*Zeven Davidian. Pilotes y cimentaciones sobre pilotes. Editores técnicos asociados.

\*Conferencia y proyecto y construcción de obras marítimas y portuarias. Palacio de minería de la UNAM.

## **CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE DURABILIDAD DE PILOTES DE ACERO Y DE HIERRO HINCADOS EN EL MAR.**

### **2.1 Investigación sobre las acciones de los organismos marinos a los pilotes de acero o de hierro.**

#### **CAUSAS DE LAS ACCIONES DE LOS ORGANISMOS MARINOS A LOS PILOTES DE ACERO Y DE HIERRO.**

Una de las causas importantes que afectan la durabilidad de los pilotes metálicos, asentados en el mar, son las picaduras (pequeñas porciones de metal que quitan los organismos marinos a los pilotes metálicos) de los organismos marinos, tales como mariscos: crustáceos y moluscos.

Existen muchos informes respecto a las relaciones de corrosión del hierro y acero; producto de picaduras hechas por los organismos que habitan en el mar, las cuales son importantes a los pilotes de acero. El análisis de estas picaduras es de mucha importancia para los Ingenieros, porque con estos análisis se obtiene como resultado que por causa de estas picaduras de organismos marinos se reduce la resistencia estructural del pilotaje con el tiempo.

#### **LA EXPERIENCIA COMO GUÍA**

La experiencia con pilotaje similar en la localidad debe ser estudiada como la mejor guía para las necesidades y eficiencias de los pilotes. Las pruebas de laboratorio e investigaciones de obra sobre pilotes de acero en diferentes suelos y aguas marinas, se han llevado a efecto durante muchos años y sus resultados deben ser estudiados y tomados en cuenta para la selección del pilote y su protección.

\* Robert D. Chellis. Cimentaciones profundas. Editorial Diana de México.

## 2.2 Corrosión de los pilotes de acero o de hierro, debida a bacterias anaeróbicas y aeróbicas que se encuentran en el mar.

### CORROSIÓN DE LOS PILOTES DE ACERO O DE HIERRO, DEBIDA A BACTERIAS ANAERÓBICAS.

La presencia de bacterias anaeróbicas en el mar, puede causar la corrosión del hierro o acero bajo el terreno o el agua salada de mar. Se ha localizado la presencia de estas bacterias anaeróbicas en varios suelos marinos y a una profundidad muy grande, se les ha encontrado principalmente grupos reductores de sulfato ( $\text{SO}_4$ ) y consumidores de hierro (Fe). Las bacterias anaeróbicas reductoras de sulfatos más comunes, es la "Esporovibrio desulfuricans", que requiere de oxígeno que deriva de la reducción de componentes tales como sulfato, sulfuro ( $\text{S}^{-2}$ ), tiosulfato, o sustancias orgánicas, en lugar de obtenerlo del aire libre. La humedad y el azufre le son esenciales. El sulfuro de hidrógeno, que ataca agresivamente al hierro, es liberado y el hidrógeno es eliminado de las áreas catódicas del metal con la formación de sulfuro ferroso. El grupo desulfuricans, se cree, es activo únicamente si se encuentran cerca de los materiales neutrales casi totalmente libres de presencia de oxígeno. La presencia de este grupo es señalada por las cantidades anormales de sulfuro de hierro ( $\text{FeS}^{-2}$ ) en los productos corrosivos; esto se puede detectar fácilmente por la mancha negra del sulfuro que aparece en el subsuelo y en el olor de ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), cuando se añade ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) diluidos a los productos de corrosión. Las bacterias más comunes, consumidoras de hierro son las "Crenothrix", "Leptothrix", "Espirofillum" y una forma capsulada de "Cocobacilli" y aunque estas bacterias no consumen todo el hierro como alimento, requieren de hierro ferroso en solución para el crecimiento, como rojo hidróxido férrico o un similar compuesto férrico insoluble.

En algunos casos los suelos han sido clasificados como no corrosivos, como resultados de los análisis comunes minerales del suelo y agua de mar, sin embargo en análisis posteriores se ha detectado que ocurre la corrosión. Los exámenes bacteriológicos del suelo marino y productos de corrosión, han detectado la presencia de bacterias que han contribuido a la corrosión de los pilotes, debido a la producción de agentes químicos que facilitan la acción electroquímica o el ataque del metal.

### **CONSECUENCIAS OCURRIDAS POR LA CORROSIÓN DE LOS PILOTES METÁLICOS, DEBIDAS A BACTERIAS ANAERÓBICAS.**

Debido a la corrosión de los pilotes metálicos, producto de los ataques de las bacterias anaeróbicas, surge como consecuencia la disminución de la vida útil de los pilotes metálicos, por que bajo el terreno o el agua de mar, resulta muy agresiva a los pilotes. Es muy difícil de calcular con exactitud, cuanto tiempo durarán de servicio los pilotes metálicos expuestos al agua de mar, por el aumento de velocidad de corrosión de los pilotes, debida a bacterias anaeróbicas. De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación, los años de servicio de los pilotes metálicos, pueden ser de 20 a 50 años de duración.

### **CORROSIÓN DE LOS PILOTES METÁLICOS, DEBIDA A LAS BACTERIAS AERÓBICAS**

La presencia de bacterias aeróbicas en suelos o agua de mar, también pueden causar o acelerar la corrosión de los pilotes metálicos. La "Tiobacillus" es de este tipo, manteniéndose de la oxidación de compuestos de azufre. Las bacterias de la flora del suelo, oxida el azufre, formando una fuerte solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), que a su vez se combinará con cualquier materia básica presente

en el lugar. Estas bacterias se desarrollan en suelos abiertos o en suelos drenados de mar, si existe la presencia de azufre. El azufre necesario es obtenido frecuentemente a partir de la descomposición natural de la materia orgánica, y en ocasiones de las piritas de hierro. No se multiplican en suelos saturados de agua de mar pero sí pueden sobrevivir en estas condiciones.

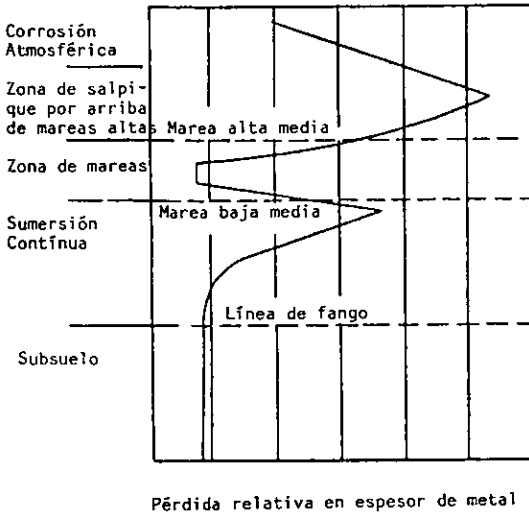
\* Robert D. Chellis. Cimentaciones profundas. Editorial Diana de México.

### **2.3 Corrosión de los pilotes de acero o de hierro, provocado por los diferentes fenómenos que ocurren y existen en agua de mar.**

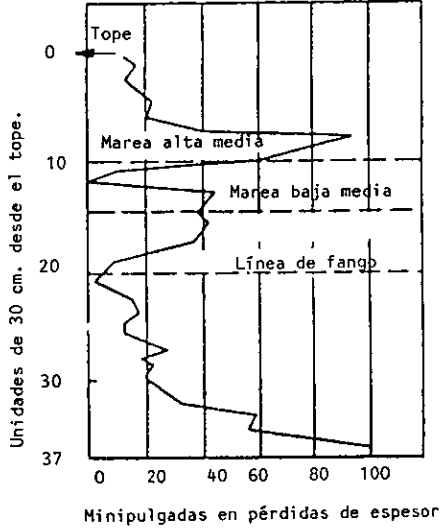
#### **CORROSIÓN CAUSADA POR EL AGUA DE MAR A LOS PILOTES DE ACERO O DE HIERRO.**

La corrosión sobre pilotes metálicos asentados en el mar, se forman en diferentes zonas de aeración. En algunas zonas de pilotaje marino, están sujetas a una corrosión más agresiva que en otras; las intensidades relativas típicas, se representan en la gráfica de la figura 2.0 (pérdida relativa en espesor de metal). La corrosión severa ocurre en la zona de salpique de agua apenas arriba del nivel de marea alta, debida a las células de corrosión electroquímica severa que se presentan sobre el pilotaje que provocan la descarga de corrientes de algunas áreas sobre el pilote metálico. La corrosión más severa se presenta en pilotes que se extienden más arriba del nivel de marea alta, alrededor de 30 cm. desde el tope del pilote, y puede extenderse hasta cuatro veces más que en otras partes.

En zonas entre mareas, la corrosión es frecuentemente severa. En algunas zonas marinas, el agua de mar está contaminada por sedimento, aceite o grasa que flota sobre la superficie y revista el metal, esto ofrece una buena protección. En



(a) Pilotaje de acero después de 5 años de exposición en agua de mar en Kure Beach.



(b) Tablestacado de acero al carbón en agua de mar después de 3 años y 7 meses en Kure Beach, N.C.

Fig. 2.0 Perfiles de corrosión de pilotaje de acero en agua de mar.

lugares con altas temperaturas, la relación de corrosión arriba de la marea baja y debajo de la misma, será alta debido a los aumentos de calor, alta concentración de sal y aeración. Por lo tanto, se incrementa el ataque de corrosión en estas zonas no protegida del pilote. La relación de corrosión entre zonas templadas, y en climas más calientes varían. En zonas templadas, la corrosión de los pilotes metálicos es menor que en zonas más calientes. Las células corrosivas, también se localizan sobre los pilotes entre el área anódica no aireada, debajo de línea de fango y el área catódica en agua aireada.

Debe considerarse la forma de construcción de los pilotes. La corrosión en pilotes H, puede producirse más fácilmente sobre los bordes de las alas, debido a las diferencias de concentraciones de oxígeno en esa zona y en las superficies planas. Esto puede causar una pérdida de resistencia desproporcionada a la pérdida de cuerpo de metal. Los pilotes redondos evitan esas concentraciones galvánicas y se corroen menos que los pilotes H. Otra de las causas que aceleran la corrosión, es el aumento de la temperatura del agua. Por ejemplo, un incremento de 28°C, probablemente duplicará la cuantía del ataque por corrosión.

\* Robert D. Chellis. Cimentaciones profundas. Editorial Diana de México.

## **ANÁLISIS DE DURABILIDAD DE LOS PILOTES METÁLICOS Y EXPERIENCIAS CON LA CORROSIÓN CAUSADA POR LOS DIFERENTES FENÓMENOS QUE EXISTEN Y OCURREN EN EL AGUA DE MAR.**

El agua de mar resulta muy agresiva a los pilotes metálicos sin revestimiento, debido a la gran cantidad de sal contenida en el agua, altas temperaturas y otros factores. Casi es imposible de calcular con exactitud la vida

útil de servicio de los pilotes metálicos expuestos al agua de mar. En el puerto de Nueva Haven, un grupo de pilotes metálicos sin revestir que soportaban un muelle en T quedaron muy corroídas de forma peligrosa en unos diez años. En este puerto había una ataguía con 25 años de antigüedad que estaba en buenas condiciones, mientras que en otro lugar, una obra parecida con 30 años de antigüedad presentaba zonas totalmente corroídas.

Los pilotes metálicos sin revestir, expuestos al agua de mar, especialmente en zonas de acción de mareas, deben considerarse como provisionales. En Nueva Inglaterra, un muelle de concreto apoyado sobre pilotes metálicos de perfil H, fue examinado once años después de su construcción, se encontró que la cuantía de pérdida de la superficie de los pilotes en la zona de acción de las mareas era de aproximadamente un 10% de su cuerpo. Siete años más tarde se examinaron los pilotes de nuevo, los Ingenieros encontraron con que la cuantía de pérdida de la superficie de pilote era en aquel tiempo de aproximadamente un 45% de pérdida de cuerpo del pilote. Se observa que la velocidad de corrosión aumentaba con forme pasaba el tiempo. Se encontró que en algunas de las alas de estos pilotes, estaban muy corroídas. Una nueva investigación mostró que las pérdidas causadas por la corrosión es de 90 cm. por debajo del nivel de bajamar, siendo considerablemente menores que las correspondientes en la zona de acción de las mareas y que la pérdida de sección, no era tan importante al nivel de fango; de 3 a 4.50 m. más abajo, sin embargo, tuvieron que realizar reparaciones para salvar la estructura.

En general podemos considerar que un pilote metálico expuesto al agua de mar y situado por lo menos de 60 a 90 cm. por debajo del nivel de la marea baja, puede suponerse que perderá por corrosión, del orden de 0.13 mm. de espesor por año. Esta pérdida puede llegar a ser de 0.25 a 0.38 mm. por año en las partes



sometidas a la acción de mareas, o mucho mayor en determinadas zonas locales.

Un pilote de perfil H, expuesto a la acción del agua de mar, será atacado por ambas caras del alma y de sus alas, por lo tanto puede quedar debilitado de modo peligroso a los 20 ó 25 años. Las aguas contaminadas del puerto, pueden ser más corrosivas que las aguas sin contaminación, por lo tanto es apreciable que un pilote tubular metálico relleno de concreto, durará mucho más tiempo que un pilote de perfil H con el mismo espesor de metal, ya que el primero solo lleva una de sus caras expuestas a la corrosión, además cuando el tubo llegará a destruirse, el concreto de su interior todavía es capaz de resistir cargas. La parte situada justamente por encima del nivel del fango, probablemente será una zona en que la corrosión se produzca de modo más acelerado que en otras zonas. La parte metálica que queda penetrada dentro del suelo, bajo del agua de mar, sufrirá una corrosión menor que la expuesta directamente al agua misma, sin embargo depende de lo que contenga el suelo: cantidad de oxígeno, álcalis y sales (especialmente sulfatos), ácidos orgánicos y de otros tipos de compuestos químicos, así como la porosidad del terreno.

Los metales que mejor se comportan en las zonas de acción de las mareas, son los de tipo Monel y ciertas clases de bronce o metales no ferreos. Puede emplearse acero al cobre cuando los pilotes están expuestos al aire, pero de poco servirá, si dichos pilotes van sumergidos en agua de mar o están en la zona de acción de las mareas.

En el mundo, se ha informado el progreso de corrosiones como entre 0.0254 a 0.196 mm. por año, con un promedio de 0.111 mm. por año. La pérdida de peso se puede suponer como directamente proporcional al tiempo.

La corrosión que se produce a causa de agua de mar, se incrementa con la velocidad del agua en áreas de contacto con el metal, si este no está protegido por algún método que evita la corrosión.

El "Sea - Action Committee" del "Institution of civil Engineers" proporciona la siguiente información (tabla 2.1. Corrosión experimentada en agua de mar) de pérdidas corrosivas y profundidades de picaduras en agua de mar (incluye propósitos comparativos en una serie en agua fresca) sobre placas de 6.30 mm., de espesor de especímenes medio acero, al carbón, que tiene un contenido bajo de azufre y fósforo, siendo el análisis carbón: 0.345%, silicio: 0.20%, azufre: 0.025%, fósforo: 0.027%, manganeso: 0.715%, cobre: 0.076%.

LOCALIZACIÓN DEL ESPECIMEN	PROFUNDIDAD PROMEDIO DE CORROSIÓN EN UNA CARA, EN CM.					
	ESCAMADO			DESESCAMADO		
	5 AÑOS	10 AÑOS	15 AÑOS	5 AÑOS	10 AÑOS	15 AÑOS
HALIFAX, N. S.: EN AIRE	0.010	0.023	0.043	0.008	0.020	0.038
ALTERNATIVAMENTE HÚMEDO Y SECO	0.036	0.041	0.079	0.023	0.033	0.125
SUMERGIDO	0.048	0.117	0.173	0.056	0.112	0.183
AUCKLAND, N.Z.: EN AIRE	0.023	0.051	0.089	0.018	0.033	0.061
ALTERNATIVAMENTE HUMEDO Y SECO	0.015	0.028	0.023	0.028	0.038	0.036
SUMERGIDO	0.043	0.074	0.142	0.058	0.102	0.155
PLYMOUTH, ING.: EN AIRE	0.081	0.163	0.243	0.025	0.097	0.056
ALTERNATIVAMENTE HÚMEDO Y SECO	0.030	0.058	0.091	0.058	0.102	0.160
SUMERGIDO (AGUA DE MAR)	0.048	0.079	0.086	0.053	0.094	0.109
COLOMBO, CEILÁN EN AIRE	0.201	0.292	0.394	0.224	0.371	0.483
ALTERNATIVAMENTE HÚMEDO Y SECO	0.168	0.231	0.335	0.163	0.249	0.302
SUMERGIDO	0.061	0.109	0.173	0.074	0.130	0.170
PLYMOUTH, ING., SUMERGIDO: EN AGUA DULCE	0.031	0.046	0.064	0.046	0.058	0.074

Tabla 2.1. Corrosión experimentada en agua de mar. Calculada a partir de la pérdida - peso total.

En Colombo, la corrosión aérea fue severa, se observó que la corrosión aumentó de 3.75 a 6.30 cm., encontrándose prácticamente en estado de colapso. La corrosión aérea en Halifax fue ligera, que consistió en herrumbre fina, mientras que en Plymouth las barras estaban cubiertas de una costra negrusca de herrumbre que alcanzaba a veces 3.75 cm. de espesor total de barra. Los especímenes de marea media en Auckland y Colombo, estaban cubiertos con fauna y flora, incluyendo lapas, algunas costras de laminado aún estaban adheridas, en Auckland. Los especímenes de marea media en Halifax, estaban bastante libres de fauna y flora; estaban salpicados de herrumbre pesada (escamas), especialmente en el fondo de mar. En Plymouth, las barras de marea media presentaban unas cuantas lapas y estaban cubiertas con herrumbre roja, teniendo el espesor total de pilote adicional unos 19 mm. Los pilotes metálicos sumergidos en agua de mar, excepto las de Halifax, estaban cubiertas con fauna y flora, y en Colombo y Auckland esto era sobreyacente a una capa de óxido negro suave. Las barras metálicas de Halifax sumergidas, estaban fuertemente corroídas, y las barras metálicas de agua de mar en Plymouth estaban cubiertas con flora y gran cantidad de herrumbres. Las barras metálicas en Plymouth, sumergidas en agua dulce, no presentaron crecimientos orgánicos, pero se proyectaban 2.5 cm. a la superficie grandes escamas y herrumbres, en agua dulce no presentan los mismos mecanismos que ocurren en el agua de mar.

En estos experimentos se observa que las barras sumergidas perdieron mucho más peso que las barras expuestas a media marea, excepto en Colombo, mostrando que no siempre es cierta la creencia popular de que la corrosión es más severa a nivel de marea media.

La costra de laminado; mientras permanezca adherida, da protección contra la corrosión, pero si se agrieta, se presentan muchas picaduras locales. La

corrosión aérea en Colombo, donde las barras estaban sujetas al rocío, provocó menos pérdida de peso en las barras desescamadas, y la profundidad de las picaduras fue menor. Las pruebas de marea media mostraron pérdidas de peso ligeramente mayor en las barras desescamadas, pero las barras fueron menos picadas. El agua en Halifax tenía algo de aceite, que formó un depósito en las barras de marea media, la total inmersión mostró mucha diferencia entre las barras sucias y limpias, siendo las barras limpias uniformemente corroídas, mientras que las barras sucias mostraban una corrosión severa donde se desprendió la costra de laminado. Por lo tanto, aunque las barras limpias perdieron más peso, esta desventaja fue más que compensada por la menor presencia de picaduras. En condiciones de inmersión en agua dulce, las barras limpias también perdieron más peso, y las picaduras fueron generalmente menores que en agua de mar.

Se considera que la relación promedio de corrosión en aguas británicas, puede considerarse como de 0.076 mm. por año en agua de mar, y de 0.051 mm. por año en agua dulce.

Tablestaca fabricada de acero en la bahía de Guantánamo Cuba, mostró porciones por abajo de la línea de flotación, en buenas condiciones después de 32 años de servicio, mientras que las porciones superiores, estaban prácticamente destruidas.

El pilote de placa y tablestaca retirado de Glenwood Landing, Nueva York, en 1929, de la zona supuestamente de mayor corrosión (aproximadamente de 30 a 45 cm. bajo el nivel de la marea alta), mostró una pérdida de 1.2 mm. en 11 años y 2.4 mm. en 21 años, estas relaciones son aproximadamente el doble de las encontradas en Plymouth Inglaterra.

Un pilote metálico fabricado en E.U., fue empleado temporalmente 12 veces entre 1907 y 1912 y posteriormente se instaló en Key West Florida, fue encontrado en 1936 en muy buenas condiciones debajo del nivel de la marea baja.

En agua salada de mar, la tablestaca de 22 años de edad, asentada en Jack Sonville, fue encontrada en condiciones regulares en la línea de flotación y en excelente condición 3.00 m. más arriba.

En Key West Florida, se asentó una tablestaca de acero en un embarcadero, después de 19 años se encontró en excelente condición, excepto donde estaba expuesta al rocío de agua salada y acción de oleaje.

También en Key West Florida, se analizó un entronque ferroviario después de 20 años de su construcción, se encontró en excelentes condiciones por abajo del nivel de la marea baja, servible por arriba del nivel de bajamar, en contacto con tierra por un lado, y totalmente corroído donde estuvo expuesto al rocío de agua salada en ambos lados.

Un grupo de pilotes cilíndricos de acero, instalados en tortugas, en el Golfo de México, con marea baja media de 90 cm. desde el tope y una media marea de 45 cm. al examinarse en 1933, se encontró la siguiente pérdida de sección: 7.5 cm. desde el tope, 6.3 mm., 30.00 cm. desde el tope y 5.5 mm., 60.00 cm. desde el tope con 1.6 mm., 1.27 m. desde el tope con pérdida de 0.80 mm.

La relación media de corrosión en el tablestacado de acero sobre la costa del Atlántico en los Estados Unidos, basada en el total de promedios, fue encontrada por el "Beach Erosión Board" como de 0.2032 mm. por año. Las relaciones promedio de pérdida para malecones de puerto fueron de 0.125 mm. por año de

0.60 a 2.40 m. sobre el nivel de marea alta media (MAM), y aproximadamente de 0.064 mm. por año en el nivel de marea alta media y nivel de marea media y hasta de 0.089 mm. por año en el nivel de marea baja media (MBM). Las relaciones para malecones de playa, eran la mitad de las cifras anteriores. Para aristas de encuentro y rompeolas, las pérdidas fueron de 0.254 mm. por año entre 0.60 a 2.40 m. sobre el nivel de marea alta media, a un medio de este valor en el nivel de MAM y más del doble de la MAM al nivel de marea baja media (MBM). Entre el nivel de MBM y la línea de tierra, el promedio fue de 0.089 mm. por año, siendo mayor cerca del nivel de MBM. La cubierta de tierra en una cara de malecones de puerto redujo la relación de 0.1905 mm. por año a un tercio de este valor. Para malecones de playa, la relación fue reducida de 0.69 mm. a 0.254 mm. por año, pero para aristas de encuentro y rompeolas, la relación fue la misma, 0.51 mm. por año, cubiertas a una o dos caras. La cubierta de tierras en ambas caras, redujo la pérdida sobre malecones de playa a 0.043 mm. por año, y en aristas de encuentro y rompeolas a 0.066 mm. por año. Las pérdidas promedio para malecones de puerto, sujetos a rocíos fuertes, moderados y ligeros fueron de 0.211, 0.104, y 0.061 mm. por año. Para rocíos fuertes sobre malecones de playa, aristas de encuentro y rompeolas, la pérdida fue de 0.41 mm. por año.

\*Cimentaciones de estructuras. Clarence W. Dunhan. Ingeniero consultor. Graw Hill book. Co, Inc. USA.

\*Robert D. Chellis. Cimentaciones profundas. Editorial Diana de México.

## **2.4 Corrosión de los pilotes de acero o de hierro, causadas por suelos gruesos o finos en la profundidad del mar.**

### **CORROSIÓN DE LOS PILOTES DE ACERO O DE HIERRO, CAUSADAS POR SUELOS FINOS.**

Los pilotes metálicos, hincados completamente en arcilla densa, probablemente serán duraderos, la oxidación requiere la presencia prolongada de una fuente de oxígeno. Cuando el suelo es impermeable, el agua no circula a través del mismo, no existe la presencia del aire, por lo tanto, la corrosión se presenta muy lenta.

En suelos porosos, el agua subterránea puede desplazarse lentamente de manera que la fuente de oxígeno se va renovando, entonces es cuando se produce la corrosión.

Los suelos y el agua corriente que contengan ácido u otras sustancias químicas agresivas, ocasionan corrosiones muy peligrosas a los pilotes metálicos.

### **CORROSIÓN DE LOS PILOTES DE ACERO O DE HIERRO, CAUSADOS POR SUELOS GRUESOS.**

La relación de corrosión de los pilotes de acero o de hierro en el terreno, varía considerablemente con la textura y composición del suelo, profundidad del empotramiento, y contenido de humedad. En suelos de textura gruesa, debido a la circulación del aire, la corrosión puede acelerarse a la condición similar a la que ocurre en la atmósfera. Las arenas situadas profundamente bajo estratos densos,



pueden proporcionar poco oxígeno, en particular durante períodos de aguas freáticas bajas.

Las arenas arrastradas por el agua o impulsadas por el viento, pueden lesionar a los pilotes metálicos, expuestos próximos a tierra, produciendo efectos parecidos a los de un chorro de arena, este fenómeno acelera la corrosión de los pilotes metálicos.

\*Cimentaciones de estructuras. Clarence W. Dunhan. Ingeniero consultor. Mc Graw – Hill book. Co, Inc. USA

\*K. Terzaghi y R. B. Peck, "Soil Mechanics Inc. Engineering Practice", John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1948.

## **2.5 Diseño de Técnicas para protección de pilotes metálicos contra la corrosión, causada por el agua de mar, suelos gruesos y finos.**

### **REVESTIMIENTO SUPERFICIAL**

Las pinturas de aceite, sirven por unos cuantos meses y las pinturas de carbón - alquitrán ordinarias por un tiempo mayor, siendo más durables que las de aceite, aunque no satisfactorias en el sol.

Las capas de concreto delgadas, aplicadas sobre el pilote y casquetes del mismo, son efectivas, pero costosas. Otros revestimientos estudiados incluyen la grasa, neopreno laminado, zinc rociado a flama, pinturas ricas en zinc, mastique rociado en caliente, y cintas adhesivas de plástico. Otros revestimientos, son; mastique fenólico, resina sarán, y resina vinílica con aluminio mastique. Hasta no probar ser mejores otros tipos de revestimientos, el lijado seguido de dos capas de

bistumastique aplicado en frío o una capa de esmalte bitumástico aplicado en caliente, será el revestimiento ideal a aplicar.

Los revestimientos deben extenderse 60 cm., bajo el nivel de la marea baja media (MBM) de ser necesario, ante la presencia de ciertos crecimientos marinos raros, que depositan ácidos que causan las picaduras en pantanos, donde las aguas están muy contaminadas por drenajes, desechos industriales o carbón. Tales condiciones pueden indicar la conveniencia de revestir el acero en toda su longitud, o cuando menos hasta la línea de fango. Se recomienda aplicar medidas ecológicas a empresas próximas.

Los materiales suaves y finos bajo la línea de fango, usualmente no dañarán los revestimientos en grado suficiente. Cuando el hincado se hace en materiales gruesos y duros, se toma en consideración el excavado anterior al hincado o al empleo de envolventes, en lugar de esmaltes. Las superficies revestidas, no deben hincarse en contacto con el terreno, a no ser que se pueda demostrar que no serán dañadas; de ahí en adelante, se recomienda hacer una perforación previa antes del hincado. La abrasión causada por la fluencia de arena en agua cercana a la línea de fango, puede ser severa sobre revestimientos duros, pero menos sobre materiales elásticos.

Las superficies de contacto sobre los intercierres del tablestacado de acero, deben ser imprimadas ligeramente pero no revestidas con materiales más pesados, si han de interferir con el hincado del pilote. Las plantillas de hincado, deben estar equipadas con rodillos, si son necesarios para evitar la raspadura del revestimiento durante el hincado.

### **Preparación de superficies.**

Para estructuras de acero frontales al agua, todas las superficies a 60 cm., bajo el nivel de marea baja media, excepto varillas y ajustes, deben ser limpiadas a flama y cepilladas con alambre, o preferiblemente lijadas e imprimadas antes del revestimiento. El acero que se va a envolver de concreto debe ser revestido cuando menos 15 cm. de espesor de concreto, excepto cuando el concreto se extiende bajo el nivel de marea baja media y los revestimientos son omitidos bajo este nivel. Las superficies a ser soldadas, deben tener una delgada película de preparación. Las soldaduras deben ser revestidas. El acero puede ser limpiado y revestido en la fábrica o en la obra. Las superficies imprimadas antes de la entrega, deben reimprimarse en la obra.

### **Pinturas bituminosas.**

Este concepto se emplea únicamente a la película fina, especialmente de asfalto rebajado aplicado en frío, que en ocasiones tiene pequeñas cantidades de compuesto lubricante. Los principales materiales bituminosas empleadas en las pinturas, son el asfalto o carbón-alquitrán. Esta pintura puede ser colocada a brocha o al rocío en un espesor de película seca de 0.0381 a 0.076 mm. por película, el espesor mínimo seco total, debe ser de 0.127 mm. Estos asfaltos cortados o rebajados, no tienen propiedades inhibitorias de corrosión, y actúan solamente como barreras mecánicas. Las películas son delgadas, a no ser que incluyan tapaporos; como carbonato de calcio, cemento asfalto, mica, sílice, arcilla o material inorgánico fibroso, como el asbesto. Los asfaltos rebajados sin tapaporos son únicamente adecuados para uso temporal en suelos no corrosivos. Los solventes en pinturas carbón-alquitrán son demasiados fuertes y destructivos para los selladores convencionales. Las películas o revestimientos a base de carbón

alquitrán, deben aplicarse al metal descubierto. Se puede emplear un sellador lavador para protección temporal de acero limpiado con soplete, hasta que pueda aplicarse una película base de pintura al alquitrán, el cromato puede ejercer algo de efecto inhibitor, pero de otra forma, deberá utilizarse la pintura aplicada directamente sobre el metal descubierto.

Las pinturas al alquitrán, son empleadas para los mismos tipos de películas que las pinturas asfálticas. Consisten generalmente de una solución de brea, carbón - alquitrán, que pueden tener o no tapaporos.

El esmalte aplicado en caliente o la brea carbón - alquitrán, también aplicado en caliente (sin tapaporo), se emplea sobre el sellador de asfalto rebajado. El carbón - alquitrán, presenta más resistencia al agua que el asfalto, pero su resistencia es menor a la intemperie y ácidos. La pintura caliente al alquitrán, es mejor en objetos enterrados. También se encuentran disponibles revestimientos tipo mastique de carbón - alquitrán.

Se ha encontrado que el carbón - alquitrán, da buenos resultados y mejor servicio que el óxido de hierro o pinturas de masilla. También se ha encontrado que una o dos capas de sellador plomo rojo son beneficiosas. El carbón - alquitrán es bueno para uso subterráneo, donde la apariencia no es importante; tiende a arrugarse al sol.

La pintura epóxica al alquitrán, se forma de resina epóxica y brea de carbón alquitrán y se aplica en frío. La epóxica, posee dos componentes que curan a través de la película espesa, mediante polimerización, en lugar de vaporización de solvente; el color es negro. Resiste la tendencia al arrugamiento, la acción de aceites, abrasión, agua salada, ácidos y alcaloides. Dos capas deben ser el mínimo.

El área de recubrimiento, es de 1,486.45 mts<sup>2</sup>. por galón por capa, y un espesor de 0.0356 a 0.041 mm. se obtiene de dos a tres esparcimientos por brocha o de cuatro a seis capas rociadas. En este caso no es necesario un sellador. El acero debe ser lijado.

Las películas bituminosas aplicadas en frío, pueden aplicarse en varias consistencias y son soluciones asfálticas de carbón alquitrán, las películas medianas son de alta consistencia y están diseñadas para ser aplicadas con brocha o al rocío en un espesor seco de 0.127 mm. por capa (mínimo) o 0.254 mm. como máximo. La película totalmente seca, debe tener un espesor de 0.305 mm. Las películas gruesas, son de muy alta consistencia y se aplica al rocío o con brocha, a un espesor seco de 0.254 mm. como mínimo o de 0.635 mm. como máximo, siendo el espesor total de película seca de 1.27 mm. como mínimo. Las películas extra gruesas son aplicadas en grandes espesores, mediante brochas o al rocío. El espesor mínimo seco debe ser de 0.889 mm. por capa, seleccionándose el espesor total seco de acuerdo con las necesidades particulares.

El bitumástico No. 50, se aplica en frío, y es una brea carbón alquitrán de trabajo pesado, autoselladora; empleada en casos difíciles. Las películas de por lo menos 1.6 mm., pueden obtenerse mediante una relación de esparcimiento de 5.1097 a 6.503 m<sup>2</sup>. por galón. Resistente en aguas cargadas de sal y es útil en superficies enterradas. Sobre pilotes y estructuras marinas, las superficies, se limpian hasta dejar descubierto el metal, antes de la aplicación de las dos capas. Si están a la luz del sol, debe añadirse una capa de bituplástico No. 28. El No. 50 soporta temperaturas de -23 a 71°C y el No. 28 soporta de -45 a 93°C. Debe esperarse una buena vida útil, a partir del revestimiento No. 50 aplicado en frío y en dos capas, en espesores de 0.8 a 1.20 mm.

El esmalte bitumástico No. 70B, es una base de carbón – alquitrán y aplicada en caliente, que ha proporcionado buen servicio bajo severas condiciones. Se puede aplicar en una capa sencilla de 2.4 mm., de espesor, más o menos 0.8 mm.

### **Emulsiones bituminosas.**

Éstas, tienen asfalto o resina carbón alquitrán. Se requiere la aplicación de un sellador sobre el acero, y se puede emplear pintura bituminosa o un sellador pigmentado con propiedades inhibitoras a la corrosión. Las emulsiones bituminosas tienen valor como capas superiores sobre las pinturas alquitradas, esmaltes al carbón alquitrán, u otras pinturas bituminosas para evitar el arrugado y agrietamiento bajo la luz del sol.

### **Minio genuino**

Primario alquidálico de excelente poder anticorrosivo y cubriente. La mejor opción para lugares húmedos, costas y climas tropicales. De color naranja y acabado mate.

### **Cromato de zinc**

Primario alquidálico pigmentado con cromato de zinc, excelente dureza alquidálico, de color verde amarillento. Una alternativa más para costas y climas tropicales.

## **Revestimiento y protección catódica.**

La protección catódica, no es efectiva en la zona de salpique y su efecto es parcial en la zona de mareas. Debajo del nivel de la marea baja media (MBM), la corrosión puede ser evitada mediante una corriente de 3 ma/pie<sup>2</sup> (3 miliamperio/pie<sup>2</sup>), después de que una corriente inicial mayor ha causado la formación de depósitos calcáreos. Para que dure más tiempo en toda la longitud del pilote, se le aplica una película protectora que se extienda desde arriba de la zona de salpique, hasta la zona más cercana al nivel de la MBM. La fatiga de los pilotes descubiertos, debe ocurrir en la zona de salpique. Si los pilotes están pintados sólo en las partes sumergidas, se espera una severa corrosión en la zona de mareas, debido a que las áreas pintadas no proporcionan protección galvánica hasta la zona de mareas, por lo tanto la corrosión será severa en las zonas quebradizas del revestimiento. Si los pilotes están pintados en solo la porción superior del nivel de la MBM, que es catódica, la corrosión moderada es posible que sea evitada y la fatiga ocurrirá eventualmente por debajo del nivel de la MBM, la mejor protección es proporcionada en las roturas sobre el revestimiento en la zona de mareas, excepto por la presencia de picaduras ligeras en las roturas, sin afectar las porciones inferiores, debido a que el área debajo de la superficie de rotura de revestimiento es mayor. Por lo tanto, la pintura aplicada arriba del nivel de la MBM y acoplada con protección catódica, debe proporcionar prácticamente protección total a superficies continuamente sumergidas.

\* L. Van, Rijsselberghe y L. Descans "Dues d' Albe en Palplanches Métalliques. Application au Port de Zeebrugge. 3e Fasciunle", junio, 1951. R 423 - 484.

## PROTECCIÓN CATÓDICA

La protección catódica, se ha venido empleando cada vez más desde varios años atrás, como una alternativa o suplemento de los revestimientos protectores. La fuerza de transmisión en la corrosión electroquímica, es la diferencia de potencial entre las áreas anódicas de donde parte la corriente en el acero para entrar en el electrólito y las áreas catódicas donde retorna la corriente. El acero en contacto con el agua de mar altamente aireado o en el fango, actúa como cátodo y el acero en contacto con el agua de mar menos aireado o en el fango, actúa como ánodo. Se puede evitar la corrosión en el metal, si se pueden imprimir contracorrientes bastante elevadas como para neutralizar las corrientes corrosivas y dejar totalmente catódica la estructura, respecto a sus alrededores. La protección catódica, es efectiva siempre y cuando la estructura permanezca en contacto con un buen electrólito, tal como el agua de mar y la mayoría de los suelos.

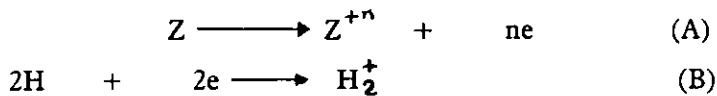
La corrosión de pilotes de acero bajo el nivel de la marea baja, anteriormente fue un serio problema económico. Las corrientes catódicas proporcionan completa protección a esta región. Es complicado pintar pilotes cerca del nivel de marea baja, pero esta región también será protegida catódicamente. La protección total, se extenderá en aproximadamente dos tercios de la altura de la zona entre los niveles de marea baja y alta, debido a la formación de depósitos de calcio. Sin la protección catódica, ha sido una práctica común, el incremento de espesor en el metal, pero esto se ha vuelto innecesario. La protección catódica, no es efectiva contra la abrasión, de otra manera, las estructuras de acero tienen duración casi indefinida, prácticamente sin costo de mantenimiento, aparte de las inspecciones esporádicas para permitir pequeños ajustes o el remplazo de ánodos. El costo de esta protección, es muy reducido por metro cuadrado, al año.



La protección catódica en una superficie metálica, las moléculas de gas hidrógeno, protegen al metal, como el gas hidrógeno puede ser retirado mecánicamente o mediante oxígeno disuelto en agua, es necesario generar más corriente eléctrica para estructuras en aguas aireadas de movimientos rápidos que en aguas tranquilas. También, se requieren densidades mayores de corriente eléctrica, cuando la concentración de oxígeno es elevado, en la presencia de bacterias reductoras de sulfatos.

### Métodos de protección catódica.

Los principios de la protección catódica, pueden ser aplicados, considerando la corrosión de un metal por un medio ácido. Las reacciones electroquímicas que ocurren, son la disolución del metal y la producción de hidrógeno gaseoso de acuerdo con las siguientes ecuaciones:



Donde:  $Z$  = Átomo de un elemento químico.

$Z^{+n}$  = Ion de un elemento químico.

$n$  = Número de cargas positivas o negativas en el ion.

La protección catódica se logra mediante el suministro de electrones a la estructura metálica a proteger. El análisis de las ecuaciones (A) y (B), se deduce que la adición de electrones a la estructura tenderá a disminuir la disolución del metal y a aumentar la velocidad de producción de hidrógeno. Si se considera que la corriente fluye de (+) a (-) como establece convencionalmente la teoría eléctrica,

de aquí que una estructura se protege, si la corriente entra desde el electrólito. Por el contrario, la corrosión se acelera, si la corriente pasa del metal al electrólito.

En cualquier lugar que haya agua, existen iones de hidrógeno formados por su disociación, estos iones ceden fácilmente sus cargas a los átomos de metal.

Se puede obtener protección catódica, mediante el empleo de un rectificador para convertir la corriente alterna a directa, imprimiéndola a través de ánodos de grafito, hierro de desecho, o acero, o puede asegurarse a partir de corrientes galvánicas generadas a partir de ánodo reemplazable de magnesio, aluminio o zinc. Cada método tiene méritos y defectos, según las circunstancias. La elección del método más adecuado en economía y eficiencia, deberá hacerla un Ingeniero Electrónico. Los factores a ser considerados incluyen las distancias a otras estructuras que puedan afectar la distribución o eficiencia del sistema, resistencia eléctrica del medio ambiente, medios prácticos para soportar ánodos donde puedan ser más efectivos y, sin embargo, protegidos de la acción de olas, hielo, movimiento naval o velocidad de agua, facilidad de acceso y disponibilidad de personal entrenado para el mantenimiento.

### **Corriente Impresa.**

Cuando se emplea corriente impresa a partir de rectificadores, los pilotes deben conectarse eléctricamente, si la estructura no proporciona una conexión. Si no se presentan arriostramientos, se conecta a través de barras de armado o mediante cables, varillas o tiras. La conductividad eléctrica, puede no ocurrir en tablestacado de acero y se recomienda un buen tramo de soldadura en la zona de conexión. Las cantidades de corriente aplicada a la estructura varían y se controlan mediante un rectificador. Para obtener una protección inicial rápida, los

rectificadores se diseñan para producir corriente en una relación rápida inicial, lo que significa que serán muy grandes de ahí en adelante, aumentando el costo de esta manera.

Durante el tratamiento inicial a base de corriente de alta densidad, se forman depósitos calcáreos bajo la herrumbre, permitiendo que estas capas sean eliminadas por la acción del oleaje. La corriente catódica protectora, no evita el crecimiento de organismos marinos sobre superficies revestidas. Las películas calcáreas; protegerán la película catódica superficial de hidrógeno del oxígeno, permitiendo a la corriente la fluidez a más ocultas áreas de metal. Esto da muy buena protección por varios meses, aún después de cesar la corriente de mantenimiento o decaer el potencial. Los potenciales protectores, pueden restablecerse a la densidad previa de corriente de mantenimiento, sin la aplicación de una corriente elevada.

Los ánodos de grafito enterrados, están rodeados por coque desmenuzado. Ésto absorbe el oxígeno liberado en el ánodo, el cual atacaría. El coque a su vez se convierte en ánodo, y el grafito sirve de conexión con el cisco de coque. Esto, permite al grafito un potencial de vida ilimitada, si el volumen de coque es grande. Los tamaños comúnmente usados, han sido ánodos de 7.5 cm. de diámetro y de 75 a 150 cm. de largo, rodeados por cisco de coque de 30 a 35 cm. de diámetro y de 3 a 6 m. de profundidad.

Los rectificadores tipo selenio, requerirán de reemplazo, aproximadamente cada 10 años; los tipos silicio y germanio, tienen un grado de duración más alto.

## **Protección galvánica.**

Las instalaciones de ánodo galvánico, son ampliamente utilizados para proteger el acero en agua de mar. Los ánodos pueden soportarse mediante fijaciones rígidas a los pilotes y no requieren de alambres conectores. Se requiere de un ánodo para cada pilote. Los costos de mantenimiento son bajos y éste consiste en el remplazo de ánodos una vez que han sido sacrificados. La vida de un ánodo depende de su tamaño y forma, se pueden diseñar instalaciones para que duren períodos cortos o largos. En el agua de mar, se utilizan ánodos de zinc de alta pureza. Los ánodos galvánicos, proporcionan protección rápida, después de lo cual, la relación de sacrificio disminuye en aproximadamente un medio de la relación inicial.

Los sistemas de protección galvánica para muelles, malecones, y embarcaderos en varias partes del mundo, han sido de tamaños muy grandes, hasta de 250,000.00 y 500,000.00 kg. de ánodo de zinc, han sido empleados para una sola instalación, con un rendimiento máximo de corriente hasta de 3,000.00 amperios.

En muelles para barcos tanque, en los cuales se manejan materiales inflamables, las instalaciones rectificadoras deben evitarse, debido a que presentan concentraciones de corriente y voltajes que pueden provocar chispas. Los ánodos de zinc en un sistema de protección galvánica, producen sólo una fracción de voltio y prácticamente eliminan la posibilidad de chispas.

La protección galvánica para tablestacados de acero, puede o no requerir de varios centímetros de conexión electrónica en los uniones mediante cordones de soldaduras, dependiendo de las circunstancias.

### **Protección catódica y revestimientos aplicados.**

Estos revestimientos, no han sido muy efectivos cuando se emplean por sí solos, ya que pueden contener pequeños agujeros en los cuales pueden iniciarse la corrosión, dañando a este revestimiento. La protección catódica puede evitar este tipo de problemas, conservando el revestimiento y también evitando la corrosión, si la abrasión o mariscos quiebran posteriormente el revestimiento. Algunos Ingenieros han considerado deseable revestir las longitudes totales de pilote, cuando se hincan en rocas de coral porque la corriente fluye a cualquier metal base y el revestimiento reduciría el consumo de corriente. Otros consideran poco económico, pintar más debajo de la línea de la marea baja. Una estimación comparativa puede hacerse respecto al costo del pintado bajo el nivel de la marea baja, contra los incrementados requerimientos de corriente del metal al descubierto. Es muy probable que el mejor revestimiento obtenible, deba aplicarse al tablestacado de acero catódicamente protegido en agua de mar, debido a que las cantidades de corriente requerida son proporcionales al área de metal al descubierto.

### **Protección catódica para plataformas de perforación en aguas profundas.**

La vida útil requerida para las plataformas de perforación en aguas profundas puede ser de 35 a 50 años. Las relaciones de corrosión de acero no protegido en agua de mar son de 0.00 a 0.254 mm. por año en la parte sumergido, de 0.635 a 1.016 mm. por año en la zona de salpique, y de 0.076 a 0.127 mm. por año, en la zona atmosférica. La corrosión bajo el agua, es causada por corrientes desviadas, reacción entre el acero y los agentes químicos en el agua y la acción galvánica de las soldaduras. La acción galvánica en la zona de salpique, resulta a partir de ligeras diferencias de potencial en el acero y de concentraciones de

oxígeno. Los daños mecánicos, provocan el aumento de la corrosión. En la zona atmosférica, la corrosión se debe a la reacción entre el acero y el oxígeno ante la presencia de rocío de agua y condensación de humedad.

El costo de reemplazo de acero en mar abierto, puede ser el triple del costo del mismo acero, que para instalaciones sobre tierra, de modo que se debe estudiar muy bien el costo económico que ofrece la protección de dicho acero. La protección catódica es el mejor medio para evitar la corrosión del acero bajo el agua, debido a la baja resistencia del agua de mar. El acero al descubierto puede ser rápidamente polarizado, mediante una densidad inicial de corriente de 5 a 10 ma/ft<sup>2</sup>, más tarde es reducida a 3 ma/ft<sup>2</sup>, empleando ánodos galvánicos.

En la zona de salpique, se presenta considerable desembolso. Los métodos de protección son; el engrosado metálico, forrado con cinta, material plástico, hule y lámina monel. En la zona atmosférica, se pueden emplear tratamientos menos costosos, aunque el mantenimiento frecuente es muy costoso. Los elementos tubulares reciben mejor la protección catódica y son más fáciles de revestir o laminar. Para protección máxima mediante revestimiento, una compañía petrolera ha encontrado que el vinilo ofrece mayor resistencia, teniendo suficiente resistencia química y habilidad para renovarse mediante nuevos revestimientos. Un sistema de aplicación de pintura vinílica, en cinco capas sobre una superficie lijada, comprime un sellador o a un sellador ácido que evita la corrosión inicial y mejora la adhesión, teniendo también revestimiento de hojuelas de mica y una película mástic; que contiene hojuelas de mica y asbesto fibroso para incrementar la película y resistencia a la abrasión, una película delgada que suaviza la superficie y permite colores deseados y han sido empleado con éxito. Un método prometedor posterior, consiste de un revestimiento de epóxico-carbón-alquitrán.



## EXPERIENCIAS CON LA PROTECCIÓN CATÓDICA EN EL MAR

### Sistemas galvánicas.

Para los muelles en Venezuela, un estudio mostró que los ánodos galvánicos eran más económicos. El magnesio fue utilizado como el ánodo galvánico, debido a su alto diferencial de potencial en combinación con el acero y su alta capacidad de almacenaje electrónica, logrando un uso real de hasta 500 amp-hra. por cada 500 Gr. El requerimiento de corriente para protección de acero limpio en agua de mar, está a los 10 ma/ft<sup>2</sup>. de estructura. La corriente necesaria para la protección de pilotes de acero en el suelo, es cercana a 2 ma/ft<sup>2</sup> de acero al descubierto totalmente. Dos o tres ánodos de magnesio de 25 kg. alrededor de 6 m. entre sí, fueron colocados en una plataforma estructural de acero, por medio de alambres de cobre encamisados con neopreno conectados eléctrica y mecánicamente al acero, debido a sus conexiones soldadas, formó un gran ánodo. Se utilizó metal monel para soportar al tornillo de ojo y asa para resistir la corrosión. Los ánodos deben reemplazarse cada año.

Las plataformas de perforación en mar abierto del Golfo de México, son protegidas por ánodos de magnesio permanentes, para proporcionar una corriente estable, cercana a 2.5 ma/ft<sup>2</sup>. Estos ánodos fueron suplementados inicialmente por conectores de magnesio barrenados, sacrificados durante los primeros días, para dar una densidad de corriente inicial alta de 100 a 200 ma/ft<sup>2</sup>, que asegura una rápida deposición de sales de calcio y magnesio a partir del agua de mar. El área de acero totalmente sumergida en una plataforma, es de 1,516.18 m<sup>2</sup>. y el potencial de pilotaje no protegido fue de -0.68 voltio. Veintiocho ánodos de aleación de magnesio, de 29.5 kg. cada uno, fueron empleados, lo que proporcionó potenciales protectores de por lo menos -0.90 voltio, dando protección de 2 a 3 años.



En Newcastle, Inglaterra, el pilotaje de acero bajo un muelle de 270 m. de largo, fue corroído en aproximadamente un tercio de su espesor original de 1.05 cm. durante 22 años. Varios ánodos de magnesio, de 100 kg. cada uno, fueron colgados del arriostamiento a 2.70 m. sobre centros en dos hileras alternadas, cada una de ellas conectada al pilotaje de acero. Se esperaba que la corrosión cesará, mientras que los pilotes recibían un depósito de hidróxido de magnesio. El costo estimado fue mucho menor que para la envolvente general de concreto y protección superficial.

### **Sistema de corriente impresa.**

Para el puerto de "Long Beach", California, se asentaron pilotes monotube, enfrente de tablestacado de acero y utilizaron dos tipos de protección catódica sobre secciones diferentes. Una, empleando un ánodo de acero con rectificador y la otra, utilizando ánodos galvánicos. Cada sección tenía 75 m. de largo entonces, la efectividad de la protección era excelente. Los costos iniciales del sistema rectificador, fueron elevados, pero los costos de operación y mantenimiento fueron menores. El ánodo para el sistema rectificador, consistía en tres capas sobrepuestas de riel de acero: de 9 m. de largo, colocadas a 90 cm. sobre centros en el fondo del puerto a 22.5 m. frente a la cara del muelle construido sobre los pilotes, conectados a un cable, los pilotes fueron conectados entre sí en la plataforma de concreto. Los ánodos para el sistema galvánico consistían de dos ánodos de 25.5 kg. alargados verticalmente y suspendidos en el agua por cada caballete de 4 pilotes, localizando los montantes en forma alternada; los caballetes estaban espaciados 3 m. entre sí.

\* Robert D. Chellis. Cimentaciones profundas. Editorial Diana de México.

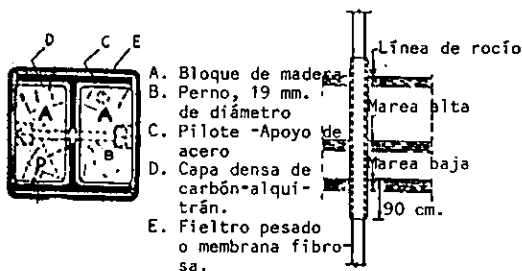
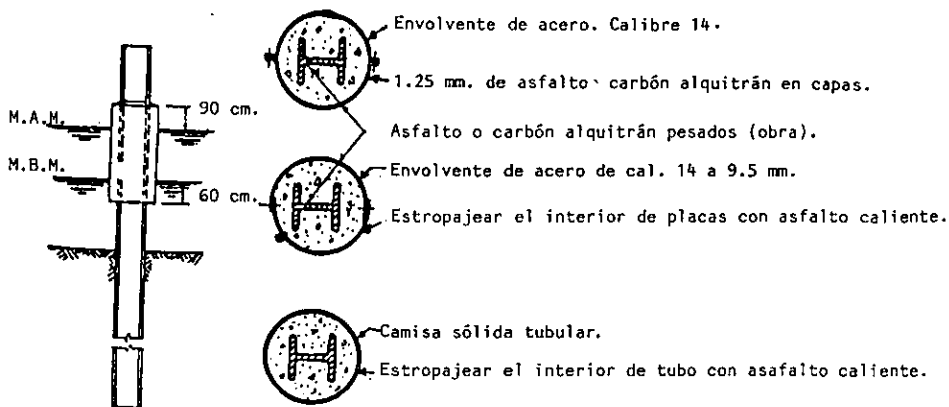
## **MÉTODO DE PROTECCIÓN DE LAS ENVOLVENTES**

La envoltura de pilote de acero, es necesario emplearla en zonas donde se presenta la máxima corrosión, que se localiza entre las marcas de marea alta y baja, pero también se encuentra en la zona de salpique. La envoltura se realiza aproximadamente a 60 cm. bajo el nivel de marea baja y extenderse hasta la zona de marea alta, sobre este punto puede ser aplicable la pintura.

### **Concreto vaciado.**

Cuando se utilizan las envolventes de concreto vaciado para protección de zonas de niveles a donde el nivel del agua crece y disminuye alternativamente, la envolvente se extiende aproximadamente a 60 cm. bajo el nivel de marea baja media y 90 cm. sobre el nivel de marea alta media, y más alto aún, por si la acción del rocío de agua y oleaje rebasa la medida señalada anteriormente, ver fig. 2.1. Cuando el concreto vaciado se emplea a partir del nivel de marea baja media, la envolvente debe extenderse cuando menos 1.20 m. dentro del fondo del agua. Normalmente, se emplean las envolventes para proteger dos metros arriba y dos metros debajo de la línea de fango, o hasta los casquetes del pilote. El método de las envolventes se ha empleado aveces en pilote H bajo las zapatas, la envoltura de concreto vaciado, se extiende hasta 0.60 y 1.20 m. desde la cara inferior de la zapata en suelos corrosivos. El método de las envolventes, es muy necesario emplearlo en terrenos o arroyos que transportan desperdicios de minas u otros materiales corrosivos.

Las envolturas de concreto vaciado se arman con acero de refuerzo de 6.3 mm. de diámetro en espiral y amarrados de cuatro barras de acero de 1.25 cm. de diámetro verticalmente en cada esquina, o empleando alambres del No. 8 (10x10



NOTA: Extiendase la protección 90 cm. bajo la línea de fango donde sea requerida.

Elevación.

### SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PILOTE APOYO PROTEGIDO

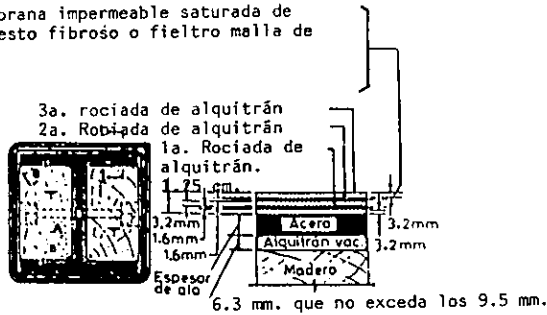
#### MÉTODOS DE APLICACIÓN PROTECTORA

1. Revista el interior de ala y alma con una capa densa de Alquitrán "D".
2. Atornille bloque de relleno de madera "A" como se muestra en la figura, con tornillos de 19 mm. "B".
3. Revista todo el interior con capa densa de alquitrán "D".
4. Sature densamente con alquitrán el tejido de saco o membrana fibrosa "E". Comience en el punto designado y forre espiralmente y traslape cuando menos 2/3 del ancho de la membrana protectora de cada vuelta, y
5. Después de aplicar la membrana protectora, proporcione al interior una densa capa de alquitrán y permítase el secado antes de hincarse.

(b).

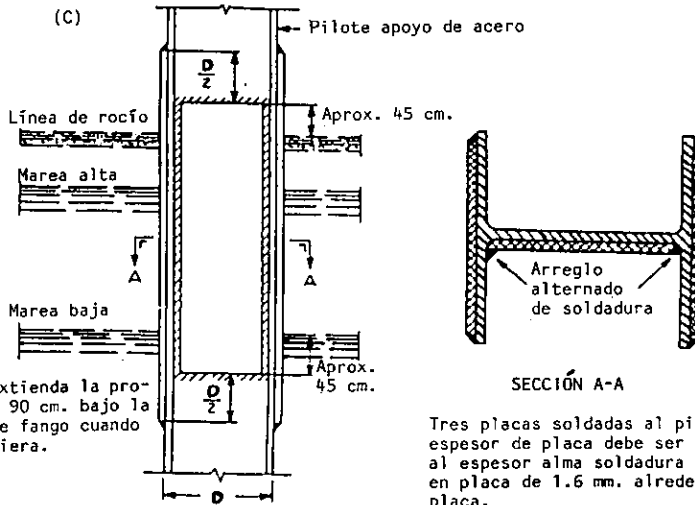
Fig. 2.1. Detalles típicos de protección contra abrasión y corrosión.

Dos capas de membrana impermeable saturada de alquitran, o asbesto fibroso o fieltro malla de 6.3 mm.



**SECCIÓN TRANSVERSAL.  
MÉTODO DE APLICACIÓN:**

1. Vacie capa "A" de alquitran.
2. Coloque madera de relleno "T".
3. Inserte pernos galvanizados.
4. Vacie capas "B" de alquitran.
5. Repita 1,2 y 4 en lado opuesto de pilote.
6. Coloque pernos y tuercas.
7. Rocíe la totalidad de la superficie en los cuatro lados .
8. Coloque membrana fieltro o fibra de saco.
9. Rocíe o estropajee.
10. Coloque membrana de fieltro o fibra de saco.
11. Rocíe o estropajee .



Nota: Extienda la protección 90 cm. bajo la línea de fango cuando se requiera.

Tres placas soldadas al pilote - apoyo; el espesor de placa debe ser cuando menos equivalente al espesor alma soldadura de pasos, espesor de filete en placa de 1.6 mm. alrededor del perímetro total de placa.

Protección de placa de acero para pilotes - apoyo de acero en aguas de marea.

(d).

Cm.), soldadas con ocho barras verticales de acero, colocados a 2.5 cm. de la columna del pilote de acero y con un recubrimiento mínimo de concreto alrededor de las barras de 7.5 cm. para su empleo en agua de mar o bajo tierra, ver fig. 2.2.

Otro método de las envolventes de concreto vaciado; consiste en instalar un molde protector de acero que después es llenado de concreto, este método consiste en deslizar hacia abajo un molde circular de acero; trepando e hincando conforme vaya avanzando, dando una terminación fuertemente ajustada en el fondo, después el molde es llenado con concreto.

Cuando se desea proteger el extremo superior de un pilote de acero mediante el método de la envolvente; sin recurrir a excavaciones, "Greulich" recomienda el siguiente método (figura 2.3).

Consiste en:

- a) El casco y la pieza cilíndrica son hincados a la profundidad requerida.
- b) La pieza cilíndrica, es extraída y posteriormente se coloca el casquete central y se hinca el pilote, hasta topar con el estrato resistente de roca.
- c) Se retira el casquete centrador y el casco se llena de concreto.
- d) Finalmente el casco es atraído tan pronto como se vacía el concreto.

Este método es muy útil cuando la parte superior del pilote es cubierto por desechos destructivos, tales como materiales saturados con desperdicios industriales corrosivos. También es útil cuando los pilotes se hincan por donde

pasan aguas contaminadas por desperdicios mineros (drenajes), o donde el fango es de naturaleza perjudicial.

Cuando el fondo de la envolvente se encuentra bajo el agua freática, en suelos permeables, es necesario sellar esta parte antes de colocar el concreto en el molde envolvente. El método representado en la figura 2.4, lleva a cabo este propósito y se instala después de hincar los pilotes, esto se realiza por medio de grúas. Se requiere de una envolvente de acero y un núcleo de acero de 30 Cm más corto que la envolvente con base ranurado, para ajustar con el pilote H. Este método de colocación se lleva a cabo como:

- a) Se coloca concreto de buena calidad en una excavación poco profunda alrededor del pilote, después se coloca la envolvente y núcleo.
- b) Se hinca la envolvente y núcleo, con el concreto colocado contra el fondo del núcleo, para formar un sello duro contra el fango y agua.
- c) Se retira el núcleo y se llena la envolvente alrededor del pilote con concreto suave.
- d) Se pone de nuevo el núcleo en la envolvente sobre el relleno de concreto, y se extrae la envolvente mientras se ejerce una presión hacia abajo sobre el concreto, causada por la acción de la grúa con cables.
- e) Finalmente, retirar el núcleo.

\*L. J. Phares, "Wet Rotary Pre-excavation for piles", Civil Eng., vol. 30. No. 2. Febrero. 1960, p. 6466.

\*F.E. Wentworth-Shields y W.S. Gray, "Reinforced concrete Piling. Concrete Publications Ltd", 1938.

\*Robert D. Chellis. Cimentación profunda. Editorial Diana de México.

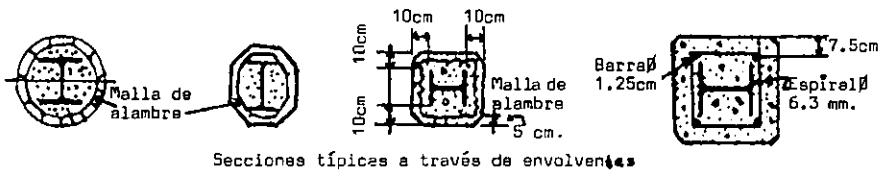
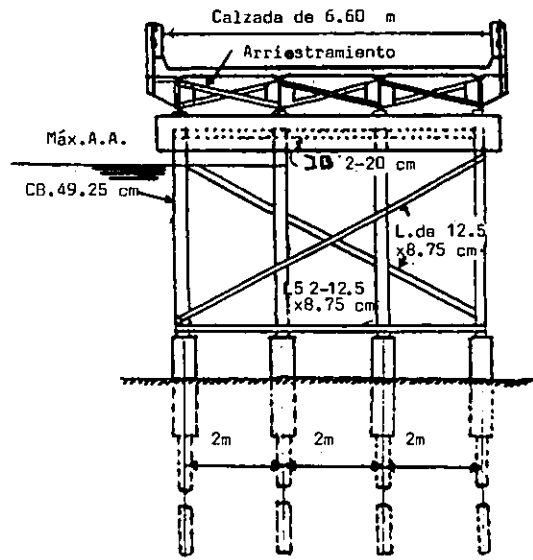
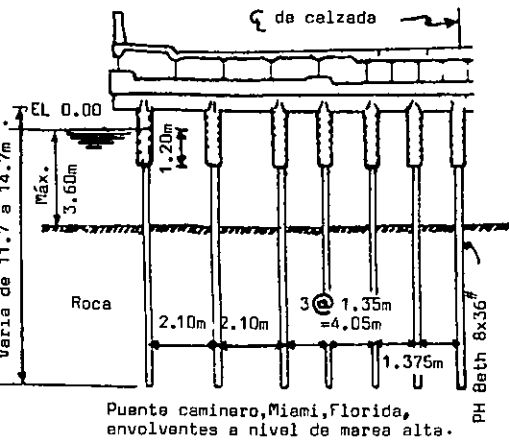


Fig. 2.2. Envolturas típicas de concreto para pilotes H de acero.

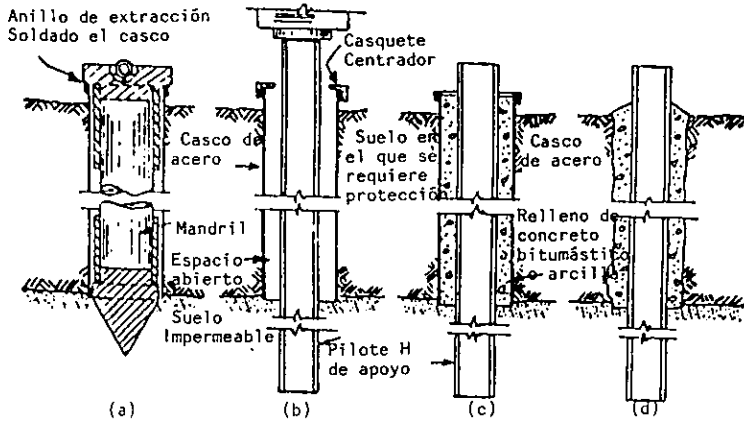


Fig. 2.3. Método de instalación de envoltura para pilotes H, sin excavación.

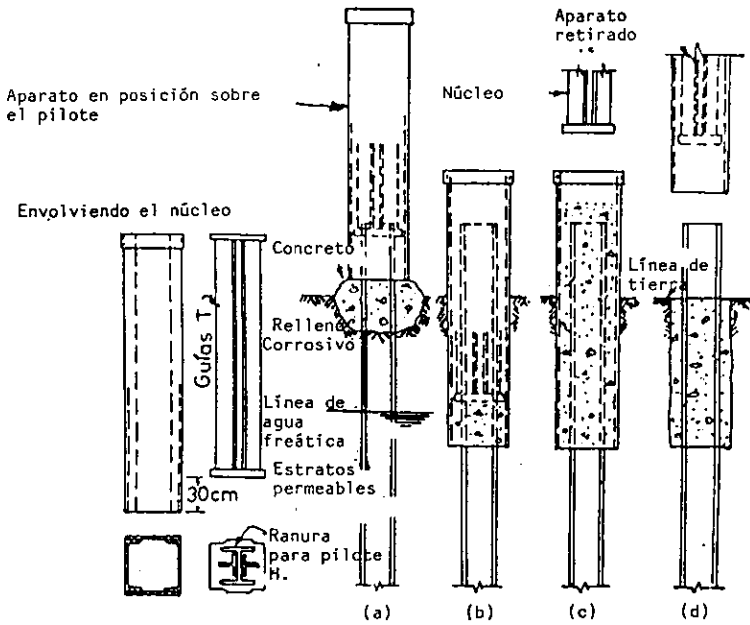


Fig. 2.4 Método para instalar envolturas de pilotes H, por abajo del agua freática.



## **CAPÍTULO 3. FUERZAS QUE ACTUAN EN LAS ESTRUCTURAS MARINAS Y SU EFECTO EN LA DURABILIDAD DE LOS PILOTES METÁLICOS.**

### **3.1.- Fuerza de viento y oleaje**

#### **VIENTO**

El viento, es el aire en movimiento y al igual que cualquier otro fluido, produce distintas presiones sobre los objetos que se le interponen. Cuando un sólido está colocado en la corriente del viento, las partículas de este último, desvían su camino y pasan rozando la superficie de cuerpo sólido. Si la velocidad es muy pequeña, las trayectorias de las partículas envuelven prácticamente al sólido. Al aumentar la velocidad del aire, sus partículas envuelven al sólido en la cara de barlovento, mientras que en la zona de sotavento, las partículas se separan violentamente, produciendo con el tiempo una serie de alteraciones que se traducen en cambios de velocidad y por lo tanto de presión. Todas las fuerzas debidas al viento, son dinámicas en el sentido de que son producidas por un fluido en movimiento.

#### **FUERZA DE VIENTO**

Las fuerzas de viento que actúan sobre estructuras marinas (tales como estructuras de muelles, plataformas de amarres y otras estructuras marinas), son calculadas con la ecuación de "Weather Bureau"; para vientos que actúan sobre superficies planas y la ecuación es la siguiente:

$$F_v = 0.003V_v^2$$

Donde:  $F_v$  = Carga horizontal del viento sobre una superficie vertical normal al viento, en  $\text{lb/ft}^2$ .

$V_v$  = Velocidad del viento, en MPH.

El efecto del viento que sopla de todas las direcciones sobre la estructura, es calculada con la fórmula de Duchemin:

$$C_h = F_v (2\text{sen } \theta / 1 + \text{sen}^2 \theta)$$

Donde:  $C_h$  = Carga horizontal del viento normal a la superficie vertical plana, en  $\text{lb/ft}^2$ .

$\theta$  = Ángulo horizontal entre la línea paralela y la dirección del viento y el plano de superficie vertical.

Se han empleado diseños para una presión de  $19.96 \text{ lb/ft}^2$ . o la resistencia a la fractura de los cables de remolque.

Los efectos del viento que sopla sobre la estructura provoca empujes horizontales sobre la estructura, que afectan a los sistemas de pilotes y pueden provocar fenómenos de volteo.

Al soplar el viento contra la estructura, provoca vibraciones a los pilotes, ocasionando fricciones laterales y golpeteo frontal con el suelo grueso en el sentido del empuje del viento, originando raspaduras y serios daños a los pilotes; de esta manera se acelera la corrosión de los pilotes, por lo tanto disminuye más rápido la vida útil de los pilotes metálicos por la corrosión.

## OLEAJE

El oleaje es un fenómeno producido por el viento, que al soplar sobre la superficie de mar, provoca que dicha superficie se deforme, produciendo ondas que se mueven en la dirección del viento.

El oleaje al golpear contra el pilote, produce empujes a éste, en la dirección del viento, ocasionando movimientos o vibraciones del pilote con el suelo grueso marino, causando picaduras y raspaduras del pilote con la arena. Con esto, se acelera la corrosión y van aumentando con una velocidad sorprendente, cada vez que se presentan el viento huracanado. Como resultado de estos fenómenos, disminuye rápidamente los años de vida útil de los pilotes metálicos, la cual es muy difícil de calcular con exactitud de cuánto tiempo puede durar este material en el mar. De los estudios realizados en diferentes zonas del mundo, se han encontrado variaciones en cuanto a durabilidad de los pilotes metálicos en el mar. Puedo mencionar que de las investigaciones realizadas en algunos lugares de mar, a los 20 años de servicio, los pilotes, presentaban una corrosión severa en las zonas expuestas a la acción de mareas. Cerca de este lugar, con el mismo tiempo de servicio, se encontraron en buenas condiciones otros pilotes metálicos. También existen pilotes muy corroídos en el mar, a los 35 años de su colocación, y así podemos encontrar diferencias en cuanto a la duración de los pilotes metálicos asentados en distintos lugares de mar.

\* "Shore Protection Planning and Desing, Tech. Repet.4, Department of the Army, Corp of Engineers, office of the Chief of Engineers, Beach Erosion Board", Junio, 1954.

### 3.2.- Efectos de las fuerzas de oleaje en los pilotes metálicos.

Los efectos que pueden provocar las fuerzas de agua en los pilotes metálicos, son los fenómenos de volteo que puede sufrir una estructura marina por la acción de las fuerzas horizontales que provengan de olas, arrastre de mareas, o corrientes marinas actuando sobre la estructura y barcos atracados.

Los pilotes hincados en agua de mar, deben ser diseñados para resistir los efectos de las olas más fuertes que puedan ocurrir, y para resistir tales fuerzas de ola de manera permisible sobre estructuras móviles atracadas y que descansan contra la estructura.

Los efectos de las fuerzas de oleaje en los pilotes metálicos, depende de la velocidad y duración del viento, longitud expuesta a la acción del viento y carácter de la masa de aire.

A continuación se presentan algunos métodos para la obtención de la altura máxima de ola y presión de la misma:

Ecuaciones de Stevenson, para calcular la altura de ola máxima;

$$H_{\max} = 1.5 (Fn)^{1/2}, \text{ para } Fn > 39.$$

$$H_{\max} = 1.5 (Fn)^{1/2} + 2.5 - (Fn)^{1/4}, \text{ para } Fn < 39.$$

Ecuaciones obtenidas por Molitor, para calcular la altura de ola máxima:

$$H_{\max} = 0.196 (VkFn)^{1/2}, \text{ para } Fn > 39.$$

$$H_{\max} = 0.196 (VkFn)^{1/2} + 2.5 - 1.035 (Fn)^{1/4}, \text{ para } Fn < 39.$$

Ecuaciones de Darbyshire, para calcular la altura de ola máxima;

$$H_{\max} = 0.054V_k^{1.5} (1 - e^{-0.23(F_n)^{1/2}}).$$

Versiones posteriores de la fórmula de Darbyshire fueron desarrolladas para determinar la altura máxima de ola, en el año de 1955, basadas de las siguientes ecuaciones:

Para regiones costeras;  $H_{\max} = 0.054V_k^{1.5}$  .

En aguas profundas;  $H_{\max} = 0.076V_k^2$  .

La máxima profundidad de diseño de agua tranquila durante una tormenta, es la base para el cálculo de olas y está dada de la siguiente manera:

$$d = d_e + Mast + Mtorm$$

Donde:  $V_k$  = Velocidad del viento en nudos (6,076.10 ft/Hra.).

$H_{\max}$  = Altura de ola máxima, de seno de cresta, para condiciones presentes, en pies.

$F_n$  = Longitud continua de agua sobre la cual sopla el viento en una dirección continua, en millas marinas (1.85325 Km).

$d$  = Profundidad diseñada de agua tranquila, en ft.

$d_e$  = Profundidad de bajamar media, en ausencia de efectos de tormenta, en ft.

$Mast$  = Marea astronómica, en ft.

$Mtorm$  = Marea de tormenta, en ft.

$e$  = Se obtiene mediante el empleo de una tabla de funciones exponenciales naperianos.

La altura de la ola máxima solitaria en una profundidad dada de agua es, para valores de  $d/T^2$  menor que 0.08.

El agua profunda, pronosticada por Michell y Hevelock;

$$H_{\max} = L/7.$$

En agua poco profunda;

$$H_{\max} = 0.78h.$$

donde:  $h$  = Distancia del seno de ola por arriba del fondo, en ft.

$L$  = Longitud de ola, cresta, en ft.

$T$  = Período de ola, en segundos.

El embalamiento de ola, es la altura vertical a la cual alcanzará una ola de frenaje. Un valor de 1.5 veces la altura de ola es el más empleado, aunque se han sugerido valores de 0.9 a 2.0 para diseños individuales. El embalamiento relativo de 1.5 deberá ser adecuado para olas de diseño pronunciadas, con valor  $H_{max}/T^2$  de 0.8, aunque no adecuado para olas menos pronunciadas.

\*C.L. Bretschneider, "Revisions in Wave Forecasting: Deep and Shallow Water", Berkley, Calif., 1958. P. 30-67.

### **Presiones de ola no rompientes.**

La presión ejercida sobre una estructura por olas no rompientes, es hidrostática.

Las olas no rompientes, pueden ocurrir donde la longitud expuesta a la acción del viento sea limitada, y en ubicación protegida. La mayoría de las estructuras de costa, están de tal forma localizadas que las olas de tormenta romperán en el agua profunda en la estructura. El método más empleado para determinar presiones debidas a olas no rompientes, es el de Sainflou.

Vamos a emplear este método, suponiendo que las presiones sobre un muro vertical, debidas a una ola clapotis, como muestran en la figura 3.1. Una ola clapotis es una ola estacionaria provocada por la reflexión del tren de olas a partir

de un malecón, rompeolas, o playa pronunciada. Si una ola de longitud  $L$  y altura  $H$ , golpea a un muro vertical, el punto  $A$  es la elevación de cresta en  $G$ . El nivel medio o centro de órbita de la ola estacionaria se encuentra por arriba del nivel  $D$  del agua tranquila, una distancia  $h_0$  y se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_0 = (\pi H^2/L) \cot h(2\pi d/L)$$

Donde:  $h_0$  = Es la distancia entre el nivel de agua tranquila y el centro orbital clapotis, en ft.

$H$  = Altura de la ola original libre, ft.

$h$  = Es la distancia entre cresta de clapotis y valle de clapotis, entre dos ondas de olas no rompientes, en ft.

$d$  = Profundidad a partir del nivel de agua tranquila, en ft.

$L$  = Longitud de ola no rompiente, en ft.

$DA = H + h_0$ , mientras que  $DG = H - h_0$ . La presión hidrostática de aguas tranquilas  $w_d$  en la base del muro, es trazada como  $CE$ . El triángulo  $CDE$  es la presión hidrostática de muro en aguas tranquilas. Estas relaciones son representadas en la figura 3.1. Al moverse la clapotis hacia arriba o hacia abajo, la presión hidrostática es incrementada o disminuida por  $P_1$ . Este cambio de presión se obtiene de la siguiente forma:

$$P_1 = \frac{wH}{\cos h(2\pi d/L)}$$

Donde:  $P_1$  = Presión de clapotis de ola no rompiente, suma o resta de la presión del agua tranquila, en  $\text{lb}/\text{ft}^2$ .

$W$  = Peso del agua, en  $\text{lb}/\text{ft}^3$

$H$  = Altura de la ola original libre, en ft.

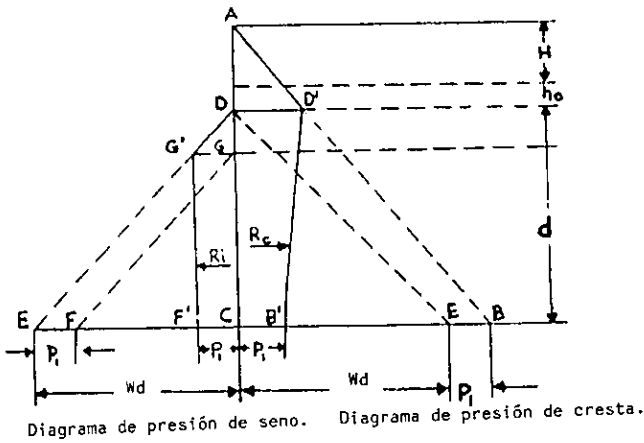
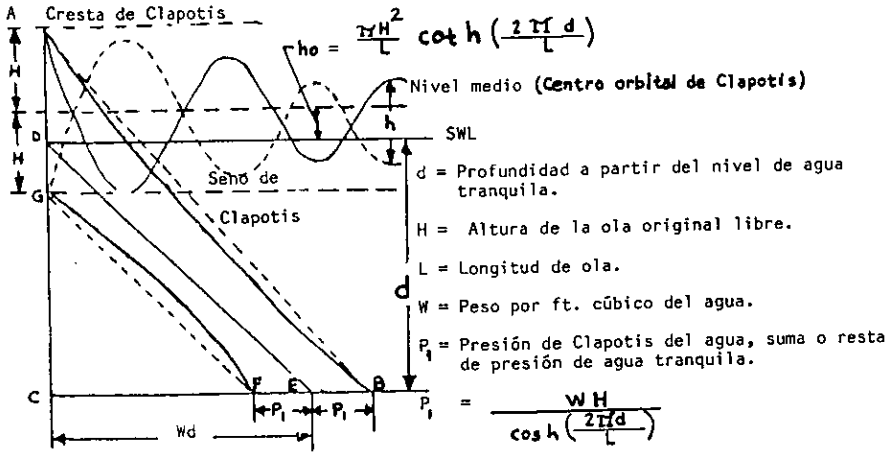


Fig. 3.1 Clapotis sobre muro vertical.



$h$  = Distancia entre cresta de clapotis y valle de clapotis, entre dos ondas de olas no rompientes, en ft.

$d$  = Profundidad a partir del nivel de agua tranquila, en ft.

$L$  = Longitud de ola no rompiente, en ft.

### Presiones de olas rompientes.

Las olas desintegradas o que rompen, ejercen presiones adicionales debidas al efecto dinámico del agua turbulenta en movimiento y compresión de bolsas de aire atrapadas, estas presiones pueden ser mayores que las hidrostáticas.

Las estructuras localizadas donde las olas se rompen, deben ser diseñadas para resistir fuerzas mucho mayores que las sujetas a olas no rompientes. Probablemente las presiones obtenidas por el método Minikin, se aproxime más a las presiones reales. La presión dinámica es concentrada al nivel de agua tranquila. El "Beach Erosion Board" presenta la figura 3.2 y la fórmula siguiente para la aplicación del método Minikin:

$$P_m = \frac{101 H_b w}{L_D} \frac{d}{D} (D + d)$$

Donde:  $P_m$  = Máxima intensidad de presión de ola, en lb/ft<sup>2</sup>.

$H_b$  = Altura de ola que apenas rompe sobre la estructura, en ft.

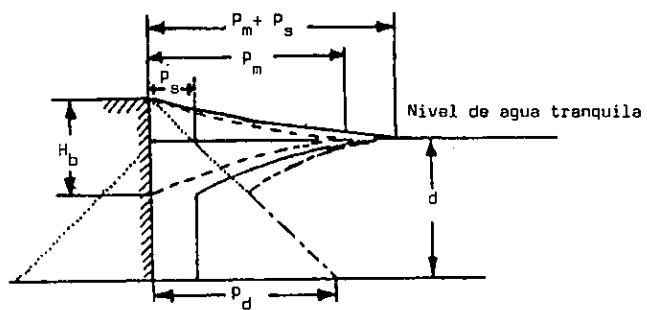
$W$  = Peso unitario del agua, en lb/ft<sup>3</sup>.

$D$  = Profundidad de agua más profunda, en ft.

$L_D$  = Longitud de ola rompiente, en ft.

$d$  = Profundidad a partir del nivel de agua tranquila, en ft.

Los cálculos aproximados de longitud de ola en agua profunda se pueden



**Fig. 3.2.** Diagrama Minikin de presión de olas.

obtener de la fórmula siguiente:

$$L_o = (g/2\pi) T^2 = 5.12 T^2$$

Donde:  $L_o$  = Longitud de la ola en aguas profundas, en ft.

$g$  = Aceleración de la gravedad, en ft/seg<sup>2</sup>.

$T$  = Periodo de ola, en seg.

Minikin, no indica símbolos separados  $L_o$  y  $L_D$ , pero emplea  $L$  y un coeficiente  $m$ , que de esta forma permite la solución sin la necesidad de tener a mano tablas o gráficas. Esta ecuación es la siguiente:

$$P_m = \frac{m\pi d}{LD} w H g \frac{D + d}{2}$$

Donde:  $P_m$  = Máxima intensidad de presión de ola, en lb/ft<sup>2</sup>.

$L$  = Longitud de ola rompiente, en ft.

$m$  = Coeficiente 2.

$d$  = Profundidad a partir del nivel de agua tranquila, en ft.

$D$  = Profundidad de agua más profunda, en ft.

$W$  = Peso unitario del agua, en lb/ft<sup>3</sup>.

$H$  = Altura de ola, en ft.

$g$  = Aceleración de la gravedad, en ft/seg<sup>2</sup>.

La presión hidrostática sobre el lado de mar al nivel de agua tranquila  $P_s$ , se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_s = (w H_b/2)$$

La presión hidrostática sobre el lado de mar, a una profundidad  $d$ , se obtienen con la siguiente ecuación:

$$P_d = w(d + H_b/2)$$

La presión dinámica ocurre centrada sobre el nivel de agua tranquila y cae rápidamente hacia afuera en curvas parabólicas a distancias  $H_b/2$  arriba y abajo. Las presiones hidrostáticas y dinámicas sobre el lado de mar, son sumadas. La presión hidrostática sobre el lado de tierra, debe ser restada en caso de encontrarse presente. Esta construcción, se representa en la figura 3.2. Las líneas de trazos y puntos, muestran las presiones dinámicas e hidrostáticas, la línea sólida, las presiones combinadas, en el caso en que las presiones hidrostáticas se encuentran a ambos lados del muro.

La fuerza resultante de ola por pie lineal de muro, es calculada a partir de esta figura y, para el caso de presiones hidrostáticas sobre cada cara, el empuje se calcula con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{P_m H_b}{3} + P_s(d + H_b/4)$$

Para el caso de la presión hidrostática sobre el lado de tierra, el empuje se obtiene con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{P_m H_b}{3} + \frac{P_d(d + H_b)}{2}$$

Donde:  $E$  = Empuje total de ola, en lb.

$P_m$  = Máxima intensidad de ~~presión de ola~~, en  $lb/ft^2$ .

$H_b$  = Altura de ola que apenas rompe sobre la estructura, en ft.

$P_d$  = Presión hidrostática sobre el lado de mar, a una profundidad  $d$ , en lb/ft<sup>2</sup>

$d$  = Profundidad a partir del nivel de agua tranquila, en ft.

\* R. L. Wiegel, "Gravity Waves. Table of Funcions, The Engineering Fundation, Council on Wave Research, Berkeley", Calif; Febrero, 1954.

El método Minikin es recomendado para la determinación de presiones a partir de las olas rompientes. Minikin informa 1.4 T/ft<sup>2</sup>. a partir de remolinos de 5.91 ft y de 2 a 3.5 Ton/ft<sup>2</sup>. a partir de olas de 20 ft de altura .

\*R. H. Fleming y C.C. Bates, "The Engineering Aplication of sea and Swell Data", Coastal Engineering Fundation, Council on Wave Research, Berkley, Calif., 1951.

### 3.3.- Fuerza de corriente de agua en los pilotes metálicos.

#### Fuerza de corriente de agua.

La fuerza total de corriente de agua sobre una estructura piloteada con una nave amarrada, se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_t = F_{cw} + F_{cv} + F_d + F_{pd}$$

Donde:  $F_t$  = Fuerza total en el muelle, debida a la acción de la corriente en los pilotes, estructura y nave, en lb.

$F_{cw}$  = Presión total de la corriente sobre la nave y objeto flotante a un costado de la estructura, en lb.

$F_{cv}$  = Presión total de la corriente sobre los pilotes de muelle, en lb.

$F_d$  = Arrastre por fricción, a partir de la corriente que fluye paralela a las naves, en lb.

$F_{pd}$  = Arrastre por efecto de la hélice, cuando la corriente fluye paralela a la nave, en lb.

### Presión de la corriente de agua.

La presión unitaria a partir de una corriente de estado estable, está dada por:  $P_c = wh$ .

Donde:  $P_c$  = Presión unitaria a partir de una corriente de estado estable, en lb/ft<sup>2</sup>

$W$  = Peso del agua, en lb/ft<sup>3</sup>

$h$  = Tirante del agua, en ft.

Realizando este análisis de presión de corriente de agua, se encontró el llamado cabeza de velocidad y se representa de la siguiente manera:  $V_c^2 / 2g$ . Por lo tanto  $P = K V_c^2 / 2g$ .

Mediante la cancelación del valor del peso del agua en lb/ft<sup>3</sup>. (en agua fresca o dulce 62.40, y en agua de mar 64.00) y es prácticamente igual al valor de  $2g(64.40)$ , las presiones totales de corriente de agua están dadas de la siguiente manera:

$$F_{cw} = K B_w V_c^2, \quad F_{cv} = K B_v V_c^2.$$

Donde:  $B_w$  = Área de la superficie plana proyectante de la estructura bajo la línea de agua en ft<sup>2</sup>.

Bv = Área proyectada de la sección transversal del casco bajo la línea o flotación, para presentaciones de extremo o laterales, en ft<sup>2</sup>.

K = Factor de forma, para pilotes redondos 1.0, pilotes cuadrados y arriostrados de 1.4, corriente normal a la línea central de la nave 0.8, y corriente paralela a la nave de 0.15 a 0.6 para líneas finas y extremas.

Vc = Velocidad de la corriente, en ft/seg.

La velocidad de la corriente en la superficie, cuando no es afectada por el viento, es de 0.85 de la velocidad media, que ocurre aproximadamente a 0.6 de la profundidad, la velocidad máxima ocurre entre estos puntos y puede suponerse como de 1.1 veces la velocidad media. La velocidad en el fondo, es usualmente un 0.75 a 0.85 de la media.

\* K. E. Beebe y James Moon, "Ocean Wave Forces on circular Cylindrical piles", J. Hydraulics Div., No. H y 2. Proc. ASCE, publicación 1199, vol. 84, abril, 1957. P. 1199-36.

### **Fricción de arrastre en las naves.**

La fricción de arrastre proveniente de un estado estable de corriente paralela a la nave, de acuerdo con el boletín de la marina, se representa de la siguiente manera:

$$F_d = (S/4)(V/6)^2.$$

donde: S = Área húmeda, en ft<sup>2</sup>.

V = Velocidad de la corriente en nudos.

Empleo de la fórmula de Taylor para calcular la fricción de arrastre.

$$F_d = 0.00657 (V_k^2 + 0.641 V_k)S, \text{ en Lb.}$$

Debemos tomar un 25% adicional por concepto de accesorios, factor de forma y grado de atascado.

### Arrastre de la hélice.

Esto ocurre cuando la corriente fluye paralela a la nave y se representa de la siguiente manera:

$$F_{pd} = 2.88 A_p V_k^2 ,$$

Donde:  $A_p$  = Area proyectada de las hélices o propelas, en  $\text{ft}^2$ .

$F_{pd}$  = Arrastre de la hélice, en Lb.

$V_k$  = Velocidad del viento en nudos.

\* R. L. Wiegel y K. E. Beebe, "The Desing wave in Shallow Water", J. Water ways and Harbors Div., No. wws proc. ASCE, publicación 910, vol. 82, p.1.-21.



## **CAPÍTULO 4. ACCIONES SÍSMICAS EN PILOTES METÁLICOS USADOS EN ESTRUCTURAS MARINAS.**

### **4.1.- Fuerza de sismo en los pilotes metálicos.**

Se han realizado muchos estudios sobre las fuerzas sísmicas, pero aún no se han solucionado completamente, por ser tan extensos y complejos.

Existen pocas investigaciones respecto a los efectos de las fuerzas laterales sobre las cimentaciones por pilotes, en zonas expuestas a los terremotos.

### **FACTORES EN EL DISEÑO POR SISMO**

Los factores fundamentales en el diseño contra sismo, son la resistencia, rigidez, masa, amortiguación de la estructura y el suelo, períodos naturales de la estructura y terreno, fuerza, amplitud, dirección y duración de los impulsos, distancias de las fallas y epicentro del sismo, tomando en cuenta también las propiedades del suelo, el pilote y sus deformaciones elásticas.

#### **Período de los sismos.**

Todas las estructuras tienen un período natural de vibración. Este debe ser calculado para evitar la resonancia con el alcance de los períodos dañinos que ocurren en los temblores.

Cerca del epicentro, se han observado períodos entre 0.1 y 0.7 seg. y la aceleración mayor ocurre en ondas que tienen períodos menores a los 0.5 seg., cuando los períodos se incrementan con la distancia desde el epicentro, la

intensidad de choque disminuye con la distancia.

Con mayor frecuencia se han observado períodos de 0.5 a 0.6 y 1.0 a 1.1 seg. en California.

Para Crookes e Imamura, el alcance destructivo puede ocurrir con período de 1 a 2 seg.

Imamura establece que si la naturaleza del suelo es dura y no cedente, la vibración terrestre ocasionada por sismo, es poco violenta y el daño a la estructura debido al asentamiento diferencial, casi nunca ocurre.

Ishimoto cree que el período se incrementa con la profundidad del aluvi6n.

Los suelos suaves que poseen poca cohesi6n, son m1s peligrosos que los firmes suelos compactos, en un sismo. En el sismo de Tokio en 1923, el da1o ocurrido a los edificios de ladrillo fue mayor en suelos diluviales que sobre aluvi6n suave. En el sismo de Long Beach en 1933, los da1os ocasionados a la estructura de un edificio de ladrillo sobre suave y reciente aluvi6n con aguas fre1ticas altas, fue menor que sobre las estructuras ubicadas sobre dep6sitos marinos m1s viejos, con aguas fre1ticas no tan cercana a la superficie.

**Determinaci6n de per6odo natural de vibraci6n para porciones no apoyadas de pilotes.**

El per6odo natural de vibraci6n de una estructura debe ser calculado con la finalidad de evitar la resonancia, con el alcance de los per6odos da1inos que se sabe ocurren en los sismos. Para un pilote sencillo, su per6odo de vibraci6n se calcula

con la siguiente ecuación:

$$T = C_f (W l_u^3 / EI)^{1/2}$$

Donde: T = Período de vibración del pilote en seg.

W = Carga muerta y viva vertical sobre el pilote, en lb.

$l_u$  = Tramo no apoyado del pilote hacia abajo, hasta el punto supuesto de fijación en el terreno, en plg.

$C_f$  = Constante dependiente, cuyo valor entre 0.18 y 0.09 para condiciones representadas en la figura 4.1.

E = Módulo de elasticidad, en lb/plg<sup>2</sup>

I = Momento de inercia, en plg<sup>4</sup>.

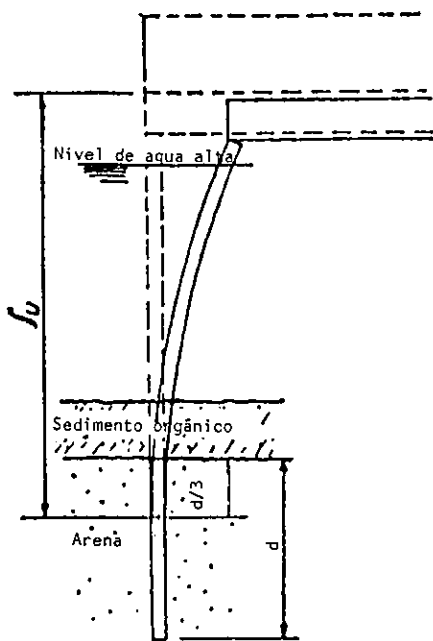
El valor  $C_f = 0.18$ , se aplica cuando se obtiene completa fijación en el fondo y ninguna ocurre en el tope del pilote, el valor  $C_f = 0.09$ , se aplica cuando el tope y fondo del pilote están totalmente fijos.

Para calcular el período de la unidad total o estructura, en la cual la longitud no apoyada de los pilotes puede variar, se emplea la siguiente ecuación:

$$T = C_f (\Sigma(W) / \Sigma(EI / l_u^3))^{1/2}.$$

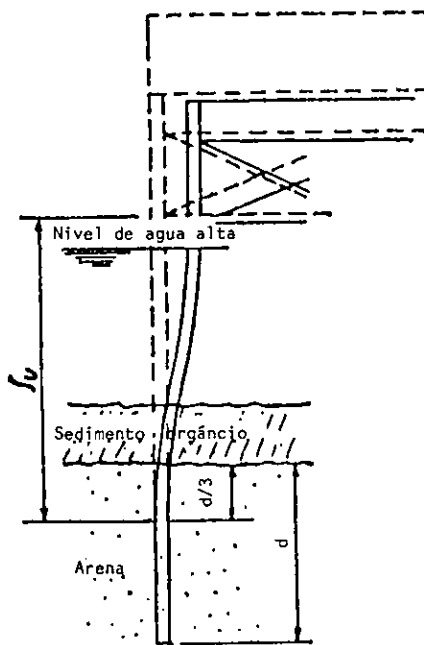
### **Fuerza sísmica lateral**

Las fuerzas laterales aplicadas sobre la estructura, se han supuesto en el sentido de que se transmiten al terreno mediante la resistencia al corte y flexión de los pilotes, y en ocasiones se ha supuesto que las fuerzas laterales han sido aplicadas a los pilotes mediante el movimiento del terreno, mientras que la inercia de la estructura resiste el movimiento. Los pilotes metálicos deben ser capaces de flexionarse con el terreno y las fuerzas de inercia en la estructura deben ser evaluadas por la resistencia admisible lateral de los suelos adyacentes a los



$C_f = 0.18$

(a) Pilote no Arriestrado



$C_f = 0.09$

(b) Pilote Arriestrado

Fig. 4.1 Tramos no apoyados de pilotes en sismos.

casquetes del pilote y vigas.

Los pilotes inclinados, son buenos para resistir cargas laterales, aplicadas sobre el nivel del terreno, pero son más efectivos los pilotes verticales para resistir el movimiento del terreno.

### **Comportamiento de amortiguación.**

La energía proveniente de un sismo, es aplicada a la estructura y a su vez, esta energía puede ser absorbida en la superestructura y subestructura, a base de deformaciones flexionantes, esfuerzos cortantes, o movimientos de oscilación. Cualquier exceso de energía cinética que sobre, producirá daños a la estructura. Las componentes de esfuerzos cortantes y verticales, actuarán sobre el suelo, y la acción amortiguadora de la tierra es importante. Los agujeros se agrandan con el desplazamiento lateral de los pilotes, aceptando que sea absorbida más energía con la flexión de los pilotes. Es posible que algunos pilotes retengan cierta excentricidad, después de un sismo.

Las cargas verticales provenientes de la acción oscilante, pueden producir subpresiones temporales y luego asentamiento de pilotes.

### **Reacciones verticales desiguales.**

La fuerza sísmica lateral, aplicada sobre una estructura produce cargas temporalmente incrementadas sobre pilotes bajo cimentaciones exteriores. La acción oscilante puede tender a dejar más carga sobre los pilotes centrales que sobre los pilotes exteriores. Los asentamientos desiguales preforzan porciones de las estructuras y las hacen más susceptibles a los sismos.

## **Efectos torsionales.**

Estos efectos pueden estar presentes, debido a la dirección de los impulsos y altura asimétricas de la estructura.

### **Ecuación para obtener la fuerza total lateral y momento de volteo.**

Los fenómenos sísmicos, todavía no son conocidos totalmente, y no se garantizan los intentos de aplicación de análisis riguroso, hasta no obtener mayor progreso. Se recomienda el método simplificado de "California Joint Committee" para emplearse en la determinación de las fuerzas que afectan las cimentaciones profundas; como pilotes metálicos, principalmente la determinación de esfuerzos base de cortante y momento de volteo.

Los pasos a seguir, se procede de la siguiente manera:

- a) Diseño para sismo o viento, atendiendo al que sea mayor.
- b) Suponer que el viento es de 15 lb/ft<sup>2</sup> por debajo de los 60 pies y de 20 lb/ft<sup>2</sup> por arriba de los 60 ft para edificios y valores como ha sido indicado para otras estructuras.
- c) Calcúlese el esfuerzo cortante base, debido a las fuerzas de sismo con las fórmulas siguientes:

$$V = C/W$$

Donde: V = Fuerza total lateral o cortante en la base, en lb.

C = Coeficiente numérico.

W = Peso muerto total del edificio, más el 50% de la carga viva de diseño para pisos de almacenaje, y 25% para otros pisos, en lb.

El coeficiente C, se calcula con la siguiente ecuación:

$C = 0.015/T$ , C no es menor de 0.02, ni mayor de 0.06, para edificios,  
ó:

$C = 0.025/T$ , donde no será menor de 0.03, ni mayor de 0.10, para  
otras estructuras.

Donde: T = Período fundamental de vibración del edificio, en seg.

Cuando no se tienen datos para determinar T, se puede suponer que:

$T = 0.05 H(b)^{1/2}$ , para edificios.

Donde: H = Altura del edificio, en ft.

b = Ancho del edificio, en ft.

T se debe calcular mediante métodos reconocidos, suponiendo condiciones  
fijas de base, para estructuras diferentes de edificios.

d) Previsión para momento de volteo, deberán hacerse para fuerzas sísmicas en  
los diez pisos superiores o últimos 120 pies del edificio, con el momento  
constante por debajo de estos puntos, hasta las cimentaciones.

No se supone por lo general, que actúen simultáneamente las fuerzas de  
viento y sismo.

#### **4.2.- Efecto sísmico en el agua de mar y suelos marinos.**

Pueden resultar daños a partir de los cambios en la distribución de esfuerzos  
en el terreno, o de las propiedades mecánicas de los suelos marinos durante los  
sismos. Las arenas saturadas y arcillas sensitivas pueden ser peligrosas bajo

condiciones de sismo. Si una arena saturada se encuentra por debajo de la densidad crítica, el efecto sísmico puede provocar que la carga sea soportada temporalmente por el agua y se produzcan licuaciones del suelo con el agua. Tales suelos, deben ser estabilizados.

Las estructuras marinas sustentadas sobre pilotes, apoyados en arena densa, pueden no dañarse por efecto de cargas temporalmente más altas sobre los pilotes, siempre y cuando exista todavía un factor de seguridad, y puedan aumentarse las presiones de apoyo permisibles, en un 20 a 30%. Aunque se desarrolle una presión alta de poro en arcilla, a partir de cargas por sismo aumentadas sobre los pilotes, la estructura de arcilla, no tendrá tiempo para reajustarse y aún así se producirá poco daño en la cimentación.

Con las vibraciones causadas por los sismos, provoca mayor presión cerca de la superficie del terreno que a profundidades mayores. Debido a la resistencia por fricción bajo las cimentaciones, el suelo de apoyo se comporta como parte de la zapata. Cuando la arena se encuentra saturada, la capacidad de soportar carga se reduce, debido a la flotación y el incremento relativo de la relación de fuerza sísmica a la fuerza gravitacional. La presión de agua de poro se incrementa, debido a las vibraciones.

\*M. A. Bint, "Analytical and Experimental Methods in Engineering Seismology", Trans. ASCE, Informe 2183, 1943, p. 365-408.

\*A. Imamura, "Theoretical and Applied Seismology", Maruze Co, Tokio, 1937.



Todos los metales ubicados en cualquier punto de la tierra, son atacados por la corrosión; ya sea, si están en contacto con la atmósfera, agua de mar o si están bajo tierra, no se escapan de la oxidación. La velocidad de corrosión que ocurre en cada zona, es variable.

Los pilotes metálicos, tienen resistencia elevada a la flexión, esfuerzos de tensión, esfuerzos a compresión y esfuerzos cortantes. Por este motivo, estos elementos, son empleados como uno de los métodos de construcción de cimentaciones profundas. Se emplea principalmente a los pilotes para construcción de cimentaciones profundas (infraestructura) en el mar, debido a que es el único método capaz de resistir las cargas de la superestructura, así como resistir las fuerzas naturales que actúan sobre la estructura y pilotes; tales como las fuerzas de viento, de olas, arrastre de mareas, corrientes marinas, barcos atados a los pilotes y fuerzas de sismo.

De todos los métodos que se emplean para prevenir la corrosión en el mar, el más efectivo es el revestimiento superficial acoplada con protección catódica, con bajo costo de operación y mantenimiento o el reemplazo de ánodos una vez sacrificados. La protección catódica, es el mejor medio de evitar la corrosión de los pilotes metálicos en el mar y bajo el terreno.

Las estructuras metálicas que se pueden proteger catódicamente, son; las tuberías subterráneas, interior de tanques de almacenamiento de líquidos, plataforma de una torre de perforación, pilotes metálicos, etc.

Para estructuras metálicas ubicadas en el terreno, el requerimiento de

corriente, es del orden de 1 a 3 ma/ft<sup>2</sup>. Para pilotes metálicos hincados en agua de mar, los requerimientos de corriente son usualmente de 3 a 5 ma/ft<sup>2</sup> de área expuesta para sistemas de protección galvánica. El procedimiento que se sigue para diseñar un sistema de protección galvánica, se lleva a cabo de la siguiente manera: se calcula el área sumergida en el electrólito. Con base a la densidad de corriente requerida de diseño (3 a 5 ma/ft<sup>2</sup>) dependiendo de la resistividad del electrólito, se calcula la cantidad de corriente necesaria para la protección. Conociendo el equivalente electroquímico del metal de sacrificio, se calcula el peso del metal requerido para la protección de la estructura, durante los años que se desee.

El sistema de corriente impresa, consiste de una fuente de corriente directa, que imprime la corriente de protección al pilote metálico. La fuente más usada, es un rectificador que convierte la corriente alterna a directa. Existen dos tipos de rectificadores comerciales de mayor importancia: cilicio y selenio. Las etapas a seguir para el proyecto de diseño de corriente impresa, son las mismas consideradas para el diseño de la protección catódica con ánodo de sacrificio y son: historia de la línea, amojamiento, medición de rectificadores, instalación de juntas aislantes, pruebas de requerimiento de corriente, diseño, instalación y conexión, ajuste, control y mantenimiento.

La máxima corrosión en el mar, ocurre en la zona de salpique; estas zonas se localizan por arriba del nivel de marea alta media. Las condiciones más críticas de corrosión en los pilotes metálicos hincados en el mar, ocurren exactamente en la zona de salpique. Las condiciones menos críticas, se presentan en zonas cercanas por debajo del nivel de fango, o sea que en esta parte, se presenta la mínima corrosión.

Las presiones causadas por un sismo, son mayores en la zona más profunda

del terreno, que cerca de la superficie. Como a grandes profundidades de la tierra, el terreno no cuenta con espacio para ser fracturado por la energía de deformación, proveniente de las ondas de cuerpo, por estar constituido de roca y suelos muy compactos, por esta causa, los suelos que se encuentran a esta profundidad, no sufren los mismos daños, como ocurre en la superficie terrestre. Cuando las ondas de cuerpo llegan a la superficie, se reflejan y provocan las llamadas energías de ondas de superficie; estas ondas sísmicas afectan grandes zonas de la superficie terrestre en la que se producen movimientos de suelos y estructuras piloteadas. Estas ondas de energía, ocasionan que sean más notables las fuerzas que ocurren cerca de la superficie terrestre y toman mayor impulso, por que en esta zona los suelos son menos compactos y además, se topan con el espacio vacío en la superficie terrestre, por este motivo, se liberan con más facilidad las energías sísmicas que a profundidades mayores. Esta energía es aplicada a la estructura y por amortiguamiento, la energía es absorbida en la superestructura y subestructura.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Robert d. Chellis. Cimentaciones profundas. Editorial Diana de México, 1987.
- 2.- Rort Bertin, Claude Gasc. Cimentaciones y obras en recalces. Editores técnicos Asociados, S. A. P.P. 55, 161 a 226. Barcelona, 1976.
- 3.- Zaven Davidian, Pierre Lassau. Pilotes y cimentaciones sobre pilotes. Editores Técnicos Asociados, S. A. P.P. 1 a 20 y de 89 a 100. Barcelona, 1972
- 4.- George B. Sower, George F. Sower. Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones. Editorial Limusa. México, D.F. 1993.
- 5.- Juárez Badillo, Rico Rodríguez. Mecánica de suelos. Tomo II. Editorial Limusa. México, D.F. 1998.
- 6.- Instituto Politécnico Nacional. Cimentaciones Superficiales. México, D.F. 1995.
- 7.- Fernando Muzas Labad, Juan José Zanz Llano, Fructuoso Maña Reixach. Cimentaciones Urbana. Calidad y Moderna Tecnología. Editores Técnicos Asociados, S. A. 1975.
- 8.- Leonardo Zeevaert. Interacción suelo-Estructura de cimentación. Editorial Limusa. México, D.F. 1991.

- 9.- Ralph B. Peck, Walter E. Hanson, Thomas H. Thornburn. Ingeniería de Cimentaciones. Editorial Limusa. México, D.F. 1998.
- 10.- H.D. Foth, L.M. Turk. Fundamento de la ciencia del suelo. Compañía Editorial Continental, S.A. México, D.F. 1975.
- 11.- Clarence W. Dun ham. Cimentaciones de estructuras. Mc. Graw-Hill book. Co. Inc. USA. P.p. 374 a 397. México, D.F. 1980
- 12.- Gordon A. Fletcher, P. E. Estudio de suelos y cimentaciones en la Industria de la Construcción. Editorial Limusa, México 1978.
- 13.- Conferencia de diseño sísmico de cimentaciones. Palacio de Minería de la UNAM. México, D.F. 1993.
- 14.- Conferencia de Proyecto y Construcción de Obras Marítimas y Portuarias. Palacio de Minería de la UNAM. México, D.F. 1994.
- 15.- Conferencia de Mecánica de suelos aplicada al diseño y construcción de obras subterráneas. Palacio de Minería de la UNAM. México, D.F. 1994.
- 16.- Conferencia de Diseño y Construcción de Cimentaciones. Palacio de Minería de la UNAM. México, D.F. 1994.
- 17.- Conferencia de Estructuras Marinas Móviles. Palacio de Minería de la UNAM México, D.F.1994.