

73  
2y



# Universidad Nacional Autónoma de México

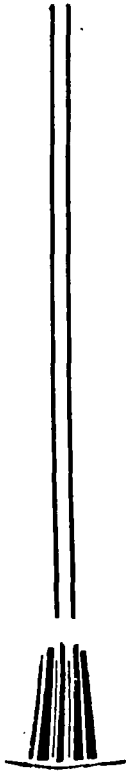
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
A R A G O N

PALE. DE CREDITO

## CORROSION DEL ACERO EN OBRAS DE INGENIERIA CIVIL

**TESIS PROFESIONAL**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A :

ROBERTO VICTORIANO PERALTA





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

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

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

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

A MIS PADRES Y HERMANOS

PORQUE GRACIAS A SU APOYO Y CONSEJOS HE LLEGADO  
A REALIZAR UNA DE MIS METAS, LA CUAL CONSTITUYE  
LA HERENCIA MAS VALIOSA QUE DE ELLOS PUDIERA RE  
CIBIR.

A MI COMPAÑERA PATY

POR SER UNA PARTE IMPORTANTE EN MI VIDA PORQUE  
GRACIAS A SU APOYO Y CONSEJOS HE LLEGADO A CUL  
MINAR UNA ETAPA DE MI VIDA.

A TODAS LAS PERSONAS QUE EN DETERMINADO MOMENTO ME APOYARON DE UNA\_\_  
MANERA DIRECTA O INDIRECTA, GRACIAS POR HABERME PERMITIDO LA REALI\_\_  
ZACION DEL PRESENTE TRABAJO.

A MIS PROFESORES

MI MAS SINCERO AGRADECIMIENTO PORQUE GRACIAS A SU APOYO Y MOTIVACION HE LLEGADO A CULMINAR UNA DE MIS METAS TRAZADAS EN LA VIDA.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

CON SICERA GRATITUD POR LA OPORTUNIDAD QUE NOS DIO PARA FORMARNOS PROFESIONALMENTE.

A LA ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON

AGRADEZCO ETERNAMENTE PORQUE EN ELLA APRENDIMOS A VALORAR EL SACRIFICIO Y MOTIVACION PARA ALCANZAR UNO DE LOS MAS GRANDES ANHELOS EN LA VIDA: EL TITULO PROFESIONAL.

## **CORROSION DEL ACERO EN OBRAS DE INGENIERIA CIVIL**

### **INDICE**

<b>I.- Introducción.....</b>	<b>1.0</b>
<b>II.- Principios básicos de la corrosión.....</b>	<b>2.0</b>
<b>III.- Corrosión en estructuras de acero.....</b>	<b>3.0</b>
<b>IV.- Corrosión en estructuras de concreto reforzado.....</b>	<b>4.0</b>
<b>V.- Corrosión en estructuras de concreto presforzado.....</b>	<b>5.0</b>
<b>VI.-Conclusiones.....</b>	<b>6.0</b>

**Bibliografía.**

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

# **CAPITULO I INTRODUCCION**

La corrosión de los elementos metálicos es un fenómeno que causa grandes pérdidas económicas en todos los países del mundo y que incrementa los riesgos de accidentes graves que pueden ocasionar la pérdida de muchas vidas humanas.

Esta situación ha motivado que en los países de mayor desarrollo tecnológico se inviertan cuantiosos recursos en la investigación de técnicas para el monitoreo y la prevención de los fenómenos corrosivos.

Usualmente se asocia el problema de la corrosión a las instalaciones de tipo industrial y se considera que es una responsabilidad primordial de los ingenieros químicos.

Sin negar que efectivamente es mucho mayor el impacto corrosivo en la industria química y que la naturaleza del fenómeno es esencialmente del campo de la Ingeniería química, en esta tesis se pretende destacar el hecho de que la corrosión es un fenómeno que afecta también a las obras de ingeniería civil y que por lo tanto debe ser motivo de estudio y reflexión por parte de los ingenieros civiles.

El aserto anterior queda demostrado por los casos notables de colapso de obras importantes que han ocurrido en México y otros países. Esos colapsos han generado una gran preocupación por investigar el comportamiento a largo plazo de las estructuras y sus materiales constituyentes.

En esta tesis se intentará describir de una manera general el estado del arte sobre la corrosión en las obras de ingeniería civil. Después de establecer en el

capítulo II los principios básicos de la corrosión como un fenómeno electroquímico, se procede en los capítulos subsiguientes ( III a V ) a presentar los aspectos más importantes de la corrosión en estructuras de acero, de concreto reforzado y de concreto presforzado.

En cada uno de estos capítulos se procede en primer término a identificar el mecanismo de corrosión que en cada tipo de estructura se genera, con base en la identificación de los elementos que propician la formación de la pila galvánica que desencadena el proceso corrosivo. Posteriormente, se presentan casos notables de fallas por corrosión de obras de cada tipo. En seguida se describen las técnicas disponibles para evaluar en cada tipo de estructura el grado de deterioro por corrosión y finalmente se describen las técnicas más usuales para prevenir el ataque corrosivo.

Tanto las técnicas de monitoreo como las de prevención se basan en la identificación de la pila galvánica. Para el monitoreo se mide el potencial de esa pila como un índice del avance corrosivo; para la prevención se busca de alguna manera bloquear la formación de esa pila mediante acciones sobre cualquiera de sus componentes. De ahí la importancia que tiene para el ingeniero la comprensión del mecanismo básico de generación del proceso corrosivo.

Finalmente, en el capítulo VI se presentan las conclusiones que a juicio del autor pueden extraerse de este trabajo: el autor se sentirá muy satisfecho si esta tesis contribuye a incrementar el interés de los ingenieros civiles en el estudio de los efectos de este importante fenómeno sobre las edificaciones.



**CAPITULO II**  
**PRINCIPIOS BASICOS**  
**DE LA CORROSION**

# **CAPITULO II PRINCIPIOS BASICOS DE LA CORROSION.**

## **CORROSION EN LA VIDA DIARIA**

Al hablar de corrosión, generalmente nos imaginamos, "la herrumbre" propia de los metales ferrosos.

La corrosión es causante de la desintegración progresiva de la mayor parte de los materiales naturales o hechos por el hombre.

Este fenómeno destructivo ha existido siempre, pero no se le ha prestado atención, sino hasta los tiempos modernos, debido al gran avance tecnológico.

La expansión industrial, el consumo excesivo de combustibles derivados del petróleo, la utilización inmoderada de productos químicos en general, han cambiado en forma radical la composición atmosférica de las grandes ciudades, haciendo un medio ambiente más agresivo tanto para los seres humanos como para las edificaciones; estructuras de acero y concreto.

La producción de acero y la mejora de sus propiedades mecánicas, el desarrollo en la utilización de recursos siderúrgicos van acompañados de un costo que cada año se paga a la corrosión. Aproximadamente un 25% de la producción anual de acero es destruida por la corrosión.

La corrosión de los metales representa un grave problema, desde el punto de vista económico, ya que una gran cantidad de dinero se pierde. Las roturas en los tubos y silenciadores de autos, la sustitución de calentadores de agua de uso doméstico, la explosión de tanques de almacenamiento de gas por fugas, las roturas en las conducciones de agua potable, incluso el colapso de puentes, son algunos de los problemas que enfrentamos.

Sin embargo un proceso totalmente de corrosión lo empleamos diariamente para producir energía eléctrica y es el de la pila seca, que se puede comprobar que es una reacción de corrosión .

Demos con más detalle algunos ejemplos de corrosión que ocurren frecuentemente en la vida diaria.

## **LAS TUBERIAS DE AGUA**

La corrosión la tenemos presente diariamente, pero sólo nos damos cuenta cuando surge un desperfecto. Un ejemplo clásico es la rotura de la tubería de conducción de agua. Cuando abrimos la llave, el agua en vez de presentar su claridad natural presenta un sabor característico del hierro. Esto indica que la corrosión ha empezado a atacar la tubería de la red de distribución de agua potable.

La corrosión puede ocurrir en la tubería en la superficie interna u externa de la misma.

## **LA LAVADORA AUTOMÁTICA**

Otro caso es el referente a la lavadora automática.

Un determinado día al poner en funcionamiento la lavadora, notamos que hace ruidos extraños.

Al revisar el tambor nos encontramos que presenta una fisura, que apareció sin dar indicios previos, no presentaba herrumbre como en el caso de la tubería, sólo ruidos extraños que nos indicaban que ocurría una falla. A pesar de no ser visible había ocurrido algún tipo de corrosión en el tambor de acero inoxidable, denominada por los especialistas corrosión fisurante. Este tipo de corrosión es muy peligrosa por que la persona no se da cuenta del problema hasta que se presenta la falla.

## **EL AUTOMOVIL**

Se inicia la aparición de manchitas de herrumbre y la pintura presenta pequeñas ampollas o levantamientos de la misma. Esto significa que se inició en nuestro vehículo la corrosión, posteriormente nos damos cuenta que al ser lavado el coche, de las molduras salen partículas de herrumbre. También se detecta este fenómeno corrosivo en las puertas del automóvil, en las esquinas de las mismas han aparecido picaduras y levantamiento de la pintura producto de la filtración de agua que escurre por el cristal cuando llueve, debido al mal

estado de los hules de las cañuelas. Este efecto corrosivo también lo presentan las salpicaderas y el piso de nuestro coche.

El problema corrosivo en zonas costeras se agrava, las carrocerías de los coches en poco tiempo quedan inservibles por la acción perniciosa de la brisa marina, que transporta gotas de cloruro de sodio (sal). En países con inviernos largos es dañino el uso de sal común sobre las avenidas para hacerlas transitables, todo esto lleva a que los automóviles tengan una vida útil muy corta.

## **CONSTRUCCIONES DE CONCRETO**

Si observamos con detenimiento notaremos tanto en las grandes ciudades, como en las zonas costeras, la aparición de manchas de herrumbre en las estructuras de concreto, por ejemplo: en un puente, en los postes de luz, en obras no terminadas cuyas varillas quedan al aire libre, se verá óxido férrico o herrumbre. Estas estructuras están reforzadas internamente con varillas de acero, las cuales se cubren de concreto (mezcla de cemento portland, arena, agua, grava, con un alto pH de 12 aproximadamente) con el fin de proporcionar una adecuada resistencia mecánica a la estructura.

El concreto es un material discontinuo, compacto y de alta densidad. Pero esta piedra artificial está compuesta de infinidad de poros interconectados, por lo tanto es permeable a líquidos y gases. Esto tiene por resultado facilitar el fenómeno de corrosión del acero en el concreto; al haber tal porosidad hay posibilidad que tanto el agua como el oxígeno penetren hacia el acero.

Otro ejemplo es: una estructura en contacto con agua de mar, por los intersticios del concreto pueden llegar los iones de cloruro a las varillas de acero, por lo que empieza la disminución del diámetro y por ende pérdida de adherencia entre acero y concreto. La herrumbre ocupa un volumen aproximadamente cuatro veces mayor que el acero sin corroer. Esta herrumbre u óxido, ejerce una gran presión sobre el concreto con fuerzas de gran magnitud que agrietan el concreto y lo debilitan, perdiendo éste su resistencia, esto continua hasta que aparecen en la superficie del concreto manchas de herrumbre.

Cuando observamos herrumbre en una estructura esto nos indica que el proceso de corrosión de la varilla de acero de refuerzo está demasiado avanzado y que la seguridad de la estructura es muy dudosa.

En zonas costeras los elementos dañinos son los cloruros, en las zonas urbanas, el elemento agresivo es el dióxido de azufre o anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ) provenientes de las industrias que consumen gasóleo y de los escapes de vehículos automotores.

## **CORROSION DE ENVASES METALICOS PARA CONSERVAS**

Cuando se almacenan latas de conserva por mucho tiempo, éstas presentan un hinchamiento, esta deformación se debe a la acumulación de gas hidrógeno, es una forma avanzada de corrosión, esto indica que la conserva se encuentra en fecha de caducidad.

Después de mucho tiempo la lata presenta, pérdida de su aspecto brillante, desastafiado intenso en envases barnizados. La corrosión de hojalata por alimentos envasados, es un proceso electroquímico. La falta de continuidad de las capas metálicas permite que el producto envasado entre en contacto con los metales que constituyen a la hojalata y por ende la formación de pilas galvánicas, actuando el alimento como electrólito.

En la hojalata su composición principal está dada por, hierro y estaño, puede compararse a una pila galvánica formada por ambos metales. La corrosión de latas de conserva por alimentos ácidos produce la disolución del estaño y la formación de gas hidrógeno, producto de la reacción catódica de los iones de hidrógeno, que provocan un abombamiento en la cabeza de la lata.

Se han analizado problemas de corrosión, que se presentan frecuentemente en la vida diaria, aunque hay otros tipos de corrosión que afectan a la industria que no se mencionaron.

Sin embargo, los más peligrosos casos de corrosión son aquellos que se presentan sin previo aviso, sin una manifestación como la herrumbre, el metal se colapsa poniendo en peligro muchas vidas humanas.

## ¿POR QUE EXISTE LA CORROSION?

La corrosión de los metales en cierta forma es inevitable, una pequeña venganza que se toma la naturaleza por la continua transformación que el hombre le causa. Los metales no existen en estado nativo (sólo los metales nobles como oro, platino, etc.), sí no en forma de minerales como los óxidos, sulfuros, carbonatos, etc.

Para obtener metales en estado puro, se recurre a su separación a partir de sus minerales, hacer esta separación, requiere un gran consumo de energía eléctrica de una acería para obtener un material tan indispensable para el desarrollo actual, como el acero, pues bien, producido éste, prácticamente inicia el período de retorno a su estado natural, los óxidos de hierro. Son los óxidos el estado más estable del hierro, respecto al medio ambiente. El mineral de hierro más común es la hematita, un óxido de hierro,  $Fe_2O_3$ . El producto más común de la corrosión de hierro es la herrumbre y tiene la misma composición química.

A la obtención de metal en estado puro le llamamos reducción.

Inversamente, las transformaciones sufridas por el metal que retorna a su estado original, se resumen en oxidación.

Un metal sólo podrá corroerse, cuando sea inestable con respecto a los productos formados por su corrosión. Esta inestabilidad puede preverse en términos energéticos. La termodinámica para el caso de los metales puros permitirá predecir si aparecerá en ellos o no corrosión.



La energía de un determinado sistema puede medirse en términos de lo que se llama la energía libre.

Se puede presentar tres casos:

a) La energía libre es positiva. El metal es activo y puede haber corrosión es el caso de los metales de uso común ( hierro, aluminio, cinc.).

b) La energía libre es positiva, pero el metal permanece inatacado, se dice que el metal está pasivo o pasivado.

c) La energía libre es cero o negativa, el metal es indiferente a los agentes agresivos habituales, no hay reacción de corrosión.

Este es el caso de los metales nobles.

## **DAÑOS ECONOMICOS DE LA CORROSION.**

Un estudio efectuado por el National Bureau of Standards de los Estados Unidos ( Daños económicos de la corrosión metálica en los Estados Unidos, 1979 ) indica que tomando como referencia base el año 1975, los costos totales anuales de la corrosión metálica pueden estimarse del orden de los 70 billones de dólares, lo que supone un 4.2% del producto Nacional Bruto (PNB).

El estudio indica que aproximadamente un 15 % o sea 10.5 billones de dólares (0.6 % del PNB) pudieran haberse evitado.

En un país de un nivel de desarrollo tecnológico muy parecido al de México; Egipto, se ha realizado un estudio similar. Durante una investigación que duró 3 años, se evaluaron los efectos económicos provocados por la corrosión de los metales, los cuales se calcularon en aproximadamente 475 millones de dólares, un 4.9 % del PNB de Egipto.

Los estudios con que se cuenta actualmente han sido realizados entre 1949 y 1979 y provienen básicamente de 9 países.

Los resultados globales se presentan en la siguiente tabla, en la que se indica el costo total de la corrosión expresado en dólares americanos y se expresa el porcentaje del Producto Nacional Bruto, para el año en que se realizó el estudio.

### COSTO DE LA CORROSION POR AÑO.

Año	País	En millones de Dólares EUA	En % del PNB
1949	EUA	5 500	
1960-61	INDIA	320	
1964	SUECIA	58 n 77	
1965	FINLANDIA	47 n 62	0,58 n 0,77
1968-69	RFA	6 000	3,0
1969	URSS	6 700	2,0
1969	GRAN BRETAÑA	3200	3,5
1973	AUSTRALIA	550	1,5 n 3,0
1974	URSS	18 850	4,1
1975	EUA	70 000	4,2
1976-77	JAPON	9 200	1,8

Para los países en que se disponen datos, el costo de corrosión representa aproximadamente entre un 2 y un 4 % del PNB. No hay datos de cómo se reparten estos costos. El estudio realizado en la Gran Bretaña, que se conoce con el nombre de Hoar, indica que los costos debidos a la corrosión son soportados por algunos sectores industriales y se dividen como sigue: transportes 26 %, naval 21 %, industria de la construcción 18 %, el petróleo y la química 13 %, etc. Muchos estudios señalan que un 20 % y un 25 % del costo total de la corrosión pudo haberse evitado mediante una mejor aplicación de las técnicas anti-corrosivas, con una mayor información de riesgos y peligros por corrosión.

## **PROBLEMAS PRODUCTO DE LA CORROSION.**

- 1) económicos ( pérdidas directas e indirectas ).
- 2) conservación de recursos ( agotamiento de reservas naturales ).
- 3) seguridad humana ( fallas fatales en medios de transporte, corrosión de recipientes que contienen residuos radioactivos, escapes en tuberías de refrigeración de plantas nucleares, etc.)

En México no contamos con estudios similares a los que se han hecho en otros países sobre costos de la corrosión.

Son muy pocas las encuestas que se han realizado en México sobre problemas por corrosión en las industrias; una encuesta realizada en 1985 por la industria Química Mexicana indica la presencia de este fenómeno en más de un 90%. Esto nos indica la gravedad del problema, si además consideráramos todos los sectores productivos, nos daríamos cuenta de la magnitud de dinero perdido. Por otra parte refiriéndonos a la seguridad humana, el costo social de la corrosión puede llegar a ser tan alto, que debe prestársele mayor atención a este problema.

Los que utilizamos el hierro debemos tomar conciencia de la magnitud del problema " corrosión " y tomar precauciones, desde la etapa del proyecto, seleccionando los recursos anticorrosivos para aumentar la vida útil del hierro y sus aleaciones y por ende asegurar el ahorro de muchos miles de pesos.

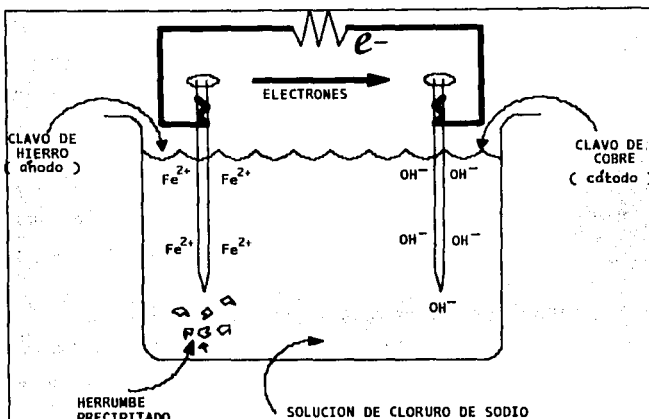
## **LA PILA GALVANICA.**

Una pila galvánica se forma con un ánodo que es el electrodo negativo (-), un cátodo que es el electrodo positivo (+), y un tercer elemento una sustancia acuosa conductora de corriente eléctrica, estas sustancias pueden ser, ácidos, bases, sales en combinación con agua. Para hacer funcionar la pila necesitamos, cerrar el circuito con un contacto eléctrico éste puede ser un alambre de cobre, teniendo estos elementos conectados electricamente entre sí se obtiene un flujo de electrones del metal más activo o anódico hacia el metal más noble o catódico.

Este proceso electroquímico tan sencillo es el principio básico de la corrosión de metales y se denomina pila de corrosión.

El metal más activo o anódico es el que pierde o cede electrones esto trae como consecuencia que el ánodo (-), al ser un metal muy activo, es inestable y se disuelve es decir, se corroe.

El metal noble o catódico, gana electrones ver figura .



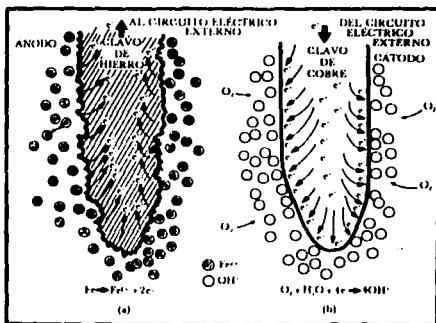
La corrosión es entonces una reacción electroquímica, donde hay flujo de electrones y transformaciones químicas que actúan simultáneamente en zonas anódicas y catódicas. Imaginemos qué sucede a nivel atómico en el proceso de corrosión. En la zona anódica se dará la destrucción gradual del material, en este caso el hierro cede electrones al circuito externo ( alambre de cobre ), debido a la diferencia de potencial creado por el par hierro-cobre, el hierro al ser un metal más electropositivo que el cobre, cede electrones , es decir se oxida y el cobre al ser un metal reductor gana electrones al haber contacto entre ánodo y cátodo, se cierra el circuito e inicia el flujo de electrones entre ellos.

La superficie metálica del clavo de hierro cede electrones y se convierten en átomos cargados positivamente ( iones  $Fe^{2+}$  ), los cuales al hacer interacción

con las moléculas de agua pasan a la solución como especies solubles hidratadas, reacciones químicas posteriores hacen que estos iones  $Fe^{2+}$  se transformen en el óxido rojizo o herrumbre tan conocida por nosotros.

Por otra parte los electrones cedidos por los átomos de hierro viajan por el circuito conductor externo hacia el cátodo donde llegan en exceso y se combinan con el oxígeno disuelto en la solución, con el objetivo de balancear la reacción química de corrosión.

Esta combinación de electrones cedidos más agua se transforma en hidróxido (OH). En efecto el metal ánodo se desintegra, mientras que el material catódico permanece casi sin ser dañado. Ver figura .

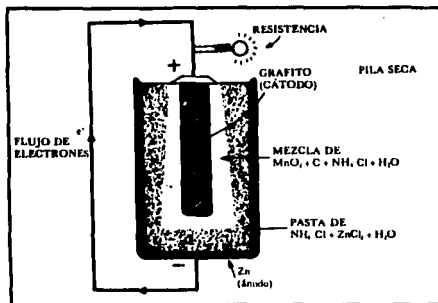


Es importante aclarar que en un proceso de corrosión intervienen tanto la reacción anódica como la catódica, y si una de las dos reacciones falla, el proceso de corrosión se anula. A la actividad electroquímica de esta naturaleza se le conoce como acción galvánica, constituye también el principio de las llamadas pilas secas, que todos conocemos en gran variedad y tamaños.

Esto nos indica que la corrosión de un metal es semejante a un sistema capaz de producir energía electroquímica, tal como lo es una pila.

En la pila seca también se forma un par galvánico, por la diferencia de potencial de dos fases diferentes y un electrólito entre ambas fases.

A continuación se da un ejemplo del funcionamiento de una pila seca o célula galvánica.



2.15

FALLA DE ORIGEN



Se compone de dos electrodos, uno activo cinc y el otro pasivado, grafito, siendo el cinc activo formará el ánodo de la pila, el cual se disolverá y la barra de grafito fungirá de cátodo reaccionando con la pasta electrolítica.

Por lo tanto, el par cinc-grafito, es una celda productora de energía y se comporta en forma análoga a la celda galvánica hierro-cobre, en donde suceden procesos anódicos y catódicos parecidos.

De lo antes mencionado podemos decir que un par galvánico como el que actúa en un proceso de corrosión, puede generar cierta cantidad de energía.

Sin embargo esta energía creada por la corrosión no puede ser usada, se disipa sin que podamos hacer algo, debido a que los procesos de corrosión se dan a niveles microscópicos y donde el conductor eléctrico externo es la misma estructura metálica que se corroe.

Aquí se encuentra la diferencia entre un sistema productor de energía que podemos utilizar ( en una linterna, acumulador para arranque de un coche, en un radio portátil ) y un proceso de corrosión en el que es semejante el proceso electroquímico pero la energía no puede ser utilizada y en cambio se desperdicia.

A continuación presentamos una lista de metales ordenados según su tendencia a corroerse, a esta lista se le conoce como: " Serie Galvánica ".

A través de pruebas en laboratorio fue posible construir esta lista de metales o aleaciones de acuerdo a su tendencia relativa a corroerse.

Estas mediciones se basan en el principio de la acción galvánica que se forma entre dos metales cuando se sumergen en un electrólito común .

Para hacer el cuadro se midió la diferencia de potencial entre pares de distintos metales y aleaciones, al tener una solución conductora común, por ejemplo, agua de mar, los metales se pueden ordenar de acuerdo a su mayor o menor tendencia a corroerse en una " Serie Galvánica " en la que el arreglo de los metales depende del electrolito que se use.

En la tabla se muestra una serie galvánica para agua de mar.

Extremo Noble	Oro
(pasivo)	Acero inoxidable (pasivo)
	Níquel
	Cobre
	Bronce al aluminio
	Níquel (activo)
	Laitón Naval
	Estado
	Acero inoxidable(activo)
	Hierro forjado
Extremo Base	Aluminio
	Cinc
	Magnesio

## MANIFESTACIONES DE LA CORROSION.

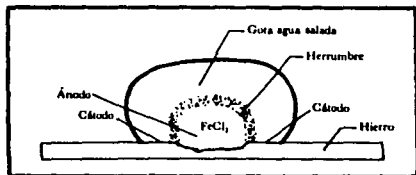
La corrosión de naturaleza electroquímica se puede manifestar de diversas maneras, en el caso del metal más comúnmente empleado que es el hierro, la presencia de herrumbre constituye la manifestación de que se está desarrollando un proceso de corrosión.

Veamos la experiencia debida a Evans, uno de los investigadores que más ha contribuido al conocimiento de la corrosión.

Su experimento consiste en el ataque de una gota de agua salada.

Evans demostró que en el caso de una gota de agua salada las diferencias en la cantidad de oxígeno disuelto en el líquido en contacto con la superficie metálica, forman una aireación diferencial, que crea pilas de corrosión en las que el ataque del metal ocurre en las áreas menos oxigenadas, provocando una corrosión rápida e intensa.

Al depositar una gota de agua salada ( agua y cloruro de sodio ) sobre la superficie horizontal de una lámina de acero perfectamente limpia y desgrasada, como se indica en la figura, se observa después de unos 30 minutos un precipitado en el medio de la gota.



La parte periférica o más exterior, más aireada, funge como cátodo y con relación al centro donde hay menos oxígeno, se convierte en ánodo.

Entre estas dos zonas se forma una membrana de hidróxido de hierro (herrumbre). Con ayuda de un tubo capilar se puede atravesar la membrana de hidróxido de hierro y comprobar la formación en el centro de la gota de una sal ferrosa (  $\text{FeCl}_2$ , cloruro ferroso ).

La presencia de herrumbre es una manifestación clara de la existencia de corrosión para el caso del hierro y sus aleaciones (aceros). Para la mayoría de los metales, las manifestaciones de la corrosión pueden estudiarse en función de la forma o tipo de corrosión.

En soluciones acuosas o en atmósferas húmedas, como ya se ha indicado, el mecanismo de ataque envuelve algunos aspectos electroquímicos.

Una solución que conduce electricidad es un electrólito. Su facultad para conducir la energía se debe a la presencia de iones. Estos son átomos cargados positiva o negativamente.

Un electrolito capaz de formar un ambiente corrosivo puede ser, cualquier solución; lluvia o incluso humedad condensada del aire. Puede abarcar desde el agua dura o salada hasta los ácidos y álcalis fuertes.

Los ánodos y cátodos presentes en un proceso de corrosión se conocen como electrodos. Los electrodos pueden consistir en dos diferentes tipos de metal. En el electrodo negativo(ánodo) es donde tiene lugar la corrosión.

Para que exista corrosión deben cumplirse ciertas condiciones mínimas estas son:

1. Debe haber un ánodo y un cátodo.
2. Debe existir un potencial eléctrico entre los dos electrodos( ánodo y cátodo ).
3. Debe haber un conductor metálico que conecte eléctricamente al ánodo y al cátodo.
4. Tanto el ánodo como el cátodo deben estar sumergidos en un electrolito conductor de la electricidad, el cual está ionizado.

La diferencia de potencial creada entre ánodo y cátodo provoca una migración de electrones de el ánodo al cátodo a lo largo del conductor metálico externo (alambre de cobre ).

El ánodo, al perder electrones, produce iones hierro cargados positivamente,  $Fe^{2+}$ , los cuales pueden combinarse con iones cargados negativamente,  $OH^-$  que se encuentran en las inmediaciones del ánodo, pudiéndose formar ocasionalmente hidróxido ferroso,  $Fe(OH)_2$ , el cual puede reaccionar posteriormente formando hidróxido férrico,  $Fe(OH)_3$ , la tan conocida herrumbre.

En el cátodo y procedentes del ánodo van llegando, a través del conductor metálico externo, electrones. Estos electrones cargados negativamente, al llegar a la interfase cátodo-solución, se combinan con los iones hidrógeno cargados positivamente  $H^+$ , para formar hidrógeno gas,  $H_2$ . Cuando los iones hidrógeno se convierten en hidrógeno gaseoso, al combinarse con electrones procedentes del ánodo, se crea un exceso de  $OH^-$  en las

1  
inmediaciones del cátodo. Este exceso de  $\text{OH}^-$  aumenta la alcalinidad y el pH del electrolito adyacente al cátodo.

## **"TIPOS DE CORROSION"**

Los tipos de corrosión se clasifican de diferentes maneras por ejemplo: por el ambiente que causa la corrosión o por la manera en que se afecta el acero. Los tipos más comunes de corrosión que afectan a los aceros son la corrosión uniforme, la corrosión localizada o penetrante y la corrosión bajo esfuerzo. La fragilización por hidrógeno había sido considerada algún tiempo como un tipo separado, sin embargo, ahora se considera una variante de la corrosión bajo esfuerzo. La falla frágil del acero de prestuerzo por corrosión bajo esfuerzo o por fragilización por hidrógeno, es muy peligrosa y motivo de preocupación para los proyectistas y constructores.

La corrosión de abrasión es otro tipo del que hay preocupación creciente. Otros tipos de corrosión son la corrosión de fisuras y la corrosión de corrientes perdidas.

### **CORROSION UNIFORME.**

En este tipo de corrosión , el ataque sobre la superficie del acero es uniforme, de tal forma que no existe sitios diferentes de ubicación de ánodos y cátodos, por lo que se requieren que las áreas anódicas y catódica sean iguales y que ambos procesos controlen por igual la tasa de corrosión.

Este tipo de corrosión puede clasificarse como un ataque químico.

Ocurre cuando el acero sin protección se expone al medio ambiente, ya sea durante el transporte o el almacenamiento, o antes de la inyección del mortero. En este tipo de corrosión, es posible que los productos de la corrosión, formen una película continua que retarde el avance de una corrosión posterior.

## **CORROSION LOCALIZADA Y CORROSION PENETRANTE.**

Debido a la falta de homogeneidad de la superficie del metal o del medio ambiente, se pueden desarrollar celdas electroquímicas separadas y ocurrir una corrosión localizada.

Esta acción contrasta con la "química" que se aplica a la corrosión general.

La corrosión se hace más localizada a medida que la relación entre el área anódica y catódica disminuye y ocurre una relación muy alta de corrosión local. Esto puede provocar una falla frágil súbita después de una pérdida insignificante de material.

La corrosión localizada ocurrirá en los sitios en los que ha sido dañada la pasivación superficial.

En presencia de iones de cloro puede ocurrir un mecanismo de penetración de esfuerzos, que concentran la deformación en un volumen pequeño de material en este caso de metal.



Los aceros de alta resistencia y baja ductilidad no redistribuyen los esfuerzos en la zona afectada por la penetración

Aún cuando la pérdida total de peso producida por la corrosión penetrante es generalmente muy alta, el intervalo de tiempo entre la construcción y la falla de la estructura puede ser muy corto

## **AGRIETAMIENTO POR CORROSION BAJO ESFUERZO**

Este ataque es un tipo de corrosión altamente localizada que produce un agrietamiento como resultado de la presencia simultánea de corrosión y de un esfuerzo de tensión. Este fenómeno es importante porque puede presentarse bajo esfuerzos en el rango de los esfuerzos permisibles. Aun cuando se han propuesto muchos mecanismos ninguno explica completamente el fenómeno por corrosión bajo esfuerzo.

El proceso de corrosión produce una discontinuidad en la superficie del metal.

Se ha observado que las grietas por corrosión bajo esfuerzo se originan en la base de un hoyo penetrante. Una vez que la grieta se ha iniciado, hay una gran concentración de esfuerzos en la punta de la grieta, con la subsiguiente propagación de la grieta. Las grietas se propagan a lo largo de los bordes de los granos (Intergranulares) o en planos de deslizamiento dentro de la estructura cristalina (Intragranulares). Ocasionalmente esas grietas pueden causar una reducción suficiente de la sección transversal para provocar la falla frágil.

## **FRAGILIZACION POR HIDROGENO.**

El agrietamiento por fragilización por hidrógeno en el acero bajo esfuerzo se presenta cuando hidrógeno atómico se introduce en la estructura del metal, donde se recombina con las moléculas de hidrógeno, produciendo una presión interna en el metal. La absorción del hidrógeno atómico en el acero de presfuerzo ocurre usualmente por carga catódica, la que se presenta en un ambiente corrosivo cuando el acero está acoplado eléctricamente a un metal más anódico, por ejemplo, el recubrimiento de cinc.

El hidrógeno atómico puede formarse por el proceso de corrosión mismo o como resultado de alguna operación de manufactura como la limpieza con baño químico.

El agrietamiento del metal puede iniciarse como resultado de la presión interna desarrollada por las moléculas de hidrógeno, causando esfuerzos críticos externos de tensión. El hidrógeno atómico puede penetrar al metal durante un período extenso de tiempo. La ruptura debida a la fragilización por hidrógeno ha ocurrido varios años después de la instalación.

## **CORROSION POR ABRASION.**

La corrosión de abrasión es causada por el desgaste de dos superficies en contacto, bajo carga, sujetas a la vibración y al deslizamiento. Los requisitos para la ocurrencia de la corrosión por abrasión son la presión de interfase y la

presencia de una vibración o movimiento cíclico relativo de suficiente magnitud para que produzca un deslizamiento o deformación de la superficie de contacto.

El movimiento requerido para producir la corrosión es muy pequeño, menor de 10-5 mm. La corrosión de abrasión es una forma donde predomina la reacción química.

El mecanismo de abrasión que eventualmente produce un agrietamiento localizado, no se conoce con certidumbre.

## **CORROSION DE FISURAS.**

La corrosión de fisuras es una reacción intensamente localizada que ocurre dentro de las grietas o zonas protegidas de la superficie del metal. Las fisuras pueden originarse en el contacto del acero de prestuerzo con otro cuerpo impenetrable. El electrolito atrapado en la fisura produce un desbalance de concentraciones electrolíticas en las fisuras y en las superficies exteriores. Una falla frágil del acero puede ocurrir súbitamente.

## **CORROSION DE CORRIENTES PERDIDAS.**

Una corriente perdida en el suelo es producida por fugas eléctricas o por falta de un aislamiento eléctrico positivo y permanente. Las corrientes perdidas causan corrosión en los sitios en donde la corriente deja la estructura y entra al suelo o al agua electrolítica. Frecuentemente los proyectistas ignoran o desprecian, el hecho de que las corrientes pueden pasar a través del acero de prestuerzo produciendo una diferencia de potencial entre el concreto y el acero,

que provoca la corrosión del acero por la formación de celdas de corrosión electroquímica.

Las estructuras susceptibles a este tipo de corrosión son: las asociadas con los rieles electrificados o con los sistemas de tranvías, las que pueden estar total o parcialmente enterradas en el suelo como las zapatas de pilas, de pilotes. las plantas químicas u otras instalaciones industriales en las que se manejan grandes volúmenes de líquidos eléctricamente conductores, estructuras en las que hay una cantidad muy grande de soldadura, como los recipientes nucleares y las estructuras marinas en las que el acero y el concreto trabajan en conjunto y el agua de mar actúa como electrolito.

Ejemplo de estas últimas son las plataformas fuera de la costa, los bloques de anclaje, los muelles y los puentes flotantes. El acero de alta resistencia para presfuerzo es más sensible a las corrientes perdidas que el acero normal. Se deben tener ciertas precauciones en las estructuras expuestas a este tipo de corrosión.

En diseño deben considerarse medidas apropiadas para aislar eléctricamente la estructura. La corriente alterna tiene mucho menos probabilidad de causar corrosión se verá, a menos que sea de baja frecuencia (aproximadamente 17 Hz).

## **FATIGA POR CORROSION.**

La fatiga por corrosión, es la reducción en la resistencia a la fatiga como resultado de la presencia de un medio corrosivo. Un esfuerzo de fatiga cuando está acompañado de corrosión, normalmente producirá una falla más rápida que un esfuerzo estático de la misma magnitud. En este tipo de falla no hay combinación especial de iones agresivos y metal, y sucede en la mayor parte de los medios acuosos. El mecanismo parece relacionarse con la exposición del metal trabajado en frío, sin óxido, el cual se vuelve anódico y se corroe, desarrollándose gradualmente grietas intragranulares con los esfuerzos cíclicos.

## **CAPITULO III**

**CORROSION EN ESTRUCTURAS**

**DE ACERO**

## **CAPITULO III CORROSION EN ESTRUCTURAS DE ACERO.**

### **MECANISMO DE LA CORROSION DEL ACERO ESTRUCTURAL.**

El acero es una aleación de hierro y carbono (contenido inferior de 2% en peso), que presenta diferentes clases de preparación diferentes tratamientos térmicos, distintos tipos de aleaciones, diferente refinación para mejorar sus propiedades mecánicas.

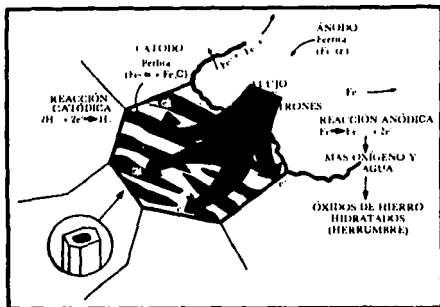
En la figura se presenta, a nivel microscopico una sección de acero donde se presentan dos fases diferentes en el mismo metal una con alto contenido en hierro llamada ferrita y otra conteniendo carburos de hierro a la que se le llama perlita. Al haber dos fases diferentes en el mismo metal y al ser las dos conductoras, se presenta un par galvánico en presencia de un electrolito.

El electrolito estará constituido por la humedad que existe en la atmósfera, la cual formará películas muy finas sobre la superficie metálica. Esta película de agua acumulará impurezas que están presentes en el aire, tales como oxígeno, bióxido de carbono, anhídrido sulfuroso, cloruros, etc Este cúmulo de contaminantes da como resultado una solución muy conductora y agresiva, por lo tanto queda formada la pila de corrosión, el conductor eléctrico es la misma pieza metálica y el electrolito es la humedad sobre la estructura que cubre ambas fases. La ferrita es más activa (anódica) que la fase perlítica (noble)

La corrosión se produce a nivel de microceldas, millones de ellas están distribuidas a lo largo y ancho de la pieza de acero. esto nos muestra que cuando hay heterogeneidades en una pieza metálica, esto es suficiente para que se presente la corrosión, existiendo claro un electrolito de por medio

Estas heterogeneidades pueden ser:

Diferentes procesos metalúrgicos de una aleación tales como la perlita y la ferrita, producto de impurezas, una distribución no uniforme de esfuerzos en el metal. Estas discontinuidades provocan que el metal se degrade irremediablemente. Para llegar a tal corrosión se requiere de una gran cantidad de flujo de electrones durante el proceso de corrosión, pero desgraciadamente no se puede aprovechar absolutamente nada de la energía disipada.



Las estructuras de acero se corroerán en soluciones acuosas o ácidas; en cambio el cobre permanecerá inmune a la reacción de hidrógeno. Sin embargo, éste se disuelve, es decir, se corroe en presencia de la reacción de reducción de oxígeno, por ejemplo es muy común la corrosión del cobre en contacto con agua aerada es decir agua que contenga oxígeno disuelto.

### FENOMENO DE POLARIZACION.

Es de gran importancia conocer la velocidad a la cual se desarrollan las reacciones catódicas y anódicas que pueden ser determinadas por varios métodos



físicos y químicos. Cuando una reacción electroquímica se retarda, se dice que está polarizada. Hay dos tipos diferentes de polarización por concentración y polarización por activación.

La polarización por activación: se refiere a aquellos factores retardadores de la reacción que son inherentes a la reacción misma como por ejemplo, la velocidad en la que los iones hidrógeno se reducen a gas hidrógeno. La polarización por activación, es función de varios factores que incluyen la velocidad de transporte del electrón al ion hidrógeno en la superficie metálica, por lo que la velocidad de desprendimiento del hidrógeno es muy diferente para cada metal.

La polarización por concentración se refiere al número de reactivos o de productos, que aceleran o retardan la velocidad de corrosión. Las implicaciones de polarización por concentración para un sistema que se corroe son muy importantes. En casos prácticos, lo más común es que la concentración por polarización afecte la reacción catódica debido, por ejemplo, al abastecimiento de  $H^+$  o de oxígeno disuelto. El pobre abastecimiento del reactivo catódico, ya sea por una concentración baja de  $H^+$  o de oxígeno atmosférico disuelto en el medio agresivo, ayudarán a reducir la velocidad de un proceso de corrosión al controlar la reacción catódica.

## **TECNICAS DE MONITOREO EN ESTRUCTURAS DE ACERO.**

Es importante conocer la resistencia a la corrosión del acero o de una aleación en un medio ambiente específico. Sobre la base de ensayos en laboratorio, se puede llegar a establecer, condiciones ambientales parecidas a la realidad y de esta manera estudiar el comportamiento de un metal o varios metales en este medio.

De una manera muy general y en función del objetivo perseguido, selección de materiales, estudios de la resistencia a la corrosión o bien del mecanismo de la corrosión, los ensayos de corrosión se pueden englobar en dos grandes categorías:

- a) Ensayos acelerados realizados en el laboratorio.
- b) Ensayos de larga duración efectuados en los medios naturales.

### **METODOS DE EVALUACION DE LA VELOCIDAD DE CORROSION.**

El método utilizado tradicionalmente y que se viene creando hasta la fecha, es el de la medida de la pérdida de peso. Este método consiste en determinar la pérdida de peso que ha experimentado un determinado metal o aleación en contacto con un medio corrosivo. Las unidades más utilizadas para expresar esta pérdida de peso son: miligramos/decímetro cuadrado (mdd), milímetros por año (mm/año), pulgadas por año o milipulgadas por año (mpy). Las unidades anteriormente citadas constituyen las de mayor utilización en Ingeniería de la corrosión.

## MEDIDA DE LA VARIACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS.

Hemos visto en el capítulo anterior que existen diferentes formas de corrosión. La medida de la velocidad de corrosión por el método de la medida de la pérdida de peso, supone el caso de la corrosión generalizada o uniforme, que es la que sufre el acero con más frecuencia. La corrosión localizada supone muy a menudo una pérdida mínima de material, pero en cambio puede alterar drásticamente sus propiedades mecánicas. Un ensayo de tracción permitirá determinar la resistencia del metal atacado, se puede hacer la comparación con una probeta del mismo material que no haya sido expuesta a las condiciones del medio agresivo.

La aplicación masiva de aceros inoxidable ha traído consigo la aparición de nuevas formas de corrosión, a las que son susceptibles éstos; por ejemplo los aceros inoxidable austeníticos pueden sufrir la llamada corrosión intergranular, debida a una precipitación de carburos de cromo en los bordes de grano, como consecuencia de un tratamiento térmico inadecuado. La localización de este tipo de corrosión puede realizarse mediante un examen metalográfico con un microscopio clásico de luz reflejada que permite visualizar la estructura superficial del metal.

El desarrollo de los microscopios electrónicos de barrido permite actualmente lograr una excelente identificación de las formas de corrosión localizada que ocurren en los diferentes metales y aleaciones; muchos microscopios electrónicos de barrido cuentan con un analizador de rayos X, lo que permite un análisis puntual y con ello determinar la naturaleza de los constituyentes afectados por el proceso de corrosión.

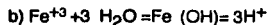
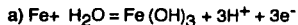
La naturaleza electroquímica de los procesos de corrosión, especialmente de los que tienen lugar a la temperatura ambiente, corrosión atmosférica o a

temperaturas inferiores a los 100 °C. en la mayoría de los procesos industriales ha permitido la aplicación de los métodos electroquímicos, modernos aplicados al estudio de la corrosión de los metales y a la medición de la velocidad de corrosión. Todas las técnicas electroquímicas modernas están basadas prácticamente en el desarrollo de un aparato que se conoce con el nombre de potencióstato.

#### DIAGRAMAS DE POURBAIX.

La serie de fuerza electromotriz no considera el efecto que tiene una película de óxido presente en la superficie de un metal, como el caso del aluminio que tal como lo conocemos es muy resistente a la corrosión y que el cromo incluso se le usa como elemento de aleación en los aceros para imprimirles mayor resistencia a la corrosión.

Otras reacciones que no se toman en cuenta son reacciones muy comunes entre un metal y un medio acuoso por ejemplo:



a) nos indica la reacción que sufre el hierro en contacto con el agua para formar el hidróxido férrico. El equilibrio de la reacción no depende de un potencial eléctrico que haga mover esos tres electrones por mol de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  formado, sino también del pH, es decir de la acidez del medio de la concentración de iones  $\text{H}^+$ .

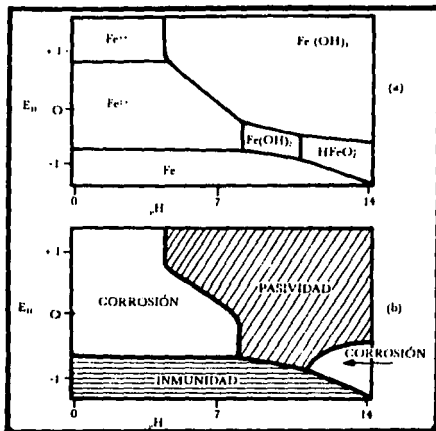
b) no depende del potencial, sino del pH del medio; aquí no hay transferencia de electrones, es una reacción química.

**Ambas reacciones y muchas otras son importantes para saber el estado en que se encontrará una estructura de acero, dependiendo del potencial y de la acidez del medio, habrá o no formación de herrumbre.**

Hace algunas décadas, el investigador belga Marcel Pourbaix no sólo obtuvo esos equilibrios sino que los presentó gráficamente como función del potencial y del pH a través de unos diagramas, los equilibrios entre un metal y agua a 25°C son representados por líneas que dependen del potencial, del pH o de ambas, delimitando así zonas termodinámicamente estables, en donde el metal existe en alguna de sus formas, disuelto como óxido o como hidróxido, como metal, etc.

La figura (a) siguiente muestra el diagrama simplificado para el hierro en contacto con agua, la cual tiene una división natural graficada en tres regiones las cuales se pueden clasificar de acuerdo a su conducta de corrosión en: pasividad, corrosión e inmunidad.

La figura (b) siguiente muestra la zona de pasividad que se aplica cuando el metal posee películas de óxidos o de hidróxidos en su superficie que inhiben la corrosión. En la zona de corrosión, el metal se disuelve activamente, siendo los productos de corrosión solubles; en cambio en la zona de inmunidad, el metal se encuentra perfectamente preservado y estable bajo condiciones muy especiales de potencial y de pH.



## TECNICAS DE PROTECCION DE ESTRUCTURAS DE ACERO.

Es común que durante la operación de plantas e instalaciones en la industria se observe la gradual destrucción de los materiales utilizados, en la construcción de equipos, tanques, depositos, transportes, líneas de conducción, etc. Normalmente estos efectos se atribuyen al fenómeno de corrosión.

### PROTECCION POR USO DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS.

Este método considera la formación de una barrera que impide el acceso de los agentes corrosivos a la superficie metálica; la barrera se forma a partir de la aplicación de una dispersión líquida de una resina y un pigmento, con eliminación posterior del solvente, obteniéndose una película sólida adherida a la superficie metálica, condicionada a la resistencia que presenta la película al medio agresivo, su uso está muy generalizado en la protección de estructuras e instalaciones aéreas o sumergidas.

## RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS.

Un recubrimiento anticorrosivo se define como una dispersión de un pigmento finamente dividido en una solución de una resina y aditivos. Su composición debe obedecer a una formulación ya probada, al ser aplicada y seca, la película resultante representa una barrera flexible, adherente y con máxima eficiencia de protección contra la corrosión. Un recubrimiento considera los siguientes componentes básicos:

Resinas, Aditivos , Solventes.

Pigmentos inhibidores, Cargas o Inertes, Pigmentos colorantes o entonadores.

## RESINAS.

son compuestos orgánicos o inorgánicos poliméricos formadores de película, se caracterizan por fijar el pigmento, promover una buena adherencia sobre el sustrato metálico o capa anterior, ser una barrera flexible durable e impermeable a los agentes corrosivos. A continuación se enlistan algunas resinas usadas en la industria anticorrosiva.

Resina alquidámica.

Resina vínicica.

Resina acrílica

Resina epóxica.

Resina fenólica.

Resina poliamídica.

Resina de Cumarona- Indeno

Resina poliamínica.

Resina de silicón.

**ADITIVOS:** Son compuestos metálicos u organo-metálicos, que se adicionan en cantidades pequeñas, tienen gran influencia sobre la viscosidad y estabilidad del recubrimiento líquido así como sobre el poder de nivelación y apariencia de la película ya aplicada, ejemplos de estos se describen a continuación:

a) **Agentes secantes:** aceleran el proceso de oxidación o polimerización de la resina durante su secado, obteniéndose películas sólidas en corto tiempo, ejemplo de ellos; los nftenatos, octatos de cobalto, plomo, manganeso y calcio.

b) **Agentes antioxidantes:** inhiben o retardan la oxidación superficial del recubrimiento líquido, generalmente se manifiestan como una capa de nata en recipientes abiertos o cerrados. Ejemplos de ellos son: metil, etil, cefoxima, butiral dioxima e isómeros amilfenolados que poseen propiedades antioxidantes.

c) **Agentes estabilizadores de dispersión:** estos productos evitan el asentamiento o separación del pigmento; ejemplo de este tipo de productos son: bentonitas, lecitina y thiaxina.

d) **Agentes modificadores de flujo y viscosidad:** son productos que proporcionan al recubrimiento la suficiente tixotropía y poder de nivelación para obtener películas continuas y uniformes, ejemplos de estos aditivos son: thiaxina, bentonitas, aceite de castor deshidratado-poliamina, atapulguita mineral coloidal, etil amino etanol y mono oleato de glicerina.

e) **Agentes surfactantes:** son compuestos orgánicos cuya finalidad es proporcionar la humectación y dispersión del pigmento, evitar la formación de espuma, así como aumentar el poder de humectación sobre el sustrato metálico, ejemplo de estos aditivos son: ácido oleico y otros ácidos orgánicos, aceites de silicón y de pino-



**jabones solubles en agua, estereatos de aluminio y calcio, fungicidas, bactericidas absorbedores de rayos ultravioleta,**

#### **SOLVENTES.**

**Son líquidos orgánicos de base alifática o aromática cuya función principal es la de disolver las resinas y aditivos y presentar un medio adecuado para la dispersión del pigmento, estos compuestos no son formadores de película ya que se eliminan del recubrimiento durante el secado. Parte de las propiedades del recubrimiento como son: viscosidad, facilidad de aplicación, porosidad, dependen de naturaleza del solvente, por lo que su selección deberá tomar en cuenta propiedades como: poder de disolución, temperatura de ebullición, velocidad de evaporación, flamabilidad, toxicidad, estabilidad química y costo. De estas propiedades la velocidad de evaporación o volatilidad tienen gran influencia en la continuidad de la película de recubrimiento; solventes muy volátiles retardan y tienden a producir porosidad mientras que los solventes poco volátiles retardan excesivamente el proceso de secado**

#### **PIGMENTOS.**

**son sustancias sólidas orgánicas o inorgánicas. que reducidas a un tamaño inferior a los 2.5 micras y dispersas en el vehículo, proporcionan a la película seca del recubrimiento propiedades como resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, poder cubriente así como protección a la resina de la acción degradante de los rayos ultravioletas del sol. Entre las características deseables de un recubrimiento se puede mencionar las siguientes: no reactividad química con el vehículo, fácil humectación y dispersión alta resistencia al calor la luz y agentes químicos, etc.**

a) pigmentos inhibidores inhiben en mayor o menor grado la corrosión impidiendo el acceso de los agentes corrosivos al sustrato metálico dado que obstruyen los poros presentes en pequeña proporción en cualquier recubrimiento. Entre ellos se puede mencionar al subóxido de plomo, cromato básico de cinc, polvo de cinc, óxido de cinc combinado, amarillo de cinc, sulfato básico de plomo.

b) Pigmentos entonadores: Son compuestos solubles o fácilmente dispersables en el vehículo, que en menor proporción al pigmento inhibido permiten lograr diferentes tonos y colores en el recubrimiento. Azul de ftalocianina, rojo de toluidina, naranja molibdato, naranja de dinitroanilina y naranja molibdato son ejemplos de este tipo de pigmento.

c) Cargas inertes: para la protección anticorrosiva y para la protección de la resina a los rayos ultravioletas como ejemplos tenemos, silicato de magnesio, mica, talco, sílica de diatomea, baritas, bentonitas, etc.

#### PREPARACION DE SUPERFICIES.

Uno de los factores más importantes en la protección anticorrosiva de una instalación utilizando recubrimientos es la correcta limpieza o preparación de la superficie, si la superficie por recubrir está contaminada con aceite, humedad, suciedad, polvo, herrumbre, escamas de laminación o cualquier otro material suelto, el recubrimiento no podrá adherirse firmemente y su eficiencia de protección será nula, además del efecto sobre la adherencia, algunas impurezas tales como el óxido, la escoria o la suciedad contribuyen a la ruptura de la película por su avidéz de humedad ocasionando el ampollamiento y la corrosión del metal bajo película.

El acero es el material de construcción más ampliamente utilizado en la fabricación de equipos e instalaciones, desde el punto de vista de preparación de superficies los principales contaminantes están representados, además de la grasa,

aceite y suciedad, por la escoria, escamas de laminación y el herrumbre; al dilatarse o contraerse por temperatura estas impurezas tienden a desprenderse y el metal pierde la protección; las impurezas incluyendo el herrumbre, son más nobles en la serie galvánica, por lo que actuarán como cátodos en presencia de humedad acelerando la corrosión del acero.

La preparación de superficies de acero se reduce a los siguientes métodos fundamentales que se detallan a continuación:

#### LIMPIEZA CON CHORRO DE ARENA.

Este método es el más eficaz en la preparación de superficies de acero, elimina eficientemente la suciedad, herrumbre, escamas, escoria y otros contaminantes, proporciona una superficie áspera de color gris uniforme, excelente para promover una buena adherencia del recubrimiento. Dependiendo del tipo de recubrimiento para utilizar, en la práctica se utilizan tres grados de limpieza con chorro de arena.

- a) Limpieza a metal blanco: se obtiene una superficie gris claro uniforme, eliminando totalmente cualquier contaminante de los mencionados anteriormente.
- b) Limpieza comercial: se obtiene una superficie gris oscuro con rayas o estrías más oscuras, eliminando totalmente cualquier contaminante de los mencionados anteriormente.
- c) Limpieza cercana a metal blanco: su aspecto es intermedio entre los dos tipos de limpieza antes mencionados y no deberá mostrar óxido o herrumbre, residuos de pintura, aceite, grasa u otra materia extraña.

## LIMPIEZA MANUAL.

Este método de preparación de superficies, considera el uso de herramientas neumáticas y eléctricas tales como cepillos rotatorios de cerdas de alambre, esmeriles, lijadoras y herramientas manuales de tipo cepillos de lumbre, raspadores, cinceles, martillos especiales, etc.

Por su rapidez y eficiencia, las herramientas neumáticas deberán preferirse en áreas grandes y las manuales en áreas pequeñas o poco accesibles. La secuencia en la preparación de superficies por este método depende de cada caso en particular; el procedimiento es el siguiente:

a) Descostrado con herramientas de impacto martillo y cincel para eliminar costras grandes de óxido-escamas y restos de soldadura o escoria, si la superficie está contaminada con grasa y aceite, deberán eliminarse con solventes adecuados.

b) Por rasqueteo con la herramienta correspondiente deberán eliminarse donde sea posible el óxido, pintura o cualquiera otra materia extraña; las lijadoras metálicas dejan superficies más ásperas pero su alto costo limita su uso a pequeñas áreas tales como soldaduras, bordes afilados y restos de pintura vieja firmemente adheridas.

## LIMPIEZA QUIMICA.

Este procedimiento considera el uso de mezclas o soluciones comerciales capaces de producir por separado, primeramente una acción de limpieza capaz de eliminar restos de grasa y aceite y en segundo lugar tener la capacidad suficiente para disolver escamas, escoria y restos de óxido, con el fin de dejar la superficie libre de contaminantes; por este método se procede en la siguiente forma:

- a) Eliminación de capas gruesas de escoria, grasa y contaminantes.
- b) Aplicación con brocha o aspersión de la solución del producto químico seleccionado.

#### SISTEMA DE APLICACION DE RECUBRIMIENTOS.

Antes de aplicar el material de recubrimiento éste deberá ser homogeneizado y acondicionado para su uso correcto, esto puede llevarse a cabo en la siguiente forma:

- a) Destapar y homogeneizar el recubrimiento con una paleta u otro medio adecuado y pasar un quinta parte a otro recipiente limpio más grande.
- b) Agitar el contenido del recipiente original hasta lograr que todos los sólidos adheridos a las paredes y fondo se reincorporen en forma homogénea; el almacenamiento controlado tiende a provocar en estos asentamientos.

#### APLICACION CON BROCHA.

La aplicación con brocha es un procedimiento que se ha utilizado durante muchos años. En comparación con otros métodos es excesivamente lento por lo que deberá preferirse para áreas pequeñas o de conformación difícil; además presenta dificultad para el control eficiente de espesores de película, el costo por equipo es mínimo.

#### RECOMENDACIONES.

Seleccionar el tamaño de la brocha dependiendo del tamaño del área por recubrir, la máxima eficiencia de aplicación se obtiene con brochas de pelo de caballo, también hay combinación de cerdas naturales y sintéticas. La brocha

nunca deberá sumergirse más de la mitad de la longitud de las cerdas, evitándose así la necesidad de eliminar el exceso de recubrimiento en el borde del recipiente.

#### APLICACION CON RODILLO.

Estos dispositivos de aplicación se desarrollaron para reducir el tiempo de aplicación en superficies planas. En el mercado existen gran variedad de formas y tamaños; los rodillos generalmente se construyen de lana natural y combinaciones de fibras sintéticas. Estos rodillos se pueden encontrar de 15 cm a 35 cm de ancho. Aún cuando se aumenta la rapidez de aplicación por este método, el espesor resultante no es del todo uniforme y tiene éxito sólo en superficies planas.

#### APLICACION POR ASPERSION.

Este método de aplicación se desarrolló ante la necesidad de aumentar las velocidades de aplicación y mejorar el control de espesores y eficiencia en general, como consecuencia de las grandes áreas por recubrir y la agresividad de los medios corrosivos que se presentan en la industria y el medio ambiente. Actualmente se utilizan métodos de aspersión; en caliente, aspersión por vapor y aspersión sin aire, pero su alto costo o dificultad de manejo han limitado su popularización.

El equipo de aplicación por aspersión con aire considera los siguientes componentes:

Pistola de aspersión, recipientes de material, mangueras, filtros de aire, reguladores de presión de aire, compresores de aire y equipo de seguridad.

## **TIPOS DE RECUBRIMIENTOS.**

A la fecha se han desarrollado una gran diversidad de recubrimientos cuya formulación o composición obedece a la resolución de un problema específico de tal forma que se puede hablar de recubrimientos anticorrosivos y de pinturas arquitectónicas, las cuales se utilizan esencialmente para fines decorativos. Mientras que las primeros, con fines de formulación, requieren el uso de resinas y pigmentos altamente resistentes que permiten una alta eficiencia de protección.

### **RECUBRIMIENTOS ALQUIDALICOS.**

Es un recubrimiento con buena retención de brillo y resistencia a medios ambientes secos o húmedos sin salinidad o gases corrosivos; presenta buena adherencia, por poder de humectación y tolera ciertos grados de impurezas en la superficie por lo que con frecuencia es suficiente con una limpieza manual. No es recomendable para una inmersión continua; su resistencia química es mala en condiciones alcalinas ante las cuales se saponifica y destruye, no se recomienda la aplicación sobre concreto, galvanizado o inorgánico de cinc o a exposiciones superiores a 60°C.

### **RECUBRIMIENTOS VINILICOS.**

Son recubrimientos no tóxicos, resistentes a la abrasión que pueden ser utilizados en la protección de superficies metálicas y resisten la inmersión continua en agua dulce o salada, resisten soluciones diluidas de la mayor parte de los ácidos orgánicos e inorgánicos, incluyendo HCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ácido cítrico, no son afectados por derivados del petróleo, proporcionan una superficie semibrillante, con alta resistencia a la intemperie aún altamente húmeda y corrosiva. Con el tiempo son afectados por los rayos del sol presentando un caleo superficial.

## RECUBRIMIENTOS EPOXICOS.

En términos generales el nivel de adherencia, dureza, flexibilidad y resistencia a los medios corrosivos de los recubrimientos epóxicos no ha sido superado por ningún otro tipo de los recubrimientos actuales. Pueden aplicarse sobre superficies de concreto, metálicas, galvanizadas o inorgánico de cinc: presentan una excepcional resistencia a los medios alcalinos y buena resistencia a los medios ácidos, soportan salpicaduras, escurrimientos e inmersiones continuas de la mayoría de los hidrocarburos, alcoholes, etc.

Presentan un grado de impermeabilidad permaneciendo inalterables ante la exposición e inmersión en agua dulce, salada y vapor de agua. Estas características no las adquieren por sí solos, requieren de un agente de polimerización o entre cruzamiento denominado catalizador, el cual usualmente está constituido por una solución de resinas amínicas o poliamídicas.

Sus limitaciones son: formación de un caleo superficial, a largo plazo tienden a fragilizarse.

## RECUBRIMIENTO EPOXI-ALQUITRAN DE HULLA.

Este recubrimiento se ha desarrollado específicamente para resolver problemas de inmersión continua en agua salada por muy largo tiempo y en el cual se combina la alta resistencia y características de un recubrimiento epóxico con alta impermeabilidad del alquitrán de hulla, cuando el recubrimiento se expone por largo tiempo a la acción de los rayos del sol se cuarteo y calea.



### RECUBRIMIENTO VINIL-ACRILICO.

Es un recubrimiento que combina la alta resistencia química y a la abrasión de los vínilicos, con la excepcional resistencia al intemperismo y rayos del sol de las resinas acrílicas; su poder de retención de brillo y color es superior a cualquiera de los recubrimientos desarrollados a la fecha, es resistente a los medios salinos, ácidos y alcalinos dando lugar a una alta eficiencia de protección contra la corrosión.

### RECUBRIMIENTO FENOLICO.

Es un recubrimiento duro brillante; en términos generales su resistencia a los solventes, medios ácidos y alcalinos es moderada, por lo que no se recomienda para inmersiones continuas. En general su eficiencia de protección es ligeramente mayor a la de los alquidálicos. Si el recubrimiento es humectado, su resistencia a los solventes y al agua se incrementa considerablemente, llegando a soportar la inmersión en los mismos.

### RECUBRIMIENTO DE SILICON.

La alta estabilidad térmica de la resina permite la utilización de este tipo de recubrimientos hasta unos 45°C la película de recubrimiento resultante es resistente a la intemperie y atmósferas contaminadas.

### RECUBRIMIENTO METALICO.

Pueden lograrse recubrimientos metálicos mediante la electrodeposición de metales como el níquel, cinc, cobre, cadmio, estaño, cromo, etc, la inmersión en metales fundidos: Cinc (galvanización en caliente), aluminio (Aluminizado), etc, o bien la proyección del metal fundido mediante una pistola atomizadora; metalizaciones al cinc, aluminio, estaño, plomo, etc

Los procedimientos de aplicación son de gran importancia respecto a la eficacia de la protección contra la corrosión, pues tanto el espesor, porosidad,

Los procedimientos de aplicación son de gran importancia respecto a la eficacia de la protección contra la corrosión, pues tanto el espesor, porosidad, como la naturaleza misma de las capas obtenidas son función del procedimiento de aplicación. así por ejemplo, los recubrimientos electrolíticos que tienen espesores de algunos micrones, se reservan para su uso en medios poco agresivos. En cambio, los recubrimientos obtenidos por inmersión en un metal fundido tienen espesores mayores.

Los recubrimientos obtenidos mediante proyección permiten obtener espesores más grandes y perfectamente controlables. Se utilizan especialmente en condiciones severas de corrosión. A continuación se describen algunos procedimientos anteriormente citados:

#### INMERSION EN UN METAL EN FUSION.

Después de una adecuada preparación superficial, las piezas de acero se sumergen momentáneamente en un baño de un metal en fusión; esta operación puede realizarse para una sola pieza o para un conjunto, su uso es amplio en: tuberías, láminas, trellados, etc. Esta técnica se utiliza para recubrimientos de cinc galvanización en caliente, aluminio, estaño y plomo. Después del enfriamiento, las piezas ya recubiertas pueden someterse a un tratamiento complementario de pasivación en ciertos casos.

## METALIZACION POR PROYECCION CON PISTOLA

Esta técnica consiste en proyectar con pistola sobre la superficie de acero ya preparada, un metal en estado de fusión, el espesor del recubrimiento se puede controlar fácilmente por el operador y puede variar según la naturaleza del metal proyectado. Los metales o aleaciones que pueden aplicarse por esta técnica son: cinc, aluminio, acero inoxidable, estaño, plomo, níquel, cobre, etc.

## ELECTROLISIS.

Después de una cuidadosa preparación superficial que incluye un baño con ácido, seguido de neutralización y lavado, las piezas por tratar se sumergen en soluciones que contienen sales de los metales a depositar. las piezas se colocan en posición catódica conectadas al polo negativo de un generador. Bajo la acción de la corriente eléctrica proporcionada por el generador, el acero se recubre del metal contenido en el baño o bien puede ser suministrado por un ánodo soluble del metal en cuestión. Los metales comúnmente depositados por vía electroquímica son: cromo níquel, cinc, cadmio y estaño; los depósitos obtenidos son por lo general son del orden de 2 a 30 micrones.

## RECUBRIMIENTO DE CINCO INORGANICO.

En cierta forma este recubrimiento es un galvanizado en frío, en el cual la película es formada por la aplicación de una mezcla homogénea de polvo de cinc y una solución acuosa de silicato orgánico u inorgánico; la eliminación de agua y solventes en interacción de los componentes antes mencionados permite obtener una película de silicato de cinc con oclusiones de cinc en polvo, por lo que finalmente su naturaleza es inorgánica. Se forma una película de cinc con alta conductividad eléctrica capaz de sacrificarse anódicamente para proteger el acero.

## ALEACIONES.

Las aleaciones se componen de hierro y carbono con pequeñas proporciones de otros elementos que mejoran sus propiedades.

**Aceros al cromo níquel:** son los aceros inoxidable especiales más importantes, debido a su extraordinaria resistencia a la oxidación, gran dureza, elevada resistencia a la tracción, se utilizan en la construcción y en piezas sometidas a grandes esfuerzos de tracción ( $180 \text{ kg/mm}^2$ ).

## PLACADO.

Después de un tratamiento superficial especial, la lámina del metal para aplicar y el metal base se someten aun proceso de colaminación en caliente, obteniéndose al final la lámina de acero recubierta del metal aplicado. Este proceso puede efectuarse sobre una o las dos caras de la lámina del acero. El acero inoxidable, níquel, monel y el cobre se aplican comúnmente por esta técnica.

## PROTECCION CATODICA.

La corrosión suele ser un fenómeno electroquímico por lo que se puede intentar combatirlo conectando el metal que se requiere proteger a otro metal menos noble. Los sistemas de protección contra la corrosión están basados en la eliminación del ánodo, cátodo, electrolito o en su defecto hacerlos inoperantes. el procedimiento que elimina todos los ánodos de la superficie metálica haciéndola toda catódica, se conoce con el nombre de protección catódica.

Al conectar el metal que se quiere proteger a otro metal más activo este actuará como ánodo de sacrificio llamado también ánodo galvánico. O bien conectándolo al polo negativo de una fuente exterior de corriente continua.

El primer caso constituye la protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio y el segundo la protección catódica con corriente impresa. La protección catódica constituye sin duda, el más importante de todos los métodos empleados para prevenir la corrosión de estructuras metálicas enterradas en el suelo o sumergidas en medios acuosos y expuestas al medio ambiente como grandes edificios de estructura de acero, puentes de estructura de acero, armaduras de acero para techumbres de estadios, deportivos, auditorios, etc. Tanto el acero como el cobre, plomo y bronce son algunos metales que pueden ser protegidos de la corrosión por este método; las aplicaciones incluyen barcos, tuberías, tanques de almacenamiento, puentes.

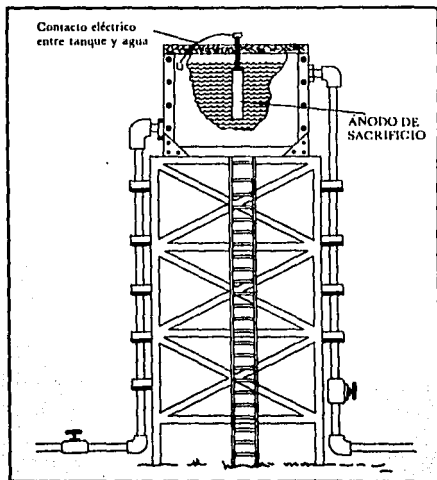
### **PROTECCION CATODICA CON ANODOS DE SACRIFICIO.**

La protección con ánodos de sacrificio se utiliza cuando se requiere proteger una estructura contra la corrosión, mediante un ánodo galvánico o de sacrificio.

Si el electrodo auxiliar es de un metal más activo que el metal que se requiere proteger, actuará de ánodo en la celda de corrosión. En este caso la estructura actuará como cátodo y quedará protegida por el "sacrificio" del ánodo que se corroerá. Este método de protección catódica se utiliza cuando resulta inconveniente una fuente externa de corriente.

La realización de la protección catódica con ánodos de sacrificio o galvánicos se lleva a cabo normalmente con tres metales característicos: cinc (Zn), magnesio (Mg), aluminio (Al) y sus aleaciones. El cinc ha sido el material anódico clásico, y es el pionero en el desarrollo de la protección catódica. Los ánodos de aleaciones de magnesio han sido también utilizados con éxito; principalmente se emplean para la protección de estructuras que requieren de una polarización

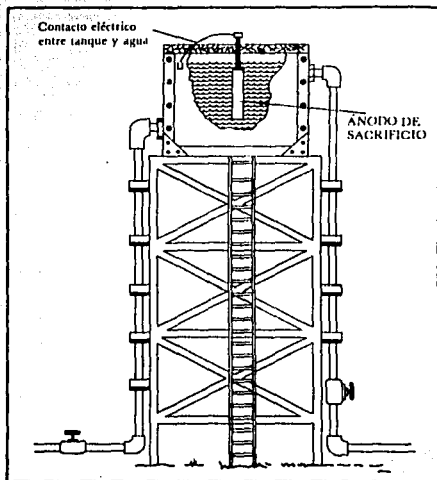
rápida, o en medios agresivos de resistividad elevada, como los suelos. El aluminio es un material anódico de gran interés por sus características electroquímicas. Sin embargo, la obtención de aleaciones de aluminio para ánodos de sacrificio ha sido más lenta que los metales antes mencionados. A continuación se presenta una figura que representa la protección con ánodos de sacrificio.



### PROPIEDADES DE UN MATERIAL ANODICO.

Tomando en cuenta la serie electroquímica de los metales, un metal tendrá carácter anódico respecto de otro si se encuentra arriba de él en dicha serie. A su vez, por ejemplo, el hierro será anódico con relación al cobre y catódico respecto al cinc. El metal que actúa como cátodo se encuentra protegido es por esto que el sistema

rápida, o en medios agresivos de resistividad elevada, como los suelos. El aluminio es un material anódico de gran interés por sus características electroquímicas. Sin embargo, la obtención de aleaciones de aluminio para ánodos de sacrificio ha sido más lenta que los metales antes mencionados. A continuación se presenta una figura que representa la protección con ánodos de sacrificio.



### PROPIEDADES DE UN MATERIAL ANODICO.

Tomando en cuenta la serie electroquímica de los metales, un metal tendrá carácter anódico respecto de otro si se encuentra arriba de él en dicha serie. A su vez, por ejemplo, el hierro será anódico con relación al cobre y catódico respecto al cinc. El metal que actúa como cátodo se encuentra protegido es por esto que el sistema

se conoce con el nombre de protección catódica con ánodos de sacrificio. Las propiedades que debe reunir un material anódico son las siguientes:

- 1) Debe poseer un potencial de disolución lo suficientemente negativo como para polarizar la estructura de acero que es el metal que normalmente se protege a  $-0.80$  V, pero el potencial no debe ser excesivamente negativo ya que eso motivaría un gasto innecesario de corriente; el potencial práctico de disolución puede estar comprendido entre  $-0.95$  V, y  $-1.7$  V.
- 2) Cuando el metal actúe como ánodo debe presentar una tendencia pequeña a la polarización, no debe desarrollar películas pasivantes protectoras y debe tener un elevado sobre potencial para la formación de hidrógeno.
- 3) El metal debe tener un elevado rendimiento eléctrico expresado en amperes-hora por kg de material (A-h/ kg) lo que constituye su capacidad de drenaje de corriente.
- 4) En su proceso de disolución anódica, la corrosión deberá ser uniforme.
- 5) El metal debe ser de fácil adquisición y deberá poderse fundir en diferentes formas y tamaños.
- 6) El metal deberá tener un costo razonable, de modo que en conjunción con las características electroquímicas correctas, pueda lograrse una protección a un costo bajo por ampere-año.

Estas exigencias ponen de manifiesto que solamente el cinc, el magnesio y el aluminio y sus respectivas aleaciones puedan ser consideradas como materiales para ser utilizados prácticamente como ánodos de sacrificio.



## VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA PROTECCION CON ANODOS GALVANICOS.

### VENTAJAS.

- fácil de instalar.
- no necesita de una fuente de corriente continua ni de un regulador de voltaje.
- no provoca problemas de interferencia.
- bajo costo de mantenimiento.
- permite obtener una distribución de corriente uniforme.
- se puede aumentar el número de ánodos, con el sistema de operación.

### DESVENTAJAS.

- corriente suministrada limitada.
- Ineficaz en ambientes de resistividad elevada.
- costo inicial alto.
- alto consumo de ánodos para estructuras enterradas mal revestidas y sin revestimiento en agua de mar.

La protección con ánodos de sacrificio puede utilizarse cuando se requiere de una corriente pequeña y la resistividad del medio agresivo es baja.

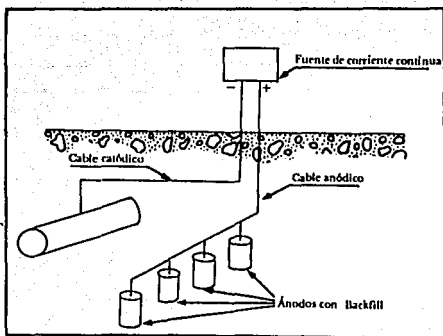
## PROTECCION CATODICA CON CORRIENTE IMPRESA.

El sistema de protección cática con corriente impresa se llevó a cabo aproximadamente cien años después que el de ánodos galvánicos. La protección se logra aplicando una corriente externa a partir de un rectificador que suministra corriente continua de bajo voltaje. El terminal positivo de la fuente de corriente se conecta a un ánodo auxiliar grafito por ejemplo localizado a una determinada distancia de la estructura metálica. En la práctica, la corriente necesaria para

proteger una estructura desnuda suele ser demasiado grande como para ser rentable económicamente, en este caso la estructura se recubre con algún revestimiento para proporcionarle protección frente al medio agresivo, reservándose la protección catódica para proteger la estructura sólo en aquellos puntos en que no puede lograrlo el revestimiento.

Los electrodos auxiliares se hacen de chatarra de hierro, aleación de ferrosilicio grafito, titanio platinado, etc. Es completamente indispensable la existencia del electrolito (medio agresivo) que completa el conjunto para que se realice el proceso electrolítico.

Los componentes básicos del sistema de protección por corriente impresa son los siguientes: un ánodo dispersor, una fuente de corriente continua, y el cable portador de corriente, ver figura.



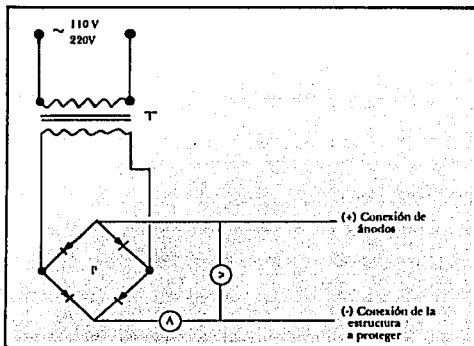
## FUENTES DE CORRIENTE

El sistema de corriente impresa requiere una fuente de corriente continua, no importa de dónde provenga, a condición de que se mantenga pese al paso del tiempo. Un sistema de corriente impresa debe poder funcionar de forma permanente al menos durante diez años.

### RECTIFICADORES.

Los aparatos que permiten el paso de corriente en un solo sentido se conocen con el nombre de rectificadores. Estos aparatos se alimentan con corriente alterna. Si se trata de un rectificador monofásico, estará constituido por un transformador monofásico T, alimentado en el primario a 110 ó 220 V. La tensión de salida puede ajustarse según las necesidades; un puente monofásico reductor P, compuesto por 4 diodos o grupos de diodos de selenio o silicio. Este puente reduce las dos alternancias de la corriente monofásica. El selenio es más barato, pero también más frágil que el silicio.

Un voltímetro controla la tensión de salida y un amperímetro la intensidad total; la tensión de salida puede ser controlada con ayuda de regletas o por medio de un "variac", el cual permite una regulación continua desde el 0 al valor máximo. Cuando se necesitan intensidades altas de corriente es más económico utilizar rectificadores alimentados con corriente trifásica de 380V, en el siguiente esquema se muestra un rectificador monofásico.



### ANODOS AUXILIARES.

Todos estos ánodos van consumiéndose a mayor o menor velocidad con el paso de la corriente. Así por ejemplo, la chatarra de hierro se consume muy rápidamente y el titanio platinado a un ritmo muy lento. A continuación se mencionan los electrodos auxiliares más comunes que son:

Chatarra de hierro, Ferrosilicio, grafito, Titanio platinado, Tántalo platinado, Plomo-Plata, Titanio-óxido de titanio y óxido de rutenio.

### PROPIEDADES DE LOS ANODOS AUXILIARES.

Como se ha visto, los diversos tipos de materiales que se utilizan como ánodos para los sistemas de protección catódica con corriente impresa se escogen básicamente en función de sus prestaciones necesarias y del medio en que serán colocados. Un buen ánodo debe poseer las propiedades siguientes:

- a) Bajo consumo.
- b) Densidad de corriente elevada.

c) Pequeñas dimensiones.

d) Baja resistividad.

e) Buena resistencia mecánica y elevado potencial de ruptura.

Los ánodos que se utilizan en corriente impresa pueden dividirse, en cuanto a su consumo en: a) ánodos solubles, b) semiinertes y c) inertes. Actualmente se prefieren los inertes ya que, pese a que su costo es más alto, tienen las mejores características.

Las ventajas y desventajas que presenta el método de protección catódica con corriente impresa se presentan a continuación.

#### VENTAJAS.

- puede diseñarse para un amplio intervalo de potencial y corriente.
- un ánodo o lecho anódico puede suministrar una gran corriente.
- con una sola instalación se pueden proteger superficies muy grandes.
- potencial y corrientes variables.
- se puede utilizar en ambientes de resistividad elevada.
- eficaz para proteger estructuras no recubiertas o mal recubiertas.

#### DESVENTAJAS.

- puede causar problemas de interferencia
- requiere una inspección periódica y de mantenimiento.
- requiere una fuente de corriente continua.
- posibilidad de condiciones de sobreprotección con daños a recubrimientos y problemas de fragilización por la acción del hidrógeno.
- conexiones y cables sujetos a roturas
- tiene un costo elevado.

## SOBRE PROTECCION.

Una estructura está sobre protegida cuando la densidad de corriente intercambiada en su superficie es mayor que la necesaria para una protección completa. Esto sucede cuando la protección catódica se efectúa mediante el sistema de corriente impresa; la sobreprotección debe evitarse porque implica un consumo inútil de electricidad, un mayor consumo del ánodo, etc. Especialmente por el daño indirecto que puede provocar: ampollamientos del recubrimiento, degradación del mismo, desprendimiento de hidrógeno con posibilidad de fragilización del acero, etc.

**CAPITULO IV**  
**CORROSION EN ESTRUCTURAS**  
**DE CONCRETO REFORZADO**

## **CAPITULO IV CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO**

### **MECANISMOS DE LA CORROSION DEL ACERO DE REFUERZO.**

La corrosión del acero de refuerzo puede ser de dos tipos: por ataque químico y por ataque electroquímico, siendo este último fenómeno corrosivo el que se presenta con mayor frecuencia, manifestándose por la formación de celdas galvánicas a lo largo de la varilla de refuerzo.

La corrosión de las varillas por ataque químico directo puede ocurrir por contacto con sustancias químicas corrosivas que se producen en algunos procesos industriales.

Una celda galvánica o electrolítica, se forma cuando hay una diferencia de potencial entre dos metales diferentes, es decir existe un ánodo un cátodo y un electrolito, al conectarse ambos metales con un conductor de electricidad, se establece un flujo de electrones que van del metal más activo o anódico al metal más noble o catódico, perdiendo material el ánodo; es decir, se corroe. Lo mencionado anteriormente de manera burda, ocurre en el interior del concreto reforzado, sin que se requiera de la presencia de dos metales diferentes. Esto sucede porque el acero, en este caso las varillas, casi nunca son homogéneas en su estructura interna, presentando zonas duras y zonas blandas, las primeras serán los cátodos y las segundas los ánodos, formándose celdas galvánicas.



El aire, oxígeno, humedad que penetran por los intersticios del concreto forman el electrolito y se inicia de esta forma la corrosión en los puntos de la varilla que surgen como ánodos actuando la propia varilla como conductor del flujo de electrones.

## **CONDICIONES QUE PROPICIAN LA CORROSION DEL REFUERZO EN EL CONCRETO.**

Teóricamente, el concreto que recubre a las varillas de acero de refuerzo proporciona protección suficiente para contrarrestar el fenómeno de corrosión electrofítica por efecto de dos principales acciones defensivas:

- 1) la resistencia física que el concreto opone a la penetración de agua y aire del exterior.
- 2) la inhibición del proceso corrosivo, por el elevado nivel de alcalinidad inherente del concreto.

En la práctica estas acciones defensivas varían pues dependen de la alcalinidad, integridad y espesor del recubrimiento superficial del concreto sobre las varillas, de la factibilidad que el concreto conserve su nivel de alcalinidad original en el curso del tiempo, de la agresividad del medio ambiente y de la propia calidad del concreto.

## **LA CALIDAD DEL CONCRETO.**

La calidad del concreto se evalúa en términos de su resistencia mecánica. como es la prueba de compresión, esta resistencia aumentará o disminuirá

dependiendo de la relación Agua/Cemento, que también actúa como parámetro de la permeabilidad de la pasta de cemento hidratada. Si es menor la relación Agua/Cemento habrá mayor resistencia mecánica y mayor impermeabilidad del concreto. Para evitar que el acero de refuerzo sufra daño por corrosión electrofónica, es necesario que el concreto de recubrimiento posea una baja permeabilidad al agua y al aire con el objeto de impedir su acceso y estos elementos agresivos no hagan contacto con el acero de refuerzo.

## **INTEGRIDAD Y ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.**

Si el concreto de recubrimiento es compacto, homogéneo y posee una reducida permeabilidad, debido a una baja relación Agua/Cemento, su grado de oposición a la penetración del agua y el aire dependerá de su integridad y grosor, la integridad es la ausencia de grietas y defectos en el concreto; el grosor neto corresponde al espesor de la costra de concreto que se localiza entre el lomo de las varillas y la superficie expuesta de la estructura. El agrietamiento en la superficie debe evitarse, puede ser inicio de entrada de humedad y contaminantes; en concretos con relaciones Agua/Cemento menores de 0.5, las fisuras en el recubrimiento no tienen efecto evidente en el proceso de corrosión del refuerzo. Dada la influencia perniciosa de los agrietamientos sobre la durabilidad de las estructuras de concreto, es recomendable evitarlas o por lo menos corregirlas cuando su presencia es inevitable. El espesor de la capa de recubrimiento es de gran importancia pues es la barrera que impide que los agentes agresivos penetren hasta las varillas de refuerzo, por este motivo es común que en los códigos de diseño de estructuras de concreto se requiera aumentar el espesor del recubrimiento en estructuras que estén en riesgo de corrosión ya sea por su

localización cercana al mar o en zonas urbanas e industriales. Sin embargo, los espesores reales serán menores que los nominalmente requeridos en el diseño.

En un estudio realizado en Australia, se analizaron las causas de la falta de durabilidad por corrosión del acero de refuerzo en 95 edificios con una edad no mayor de 16 años, construidos cerca de la costa a una distancia entre 150 m y 27 km. Por los resultados obtenidos se determinó que la causa principal fue el deterioro prematuro por corrosión del acero de refuerzo, por insuficiencia del espesor de recubrimiento de concreto, en 227 sitios afectados el espesor promedio fue de 5,5 mm con valores comprendidos entre 0 y 18 mm, estas deficiencias fueron mucho más frecuentes en losas y vigas, que en columnas y muros y la incidencia fue mayor en edificios pequeños que en grandes construcciones. En un estudio complementario se realizaron mediciones de espesores reales del recubrimiento de concreto en edificios y puentes, se hizo una comparación con los espesores nominales resultando mayores deficiencias en los edificios que en los puentes, estos resultados son antecedentes de mediciones efectuadas en más de 10,000 sitios de losas y trabes, los espesores reales fueron menores que los nominales el 62% de las veces en los edificios y el 49% en los puentes; de lo cual se concluye que deben incrementarse los espesores nominales de diseño a fin de protegerse contra deficiencias constructivas.

## **ALCALINIDAD DEL CONCRETO.**

El concreto constituye un medio fuertemente alcalino como consecuencia del hidróxido de calcio que libera durante la hidratación del cemento, esta alcalinidad tiene un pH comprendido entre 12 y 13, esta propiedad del concreto proporciona una excelente protección a las varillas de refuerzo contra la corrosión.

Una teoría explicativa postula que el acero de refuerzo en contacto con un medio así produce una variedad de óxido férrico que forma una delgada película en la superficie de las varillas e inhibe el proceso de la corrosión, mientras el concreto conserve el estado original de alcalinidad, las varillas de refuerzo permanecen en un estado de pasivación que las protege de la corrosión, incluso en presencia de agua y oxígeno. Sin embargo, dicho estado de pasivación puede verse afectado por la acción de dos principales agentes corrosivos: el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) cuyos efectos generan la reducción de la alcalinidad del concreto, destruyéndose la película protectora, iniciándose el desarrollo de celdas galvánicas de corrosión a lo largo de las varillas de refuerzo

## **EFFECTO DEL BIOXIDO DE CARBONO.**

El aire atmosférico contiene una reducida proporción de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que en un ambiente rural es del orden de 0.03% en volumen, pero se incrementa en zonas urbanas y fabriles. El  $\text{CO}_2$  contenido en el aire, al entrar en contacto con el concreto, reacciona con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) producido por la hidratación del cemento y forma carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), por lo que disminuye la alcalinidad del concreto y por ende la capacidad para mantener las varillas de refuerzo en estado de pasivación: si el pH del concreto desciende a menos de 11.5 es incapaz de conservar dicho estado. El fenómeno llamado carbonatación del concreto, es un proceso natural que genera condiciones favorables para la corrosión del acero de refuerzo. La penetración del  $\text{CO}_2$  a través del concreto, ocurre por un fenómeno de difusión, cuya velocidad depende de la concentración de gas en el medio ambiente. En condiciones así, es decir sin excesiva contaminación con  $\text{CO}_2$  y en concreto de buena calidad estructural, el proceso de carbonatación es lento y generalmente no alcanza a rebasar el espesor

del concreto de recubrimiento sobre las varillas siempre y cuando el espesor sea el especificado

Sin embargo, en una zona donde el medio ambiente es hostil, es decir hay un exceso de  $\text{CO}_2$  en el medio de contacto y el concreto es de baja calidad (muy poroso) y el espesor del recubrimiento de concreto es menor del requerido; en este caso el proceso de carbonatación puede llegar rápidamente a la profundidad de las varillas y desproverlas del estado de pasivación, dejándolas a merced de otros agentes corrosivos. Donde se pone de manifiesto la importancia que tiene la calidad del espesor del concreto de recubrimiento, para dar protección contra la corrosión del acero de refuerzo, cuando el medio es muy corrosivo, como suele ser en zonas urbanas con altos excesos de  $\text{CO}_2$ .

## **EFFECTO DE LOS CLORUROS.**

Los cloruros son sales, que desempeñan un papel importante como promotoras de la corrosión del acero de refuerzo, la acción de éstas tiene un doble efecto: la presencia de los cloruros en el concreto en contacto con las varillas incrementa su conductividad como electrolito y facilita el movimiento de iones ( $\text{OH}^-$  del cátodo al ánodo, en el cierre del circuito electrolítico, los iones de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), que entran en contacto con las varillas, dañan la película protectora de óxido ferroso que las protege de la corrosión, originando diferencias de potencial en la superficie de las varillas, creando millares de microceldas galvánicas e incluso macroceldas entre varillas contiguas.

La presencia de cloruros puede originarse de dos formas:

- 1) los cloruros pueden estar presentes en los ingredientes que se utilizan para la elaboración de la mezcla de concreto
- 2) por penetración a través del concreto de recubrimiento, pueden estar presentes en el medio de contacto externo, estructura, suelo

En el primer caso los cloruros pueden estar presentes en el agua de mezclado, los agregados y algún aditivo que se utilice. En el segundo, los cloruros provienen de medios externos como pueden ser el agua de mar, el ambiente marino, sales descongelantes, las aguas superficiales o salobres, algunos suelos y aguas fráticas. Para mitigar la corrosión por efecto de los cloruros incluidos en la mezcla de concreto en el momento de su elaboración, es necesario limitar el contenido de cloruros en los ingredientes. El código ACI 318 recomienda las siguientes limitaciones en el contenido máximo de cloruros solubles en agua para diferentes condiciones de exposición de las estructuras, los datos se expresan como porcentaje, ver tabla.

Condiciones de exposición	Contenido máximo de ion cloruro (cl <sup>-</sup> ) del concreto al entrar en servicio.
a) concreto presforzado: En todas condiciones.	0.06
b) Concreto reforzado convencional :	0.15
-Expuesto a penetración de cloruros	
-Exposición húmeda sin cloruros	0.30
-continuamente seco.	1.00

La posibilidad de que los cloruros penetren a través del concreto y alcancen las varillas de refuerzo, depende del grado de concentración de cloruros en dicho medio, de la capacidad del concreto a oponerse a su penetración y del espesor del recubrimiento.

Los medios de contacto cloruros-estructuras que comúnmente se conocen como corrosivos por contener altos contenidos en cloruros son:

- 1) el agua de mar, la brisa marina, los suelos.

2) las salmueras que resultan del uso de sales descongelantes en carreteras, aguas salobres de algunos lagos y albuferas y de zonas pantanosas cercanas al mar o con aguas geotermiales.

3) aguas fráticas y suelos que por diversas razones tienen altas concentraciones de estas sales.

Cuando se construya una estructura de concreto reforzado que tenga contacto con estos medios, deberá tenerse presente que hay un alto riesgo de penetración de cloruros externos y que se deberán tomar medidas de protección para evitar la corrosión del refuerzo. Para evaluar la resistencia u oposición a la penetración del ión cloruro se presenta un método rápido que consiste en medir la cantidad de electricidad (en coulombs) que se transmite a través de un espécimen de concreto expuesto en sus caras opuestas a soluciones de cloruro de sodio e hidróxido de sodio, se aplica una potencia de 60 voltios durante 6hrs. Pero se recomienda tener precaución con los resultados de la prueba, ver la tabla.



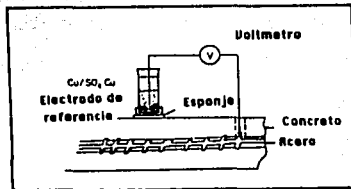
Carga eléctrica (coulombs)	penetración de cloruros	caso típico identificable
> 4000	Alta	Concreto convencional de cemento portland, con alta relación agua/cemento (>0.6)
2000-4000	Moderada	Concreto convencional de cemento portland con mediana y baja relación agua/cemento (0.6-0.4)
1000-2000	Baja	Concreto convencional de cemento portland, con muy baja relación agua/cemento (<0.4)
100-1000	Muy baja	Concreto modificado o sellado con látex
100	Despreciable	Concreto polimérico y concreto impregnado con polímeros.

## TECNICAS DE MONITOREO DE LA CORROSION DEL ACERO EN EL CONCRETO.

Las técnicas de monitoreo que permiten conocer el estado en que se encuentra el acero en el concreto, generalmente son técnicas electroquímicas, estas técnicas pueden aplicarse en estructuras reales, con el objetivo de conocer la velocidad de corrosión.

### TECNICAS ELECTROQUIMICAS.

La medida del potencial de corrosión del acero de refuerzo, se realiza con la ayuda de un electrodo de referencia que puede ser una solución  $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$  y el acero en contacto con el concreto, debe procurarse que exista un buen contacto entre el electrodo de referencia y el concreto, con el fin de minimizar las caídas óhmicas y evitar errores, a continuación se presenta un sistema para medir el potencial de corrosión de el acero en el concreto, ver figura.



La ASTM (American Society for Testing Materials) ha publicado una referencia en la cual se indican, las relaciones de potenciales y probabilidad de corrosión en

plataformas de puentes contaminados, estos rangos que no pueden aplicarse a aceros de refuerzo galvanizados, se muestran a continuación.

probabilidad de corrosión	E corr (vs Cl/CUSO <sub>4</sub> )
> 95%	< - 0,35
< 5%	> - 0,20
Aprox 50%	- 0,20 a -0,35

El mapeo de potenciales ha proporcionado una ayuda muy útil en las medidas en campo, el monitoreo consiste en medir localmente el potencial de el acero reforzado sobre la estructura total, las diferencias de potencial muestran las zonas anódicas (macrocelas) y su localización particular. El mapeo de potenciales en la actualidad es muy usado pero presenta riesgo cuando los resultados se interpretan erróneamente, por lo que se recomienda la consulta de especialistas para poder interpretarlos, tomando en cuenta la influencia de la humedad, discontinuidades en el concreto, etc.

#### MEDIDAS DE LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO.

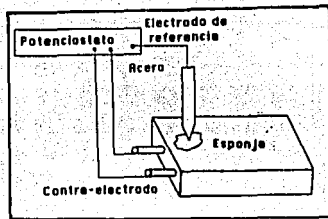
Este tipo de medidas se han usado en estructuras reales, se mide la resistividad en la superficie usando el método de Wenner, las medidas se realizan utilizando 4 electrodos y son muy fáciles de realizar usando un medidor de la resistencia de la tierra, dando resultados aproximados, se requiere la presencia de especialistas calificados, para evitar errores en la interpretación de resultados ya sea por humedad o campos eléctricos, la existencia de macrocelas que no pueden ser detectadas por las medidas de resistividad.

## MEDIDAS DE LA RESISTENCIA ELECTRICA.

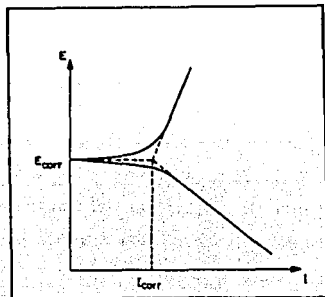
En esta técnica se realizan las mediciones de resistencia eléctrica de pequeñas y delgadas probetas inmersas en el concreto, considerando que la resistencia de un metal es inversamente proporcional a su espesor o diámetro entonces cuando ocurre la corrosión, la probeta se hace más delgada y su resistencia muestra un correspondiente incremento. Al ser muy difícil monitorear cambios muy pequeños en la resistencia directamente, Vassie, describió un tipo de probeta la cual puede ser colocada dentro del concreto. Esta técnica mide velocidades de corrosión integrada, dando información sobre el período durante el cual la probeta ha sido expuesta.

## CURVAS DE POLARIZACION.

Polarización se llama a un cambio en la intensidad de corriente que pasa a través del electrodo de trabajo, donde el potencial es medido con respecto al electrodo de referencia, la corriente se aplica a través de un electrodo auxiliar, las curvas de polarización se determinan por medio de un potencióstato, para experimentos en concreto el potencióstato constará de una compensación de la caída óhmica, o en su defecto deberá ser calculada separadamente. A continuación se muestra un sistema para obtener curvas de polarización de el acero en el concreto, ver figura.



La información proporcionada por las curvas de polarización, a través de métodos como son; método de intersección o método de la extrapolación de Tafel, del cual se obtiene la corriente de corrosión instantánea, también permite comparar el efecto de muchas sustancias despasivantes a través de la determinación del picado o rompimiento de potencial, proporciona información cinética, densidad de corriente de protección así como termodinámica; potenciales de protección, forma del ataque corrosivo: corrosión generalizada, por picaduras, pasivación, ver figura.



Existen tres tipos diferentes de polarización:

- a) potenciodinámica.
- b) potencioestática.
- c) galvanostática.

Las técnicas de polarización como son: potenciodinámica y potencioestática se basan en las medidas de corriente a potencia controlada, en tanto que la técnica galvanostática contempla cambios de potencial a corriente constante.

Cada una proporciona información diferente y se deberá seleccionar la más apropiada de manera de obtener la información más útil; a continuación se enumeran los errores más frecuentes con el empleo de esta técnica:

a) Cuando el acero dentro de el concreto, es polarizado a potenciales mayores que 5 a 10 mV entonces el medio que lo rodea cambia, por lo que la interfase metal-electrolito es diferente. Las curvas de polarización tienen un efecto destructivo y se tienen que utilizar nuevas muestras en cada ensayo.

b) La otra fuente de error que generalmente se ignora es la caída óhmica entre el electrodo de trabajo (el acero) y el electrodo de referencia, la cual tiene un efecto muy importante en los resultados. Esta caída óhmica se incrementa proporcionalmente al incremento de el potencial y no obstante que muchos potencioestatos compensan electrónicamente estas caídas óhmicas, sólo pocos de ellos tienen una compensación permanente que siga los cambios en la polarización, de preferencia

se debe compensar manualmente dicha caída a cada cambio de potencial. Cuando se opera galvanostáticamente hay forma de compensar la caída óhmica por lo que se corregirá separadamente el error por medio de cálculos matemáticos. La caída óhmica no sólo afecta el valor del potencial con respecto a la corriente sino que puede modificar la forma de la curva de polarización; a pesar que la curva así como el rango de potenciales es independiente del tamaño del electrodo, existe incertidumbre en cuanto a la superficie real polarizada.

#### POLARIZACION LINEAL.

Stearn and Geary mostraron que para un sistema simple, la curva de polarización al rededor del potencial de corrosión obedece a una relación lineal, la pendiente de esta relación es llamada " polarización lineal " o de resistencia de polarización.

$$R_p = \Delta E / \Delta I \quad (\Delta E > 0)$$

Esta pendiente está relacionada con la velocidad de corrosión instantánea a través de la ecuación de Stearn and Geary.

$$I_{corr} = B / R_p \quad ; \quad B = \beta_a \cdot \beta_c / 2.3 (\beta_a + \beta_c)$$

Donde:

I = Intensidad de corrosión

B = constante la cual depende de las pendientes de Tafel.

$\beta_a$  y  $\beta_c$  = pendientes de Tafel, que tienen valores comprendidos entre 13 y 52 mV dependiendo del sistema.

Para medir esto, es necesario un potencióstato el cual debe poseer compensación electrónica de la caída óhmica. Siguiendo los procesos de corrosión, se deben tomar medidas periódicas de los valores de velocidad de corrosión para ser graficados en función del tiempo, para obtener precisión de esta técnica, se deberán integrar las curvas  $i_{corr}$  VS Tiempo de esta manera la velocidad total de corrosión obtenida es introducida a la ley de Faraday, de la cual se obtendrá la pérdida de peso por centímetro cuadrado, el valor obtenido puede ser verificado por medio de medidas gravimétricas efectuadas sobre la misma muestra. Esta técnica es muy rápida y posee la ventaja de ser no destructiva. Las principales precauciones a considerar con el fin de obtener resultados confiables son:

a) La caída óhmica entre el electrodo de referencia y el de trabajo debe ser compensada electrónicamente o matemáticamente por medio de experimentos separados.

b) Modo de operación, esto es la velocidad de barrido de potencial deberá ser seleccionado antes de empezar la prueba, los tiempos de polarización en medidas  $R_p$  deberán ser lo bastante largos para permitir la desaparición de la componente transitoria, pero lo bastante cortos para evitar cambios en el sistema electroquímico a considerár.

Para muestras menores de  $10 \text{ cm}^2$  un período de espera de aproximadamente 30 seg o una velocidad de barrido de 10 mV/min ha sido



utilizada exitosamente; la aplicación de esta técnica al acero dentro del concreto ha proporcionado mucha información cuantitativa no obtenida antes en laboratorios.

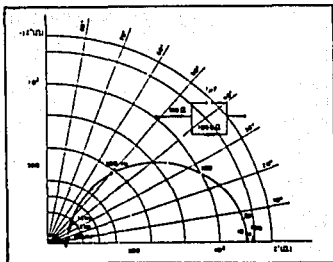
El mayor problema encontrado que se presenta en campo, en estructuras reales es definir el área sobre la cual el potencial o corriente se aplica, pero es posible utilizar esta técnica en pequeñas piezas de acero colocadas cerca del acero de refuerzo principal, este tipo de disposición no es capaz de detectar macro efectos galvánicos, sólo información acerca del efecto corrosivo del medio donde la pieza fue colocada.

#### IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA.

Recientemente esta técnica ha sido aplicada a aceros de refuerzo; esta técnica consiste en aplicar al electrodo de trabajo que es el acero de refuerzo un pequeño voltaje aplicado con el potenclostato en un amplio rango de frecuencias, utilizando un analizador de frecuencias digital, la respuesta en corriente a cada frecuencia, es otra señal del potenclostato con diferente amplitud medida como:  $\Delta I$  y un defasamiento relativo a la señal de entrada  $\Delta E$ .

La relación  $\Delta E / \Delta I$  es la impedancia del sistema, la cual es dependiente de la frecuencia. En el caso del concreto los valores de impedancia son obtenidos en un amplio rango de frecuencias, los cuales dependen de la longitud de la varilla así como de la velocidad de corrosión, los resultados pueden ser presentados utilizando diferentes diagramas, el más usual es el de Nyquist. Su uso en estructuras reales ha presentado dificultad que no ha sido superada esto debido a la discontinuidad de la corriente a lo largo de la varilla.

A continuación se muestra el diagrama de Nyquist.



#### RUIDO ELECTROQUIMICO.

La técnica de ruido electroquímico consiste en el análisis de pequeñas perturbaciones de voltaje en milivolts medidas en el potencial de equilibrio. Estas variaciones se han observado por varios investigadores, cuando existe corrosión por picaduras, las variaciones son registradas por un milivoltímetro de alta precisión, la señal de ruido es transformada del dominio del tiempo al dominio de frecuencias por medio de un analizador de frecuencias y graficado bajo la forma de amplitud contra frecuencia. El equipo utilizado consta de un milivoltímetro, un analizador y un micro computador, es una técnica recientemente estudiada, se han realizado pocos estudios, su aplicación a estructuras reales presenta el problema de encontrar fuentes muy diversas de ruido que podrían influenciar los resultados de ruido electroquímico.

## **TECNICAS NO - ELECTROQUIMICAS.**

Existen técnicas como las visuales y macroscópicas: estas observaciones proporcionan información sobre el área corroída, así como la profundidad, el número de picaduras y el área atacada por la corrosión, pero esta información tiene que ser complementada con otras técnicas ya que puede conducir a errores.

### **TECNICAS GRAVIMETRICAS.**

Durante muchos años las técnicas gravimétricas fueron las más precisas para medir la corrosión. Pero en el caso de la corrosión del acero en el concreto no lo han sido. La técnica gravimétrica o pérdida de peso, consiste en pesar el acero antes y después de su exposición en el concreto, la diferencia en peso es un promedio cuantitativo del ataque corrosivo. No es posible por medio de esta técnica medir velocidades de corrosión diferenciales o instantáneas, sólo la correspondiente al período de exposición. Cuando la corrosión por picaduras aparece, esta técnica puede ser complementada con observaciones visuales. Esta técnica es aplicable sólo en laboratorio, pero es útil para comprobar la precisión de las técnicas electroquímicas.

## TERMOGRAFIA INFRAROJA Y MEDIDAS DE RADAR.

Al presentarse la corrosión, ésta provoca vacíos así como delaminaciones, las cuales pueden ser detectadas por medio de un martillo, si el sonido emitido es hueco existe un área delaminada.

La termografía infraroja se ha usado para medir la temperatura de la superficie del concreto, sucede que cuando el concreto se calienta y se enfría durante el ciclo diario normal, el área de vacíos interrumpe las transferencias de calor; el termograma es una ilustración gráfica de consecuencias de una reducción localizada a procesos de corrosión. Los radares de suelo de alta penetración se han usado para detectar la deterioración del acero en el concreto. Se necesitan altas frecuencias para detectar delaminaciones. En estructuras pretensadas, se utilizan radiaciones gama para detectar huecos o vacíos en el concreto.

## **MEDIDAS DE PROTECCION CONTRA LA CORROSION DEL REFUERZO EN EL CONCRETO.**

Se consideran cuatro tipos de medidas de protección contra la corrosión del acero de refuerzo:

- 1) Protección natural del concreto de recubrimiento, este se obtiene por el empleo de una composición y un espesor adecuado, también por la ejecución de prácticas constructivas eficaces.
- 2) Protección mediante el uso de aditivos inhibidores de la corrosión o reductores de la permeabilidad, incluidos en las mezclas de concreto durante su elaboración.

3) Protección directa al acero de refuerzo, mediante la aplicación de un revestimiento anticorrosivo a las varillas o mediante protección catódica por corriente impresa o por protección catódica por ánodo de sacrificio que se explicó en el capítulo anterior.

4) Protección externa al concreto de la estructura por medio de tratamientos superficiales, que inhiben la penetración de los agentes corrosivos o evitan el contacto de estos agentes con el concreto.

### **PROPORCIONAR PROTECCION NATURAL AL CONCRETO.**

La protección natural que proporciona el concreto al acero de refuerzo, la constituyen ciertos aspectos inherentes a la composición del concreto, tales como la relación Agua/Cemento y el contenido original de cloruros; la magnitud del espesor del recubrimiento de concreto que se especifica en diseño deberá ejecutarse realmente durante la construcción y procurar un correcto curado al concreto de la estructura.

## RELACION AGUA CEMENTO.

Es de vital importancia la utilización de una menor relación Agua/Cemento en el concreto, en el informe ACI201.2R, se recomienda, ver la siguiente tabla.

Condiciones de exposición del concreto.	A/C Máxima
Contacto directo con agua o salpicaduras con alto contenido de cloruros ( mar, salmueras, etc.)	0.40
Contacto directo con agua o con salpicaduras de alto contenido de cloruros incremento en el recubrimiento de 13mm.	0.45
Hasta 8m por arriba y 30 horizontales, del alcance máximo de salpicaduras de agua de mar.	0.50

## ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO DE CONCRETO.

Numerosas estructuras han sufrido corrosión por no haberse especificado, un espesor generoso del recubrimiento de concreto y por la mano de obra no calificada o no supervisada. En esta situación pudieran estar algunas estructuras construidas en zonas costeras, al no tomar en cuenta el medio ambiente, en este caso la brisa marina que lleva un alto grado de cloruros, que pueden ser del orden de 0.20mg de NaCl por  $\text{cm}^2$  de superficie expuesta. Se ha propuesto un incremento del espesor de recubrimiento en climas tropicales, a continuación se presentan espesores de recubrimientos recomendados (las unidades son en mm) para algunas condiciones de exposición:

	A.C = 0.60	A.C = 0.50	A.C = 0.45	A.C = 0.40
Ambiente exterior tropical, no industrial, entre 1 y 50 km de la orilla del mar.	50	40		30
Ambiente tropical a menos de 1 km de la orilla del mar.		60		50
Contacto con agua, o salpicaduras de alto contenido de cloruros.			90	75

Es conveniente que al especificarse el recubrimiento se incrementen los espesores nominales en aproximadamente 10 mm, para contrarrestar las deficiencias constructivas que son frecuentes. Es costumbre la de curar adecuadamente el concreto, como una medida de protección contra su deterioro prematuro.

### **ADITIVOS INHIBIDORES DE CORROSION.**

Los aditivos inhibidores de corrosión se clasifican en dos tipos: los inorgánicos y los orgánicos. Los primeros son sales inorgánicas que se vienen utilizando hace mucho tiempo aproximadamente 25 años, para contrarrestar el efecto de la corrosión. Los segundos son compuestos orgánicos que se han desarrollado recientemente. Hay tres tipos de aditivos inorgánicos inhibidores de la

corrosión, que son los anódicos, catódicos y mixtos, se denominan así por el lugar de la celda de corrosión donde ejercen su acción inhibitoria.

Los aditivos anódicos compiten con los iones de cloro  $Cl^-$  para reaccionar con los iones férricos ( $Fe^{++}$ ) que se liberan en el ánodo, anulando el efecto dañino de los cloruros. Los catódicos son sustancias alcalinas, que "absorben" electrones, por lo tanto desempeñan la función de cátodo, inhibiendo la formación de celdas de corrosión. Los aditivos mixtos, son combinaciones de los antes mencionados. Entre los aditivos inorgánicos el más conocido y utilizado es el nitrato de calcio, cuya eficacia como inhibidor de la corrosión del acero de refuerzo se ha comprobado en numerosas pruebas y aplicaciones. Para su dosificación en el concreto debe conocerse necesariamente el contenido de cloruros en el medio externo, para poder contrarrestar eficazmente la corrosión. Recientemente se ha investigado un material inhibidor de la corrosión del refuerzo en el concreto, es un compuesto de naturaleza orgánica que se define como un aditivo base-agua que se forma por aminas y esteroides, aunque se considera mejor que el nitrato de calcio según pruebas realizadas, todavía no se conocen resultados en aplicaciones prácticas que lo confirmen.

## **ADITIVOS REDUCTORES DE LA PERMEABILIDAD.**

Los aditivos reductores de la permeabilidad del concreto reforzado son: la ceniza volante "fly ash" y la microsíliza "silica fume" y el látex que es una emulsión acuosa de polímeros derivados del hule sintético y cuyo uso como aditivo de morteros y concretos se ha extendido en los últimos años. La ceniza volante es el subproducto resultante de la combustión del carbón mineral, que en procesos industriales se utiliza como combustible. Esta ceniza está compuesta de esferas de



silíce vítrea con una finura semejante al cemento, en diversos países se utiliza como aditivo para concreto por sus propiedades mecánicas; una propiedad de la ceniza volante es reducir la permeabilidad del concreto y por ende mejorar la protección del acero contra la corrosión, porque se impide la penetración de agentes corrosivos (agua, oxígeno,  $\text{CO}_2$  cloruros). Sin embargo, hay que tener precaución en su uso ya que la reacción puzolánica con el hidróxido de calcio reduce la alcalinidad del concreto y su eficacia como medio de pasivación del refuerzo.

La microsílíce es el subproducto obtenido en la producción de silicio metálico y aleaciones ferrosilícicas en hornos eléctricos de arco, está compuesta por microesferas de sílice vítrea casi pura, con tamaño 75 veces menor que las partículas de cemento, la característica de este aditivo es reducir la porosidad de la pasta de cemento hidratada y por ende reducir la permeabilidad del concreto endurecido, actualmente es considerado uno de los medios más eficaces para dar protección contra la corrosión a los aceros de refuerzo.

La emulsión látex es una solución acuosa con pequeñísimas partículas de polímeros de hule sintético, cuyos tamaños varían de 0.05 a 5 micras y el contenido de sólidos entre 40 y 50% en peso. Esta emulsión en la pasta de cemento modifica la estructura del gel, formando una película continua de polímero, aumenta la resistencia a la tensión, la tenacidad, la adhesividad y la resistencia a la penetración de la humedad, este último beneficio proporciona mayor protección al refuerzo en el concreto contra la corrosión.

## **PROTECCION DIRECTA AL ACERO DE REFUERZO.**

Revestimientos anticorrosivos se aplican al acero de refuerzo y pueden ser metálicos o no metálicos, entre los metálicos el más usado es el cinc que se aplica

a las varillas de acero por un procedimiento electrolítico de galvanizado. El revestimiento no metálico es el de mayor utilización para cubrir varillas de refuerzo, se realiza con resinas epoxy, las cuales se aplican por fusión electrostática, con el fin de obtener superficies rugosas que permitan lograr una adecuada adherencia con el concreto. Estos tratamientos se aplican en plantas especializadas, se recomienda tener mucha precaución en el transporte y en el manejo durante la construcción, ya que pueden sufrir deterioro y propiciar puntos de entrada de agentes agresivos que inician la corrosión.

También se recomienda para el acero de refuerzo la protección catódica, que se realiza a través de la corriente impresa y el ánodo de sacrificio o ánodo galvánico, como explicó en el capítulo anterior.

## **PROTECCION EXTERNA AL CONCRETO EN LA ESTRUCTURA.**

Cuando una estructura de concreto reforzado está ya construída, un procedimiento usado para protegerla de la acción de la corrosión, es la aplicación de un material o sustancia que impida el contacto directo entre agentes corrosivos y el concreto, el medio agresivo puede estar compuesto por: agua, sales disueltas, oxígeno y bióxido de carbono. Las sustancias y materiales de aplicación externa son: morteros y concretos.

La aplicación de una capa de mortero o concreto directamente a la estructura en la superficie expuesta a la intemperie, incrementa el espesor de recubrimiento sobre las varillas y todavía esto es mejor si la capa de mortero posee una resistencia mejorada a la penetración de agentes corrosivos, cuidando siempre que exista una perfecta adherencia entre mortero y la estructura por proteger. Los

morteros y concretos para esta aplicación se elaboran con agregados ordinarios, pero con diferentes aglutinantes, los de uso más frecuente son los siguientes:

- 1) De cemento portland, con baja relación A/C .
- 2) Con cemento portland modificado con inclusión de emulsión látex.
- 3) De cemento portland, con inclusión de polímeros constituido por una resina y un endurecedor.
- 4) De aglutinantes diferentes al cemento portland, tales como resina epoxy, poliéster y poliuretano.

Posiblemente los más usados de todos los anteriormente mencionados son los de cemento portland modificado con inclusión de látex ya que presenta dos características; resistencia a la penetración de agentes corrosivos y su buena conductividad con el cemento de uso normal.

## **TELAS Y LAMINAS PREFORMADAS.**

Las telas y láminas tienen la función de impedir el paso de la humedad y la penetración de algunos agentes corrosivos como los cloruros, las telas plásticas suelen ser de polietileno, cloruro de polivinilo o fibra de vidrio y las láminas elásticas o elastómeras, las cuales se producen a base de neopreno, hule butilo, cloruro de polivinilo plastificado, etc. El objetivo en el uso de estas telas y láminas, es lograr hermeticidad en las juntas mediante una buena unión.

## **LIQUIDOS QUE FORMAN PELICULA.**

Existen compuestos líquidos que al secar forman una película elastomérica, estos se aplican sobre la estructura expuesta al medio corrosivo, para impedir el paso de la humedad y proteger el acero de refuerzo. Estos compuestos son productos que pueden ser de un sólo componente o de dos o más, que deben premezclarse y homogeneizarse antes de su empleo, siguiendo las instrucciones de su fabricante. Los usos más frecuentes son a base de neopreno y combinaciones de neopreno con materiales bituminosos y resinas epoxi plastificadas, la aplicación de estos líquidos puede hacerse con espátula, cepillo, rodillo, brocha o con equipo de aspersión a presión.

## **LIQUIDOS QUE ACTUAN POR PENETRACION.**

Para mejorar la resistencia del concreto a ser penetrado por la humedad, agua y en especial cloruros, la aplicación de estos líquidos se realiza por impregnación, con el objetivo de tapar u obtener los intersticios del concreto, este método proporciona gran resistencia e impermeabilidad, este procedimiento se realiza in situ, impregnando previamente el concreto con un monómero de baja viscosidad, para la polimerización existen diversos medios; al constituirse el polímero se produce la obturación de los poros superficiales del concreto impregnado, pero existe un problema, no es fácil la aplicación del producto en condiciones de obra por lo que su empleo se limita al tratamiento de elementos prefabricados y partes de estructuras especiales. Otro tratamiento de impregnación del concreto de más fácil aplicación es a base de silanos o compuestos hidrogenados de silicio que en diversas pruebas han demostrado ser eficaces barreras contra la humedad, contra los iones cloruro, etc. Por último hay tratamientos de sellado por impregnación a

base de silicatos líquidos, que al penetrar en el concreto reaccionan con el hidróxido de calcio del concreto, taponan los poros superficiales del concreto y por ser insolubles lo hacen más resistente a la penetración del agua y de las sales corrosivas.

## **EVALUACION DEL ESTADO CORROSIVO.**

Para hacer una evaluación sobre el grado de corrosión en una estructura de concreto reforzado a continuación se enumeran, inspecciones, revisiones de rutina, pruebas:

1) Examen visual: es fundamental hacer una inspección de rutina dentro de los programas de mantenimiento de estructuras de concreto, el objetivo es descubrir oportunamente cambios repentinos observables, aún cuando su utilidad es reducida, como para descubrir un síntoma por corrosión del acero en el concreto, ya que cuando se hace visible es por que la estructura se encuentra en un estado avanzado de corrosión, es preferible descubrir la corrosión cuando aparecen las primeras fisuras o manchas de óxido superficiales.

2) Prueba de percusión: mediante golpes en la superficie de la estructura con un instrumento apropiado, es posible identificar zonas con diferente sonido de respuesta, cuando se golpea una superficie y se amortigua el sonido esto indica que hay menos compacidad en el recubrimiento o existe laminación por inicio de corrosión en el metal de refuerzo, se puede verificar la corrosión haciendo una ranura en el recubrimiento de la varilla, se hace lo siguiente: se marca la posición de las varillas y se golpea consecutivamente esta superficie a lo largo de las varillas, si hay corrosión el concreto cederá fácilmente, en caso contrario costará

trabajo llegar a las varillas lo cual indica que es concreto sano, esto se puede hacer con un martillo de rebote conocido con el nombre de esclerómetro.

## **ALCALINIDAD DEL CONCRETO.**

Se considera una alta alcalinidad del concreto si el pH es superior a 11.5, esto protege al acero, es decir se encuentra en un estado de pasivación el refuerzo, si el pH es menor es posible que la carbonatación del concreto por efecto del CO<sub>2</sub> haya creado condiciones propicias para la corrosión de las varillas, ya que el proceso de carbonatación avanza desde la superficie expuesta hacia el interior del concreto. Se puede medir la variación del pH del concreto con su profundidad, esto es posible mediante perforaciones en seco, con un instrumento llamado martillo rotatorio con diámetros entre 10 y 20 mm de modo que a diferentes profundidades se realice la evaluación del pH, que de manera rápida se puede hacer con una solución de fenoftalefina con concentración al 5%.

## **CONTENIDO DE CLORUROS.**

La presencia de cloruros en el concreto de refuerzo rebasando ciertos límites, constituye un grave peligro ya que acelerará el proceso corrosivo. La determinación de la cantidad de cloruros a diferentes profundidades, es un factor útil que permite evaluar el grado de corrosividad en las inmediaciones de las varillas y esto se logra mediante la perforación del concreto, obteniéndose pequeñas partículas de polvo de concreto, estos polvos se analizan la solubilidad respecto a soluciones como; agua, ácido nítrico. Aunque los cloruros que más preocupan son los solubles en agua, un parámetro rápido que permite obtener cloruros, es la determinación en ácido y si estos cloruros exceden los límites

permitidos, se determinan en agua, considerando que los cloruros solubles en agua son el 75%, de los solubles en ácido. La siguiente tabla muestra los % de cloruros permitidos por el comité ACI 222 de cloruros solubles en ácido.

contenido máximo de cloruros

Clase de concreto	% del cemento en peso	% del concreto
Concreto presforzado	0.08	0.01
Concreto reforzado convencional	0.20	0.03

### ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO DE CONCRETO.

Sabiendo hasta qué profundidad llega el efecto dañino del  $\text{CO}_2$  y los cloruros es posible definir la capa de concreto que ya no brinda protección a las varillas contra la corrosión, además se puede suponer si el grosor afectado es menor que el recubrimiento esto nos indica que hay concreto sano que protege al acero. Sabiendo por experiencia que los espesores reales de recubrimiento de concreto tienden en la práctica a ser menores que los nominalmente especificados, conviene verificar el espesor real, para tal fin, existen dispositivos electromagnéticos localizadores del refuerzo llamados pacómetros que permiten evaluar el espesor del recubrimiento con rapidez y sin dañar el concreto, pero los resultados que se obtienen no son siempre confiables, se recomienda complementar los experimentos con ranuras superficiales que permiten observar visualmente el estado físico de las varillas.

## MEDICION DEL POTENCIAL ELECTRICO.

Esta prueba consiste en medir el potencial eléctrico que existe entre las varillas de refuerzo y el concreto que las recubre, como una forma de evaluar el grado de corrosividad del medio dentro del concreto, si las varillas están en la fase de pasivación el movimiento de ( $e^-$ ) electrones es nulo o reducido, en caso contrario existe un gran movimiento de electrones lo cual nos indica el potencial eléctrico que existe en el circuito eléctrico de corrosión. Esta medición se realiza mediante una media-celda sulfato de cobre, un voltímetro de medición en serie, el procedimiento de funcionamiento está reglamentado por el ASTM C 876 y el criterio de resultados es el siguiente:

Lectura en la media celda (Volts)	Interpretación
Más positiva que - 0.20	Hay probabilidad del 90% que no exista corrosión del refuerzo en el momento de medición.
Entre -0.20 y -0.35	Hay Incertidumbre sobre la actividad corrosiva en la zona.
Más negativa que -0.35	La probabilidad de corrosión es del 90% en el momento de medición.

Las ventajas de este procedimiento de medición es, su facilidad de ejecución y la gran extensión superficial de concreto que se puede examinar en corto tiempo se dice que hasta  $90 \text{ m}^2/\text{hora}$ , esto lo hace muy útil para monitorear, grandes estructuras de concreto reforzado como pueden ser: losas y pavimentos de



concreto reforzado, pero existe un inconveniente que la prueba no proporciona una información precisa y los resultados sólo se pueden tomar con carácter comparativo.

## **REPARACION DE DAÑOS POR CORROSION.**

Al realizar un trabajo de reparación por daños a una estructura de concreto por efecto de la corrosión del acero de refuerzo conviene definir las causas que propiciaron la corrosión ello dará la pauta para una buena solución del problema y un acertado procedimiento de reparación. Se pueden considerar tres causas comunes de corrosión precoz:

- 1) La insuficiencia en el espesor del recubrimiento de concreto.
- 2) Por elevada corrosividad en el entorno externo de la estructura construída.
- 3) Por deficiencia de la calidad del concreto, por ser muy poroso.

Si la causa es el espesor del recubrimiento, debe comprobarse el grado de corrosividad del medio externo, a fin de dar una solución para recomendar un espesor que contrarreste el efecto del medio externo, debe realizarse una inspección en otras áreas de la estructura, con el objetivo de observar insuficiencias del espesor de recubrimiento de concreto. Si la causa es la excesiva corrosividad del medio de contacto externo, es conveniente reparar el concreto dañado con un material diferente, aplicando una protección adicional a la superficie reparada, debe removerse el concreto dañado, se remueve fácilmente ya que con pequeños golpes se desintegra y el concreto sano es resistente no tan fácilmente se remueve.

a continuación se presenta una tabla que establece cuándo remover el concreto dependiendo del contenido del contenido de cloruros que contenga:

contenido de cloruros (kgcl <sup>-</sup> / m <sup>3</sup> concreto.	Plan de remoción de concreto
Menos de 0.6	Dejar el concreto sin remover
Entre 0.0 y 0.12	Remoción dudosa; depende de la decisión del propietario.
Más de 1.2	Remover el concreto hasta descubrir el lecho superior de las varillas de refuerzo.

Si la causa de corrosión es la mala calidad del concreto por haberse usado una relación Agua/Cemento más alta de la conveniente; se recomienda hacer la reparación del concreto dañado utilizando un concreto de baja relación Agua/Cemento, dando un recubrimiento externo generoso y aplicar una protección adicional externa a toda la superficie expuesta a los agentes corrosivos.

## **PRACTICAS QUE SE RECOMIENDAN.**

Las prácticas que se recomiendan por su eficacia en trabajos de reparación de estructuras de concreto dañadas por la corrosión del acero de refuerzo, a continuación se describen brevemente.

La zona afectada; debe conocerse con precisión la zona afectada por el deterioro, deberán trazarse áreas cuadradas o rectangulares, con esquinas en angulo recto, se marcarán estos trazos en la estructura con el fin de que sirvan de guía en la remoción del concreto dañado.

Remoción del concreto: se hará una ranura perpendicular a la superficie del concreto, esto se puede hacer con una sierra de disco, sobre el contorno de las áreas marcadas; la profundidad de la ranura estará comprendida entre 10mm y 13 mm aproximadamente, se puede utilizar herramienta de mano, pero si es amplia el área puede utilizarse martillos neumáticos o eléctricos de poco peso, la remoción llegará por lo menos hasta descubrir totalmente las varillas corroídas dejando un espacio libre de 25 mm por debajo de ellas hasta en contrar concreto sano.

### **LIMPIEZA DE LAS VARILLAS:**

Se removerá totalmente la herrumbre que cubre las varillas, hasta dejar la apariencia de metal blanco, es preferible hacer la limpieza con chorro de arena, en toda la superficie de la varilla, verificando que esté limpia de herrumbre toda la varilla.

### **EVALUACION DE LAS VARILLAS:**

Si después de la limpieza de las varillas conservan el 80% de su sección transversal, se puede continuar la reparación sin el empleo de acero de refuerzo adicional, en caso contrario se adicionará acero o en su defecto se substituirá por varillas equivalentes, verificando la ejecución de los traslapes requeridos o empalmes o conectores.

### **PROTECCION DE LAS VARILLAS.**

Se recomienda después de la rehabilitación de varillas una aplicación de lechada Agua/Cemento, que esté suficientemente espesa para su aplicación con brocha y antes de secar la lechada se aplicará el nuevo recubrimiento de concreto.

## **MATERIAL DE REPOSICION.**

Después de la remoción del concreto dañado y rehabilitación del acero de refuerzo corroído, hay posibilidad de elegir entre los siguientes materiales recomendados.

- 1) Morteros o concretos convencionales de cemento portland, con una relación Agua/Cemento adecuada a las condiciones de exposición.
- 2) Morteros o concretos de cemento portland, con aditivos inhibidores de corrosión o con aditivos reductores de permeabilidad o modificados con látex.
- 3) Morteros o concretos de cemento sin contracción, predosificados en seco listos para usarse.
- 4) Morteros o concretos con aglutinantes distintos al cemento hidráulico, como las resinas epoxi.

Se deberá tomar en cuenta el área de reparación ya que si es de gran extensión como la losa de un puente, es conveniente usar material de reposición, pero si se trata de reparar un bache lo recomendable es utilizar concreto convencional de cemento portland sin contracción, posteriormente aplicar un recubrimiento a toda la superficie incluyendo áreas recién reparadas.

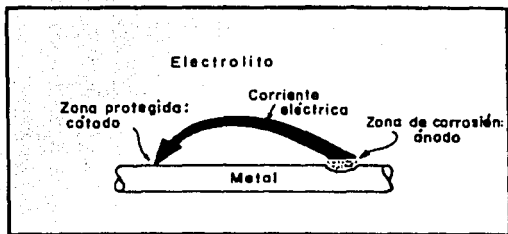
# CAPITULO V

## CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO PRESFORZADO

## CAPITULO V CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO PRESFORZADO.

### LA PILA GALVANICA EN EL CONCRETO PRESFORZADO.

La corrosión en estructuras presforzadas es más grave que en estructuras de concreto reforzado debido a que en ellas se utilizan tendones compuestos por alambres que son muy vulnerables a corroerse. Estos tendones se emplean en miembros de estructuras muy importantes como puentes atirantados, estructuras fuera de la costa, grandes edificios para estacionamiento, etc. Es por estas aplicaciones que el acero de presfuerzo ha generado una preocupación creciente y el deseo de tener un mayor conocimiento sobre los efectos ambientales tanto en zonas costeras como en las urbanas. Los tendones tienen una sección transversal de área relativamente pequeña sujeta a esfuerzos muy grandes; cuando un tendón no es protegido adecuadamente y queda expuesto al medio ambiente que lleva gran cantidad de contaminantes y humedad puede fallar fácilmente. El acero generalmente presenta discontinuidades en su estructura que facilitan la creación de celdas galvánicas en la superficie no protegida, como se muestra en la figura.



La celda galvánica se forma de la siguiente manera: la zona protegida del tendón será el cátodo, la zona no protegida del tendón constituirá el ánodo, ésta es la zona que sufrirá corrosión; el tercer elemento es el electrolito el cual se encuentra formado por el medio ambiente reinante que se encuentra saturado de contaminantes, humedad, lluvia ácida, etc.

Estos son los tres elementos básicos para la formación de una pila galvánica. Existe un gran cátodo a lo largo del tendón (zona protegida) y un pequeño ánodo que perderá paulatinamente metal, formando una picadura que pondrá en grave peligro la seguridad de la estructura, más aún porque el acero de presfuerzo está sujeto a esfuerzos de tensión muy altos por lo que puede ocurrir el colapso de la estructura. También hay riesgos de la formación de gas hidrógeno por el mismo proceso de la acción galvánica; el acero de presfuerzo es susceptible a la fragilización por hidrógeno.

### **PELIGRO DE FALLA EN EL CATODO POR PENETRACION DE IONES DE HIDROGENO EN LAS FIBRAS A TENSION.**

El concreto prestozado, en comparación con el reforzado fue considerado como un material aún más resistente a la corrosión porque carecía de grietas, por efecto del presfuerzo. Existía la creencia muy difundida de que sólo se requería asegurar una buena calidad de materiales y de mano de obra para prevenir la corrosión en las estructuras de concreto de presfuerzo. Sin embargo se ha observado que el acero de presfuerzo es más peligroso porque puede fallar por penetración de iones de hidrógeno en el cátodo.

Este fenómeno consiste en que los daños se producen, no como resultado de eliminación o disolución del metal, sino de hidrógeno formado catódicamente. El hidrógeno en estado atómico penetra en la estructura del metal donde se recombina rápidamente para formar hidrógeno molecular. Al tener un tamaño muy pequeño, el hidrógeno atómico puede penetrar en el interior de la red cristalina del acero, acumulándose preferentemente en la superficie de las partículas u otros constitutivos estructurales del acero de presfuerzo, que presentan una gran capacidad de absorción para el hidrógeno. El agrietamiento del metal puede iniciarse como resultado de la presión interna ejercida por el exceso de hidrógeno que provoca un efecto desfavorable sobre la capacidad de deformación y más particularmente sobre el comportamiento plástico del metal, el que no presenta deformaciones visibles y se colapsa súbitamente.

### **EJEMPLOS DE FALLAS POR CORROSION DEL ACERO DE PRESFUERZO EN EL EXTRANJERO.**

Las fallas ocurridas en el acero de presfuerzo son de un alto costo porque comúnmente este acero se utiliza en estructuras de gran magnitud como son los puentes. A continuación se presentan fallas en estructuras de este tipo ocurridas en el extranjero.

**El puente sobre el río Azergues en Francia** fue construido en 1962. Estaba formado de vigas de concreto postensado. Se hizo una inspección para conocer las condiciones estructurales y de servicio del puente en 1972, durante la cual se observó un agrietamiento considerable de las vigas. El número de vigas agrietadas fue aumentando conforme pasaba el tiempo. Una



revisión cuidadosa posterior arrojó los siguientes resultados: de 144 cables, 16 cables se encontraban en óptimas condiciones es decir, en ellos la inyección de mortero para la protección del acero era completa, 38 cables mostraban un inyectado parcial es decir incompleto, 80 cables no tenían inyección de mortero. y 10 cables no tenían inyección ni tensión. Este resultado indicaba una deficiencia de la mano de obra y un descuido por parte de la empresa que supervisó la ejecución de la obra. Al carecer de protección la mayoría de cables, se generó una corrosión bastante intensa, y aparecieron fallas en el acero de presfuerzo, como resultado de la penetración de cloruros. La solución fue reemplazar la superestructura del puente.

**El 4 de diciembre de 1985, el puente Ynys-y-Gwas en la Gran Bretaña se colapsó sin previo aviso. Era un puente de dovelas simplemente apoyado, de 18.3m de claro, construido en 1953.**

El puente estaba formado de nueve vigas interiores de sección I, cada viga se encontraba formada de ocho tramos (dovelas) precoladas, con un diagrama transversal en el extremo de cada tramo. Las vigas exteriores de los paramentos, de sección cajón, eran de una construcción similar de dovelas. El puente fue postensado longitudinalmente y transversalmente, todas las juntas entre dovelas prefabricadas eran de mortero cemento de 2.5 cm. de espesor. A través de los años, los cloruros se introdujeron por el mortero y llegaron a los cables. El puente había sido inspeccionado 10 veces, habiéndose realizado la última inspección en junio de 1985. Ninguna de las inspecciones reportó alguna señal de debilitamiento. En el momento del colapso, en que afortunadamente no había tránsito, se cayeron todas las nueve vigas interiores quedando en pie sólo las vigas de los paramentos. Se observaron longitudes corroídas de alambres

con poca inyección de mortero. Hubo evidencia de la corrosión de un cable que ocurrió antes de ser inyectado con el mortero como consecuencia de desgaste del sistema anticorrosivo y demoras en la construcción.

## **EJEMPLOS DE FALLAS POR CORROSION DE EL ACERO DE PRESFUERZO EN MEXICO.**

**La Falla de el puente "Papagayo"** ocurrió el día viernes 29 de marzo de 1985, aproximadamente a las 6 de la mañana.

La estructura se encontraba ubicada en el km 30+748 del tramo Acapulco-San Marcos de la carretera Acapulco-Pinotepa Nacional, sobre el río Papagayo en la costa chica del Estado de Guerrero.

### **DESCRIPCION DEL PUENTE ANTES DEL COLAPSO.**

La estructura estaba esviada aproximadamente 10° a la izquierda y estaba formada por 5 tramos libremente apoyados; los dos tramos extremos laterales eran de concreto presforzado con 4 vigas de 40 m de claro y los tres centrales de 2 vigas de concreto reforzado de 34 m de claro.

La subestructura estaba formada por 2 estribos en "U" de mampostería y por 3 pilas de concreto reforzado sobre cilindros del mismo material. Tenía una longitud total de 183.5 m.

Las pilas eran de sección hueca y tenían un cabezal de 7.8 x 1.6 mts. sobre el cual se apoyaba el tablero del puente a través de unos dados de 75 cm. de altura. Las pilas centrales se apoyaban en cilindros de cimentación de 5 m. de diámetro. Los estribos eran de mampostería con cabezales de concreto.

#### DESCRIPCION DE LA FALLA.

Se colapsaron los tramos 4-5 y 5-6 de la super estructura y la pila nº 5

La falla se produjo por corrosión en un tramo presforzado, el cual se colapsó sin previo aviso sin deformaciones visibles, como herrumbre o grietas que dieran indicios de problemas por corrosión. El colapso se inició en el tramo 5-6 el cual presentaba una falla por flexo-torsión aproximadamente en la sección al centro del claro. En el momento del colapso afortunadamente no había tránsito en la carretera.

La liberación súbita del presfuerzo en los cables longitudinales de este tramo originó una fuerza lateral de gran magnitud que ocasionó que la pila nº. 5 se volcara hacia la margen derecha. Aparentemente este volcamiento fue facilitado porque el refuerzo vertical de esta pila no se encontraba anclado en el tapón del cilindro correspondiente. Al volcarse la pila nº. 5 cayó el tramo 4-5 con una trayectoria inclinada hacia la margen derecha por lo que golpeó y produjo daños importantes en la pila nº. 4.

La pila nº. 4 presentaba un notorio desplome hacia la margen derecha y presentaba una importante fractura horizontal aproximadamente a un metro de la sección de unión con el tapón superior de el cilindro. Los apoyos del tramo 3-4

sobre la pila n°. 4 eran móviles tipo mecedoras y se desplomaron por el impacto que sufrió la pila n°5.

Se observaron grietas horizontales de aberturas importantes, en la sección de unión de los tapones superiores a los cuerpos de los cilindros en todas las pilas, también la pila n°. 3 presentaba fisuras horizontales en su cuerpo. La caída de 2 tramos de la superestructura ocasionó daños en el estribo n°. 6 que presentó una gran desconchadura en los lados aguas abajo del cuerpo frontal y semídestruidos los bancos de apoyo, en la corona de la pila n°. 4 presentaban semídestruidos los bancos en que se apoyaba el tramo 4-5.

Pudieron observarse algunos cables longitudinales rotos pertenecientes a las traveses extremas. Los alambres de estos cables presentaban deterioros importantes por corrosión, en forma de picaduras penetrantes y óxido superficial existente. Las secciones de corte de algunos de estos alambres eran antiguas pues presentaban una superficie roma y oxidada y unas cuantas presentaban indicios de una falla reciente con una superficie de aristas vivas y brillantes; algunos alambres además de estar rotos presentaban secciones estranguladas como si el acero hubiera fluído bajo tensión; las mecedoras de apoyo móvil del tramo 5-6 sobre la pila n°. 5 se encontraron intactas aún cuando a gran distancia de su posición original.

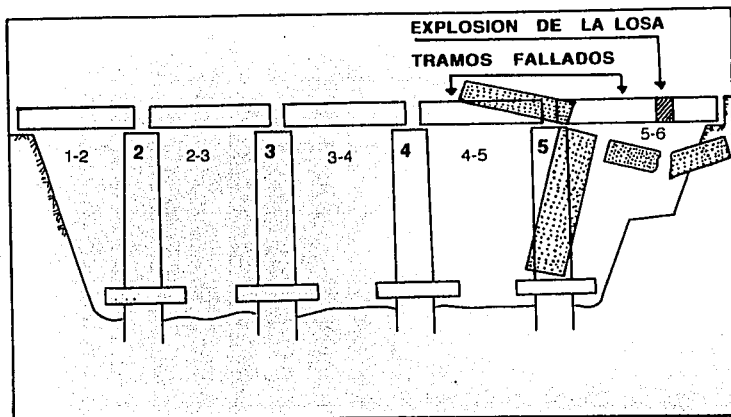
La pila 4 presentaba unas grietas importantes, siendo la principal una grieta más o menos horizontal a un metro del tapón del cilindro y una abertura de 2cm. Así mismo existía una gran grieta horizontal a unos 80 cm. de la parte superior del cilindro de cimentación; la pila presentaba un desplome de 20 cm.

hacia Acapulco, y el apoyo móvil (dado de concreto) se encontró inclinado hacia Pinotepa Nacional y muy fisurado.

Las pilas 2 y 3 presentaron un agrietamiento generalizado, con aberturas en las grietas de 1 a 2 mm, y sentido vertical predominantemente a unos 80 cm. de la parte superior de los cilindros de cimentación, supuesta unión entre el tapón del cilindro y el cilindro, había una grieta horizontal con algunos quiebres de abertura variable.

En el tramo presforzado 5-6 del lado de Pinotepa Nacional, aproximadamente en el tercio central de una viga estaba la zona de falla: el acero de presfuerzo compuesto por cables de 12 hilos de 7 mm se encontró muy corroído por falta de lechada o por una inyección deficiente. Las puntas de algunos hilos de presfuerzo se encontraban totalmente oxidadas, signo de que estos hilos se habían roto con anterioridad a la falla de la estructura.

Los ductos de presfuerzo estaban formados por tramos empalmados de 80 cm, en uno cuyos extremos se ensanchaban. El anclaje de 12 alambres de 7mm de diámetro llevaba incorporado un tapón con agujeros para inyectar el cable, pudiéndose observar en algunos de esos agujeros un tapón de madera; del resto de los tramos de la superestructura no se pudo observar nada por falta de medios de acceso. Presentamos en la siguiente figura un esquema del puente caído.



### CONCLUSIONES.

Se puede concluir de lo anteriormente comentado que la falla se produjo en el tramo presforzado 5-6 por corrosión del acero de presfuerzo, la causa fue la inyección deficiente de los ductos que envuelven al acero de presfuerzo la cual originó la entrada de humedad y cloruros provocando la corrosión del acero; y esto provocó a su vez la caída del tramo reforzado 4-5 y de la pila n. 5 el tramo reforzado golpeó la pila n. 4, agrietando e inclinando la misma.

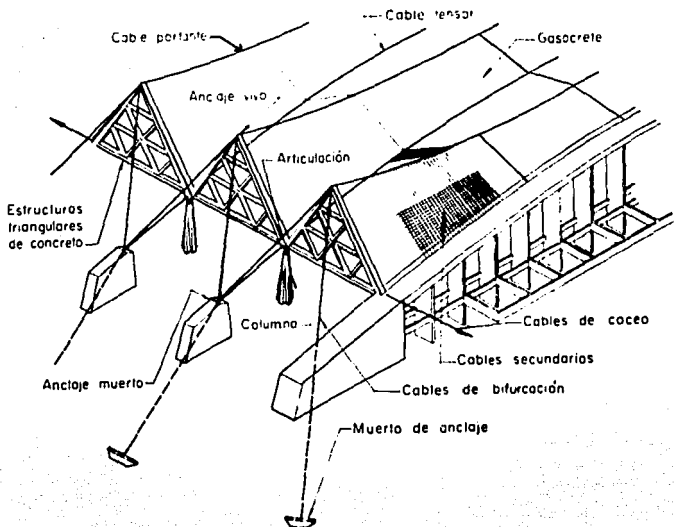
El tipo de falla ocurrida en la estructura fue de carácter frágil, ya que no se presentaron agrietamientos o deformaciones excesivas antes de la falla. El tramo 5-6 se colapsó sin sobre carga alguna, bajo la acción de su propio peso y seguramente pocos días antes de su colapso ese tramo se vió sometido en

algún momento a la acción simultánea de dos camiones de gran peso, uno por carril.

**Descripción del colapso de la cubierta del Auditorio " Benito Juárez " en la ciudad de Guadalajara, Jalisco.**

El 9 de Enero de 1980 a las 7:30 A.M. ocurrió el colapso súbito de la cubierta del Auditorio Benito Juárez ubicado en el área metropolitana de la ciudad de Guadalajara, Jalisco. Se trataba de una cubierta de tipo colgante, de doble curvatura, compuesta por siete naves orientadas en la dirección Norte-Sur. Cada nave estaba soportada por un cable portante del cual se conectaban a cables secundarios a cada 50 cm, mediante abrazaderas. Entre cada dos cables portantes y en su misma dirección existían otros cables que tenían la función de tensar los mantos de la cubierta. El entramado de cables se complementaba con varillas corrugadas, malla electrosoldada y metal desplegado que formaban el alma de la malla metálica de la cubierta; la malla contaba con un recubrimiento de concreto de agregados sin finos, a la cual se le habían agregado aditivos especiales a base de polvo de aluminio y acelerante de fraguado.

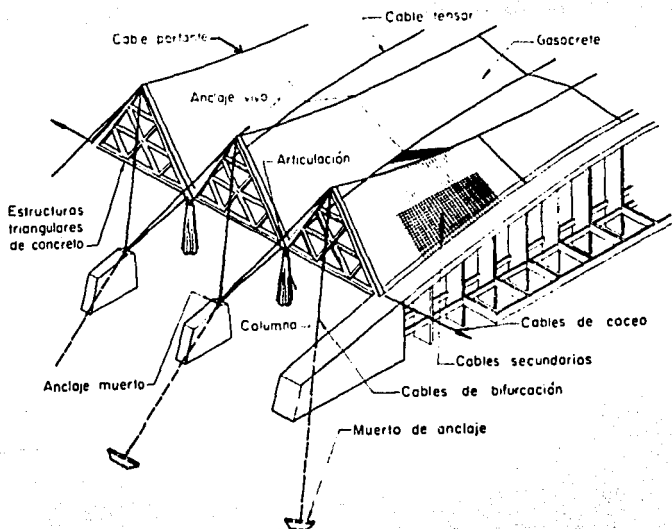
Los siete cables portantes y los siete tensores estaban anclados en estructuras triangulares cuyos vértices superiores estaban a 23.65 m. de altura. En los vértices inferiores se anclaban los cables tensores. Todos los esfuerzos de las estructuras triangulares se transmitían a la cimentación y a muertos de anclaje por medio de columnas de sección cruciforme, torones de acero de presfuerzo y bases de mampostería de concreto armado, los extremos de los cables secundarios se anclaron en unos arcos de concreto en las fachadas oriente y poniente de la estructura, ver figura.



Esta obra fue construída en el año de 1968 con capacidad para 10,000 espectadores y fue reconocida como excepcional por asociaciones profesionales, nacionales, estatales ya que se consideró que el estudio en túnel de viento de su estabilidad dinámica y la elaboración del análisis estructural de la cubierta por computadora fueron pioneros en la Ingeniería Nacional.

El Instituto de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Guadalajara reportó que el estado del tiempo fue normal en el día y hora del





Esta obra fue construída en el año de 1968 con capacidad para 10,000 espectadores y fue reconocida como excepcional por asociaciones profesionales, nacionales, estatales ya que se consideró que el estudio en túnel de viento de su estabilidad dinámica y la elaboración del análisis estructural de la cubierta por computadora fueron pioneros en la Ingeniería Nacional.

El Instituto de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Guadalajara reportó que el estado del tiempo fue normal en el día y hora del

colapso, no habiéndose registrado algún fenómeno sísmico o meteorológico fuera de lo usual.

Durante las investigaciones realizadas por la Comisión Técnica de Obras Públicas del Estado de Jalisco, no se encontraron en el lugar del siniestro rastros de explosivos, huellas de herramienta o equipos propios para demoler en forma intencionada, por lo que se descartó la posibilidad de un sabotaje criminal.

Mediante inspecciones realizadas a partir de marzo de 1978 por personal técnico de Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras públicas, el colapso de la estructura fue previsto, lo que permitió tomar medidas oportunas para evitar pérdida de vidas.

El estudio realizado en la cubierta demostró la existencia de un avanzado estado de corrosión, de carácter progresivo. Se llegó a esta conclusión mediante una medición de los potenciales de corrosión de la cubierta a fin de evaluar sus condiciones reales.

Los potenciales se midieron mediante una semi-pila de cobre-sulfato de cobre construida con base en investigaciones efectuadas por diversas instituciones americanas para el estudio del deterioro de los puentes carreteros.

De acuerdo con esa tecnología, las zonas de concreto en que los potenciales de corrosión, obtenidos con esta semi-pila, indican valores superiores a -350 milivoltios, se encuentran en proceso activo de corrosión, que provoca la acumulación de óxido férrico hidratado en la superficie del acero de

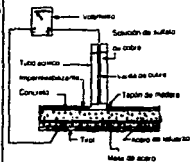
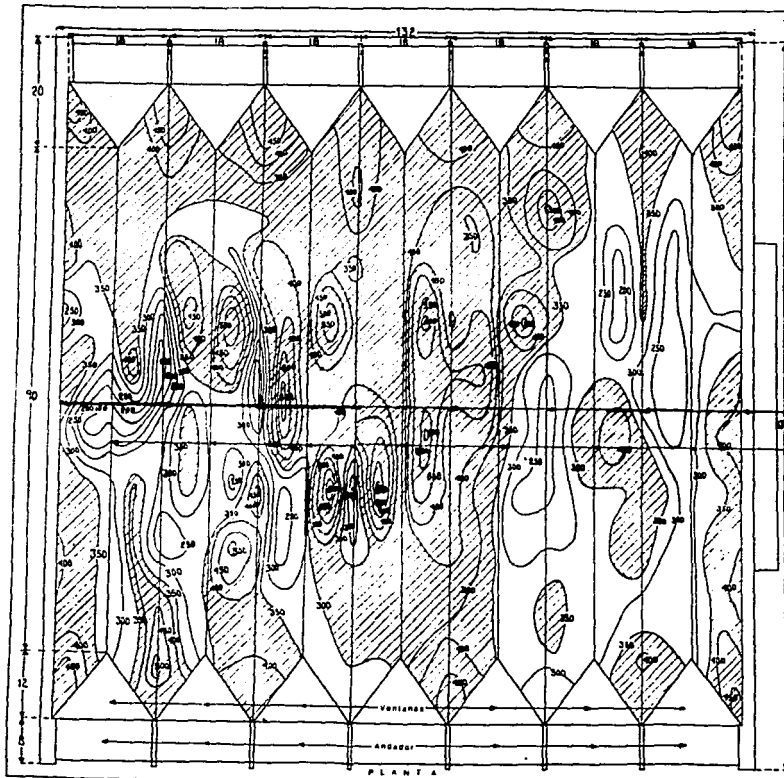
refuerzo que tiene polaridad anódica, como producto del ataque corrosivo del mismo acero.

La medición de los potenciales en la cubierta del Auditorio reportó zonas con corrosión activa en más de las 2/3 partes de su superficie y zonas con corrosión avanzada, superiores a los -500 mil-volts, en aproximadamente el 10% de su área total. ( ver plano adjunto)

Se realizó una nueva medición de potenciales de corrosión en 214 puntos ubicados sobre los cables principales y se encontró que existían puntos en todos los cables tensores (valles de la cubierta) en los que había potenciales superiores a -350 mil-volts. Estos puntos se encontraban en zonas donde se localizaban descargas de aguas pluviales. Se realizó una observación visual en el interior del inmueble, en la que pudo comprobarse que las zonas con potenciales altos correspondían a sitios en que existían huellas de infiltración de agua; el resultado del reporte indicaba que la cubierta estaba deteriorada y su rehabilitación resultaría costosa, laboriosa y de dudosa eficiencia por lo que se recomendaba sustituir la cubierta por otra de mayor durabilidad. La medición de potenciales se efectuó del 26 de Noviembre al 7 de Diciembre de 1979.

Al producirse el colapso se pudo apreciar que la ruptura del primer cable se produjo en la zona en que los potenciales medidos eran más altos y se encontraban más próximos, pero el colapso fue súbito, la ruptura de todos los cables tensores, fue casi simultánea, lo que le dio un carácter explosivo.

# FALLA DE ORIGEN



METODO PARA DETECTAR LA CORROSION

CABLES TENSORES  
CABLES PORTANTES

POTENCIALES DE CORROSION EN MILIVOLTOS

- $\mu V < 300 \mu V$  Zonas que no presentan corrosión
- $300 < \mu V < 400 \mu V$  Corrosión Acelerada

NOTACIONES EN METROS

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y PROBABILIDAD

ESTADÍSTICA Y PROBABILIDAD  
ESTADÍSTICA Y PROBABILIDAD  
ESTADÍSTICA Y PROBABILIDAD

ESTADÍSTICA Y PROBABILIDAD  
ESTADÍSTICA Y PROBABILIDAD

## CONCLUSIONES.

La falla del Auditorio Estatal "Benito Juárez" en la ciudad de Guadalajara constituye un claro ejemplo de colapso estructural por la corrosión del acero para presfuerzo.

Probablemente esa corrosión fue propiciada por la liberación de iones de cloro contenidos en los aditivos que se emplearon con el objeto de aligerar el concreto de la cubierta y acelerar su fraguado

## **PRUEBAS DE VULNERABILIDAD DE EL ACERO DE PRESFUERZO.**

Desde hace mucho tiempo se realizan esfuerzos científicos y tecnológicos para desarrollar un dispositivo que permitan evaluar la vulnerabilidad de los aceros a la corrosión bajo esfuerzo. El mayor problema que se enfrenta es el comportamiento variable de los diferentes aceros en las pruebas por corrosión.

Para lograr un sistema efectivo de pruebas de corrosión bajo esfuerzo son básicos los siguientes requisitos:

- se requiere un medio corrosivo.

- se deben tomar medidas para acelerar el proceso, con el fin de limitar el tiempo de pruebas.

- se deben seleccionar los esfuerzos de tensión con una adecuada relación a las resistencias últimas a la tensión de los aceros que se prueben.

- las condiciones de prueba deben realmente producir en los aceros corrosión bajo esfuerzo.

- deben conocerse con suficiente aproximación los parámetros de prueba con la finalidad de fijar procedimientos de prueba, de modo que diferentes laboratorios obtengan resultados equivalentes.

- los resultados de las pruebas permitirán distinguir entre aceros susceptibles y no susceptibles.

- deben poder se extrapolar los resultados de pruebas aceleradas en laboratorio, con el fin de deducir el comportamiento de acero en condiciones prácticas.

## **METODO PARA PROBAR LA SENSIBILIDAD DE LOS ACEROS A LA CORROSION BAJO ESFUERZO.**

El acero pasa por una celda de prueba que contiene el medio corrosivo. Este medio corrosivo se mantiene a una temperatura constante ya sea por calentamiento directo de la celda o mediante control de temperatura de un circuito del líquido por fuera de la celda.

La carga de tensión se realiza por palancas mecánicas, gatos hidráulicos o neumáticos, que generan una carga constante en la muestra de acero o en su defecto existe un anclaje en dos puntos opuestos a un marco rígido, determinándose un sistema de pruebas con longitud constante.

#### PRUEBA CON THIOCIANATO DE AMONIO COMO MEDIO CORROSIVO.

Esta prueba de corrosión bajo esfuerzo trabaja bajo las siguientes condiciones:

Medio corrosivo	200g de $\text{NH}_4 \text{SNC}$ en 800g de $\text{H}_2\text{O}$ .
Temperatura	$50^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , de ser posible $\pm 0.2^\circ\text{C}$
Celda de prueba	con calentamiento controlado sin recirculación del medio corrosivo, se recomienda que la celda sea de material plástico.
Muestra	carga constante de 80% de la resistencia real última a la tensión.
Resultados	el resultado que se presenta es la duración hasta la ruptura en las condiciones de prueba. Debido a la dispersión de los resultados individuales, se recomienda probar de 3 a 12 muestras para obtener un valor promedio representativo. Si las probetas no se rompen en un período de 500 h termina la prueba.

La mejor manera de evaluar los resultados de un cierto número de pruebas individuales es emplear papel con la escala de la distribución de Gauss y con la escala logarítmica de tiempo en el otro eje, el valor promedio de los resultados puede estimarse como el que corresponde a una probabilidad de ruptura de 50%.

#### Factores que influyen en la prueba con Thiocianato de amonio:

.- temperatura de la solución de la prueba; es el factor que más influye, una disminución de 5°C en la temperatura aumenta la duración a la ruptura en un factor de 2

.- concentración de Thiocianato de amonio; un cambio en la concentración de thiocianato de amonio de 20% a 7.5% produce una elevación de la duración a la ruptura en un factor de 2, si la concentración se mantiene dentro del límite  $20 \pm 1\%$  las desviaciones en la duración serán de  $\pm 3.5\%$ .

.- forma y material de la celda de prueba: deben evitarse las reacciones entre el material de la celda de prueba y el medio corrosivo. Por lo tanto se recomienda el uso de celdas de plástico. La longitud y el diámetro de la celda influyen también en los resultados, dentro de un mismo laboratorio y el tamaño de la celda es despreciable ya que la mayoría de las celdas de prueba tienen dimensiones constantes.

#### Particularidades de las muestras y duración hasta la ruptura.

.- La composición química y la estructura del acero son importantes.



.-La forma de la superficie, si es lisa o corrugada, también influye la influencia de la rugosidad de la superficie ha sido estudiada en muestras precorroídas. Se ha encontrado que la duración hasta la ruptura se reduce notablemente cuando la porosidad producida por la precorrosión tiene una profundidad mayor de 40 micras (una micra es= 0.001mm.)

Los tratamientos en caliente reducen la duración a la ruptura en comparación con procesos de estirado en frío.

Los esfuerzos de compresión en la superficie, causados por el proceso de estirado en frío o por la corrugación de la superficie ocasionan esfuerzos de tensión menores que en el núcleo de el acero, lo anterior ocasiona una mayor duración hasta la ruptura.

Las perforaciones de el acero, o defectos que actuan como perforaciones producen concentraciones de esfuerzos en torno al agujero; por lo tanto, el tiempo de ruptura de las muestras con agujeros se reduce notablemente en comparación con las muestras sin agujeros.

#### Duración hasta la ruptura de diferentes aceros.

Para comparar la susceptibilidad a la corrosión bajo esfuerzo de diferentes aceros, Stolte trató de encontrar una relación entre la resistencia última a la tensión, la carga de prueba y la duración hasta la ruptura. Propone para ello la siguiente fórmula:

$$L = C \cdot 1 / \sigma^3 RM^3 \text{-----}(1)$$

donde:

L= duración hasta la ruptura.

C= constante.

$\sigma$  = esfuerzo de tensión en la prueba.

RM= resistencia última a tensión.

De acuerdo con el procedimiento de prueba de la FIP, la mayor parte de los resultados de pruebas en Thiocianato de amonio corresponden a un esfuerzo de 0.8 veces la resistencia última a tensión introduciendo este valor en la fórmula (1) obtenemos:

$$L = C_1 \cdot 1 / RM^{12} \text{-----}(2)$$

donde  $C_1$ = constante.

Con estas fórmulas (1) y (2) es posible comparar aceros del mismo tipo, pero con diferentes resistencias últimas a tensión.

Si el nivel de esfuerzos al probar el acero A se reduce de 0.8 veces la resistencia última a tensión a 0.6 veces, lo que equivale a una reducción del 25%, la duración hasta la ruptura aumenta en el factor 2.37

$$L_2 / L_1 = [0.8 / 0.6]^3 = 2.37$$

Comparando esta cifra, veamos qué pasa si la resistencia última a tensión del acero se reduce en 25%

El acero B tiene una resistencia última a tensión de 1425 N/mm<sup>2</sup>, en tanto que el acero A tiene de 1900N/mm<sup>2</sup>, lo que da una duración 31.57 veces mayor.

$$L^2 / L^1 = 1900^2 / 1425^2 = 31.57$$

Este resultado explica la enorme influencia de las diferentes resistencias últimas a la ruptura dentro de un mismo tipo de acero, en comparación con la influencia de diferentes niveles de esfuerzo en pruebas de acero con la misma resistencia última.

Siguiendo con el ejemplo veamos que el acero A con resistencia de 1900N/mm<sup>2</sup>, esforzado al 60% de este valor tendrá una tensión de 1140N/mm<sup>2</sup>, el acero B sujeto a el mismo esfuerzo de tensión, alcanzara un nivel de 0.8 veces la resistencia última que es de 1425N/mm<sup>2</sup>. Generalmente los niveles de esfuerzo de 0.8 veces la resistencia última no se usan, en razón de criterios apropiados de seguridad estructural. Sin embargo desde el punto de vista de seguridad contra la corrosión bajo esfuerzo, este orden de ideas resulta interesante. Cargando ambos aceros con el mismo esfuerzo de tensión, se

obtienen duraciones hasta la ruptura muy diferentes en la prueba con Thiocianato de amonio para los aceros A Y B.

$$L_2 / L_1 = 0.6^3 \times 1900^{12} / 0.8^3 \times 1425^{12} = 13.32$$

Esto significa que considerando únicamente el criterio de la corrosión bajo esfuerzo, el acero B, con menor resistencia última, esforzado a 0.8 veces esta resistencia, tendrá una duración hasta la ruptura aproximadamente 13 veces mayor que el acero A, con resistencia última mayor, es forzado a un nivel de sólo 0.6 veces dicha resistencia.

La validez de estas consideraciones teóricas pueden comprobarse analizando los resultados de pruebas con  $\text{NH}_4 \text{SCN}$  disponibles en las publicaciones técnicas; bajo la suposición de un mismo nivel de esfuerzo, el empleo de acero con resistencia última a tensión menor requerirá el uso de más acero para tener la misma carga de prestuerzo, la cantidad de acero necesaria es inversamente proporcional a la resistencia de los aceros que se comparan:

$$K_2 / K_1 = R_{M1} / R_{M2}$$

K= Cantidad de acero

Por otro lado, la duración hasta la ruptura L cambia con la potencia 12 de la relación entre resistencias últimas a tensión:

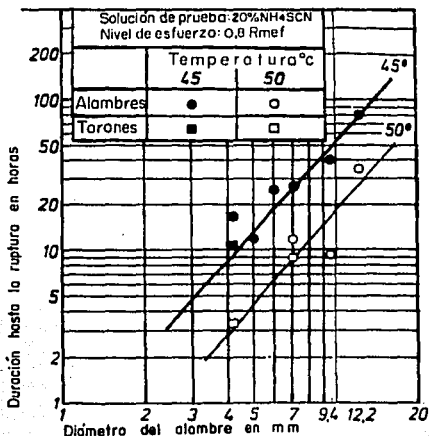
$$L_2 / L_1 = R_{M1}^{12} / R_{M2}^{12}$$

Esta diferencia en duración puede tomarse como un factor de mayor seguridad contra la corrosión bajo esfuerzo. Ahora es fácil calcular que para cada factor 2 de seguridad en el incremento de duración hasta la ruptura en la prueba con Thiocianato de amonio, se necesita 6% más de acero para compensar la disminución en la resistencia última a tensión:

$$K_2 / K_1 = RM_{112} / RM_{212} = L_2 / L_1 = 2$$

$$K_2 / K_1 = 12 \sqrt{2} = 1.059$$

La siguiente cuestión de importancia es la influencia del diámetro de los aceros en duración hasta la ruptura, la figura muestra los valores medios de la duración en la prueba con Thiocianato de amonio en función de el diámetro de los especímenes de acero, ver gráfica.



$$L = C_2 D^2 \text{ ----- (3)}$$

donde D= diámetro.

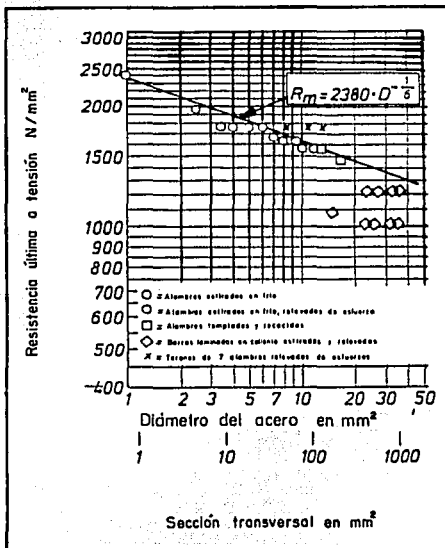
Los aceros con diámetros mayores tienen en general resistencia últimas a tensión menores. es posible hacer una conclusión de la resistencia última a tensión a partir de muestras probadas en las mismas condiciones, combinando la fórmula (2) que da la influencia de la resistencia en la duración, con la fórmula (3) que da la influencia de el diámetro.

$$L = C_1 \frac{1}{RM^{12}} \qquad L = C_2 D^2$$

$$RM = \sqrt[12]{C_1/C_2 \cdot 1/D^2} = C_3 D^{-1/6}$$

A primera vista parece no haber sentido en esta relación, de modo que es deseable comparala con otra; la norma Nacional Austriaca ONORM B 4558 se refiere a un grupo de aceros para presfuerzo con diámetros muy diferentes en el rango de 2.5 a 36mm. La fórmula para la línea punteada es  $RM = 2380 D^{-1/6}$  como puede verse, la pendiente en el sistema logarítmico es  $-1/6$ , misma relación deducida antes, cada sistema de tipos de aceros tiene límites técnicos

en relación con la resistencia última máxima, este límite es importante en el comportamiento en corrosión bajo esfuerzo de estos tipos de aceros, ver gráfica.



## **SISTEMAS DE PROTECCION CONTRA LA CORROSION DEL ACERO DE PRESFUERZO.**

En la actualidad se usan técnicas y materiales diversos para mitigar la corrosión del acero de presfuerzo, pretensado y postensado (adherido y no adherido) así como para los ductos, dispositivos de anclaje y tirantes de puentes. Las técnicas para aumentar la vida útil del acero de presfuerzo pueden dividirse en dos grupos: las que aumentan la durabilidad del concreto y mejoran sus propiedades y las que proporcionan directamente protección contra la corrosión al acero.

En el primer grupo se consideran las siguientes técnicas: aumentar el recubrimiento del concreto, disminuir la relación agua-cemento y limitar los cloruros en las mezclas, mejorar las propiedades del concreto o del mortero con el uso de inhibidores de la corrosión como el nitrato de calcio, de reductores de la permeabilidad como los humos de sílice y proteger la superficie del concreto con selladores o membranas.

El segundo grupo incluye técnicas como los ductos de acero recubiertos con unas capas de epoxi, los ductos de polietileno, los torones de presfuerzo recubiertos de epoxi, los anclajes de cables postensados de igual forma recubiertos, tuberías contraídas por calor para sellar las juntas de los ductos y sistemas de torón único aislados eléctricamente.



## **DUCTOS.**

En los sistemas de acero postensado adherido, el ducto tiene la función de formar un hueco en el concreto para introducir el acero de presfuerzo que habrá de tensarse después de fraguar el concreto. Para cumplir con esta función el ducto debe tener las siguientes características:

1.- Ser impermeable a la penetración de lechada durante la colocación del concreto.

2.- Tener alta resistencia al aplastamiento, al punzonamiento y a cualquier otro daño durante la colocación del ducto o durante la colocación del concreto.

3.- Tener suficiente resistencia a la abrasión y rigidez para impedir que el acero corte o aplaste la pared del ducto durante el tensado.

4.- Ser estable químicamente para evitar reacciones destructivas con el cemento, el mortero o el acero de presfuerzo.

5.- Tener capacidad de adherencia entre el mortero y el concreto circundante.

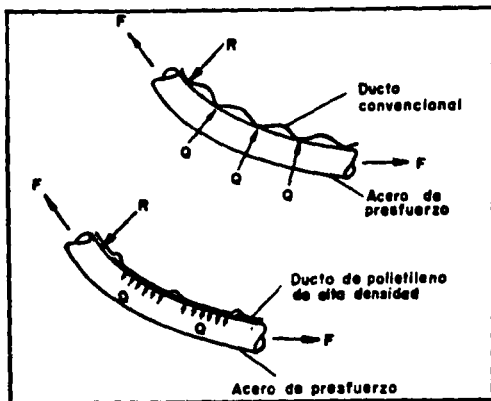
Para tendones postensados adheridos, actualmente se utilizan ductos corrugados de metal ferroso para dar protección contra la corrosión. Las normas en Estados Unidos, establecen que el ducto metálico sea galvanizado mientras que en otros países esto no se permite, ya que la experiencia ha demostrado

que el revestimiento de cinc polariza al acero de presfuerzo durante el endurecimiento del mortero de cemento, de manera catódica. Podría entonces generarse hidrógeno que pusiera en peligro a los aceros de presfuerzo que son susceptibles a la fragilización por hidrógeno. Con el objeto de aumentar la protección a la corrosión del acero de postensado en ambientes hostiles, se han desarrollado ductos metálicos recubiertos de epoxi y ductos de polietileno corrugados en espiral.

El epoxi aplicado electrostáticamente es adecuado sólo para aceros descubiertos no para aceros galvanizados. Generalmente sólo los ductos rígidos se recubren con epoxi ya que esto no es posible en ductos flexibles. El uso de ductos plásticos es motivo de preocupación creciente ya que existen dudas respecto a la capacidad de este tipo de ductos para transmitir esfuerzos al concreto por adherencia. Se han introducido al mercado ductos de polietileno corrugados con espiral y ductos corrugados con aros, pero hay dudas sobre el uso de ellos porque se puede producir aire atrapado en las corrugaciones durante la inyección de mortero, quedando huecos.

En investigaciones recientes hechas por el Instituto Federal de Tecnología en Zurich, Suiza, sobre la fatiga de vigas de concreto postensadas, se encontró que al usar ductos de acero corrugado convencionales se desarrollan zonas de fricción entre las corrugaciones del ducto y el acero de presfuerzo, surgiendo la posibilidad de corrosión por abrasión. Para prevenir lo anterior se ha desarrollado un ducto de polietileno con un nuevo perfil de corrugación. En las zonas de curvatura del tendón las corrugaciones convencionales pueden desarrollar altas concentraciones de esfuerzos; el perfil

recientemente desarrollado, distribuye el material del ducto para producir una distribución más uniforme, ver figura.



Una duda adicional referente al uso de ductos de polietileno es sobre la resistencia a la abrasión del material. El objetivo que se busca al emplear ductos de polietileno en sustitución de ductos metálicos es prevenir la penetración de cloruros y humedad hasta el acero de presfuerzo pero si el ducto se abrasiona y se forma un agujero durante el ensartado o el tensado del acero este objetivo no se cumple, por eso un aspecto fundamental de los ductos de polietileno es el grosor de su pared.

## JUNTAS DE LOS DUCTOS.

Hay dos tipos de juntas de ductos: Las de cinta estándar para ductos y el tubo contraído por calor. En una investigación hecha recientemente en los

Estados Unidos se revela la superioridad de los tubos contraídos por calor sobre la cinta para ductos. La aplicación del tubo contraído por calor es de la siguiente manera: se calienta el tubo, éste se contrae y el sellante interno adhesivo y termoplástico se funde y fluye formando un sello contra la humedad.

Se hicieron por otra parte pruebas en obra en un puente en construcción para verificar si es conveniente el uso de materiales de contracción al calor para sellar juntas de ductos de postensado, la prueba fue realizada con dos productos; manguitos y cinta envolvente y se usaron dos métodos para aplicar calor: una antorcha de propano y una pistola de calor. El fabricante recomendó el uso de la antorcha. Los manguitos mostraron una ventaja notable sobre la cinta envolvente y proporcionaron un sello hermético positivo sobre los ductos redondos. El sello con manguito resultó menos efectivo al aplicarse en acopladores de ductos planos y es posible que falle el sello totalmente en el acoplamiento con las trompetas de polietileno, lo anterior es debido a que el material es más delgado en el cople. La junta hecha con la cinta envolvente convencional de ductos resultó ser más eficiente. Estas pruebas fueron realizadas en condiciones ideales de temperatura y medio ambiente, claro que estas condiciones no se dan en el sitio de la obra, pero queda a criterio del operario; un sellado positivo en un ducto redondo no se logrará en el 100% de los casos y no puede ser verificado por los supervisores de obra.

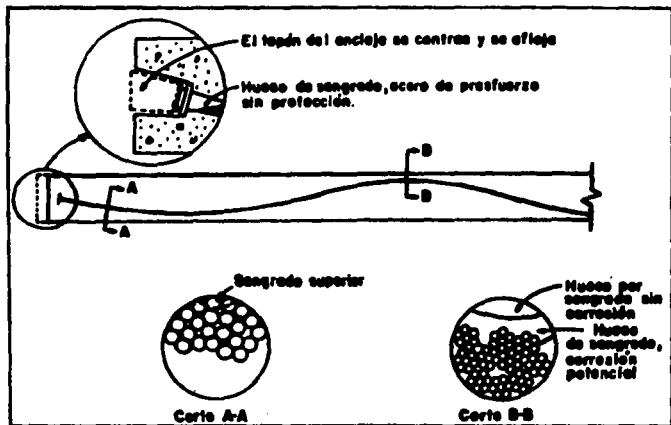
A pesar de que las juntas que se contraen con calor reportaron buenos resultados en las pruebas de laboratorio, debe hacerse una investigación más a fondo para su aplicación en condiciones reales de construcción.

## **MORTERO DE CEMENTO.**

La inyección de mortero de cemento es el método más utilizado y uno de los más confiables para proteger de la corrosión a los aceros de postensado en ambientes agresivos y ambientes moderados. Los puntos básicos que debe cumplir el mortero en los elementos postensados son: Inhibir la corrosión envolviendo el acero en un medio alcalino y tener la capacidad para transmitir esfuerzos de adherencia entre el acero y el ducto que lo envuelve. Un mortero eficiente debe tener las siguientes propiedades:

- 1.-Baja permeabilidad y alta resistividad.
- 2.-Adecuada fluidez que permita el bombeo y el relleno del hueco del ducto.
- 3.-Contracción mínima o nula en el estado plástico o endurecido y no tener contracción después de la hidratación del cemento.
- 4.-Poca o ninguna segregación.

El problema en los tendones postensados inyectados con mortero de cemento radica en las técnicas inadecuadas de inyección que pueden producir burbujas de aire en varios sitios a lo largo del tendón; estos huecos permiten la entrada de aire cargado de contaminantes y humedad produciéndose la corrosión, ver figura.



Quando el inyectado es incorrecto y existe agua atrapada es posible hacer un reinyectado. Este debe realizarse no menos de 10 minutos y no más de 20 minutos después del inyectado, dependiendo del tiempo de fraguado y de la temperatura ambiente. El reinyectado para desplazar agua atrapada puede realizarse utilizando una entrada y una salida cerca de los sitios donde hay acumulación de agua de sangrado, estos sitios pueden ser los anclajes, los coples, los puntos altos de los tendones en curva vertical y en los anclajes superiores de tendones verticales. En el caso de tendones que consistan en torones, puede aplicarse el inyectado a presión. Al rellenarse el ducto completamente debe continuarse el inyectado aumentando gradualmente la presión hasta un máximo que no rebase  $10 \text{ kg./cm}^2$ . Los anclajes deben sellarse de tal forma que los extremos de los torones sobresalgan del anclaje proporcionando un conducto de drenaje en los intersticios entre los alambre individuales del torón. Cuando el mortero dentro de los ductos haya tenido su fraguado inicial o permanente y los procedimientos de control indiquen que se

han formado bolsas de agua o vacíos de aire, se realizará un segundo inyectado; tales vacíos deben rellenarse con mortero fresco recién hecho; si llegara a haber huecos demasiado grandes se recomienda una inyección al vacío.

### **MORTERO DE CEMENTO CON POLIMEROS.**

En Japón se obtenido y empleado un mortero de cemento con polímeros resistente a las grietas bajo la carga de diseño. El método de inyección es el mismo que se utiliza para el mortero normal de cemento. El mortero con polímeros tiene la ventaja de ser 20 veces más dúctil al alargamiento que el mortero normal de cemento y no requiere técnicas o equipos especiales para la inyección, la desventaja es que es costoso y su viscosidad y endurecimiento dependen de la temperatura.

### **POLIURETANO POLIBUTADIENO.**

También en Japón se ha utilizado un poliuretano para fabricar un mortero sin grietas. Este material se forma por dos componentes: poliuretano y polibutadieno polial y un endurecedor de isocianato. Se mezclan los dos líquidos en revolvedora o se bombean con mangueras separadas a una velocidad que produzca las proporciones especificadas de mezclado; posteriormente se vierte en la abertura de entrada el mortero, el que penetra fácilmente en los pequeños huecos entre los alambre debido a su baja viscosidad. Cuando endurece es muy flexible y tiene un alargamiento último muy alto. El peso específico es la mitad del que tiene el mortero; no se usa agua durante el proceso de inyección, por lo tanto no hay lugar a la corrosión. Las

desventajas son que es una técnica costosa tanto por su aplicación como por el costo del material; que es delicado de manejar y muy inflamable.

## **CERA DE PETROLEO.**

Otra alternativa al mortero de cemento es la cera de petróleo enriquecida con aditivos inhibidores de la corrosión. La cera es un material homogéneo con una estructura de microcristales, es estable con el tiempo y fácilmente inyectable, no se agrieta ni se corta su viscosidad a la temperatura ambiente, cuenta con alta resistencia adhesiva y su repelencia al agua la convierte en una pantalla eficaz que limita el riesgo de corrosión. La cera tiene una densidad menor que el mortero de cemento, de aproximadamente 0.90; a la temperatura de 80°C la cera tiene un estado totalmente líquido y por esto requiere poca presión de inyección para su aplicación, lo que permite un relleno excelente del espacio entre los alambres.

Sin embargo, investigaciones realizadas en el puente sobre el río Kemijoki en el círculo ártico en Rovaniemi, Finlandia, han revelado resultados sorprendentes. Esta investigación indica que los materiales inyectados análogos a la cera no son apropiados porque tienen un punto de fusión entre 60°C y 85°C y al solidificarse no lo hacen uniformemente. Se contraen, es decir se enfría primero la superficie y el interior después, esto crea esfuerzos internos, esfuerzos de adherencia provocando grietas y cavidades y se pierde el objetivo que es proteger al acero contra la corrosión. Pero está en estudio un material suave que se inyecta en frío, que también se contrae, pero es capaz de permanecer adherido a las superficies circundantes, sellar las cavidades que se puedan formar. Es una sustancia tixotrópica que tiene una viscosidad constante



para un amplio rango de temperaturas y puede bombearse hasta temperaturas muy bajas como  $-18^{\circ}\text{C}$ . Esto nos indica que el uso de ceras debe evaluarse cuidadosamente antes de decidir su empleo.

## **SISTEMA DE TORONES ENVUELTOS.**

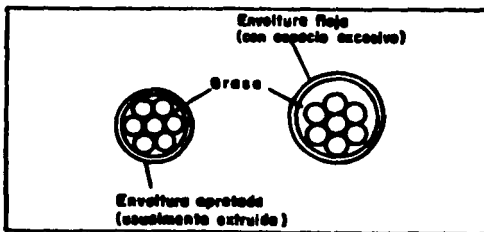
Este sistema de protección contra la corrosión se basa en el uso de torones no adheridos, engrasados y envueltos individualmente, como el llamado tendón mono-torón. El término "engrasados" se utiliza para denominar en forma general a materiales como la cera, grasa, resina epóxica o cualquier otro material que recubra un acero. La protección para evitar la corrosión de tendones no adheridos se basa en impedir que la humedad y las sustancias corrosivas lleguen al acero de presfuerzo. La envoltura no debe permitir escurrimientos hacia su interior. Se han utilizado varios materiales para envoltura, hasta ahora los plásticos parecen ser los más adecuados; el material de envoltura debe tener las siguientes características:

- 1.- No reaccionar con el concreto, el acero de presfuerzo y el revestimiento.
- 2.- Ser impermeable en toda la longitud de la envoltura.
- 3.- Ser durable, tener resistencia a daños por abrasión durante la fabricación, transporte, instalación, colocación del concreto y tensado.
- 4.- Tener estabilidad química, sin fragilización ni ablandamiento en todo el rango previsto de temperaturas y durante la vida de servicio de la estructura.

5.- Tener resistencia al envejecimiento por la acción de la luz ultravioleta.

6.- Tener resistencia suficiente para proteger las grietas finas que pudieran ocurrir en el concreto.

Se sugiere el uso de polietileno o polipropileno de alta densidad para envoltura, ambos materiales son tenaces, durables y no reactivos. La envoltura consiste en un tubo de plástico con costura longitudinal que se sella con calor. Cuando se utiliza este tipo de envoltura hay que verificar que las costuras no estén reventadas ya que después de tensar el tendón es muy difícil detectar fallas en las envolturas, para evitar esto es recomendable utilizar envoltura sin costura tipo funda. El método más satisfactorio es utilizando la extrusión de plástico sobre el tendón revestido, ya que es una envoltura continua sin costura, hermética al agua y de espesor uniforme. El espesor de la envoltura de polipropileno para ambientes corrosivos debe ser como mínimo 1mm, el diámetro interior de la envoltura debe ser 0.25mm mayor que el diámetro máximo del torón, para permitir el movimiento longitudinal libre del tendón, ya que las envolturas flojas tienen un espacio excesivo y permiten el ingreso del agua desde el momento de fabricación hasta el de instalación, así como durante la vida de servicio, ver figura.



Existen materiales de protección que actúan en conjunto con sistemas de torones envueltos, éstos deben asegurar la protección del acero de presfuerzo durante toda la vida de la estructura. Estos materiales son: grasas, mastiques bituminosos o ceras, las que deben tener las siguientes propiedades.

1.- Dar protección al acero de presfuerzo y ser una barrera contra la humedad y el aire

2.- Ser químicamente estables y no reactivas con el acero de presfuerzo, el material de envoltura y el concreto.

3.-Proporcionar lubricación entre el acero de presfuerzo y la envoltura.

4.- Adherirse y ser continuas sobre toda la longitud del tendón, rellenar completamente la envoltura, sin dejar bolsas de aire.

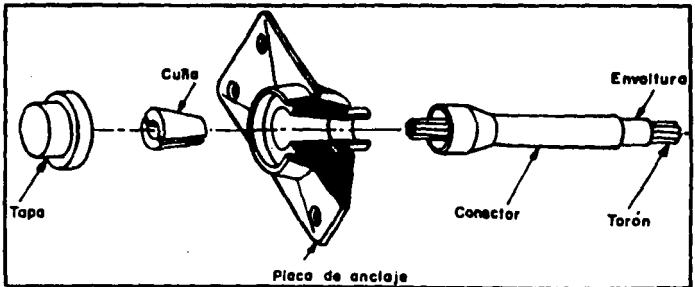
5.- Permanecer dúctiles, sin grietas y no fragilizarse.

## **TENDON MONO - TORON.**

En los Estados Unidos se ha patentado la idea de un tendón mono-torón aislado eléctricamente, el cual se encuentra disponible con varios proveedores. El sistema proporciona un aislamiento eléctrico completo impidiendo las corrientes eléctricas que deben estar presentes en el proceso de corrosión y evita que la humedad o los iones de cloro penetren en el acero. El sistema mono-torón consiste en un sistema de torón envuelto con doble protección contra la corrosión, la diferencia con los sistemas de torones convencionales es

la siguiente: se aplica una camisa de polietileno a cada uno de los siete alambres de cada torón de 1.5cm de diámetro. Durante la aplicación del material inhibidor de la corrosión el torón de siete alambres se somete a una operación de destrenzado y revestimiento en la cual se cubre la superficie completa de cada alambre, después se vuelve a trenzar como se encontraba originalmente y se encamisa el torón con polietileno, posteriormente se aplica una cera a base de petróleo suave que se puede aplicar a temperatura ambiente, que desplaza cualquier humedad que existiera en la superficie la que tiene un punto de fusión de 260°C y proporciona una protección contra la corrosión.

Hay preocupación sobre los efectos del destrenzado y vuelta a trenzar sobre las características de carga-alargamiento de los alambres ya que puede ocurrir el deslizamiento del alambre central respecto a los seis alambres helicoidales exteriores, pero las pruebas indican que para la carga de 1% de alargamiento la resistencia a la ruptura y el módulo de elasticidad parece que no cambian respecto a los torones convencionales de acero de presfuerzo sin aplicación alguna.



El sistema mono-torón con grasa y envoltura se ha usado en la construcción de estacionamientos y de losas planas y se ha adaptado para aplicarlo en cables de tirantes de puentes, el tirante consiste en un paquete de torones paralelos no adheridos, de 1.5cm de diámetro que se engrasan y se envuelven individualmente, después se rodean con un tubo de polietileno de alta densidad y se inyectan con mortero; esta tecnología podría extenderse a los tendones postensados de torones múltiples.

### **RECUBRIMIENTO DIRECTO DEL ACERO DE PRESFUERZO.**

A través de investigaciones sobre materiales y técnicas para la protección contra la corrosión, se ha considerado la posibilidad de aplicar directamente al acero de presfuerzo un recubrimiento directo, que debe tener compatibilidad de deformación para soportar sin agrietarse los alargamientos del acero de presfuerzo durante el tensado.

### **RECUBRIMIENTO DE CINC.**

El cinc es un material de recubrimiento para fierro y acero, es relativamente barato e idóneo para poderse utilizar como recubrimiento de aceros de presfuerzo, posee la ventaja de que no se daña durante el transporte, manejo e instalación, sin embargo, es un recubrimiento de sacrificio que se consume con el tiempo en un ambiente corrosivo. Al galvanizarse el acero se afectan las propiedades mecánicas del acero de presfuerzo, la resistencia última se reduce y el alargamiento último y la relajación a lo largo plazo se incrementan, la resistencia a la fatiga puede llegar a reducirse hasta 20% y se puede afectar la ductilidad. El recubrimiento de cinc puede reaccionar con

algunos cementos, liberando gas hidrógeno y por ende la pérdida de adherencia por aumento de porosidad en la interfase del acero.

## **ANCLAJES Y TORONES REVESTIDOS CON EPOXI.**

Ultimamente se realizan investigaciones sobre el uso de epoxi para recubrimientos de torones de presfuerzo. Se propone un plan de producción de torones recubiertos de todos tamaños, desde 0.95 hasta 1.5cm de diámetro. El espesor de recubrimiento sobre las coronas de los alambres exteriores es de 0.76 más o menos 0.13mm, no hay recubrimiento sobre el alambre central, tampoco lo hay sobre las caras interiores, sin embargo, no hay problema porque el recubrimiento es permanente, siempre y cuando el extremo del torón esté perfectamente sellado para impedir que la humedad y los agentes corrosivos penetren y se desplacen a lo largo del torón por acción capilar. Hay dos tipos de torones recubiertos con epoxi: los de recubrimiento liso y los de adherencia controlada. Los de recubrimiento liso se caracterizan por tener poca adherencia y se sugiere utilizarlos con anclajes externos como tendones no adheridos; los de adherencia controlada tienen características semejantes a los anteriores, excepto que tienen partículas de arenisca embebidas en la superficie de epoxi para proporcionar adherencia con el concreto. El producto pasó satisfactoriamente las pruebas de impermeabilidad a los iones de cloro, norma (EHWA-RD-74-18) resistencia al impacto (ASTM G14), resistencia a un potencial eléctrico aplicado norma (ASTMG8), rociado con sal, norma (ASTM B117) sin indicios visibles de corrosión después de 3000 horas, abrasión con arena (ASTM D968) desadherencia catódica (ASTMG8) y resistencia química (ASTM G20).

Sin embargo el producto no debe emplearse en obras de concreto pretensado o postensado adherido en los que se requiera protección contra el fuego, ya que puede ocurrir deslizamiento por falta de adherencia, en el rango de temperatura de 65°C a 93°C. El producto podrá usarse en una estructura de postensado no adherido en donde la pérdida de adherencia no ponga en peligro al elemento. La técnica de recubrimiento con epoxi ha ganado popularidad también para la protección contra la corrosión de los dispositivos de anclaje de cables postensados, anclajes simples y de torones múltiples; se emplea ahora en la construcción y rehabilitación de algunas estructuras de puentes y en estacionamientos.

## **CERAMICA.**

La tecnología desarrollada en la industria automotriz para los cables de frenos de estacionamiento puede ser una alternativa para aplicarse a los tendones de pretensado. El cable de frenos sufre un agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo por la acción combinada del esfuerzo de tensión y del ambiente corrosivo. Los requisitos actuales para automóviles requieren que la vida de un componente en condiciones extremadamente agresivas sea de 160 000 Km, los mecanismos típicos de falla se deben a la corrosión por fisuras, la corrosión electrolítica (los cables de frenos generalmente se usan para sujetar los ejes traseros) y al efecto de bacterias reductoras de sulfatos, presentes en el suelo que salpica los cables. Una solución para el control de la corrosión es el uso una camisa de poliéster termoplástico mejorado en combinación con un nuevo tipo de material cerámico de sub-recubrimiento que se basa en la tecnología de los

silicatos y que aísla el alambre del medio ambiente y protege contra una posible penetración de agua cargada de cloro

El procedimiento de aplicación es el siguiente: el alambre individual es galvanizado con una mezcla de base orgánica de silicato-cinc alquil; un aplicador colocado frente al aplicador de cierre proporciona el recubrimiento completo de cada alambre. El solvente orgánico del recubrimiento se evapora y el silicato-ester alquil se hidrolizará y polimerizará al exponerse al medio ambiente para formar una película de silicato inorgánico sobre el alambre, después de que la película formada se cura, el cable del torón de 19 alambres se vuelve a recubrir con un políester extruido o con otra camisa de plástico adecuada. este nuevo sistema patentado de protección a la corrosión, resiste según el fabricante, el agrietamiento y la falla durante un período de tiempo correspondiente a 160 000km en la vida del automóvil.

La resistencia a la corrosión fue probada conforme la ASTM B17 "rociado con sal" el nivel de protección pudo extenderse a 2000 hrs. en la prueba, equivalentes a 15 - 20 años de vida del automóvil.

Se está investigando la adaptación de recubrimientos de cerámica a tirantes de puentes ya que hay una analogía entre éstos y los cables de frenos de los automóviles, al estar expuestos a las mismas condiciones ambientales, a los iones de cloro, lluvia ácida y otros ataques químicos. Es posible lograr adaptar esta técnica a los tirantes para puentes, los futuros recubrimientos comerciales para presforzado incluirán un revestimiento de cerámica al rededor de cada alambre y una camisa adicional de polímero para proteger a la cerámica durante el transporte y la instalación la camisa de polímero estará diseñada de



tal forma que se disuelva en el concreto sin curar permitiendo el contacto directo entre concreto curado y recubrimiento de cerámica.

## **TENDONES NO METALICOS.**

En la última década se ha hecho un esfuerzo importante de investigación en Alemania y Japón sobre la factibilidad de utilizar tendones de fibra en plástico reforzado en estructuras de concreto presforzado. Se han construido, algunos puentes prototipo de concreto presforzado empleando fibras de plástico reforzado cuyo comportamiento estructural y durabilidad están continuamente monitoreados.

La ventaja de estos materiales de fibra de plástico reforzado es que poseen una excelente resistencia a la corrosión pero antes de que estos materiales puedan producirse a gran escala, habrá que investigar mucho más y justificar el costo tan alto de su utilización.

# CAPITULO VI

## CONCLUSIONES

## **CAPITULO VI CONCLUSIONES.**

1.- La corrosión es un fenómeno de naturaleza electroquímica que tiende a destruir los materiales artificiales que se emplean en la industria y en la construcción. Esta destrucción genera grandes pérdidas económicas que en los países desarrollados varían entre el 2 y el 4% del producto interno bruto y potencialmente puede ocasionar pérdidas cuantiosas de vidas y lesiones graves a seres humanos.

2.- La situación anterior justifica que en los países desarrollados se destinen recursos cada vez mayores para la investigación del proceso corrosivo y para el desarrollo de técnicas de monitoreo, prevención y rehabilitación. En México existen ya institutos de investigación sobre corrosión, sin embargo, los recursos con que estas instituciones cuentan son todavía insuficientes para la importancia económica y social del impacto corrosivo.

3.- A medida que se construyen obras mayores y que se incrementan los problemas de tipo ambiental, aumentan los daños por corrosión en las obras de ingeniería civil. Los costosos colapsos de estructuras importantes en México y en otros países, son un aviso para que los ingenieros civiles se preocupen de adquirir un mayor conocimiento sobre este fenómeno.

4.- En el pasado, la educación de los ingenieros civiles enfatizaba los aspectos de seguridad estructural de las edificaciones. Aún cuando todavía se tienen incertidumbres sobre este tema, no puede negarse que se han tenido grandes avances en el conocimiento del comportamiento estructural y en el aseguramiento de la resistencia de las obras. Sin embargo, actualmente, ante una situación generalizada de deterioro de la infraestructura en todos los países del mundo, el énfasis de la ingeniería civil está cambiando hacia la durabilidad de las obras.

5.- Dentro de la durabilidad uno de los aspectos más importantes es el referente a la corrosión, por lo que éste debería ser materia de estudio en los planes curriculares de Ingeniería civil. Los estudiantes deberían conocer las técnicas disponibles de monitoreo, prevención y rehabilitación y como para la correcta aplicación de estas técnicas es necesario comprender los principios básicos de la corrosión, se estima que es indispensable que la Química sea una materia integrante de la carrera de ingeniería civil en los semestres formativos.

6.- La tendencia actual de la investigación sobre la corrosión en estructuras es la de desarrollar fundamentalmente técnicas de prevención del fenómeno. Como uno de los aspectos más promisorios para esa prevención, puede mencionarse el desarrollo de nuevos materiales. Aún cuando esos nuevos materiales más durables pudieran ser más costosos inicialmente que los materiales tradicionales, su empleo queda ampliamente justificado porque abaten los costos de conservación, alargan la vida de servicio y reducen los riesgos de colapso.

7.- Entre los nuevos materiales, desde el punto de vista de los concretos pueden señalarse los concretos de alto comportamiento que aparte de poseer una alta resistencia a la compresión tienen menor permeabilidad y mayor durabilidad. Estos concretos se obtienen empleando aditivos superfluidizantes que permiten reducir la relación Agua/Cemento y en consecuencia incrementar la resistencia. También se obtienen estos concretos con la adición de los humos de sílice que son un subproducto de la fundición de los metales ferrosilicosos. Las partículas finas del sílice sellan los huecos entre los agregados y el cemento, aumentando la resistencia y la durabilidad.

Los concretos modificados con polímeros son aquellos en que se agregan polímeros durante la mezcla de los componentes del concreto o en los que se incluye el polímero por impregnación del concreto endurecido. A estos concretos se

les llama polimerizados y difieren del concreto polimérico en que el polímero sustituye completamente al cemento durante la mezcla. Estos concretos incrementan la durabilidad y la resistencia considerablemente, pero su aplicación ha sido limitada por su alto costo.

Los concretos con fibras aumentan su resistencia a la tensión por lo que se reduce el agrietamiento, se aumenta la protección a la corrosión y la resistencia a la abrasión. Las fibras incrementan la ductilidad del elemento mejorando su comportamiento ante sismos. En algunos casos las fibras permiten la reducción del refuerzo transversal en vigas ( estribos). Las fibras pueden ser metálicas, de vidrio, de polipropileno y de carbón. Además las fibras tienen diferentes formas (rectas, retorcidas, etc.), La incorporación de fibras se lleva a cabo durante la mezcla de los elementos del concreto.

8.- También se está investigando la posibilidad de substituir el acero por materiales de refuerzo de naturaleza inerte, que no se corroan. Entre esos materiales pueden señalarse los cables de plástico reforzado con fibras de carbón. En Canadá se construyó recientemente un puente de 40 m de claro con vigas pretensadas. En la mitad de las vigas se utilizaron torones de acero de presfuerzo tradicional y en la otra mitad, cables de plástico reforzado con fibras de carbón. Se ha instrumentado todo el puente para observar su comportamiento a largo plazo y comparar las vigas tradicionales con las que tienen el nuevo tipo de cables.

9.- Está todavía lejano el empleo de materiales distintos al acero en estructuras presforzadas, porque aún quedan muchas cosas que investigar sobre su comportamiento a largo plazo y porque sus costos todavía son muy altos. Sin embargo, ya se están aplicando modificaciones al acero tradicional que permiten incrementar la durabilidad a costos razonables. Entre ellas pueden señalarse el empleo de aceros galvanizados que requieren un manejo muy cuidadoso durante

la construcción, ya que una pequeña desconchadura de la protección galvanizada puede desencadenar el proceso corrosivo.

También se están utilizando con mayor éxito elementos de acero recubiertos con una capa de resina epóxica. Estos se han aplicado exitosamente como refuerzo en muelles de concreto y en otras obras marítimas sujetas al ataque corrosivo del agua salada. Aún cuando el acero en sí se encarece considerablemente a causa de la protección epóxica, se ha demostrado que el sobrecosto de toda la construcción es solamente del orden de 10%, el cual queda ampliamente justificado al incrementarse la duración de las obras.

10.- Es indudable que se requieren esfuerzos mayores para la investigación del impacto corrosivo en las obras de ingeniería civil y para el desarrollo de técnicas de prevención y rehabilitación por lo que, tanto el Estado como las empresas privadas de construcción, deben alentar y apoyar los esfuerzos en ese sentido. Sin embargo, los adelantos que se obtengan mediante esos esfuerzos serán vanos si los ingenieros civiles no se preocupan de aplicarlos correctamente en las obras a su cargo. Generalmente los avances de la investigación tecnológica se plasman en las normas y especificaciones de construcción. El ingeniero debe conocer los fundamentos del fenómeno corrosivo a fin de comprender la razón de las especificaciones y normas que hay que aplicar en la construcción para prevenir esos efectos nocivos o para rehabilitar estructuras ya dañadas. Debe además vigilar cuidadosamente que los operarios a sus ordenes apliquen efectivamente las recomendaciones pertinentes, no con medidas coercitivas sino explicándoles de manera sencilla la razón de ser de los cuidados que se apliquen. Sólo así se logrará el objetivo final de aumentar la calidad y la durabilidad de las obras.

## **BIBLIOGRAFIA.**

.-Avila J. y J. Genescá, "Más allá de la herrumbre". FCE-SEP-CONACYT, México. 1986, 110 pp (Colección La ciencia desde México núm. 9)

.-Avila J. y J. Genescá, "Más allá de la herrumbre II "La lucha contra la corrosión" FCE-SEP-CONACYT, México, 1991, 156 pp (Colección La Ciencia desde México núm. 79).

.-Galindo Solórzano, Amílcar, "Reporte sobre el colapso del tramo prestrozado del puente Papagayo", Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura, México, 1985.

.-Gutiérrez Ducons, Juan, "Química Superior Inorgánica", Cultural, S.A. de Ediciones, Barcelona, España, 1982, 237 pp.

.-Hampejs Siegmund, "Corrosión Bajo Esfuerzo de Aceros de Prestuerzo, Pruebas en  $\text{NH}_4 \text{ SCN}$ ", Boletín del Centro de Documentación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura, México, 1989. 40 pp. Traducido de un artículo publicado por la empresa Austria Draht.

.-Hernández Duque, G, "Técnicas de Monitoreo de la Corrosión en el Concreto". Florida Atlantic University, Center for Marine Materials, Boca Ratón, Fla. E.U.A.

.-King Revelo, Carlos, "Reporte sobre el colapso de la Cubierta del Auditorio "Benito Juárez" en la ciudad de Guadalajara, Jalisco. Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, México, 1980.

.-Mena Ferrer, Manuel, " La corrosión del Acero de Refuerzo como causa del deterioro prematuro de las estructuras de concreto" , ANALISEC, Décima Reunión de Laboratorios de Materiales de Construcción, Cancún, Q.R. México, 1994, 33 a 67 pp.

.- Petróleos Mexicanos. Curso Internacional. Ingeniería de Corrosión, México.

.-Podolny, Walter Jr. " Corrosión de Aceros para Presfuerzo y su Mitigación ", Boletín del Centro de Documentación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura, México, 1994, 43 pp. Traducción de un artículo publicado originalmente por la PCI Journal, sep-oct, 1992